



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
Факултет за френско обучение по електроинженерство
Катедра Електрически машини

Маг. инж. Борис Тодоров Демирков

**УПРАВЛЕНИЕ НА МОЩНОСТТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ
ГЕНЕРАТОРИ ВЪВ ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 "Електротехника, електроника и
автоматика"

Научна специалност: „Електрически машини“

Научни ръководители: Проф. д-р Владимир Лазаров
Доц. д-р Захари Зарков

Рецензенти:

Проф. д-тн инж. Илиана Маринова

Проф. д-р инж. Иван Евстатиєв

СОФИЯ, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Научен съвет на Училището за докторанти, Факултет за френско обучение по електроинженерство при Технически университет – София на редовно заседание, проведено на 20.02.2020г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.06.2020 г. от 15,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ 5.2-38 / 21.02.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-тн инж. Илиана Йорданова Маринова – председател
2. Доц. д-р инж. Захари Живков Зарков – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев
4. Доц. д-р инж. Бохос Рупен Апрахамян
5. Доц. д-р инж. Майк Юрген Щреблау

Рецензенти:

1. Проф. д-тн инж. Илиана Йорданова Маринова
2. Проф. д-р инж. Иван Борисов Евстатиев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултета за френско обучение по електроинженерство при Технически университет – София.

Дисертантът е редовен докторант в училището за докторанти към ФФОЕ. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Борис Демирков

Заглавие: УПРАВЛЕНИЕ НА МОЩНОСТТА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ
ГЕНЕРАТОРИ ВЪВ ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София
2020

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Темата на дисертационния труд е актуална, тъй като е свързана с проблеми, засягащи изследването на системи за получаване и преобразуване на електрическа енергия от възобновяеми източници. Заради намаляващото количество на изкопаемите горива и увеличаването на вредите, нанесени от тях, възобновяемите източници на енергия представляват обект на засилен интерес. Енергията на вятъра постепенно се отличава като водеща сред другите възобновяеми източници и дори конкурентна на конвенционалните. Системите, използващи ВЕИ са актуални и поради тази причина са обект на непрекъснати разработки и нововъведения. Моделирането и изследването на такива системи е сериозно предизвикателство, защото е необходимо да се решават задачи от различни аспекти – аеродинамични, механични, електрически. Освен това тези елементи се нуждаят от адекватни системи за управление, за да могат да осигурят максималното извличане от енергията на вятъра.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Направените изводи от аналитичния обзор са използвани за формулиране на основната цел и задачите на дисертационния труд.

Целта е разработване на цялостна система за управление на мощността на ветроенергийна преобразувателна система, използваща директно куплиран, многополюсен синхронен генератор с постоянни магнити, свързан към мрежата, чрез силов електронен преобразувател за пълната мощност.

Целта предполага решаването на следните задачи в дисертацията:

1. Разработване на симулационен модел на синхронен генератор с вътрешно разположени постоянни магнити и на двупосочен, силов електронен преобразувател, свързан към генератора.
2. Разработване на симулационен модел на двупосочен преобразувател (инвертор), с връзка с филтъра към мрежата.
3. Разработване на алгоритъм за следене на точката на максимална мощност на вятърната турбина (MPPT).
4. Разработване на система за векторно управление на синхронен генератор с постоянни магнити, използваща различни стратегии за управление на момента на генератора.
5. Разработване на алгоритъм за векторно управление на електронен преобразувател на мощността, свързан с мрежата.
6. Експериментално валидиране на разработената система за управление на мощността, чрез използване на стенд за физическо моделиране на ВЕПС.

Научна новост

1. Разработен е симулационен модел на вятър, обединяващ нискочестотната и високочестотната компонента и модел на вятърна турбина с директно задвижване.
2. Разработен е симулационен модел на многополюсен синхронен генератор с вътрешно разположени магнити, на двупосочен трифазен преобразувател, работещ

съвместно със СГПМ и осъществяващ заложените стратегии за управление на генератора, и трифазен инвертор с филтър за връзка с към мрежата.

3. Разработено е управление на мощността на ВЕПС, съставено от: управление за следене на точката на максимална мощност, управление на момента на генератора и управление на връзката с мрежата.

4. Сравнени са различни методи за управление на турбината и генератора, като е доказано, че оптималното управление на момента, съчетано с управлението максимален въртящ момент за ампер са най-подходящи за системата.

5. Разработен е цялостен симулационен модел на ВЕПС с СГПМ и електронни преобразуватели, който включва подсистема за преобразуване на енергията и подсистема за управление на мощността при променлива скорост на вятъра.

6. Предложен е симулационен модел на СГПМ с отчитане на насищането и променливи индуктивности. Разработен е 3D модел с МКЕ на многополюсен СГ с ПМ и са определени зависимостите на синхронните индуктивности от съставките на тока. Предложен е усъвършенстван метод „Максимален въртящ момент за ампер (МТРА)“ за управление на СГПМ с отчитане на промяната на индуктивностите и е доказано, че с прилагането му се намаляват загубите в машината.

Практическа приложимост

Усъвършенстван е стенд за изследване на ВЕПС със синхронен генератор в лабораторни условия. Разработено е програмно осигуряване, имплементиращо предложените методи за управление на ВЕПС върху платформата dSPACE. Проведени са експериментални изследвания и са получени потвърдителни резултати за валидността на разработените алгоритми и модели на управлението на мощността на ВЕПС.

Апробация

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен Научен съвет на Училището за докторанти, Факултета за френско обучение по електроинженерство при Технически университет – София, проведено на 20.02.2018г, протокол № 05/07.02.2018г

Етапи от дисертационния труд са докладвани и обсъждани на:

1. VIII-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2016“ 12 - 15 септември 2016 г., Варна, "Св. св. Константин и Елена", България

2. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 2017

3. IX-та КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2017“ 11 - 14 септември 2017 г., Варна, "Св. св. Константин и Елена", България

4. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, 2018,

5. 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019

6. Заседание на катедра “Електрически машини”, Електротехнически факултет на ТУ-София

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 7 статии: 1 – в българско списание; 3 публикации са в Годишника на ТУ-София; 3 – в Трудовете на международни конференции. Една статия е самостоятелна, а останалите са в съавторство.

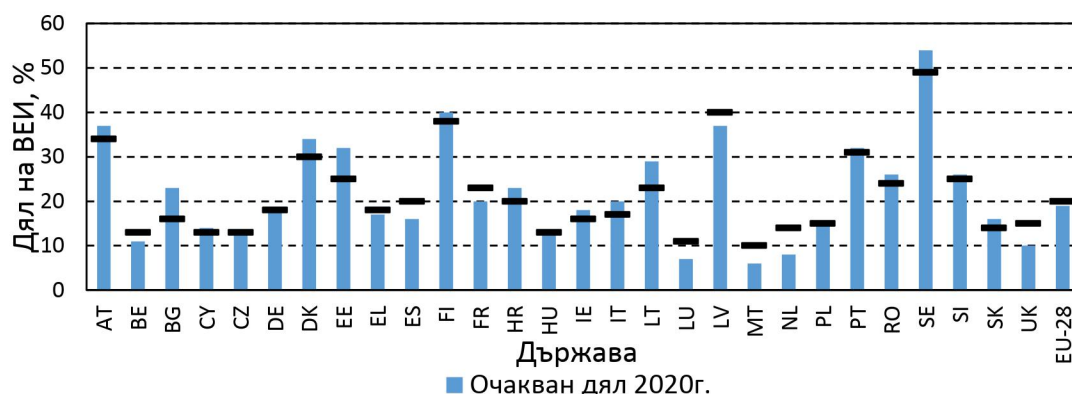
Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **(167)** страници, като включва увод, **(4)** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **(162)** литературни източници, като **(152)** са на латиница и **(3)** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **(150)** фигури и **(8)** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Тенденции в технологиите и управлението на ветроенергийни преобразователни системи (литературен обзор)

Заради намаляващото количество на изкопаемите горива и увеличаването на вредите, нанесени от тях, възобновяемите източници на енергия представляват обект на засилен интерес. Енергията на вятъра постепенно се отличава като водеща сред другите възобновяеми източници и дори конкурентна на конвенционалните [1][2]. Държавите от Европейския съюз са едни от водещите в света по производство на енергия от възобновяеми източници. Те са си поставили за цел заедно да достигнат дял 20% до 2020г и 32% до 2030г. Целите на отделните държави са показани на Фиг.1 [3]. Според EWEA се предвижда произведената енергия от възобновяеми източници към 2020г. да е между 12,8% и 17% [3][4].



Фиг. 1 Цел и очакван дял на ВЕИ за 2020г. за държавите от ЕС.

Понастоящем технологията на вятърната турбина с променлива скорост, базирана на двойно захранен индукционен генератор (DFIG) със скоростна кутия, доминира на световния пазар. Въпреки това, използването на такива генератори довежда до проблеми като потребление на реактивна мощност, механично претоварване и лошо качество на електроенергията. Мултипликаторът се нуждае от редовна поддръжка, тъй като често в него възникват повреди и неизправности. Ето защо проучванията са съсредоточени в развитие на технологиите, които могат да повишат ефективността, надеждността и да намалят разходите на ветроенергийните преобразователни системи. Съгласно направения литературен обзор, работата на вятърна турбина с променлива скорост може да бъде значително подобрена чрез използване на синхронен генератор с постоянни магнити (СГПМ), с ниска скорост на въртене и без мултипликатор (директно задвижване). Основните характеристики на вятърните турбини със СГПМ са: липса на предавателна кутия, по-висока ефективност, повишена надеждност, по-малко тегло, намалени разходи и ниски енергийни загуби. От проучването се установява, че много важна роля, при този тип системи, играе системата за управление на турбината. От нея зависи поведението на преобразователната система и количеството на извлечената енергия от вятъра.

Не по-малко важна е и системата за управление на въртящия момент, скоростта и мощността на електрическия генератор. Неговото управление е директно свързано с управлението на турбината. Необходимо е прилагането на съвременни, иновативни подходи за управлението на генератора с цел да се осигури оптималната му функционалност чрез намаляване на загубите и повишаване на ефективността.

Алгоритмите за съгласуване на мощността между генериращата част и частта, която отдава енергия в мрежата (инвертора), имат важна роля за осигуряване на стабилността на системата при непрекъснато променящата се скорост на вятъра, за гарантиране на качеството на произведената електроенергия и за безпроблемната интеграция с електрическата мрежа.

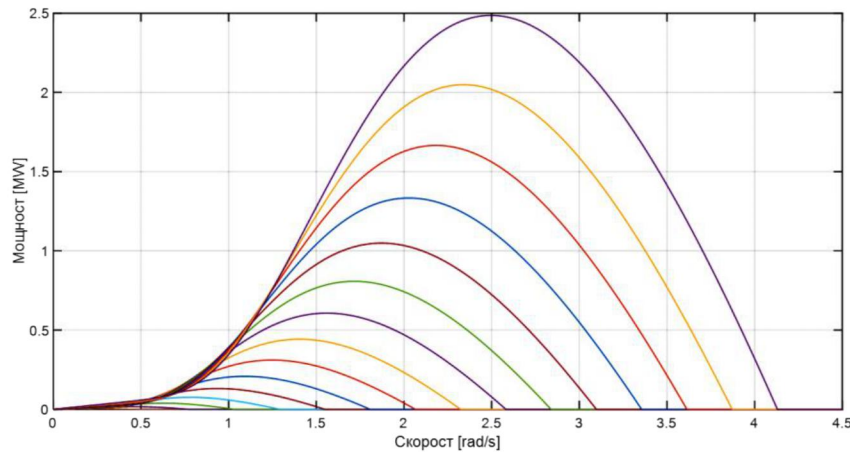
ГЛАВА 2. Моделиране на ветроенергийна преобразователна система

2.1 Моделиране на вятърна турбина

Наличен енергиен ресурс в първичния източник

Тъй като оптималната стойност за коефициента на мощността C_p и скоростното отношение λ остават фиксирани, максималната точка на мощност за всички скорости на вятъра може да се изчислява от характеристиките на турбината, както е показано на Фиг.19. Уравнението на мощността на турбината е следното,

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \theta) A v^3 \quad (4)$$



Фиг. 19 Характеристики на турбината при различна скорост на вала.

За моделиране на коефициента на мощност на турбината C_p се използват различни апроксимации с различни функции [103]. Един от най-добрите подходи се основава на моделирането на характеристиките на коефициента на мощност на турбината в зависимост от λ :

$$C_p(\lambda, \theta) = a_1 \left(\frac{a_2}{\lambda_i} - a_3 \theta - a_4 \right) e^{\frac{-a_5}{\lambda_i}} + a_6 \lambda \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + b_1 \theta} - \frac{b_2}{\theta^3 + 1} \right) \quad (6)$$

където θ е ъгълът на атака на лопатките на турбината.

2.2 Моделиране на скоростта на вятъра

2.2.1. Математически модел на скоростта на вятъра

2.2.1.1. Вероятностен модел на скоростта на вятъра

Вариацията в скоростта на вятъра се описва най-добре с функцията за вероятностно разпределение на Вейбул (Weibull) h , с два коефициента, коефициент на формата k и мащабен коефициент c . Вероятността за вятър със скорост v по време на изследвания интервал, се представя със следния израз [104]:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c} \right)^k} \quad (7)$$

2.2.1.2. Детерминистичен модел на скоростта на вятъра

Средната скорост се определя като скоростта, съответстваща на модата в разпределителната функция. Това е скоростта, с която вятърът духа през повечето време.

Средната скорост за периода се определя като общата площ под кривата $h-v$, интегрирана от $v = 0$ до ∞ , разделен на общия брой часове в периода (8760, ако периодът е една година):

$$v_{mean} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h v dv \quad (8)$$

Като цяло за функцията на Вейбул се получава:
При $n=3$

$$v_{mean}^3 = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (11)$$

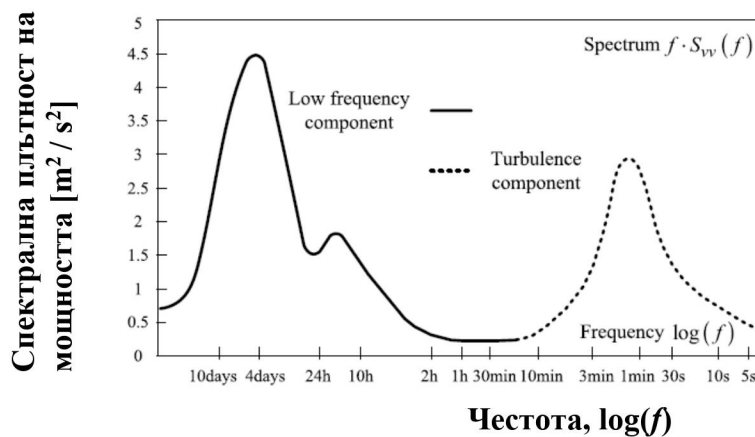
Параметрите c и k са дефинирани чрез фазовото приближение на разпределението на Вейбул, направено от събрани метеорологични наблюдения.

2.2.1.3. Спектрален модел на скоростта на вятъра

Динамиката на вятъра е резултат от съчетаването на метеорологични условия с особеностите на даденото място. По този начин скоростта на вятъра се моделира в литературата като нестационарен произволен процес чрез суперпозиция на два компонента [103][105][101]:

$$v(t) = v_s(t) + v_t(t) \quad (15)$$

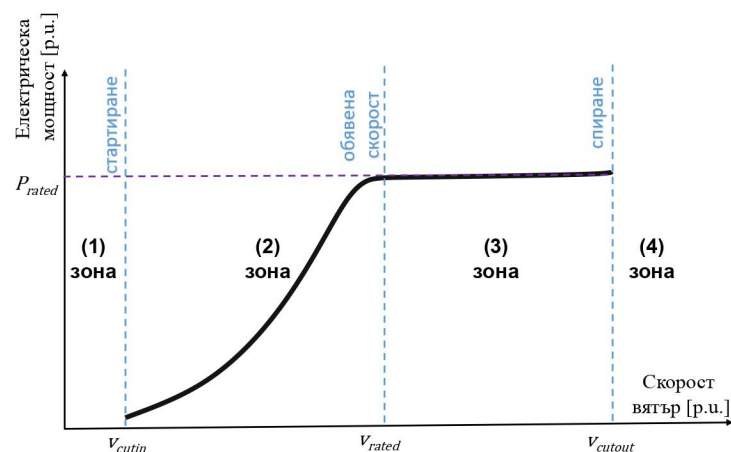
където $v_s(t)$ - е нискочестотната компонента (описваща дългосрочни, нискочестотни вариации); $v_t(t)$ - компонентата на турбулентността (съответстващ на бързи, високочестотни вариации). Тези компоненти могат да бъдат наблюдавани във модела на Ван дер Ховен (Van der Hoven) Фиг.22.



Фиг. 22 Спектрален модел на скоростта на вятъра на Ван дер Ховен [102]

2.3 Управление на механичната мощност на турбината.

Характеристиката на скоростта на въртене на вятърната турбина може да се раздели на четири зони (Фиг.23). Като турбините с променлива скорост работят предимно в зона 2. Там работата на турбината се ръководи от управлението за следене на точката на максимална мощност (виж Фиг. 19).



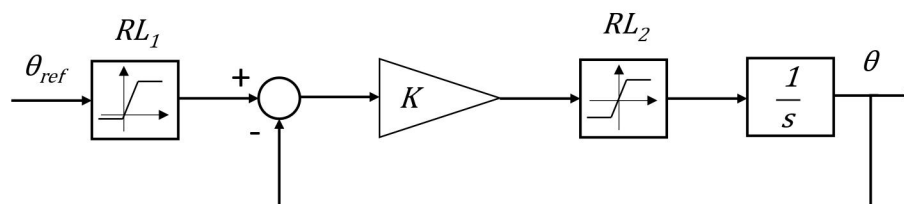
Фиг. 23 Зони на работа на вятърна турбина.

2.3.1. Моделиране на системата за ориентация на лопатките

Общи положения

Системата за ориентация на лопатките по същество се използва за ограничаване на мощността в зона 3. Тук вятърната турбина работи с постоянна скорост v_{rated} . Генераторът произвежда максималната обявена мощност P_{rated} . Мощността се поддържа чрез управлението на ъгъла на атака на лопатките. С тази система лопатките се завъртат от управляващо устройство, наречено "pitch control".

2.3.3.2. Регулиране на ъгъла с интегратор



Фиг. 25 Регулатор за управление на актуатора.

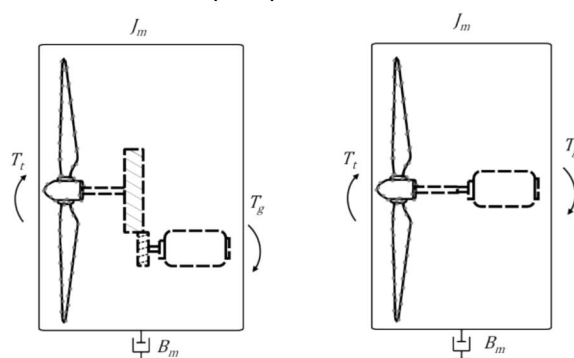
където:

RL_1 е ограничението на ъгъла на атака, RL_2 е ограничението на скоростта на въртене, K е коефициентът на мекоата.

2.4 Моделиране на връзка между турбина-генератор

2.4.2. Динамично уравнение на вала

Шестмасовият модел е най-сложен и се използва предимно за изследване на процеси свързани с аеродинамичните аспекти. Тази дисертация има за цел да сравни различни методи за управление на мощността, които се отразяват в по-дълги периоди от време. Затова е предложен механичен модел, разглеждащ общия инерционен момент J_m , съставен от инерционния момент на турбината и от инерционния момент на генератора Фиг.28.



а) със мултипликатор

б) с директно задвижване

Фиг. 28 Схема на едномасов модел на вятърна турбина и задвижващ механизъм.

$$J_m = J_t + J_g \quad (18)$$

Фундаменталното уравнение за движение прави възможно изразяването на механичната скорост от общия механичен въртящ момент T_{tot} , приложен върху ротора:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_{tot} \quad (19)$$

където J_m е общият инерционен момент, приложен на ротора на генератора.

2.5 Моделиране на електрическия генератор

Съществуват различни видове генератори, използвани във вятърните турбини. В тази дисертация като генератор е използвана синхронна машина с вътрешно разположени постоянни магнити.

2.5.2. Модел на синхронен генератор.

На базата на литературното проучване е избрано да се използва модел в dq координатна система. Той позволява изследване на динамичното поведение на машината.

2.5.2.2. Статорни напрежения в синхронна координатна система dq

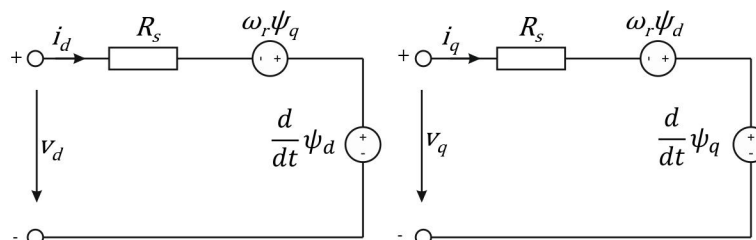
Преобразуването на модела от abc в dq уравненията добиват вида:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (26)$$

където

v_d и v_q са статорните напрежения в dq , i_d и i_q са статорните токове в dq , ψ_d и ψ_q са статорните потокосцепления в dq , ω_r е електрическата скорост на ротора.

Заместваща схема на машината в dq е показана на Фиг.34.



Фиг. 34 Еквивалентна заместваща схема на СМПМ в dq координатна система, чрез потокосцепленията.

2.5.2.5. Активна и реактивна мощност на машината

Връзката на пълната мощност с напреженията и токовете на статора се изразява както следва:

$$S_s = P_s + jQ_s = \frac{3}{2} (v_d + jv_q)(i_d - ji_q) \quad (30)$$

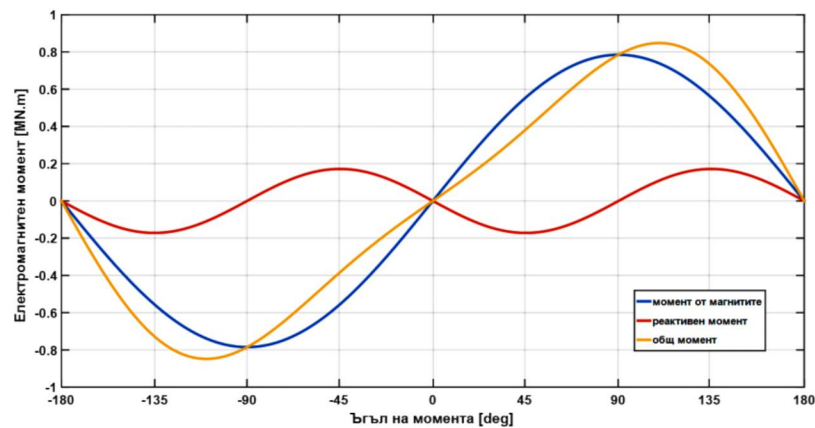
2.5.2.6. Електромагнитен въртящ момент и скорост на ротора

Като заменим стойностите на ψ_d и ψ_q , за ел. момент получаваме [128]:

$$T_e = \frac{3p_p}{2} [\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (37)$$

От (37) се вижда че СМПМ произвежда въртящ момент, който се състои от две части. Едната се създава от потока на постоянните магнити T_{pm} , а другата е реактивният въртящ момент T_{re} , който се поражда от разликата в магнитното съпротивление по двете оси на ротора d и q .

За дадена големина на тока T_{pm} и T_{re} варират в зависимост от ъгъла на въртящия момент γ и следователно и общият въртящ момент на машината се променя. На Фиг.37 е показано изменението на T_{pm} и T_{re} и полученият общ въртящ момент T_e в зависимост от ъгъла на въртящия момент γ при постоянна големина на статорния ток i_s , за конкретния генератор



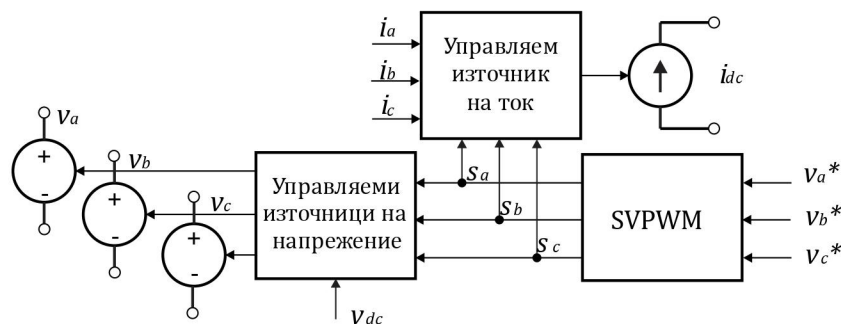
Фиг. 37 Общ момент, момент от магнитите и реактивен момент във функция от ъгъла на електромагнитния момент при $L_d < L_q$.

2.6 Моделиране на електронни преобразуватели

2.6.1. Видове математически модели

Комутационен модел

Концепцията за комутационна функция се използва за описание на работата на действителните преобразуватели на енергия. В резултат на това преобразуването се моделира според функциите, а не по точната схема на преобразувателя [130]. Тъй като не се отнася за точно определен полупроводников елемент, комутацията може лесно да се моделира. Фиг.41 показва еквивалентен модел на преобразувателя.



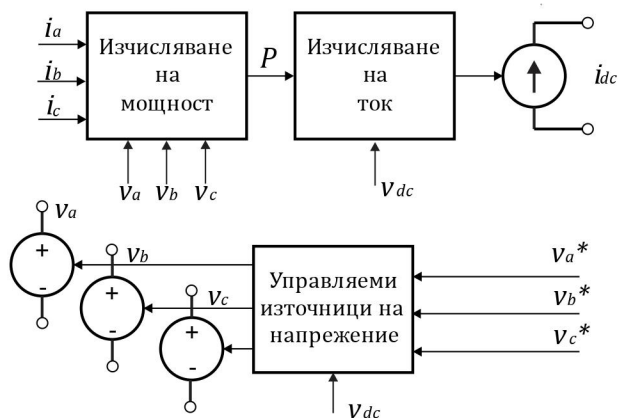
Фиг. 41 Комутационен модел на преобразувател на напрежение.

В модела с комутационни функции преобразувателите на напрежение (VSC) се представят с еквивалентни източници на напрежение, които се управляват от превключващите функции на полупроводниците, като се пренебрегват комутационните процеси в полупроводниковите елементи. Този модел позволява да се работи със стъпка, по-голяма от подробния модел, но се запазват формите на токовете и напреженията. Моделът позволява да се наблюдава влиянието на хармониците, породени от комутацията в системата.

Осреднен модел

В осреднения модел преобразувателите на напрежение се представят като еквивалентни източници на напрежение, генериращи AC напрежения, осреднени за един период на честота на превключване. Фиг.42 представя осреднен модел на VSC.

Този модел не позволява наблюдаването на влиянието на хармониците от комутацията, но се запазва динамиката, произтичаща от взаимодействието между системата за управление и системата за производство на енергия. Този модел позволява да се използват много по-големи стъпки от време при решаването (100 микросекунди), което позволява симулации на дълги периоди от време [131].



Фиг. 42 Осреднен модел на преобразувател на напрежение.

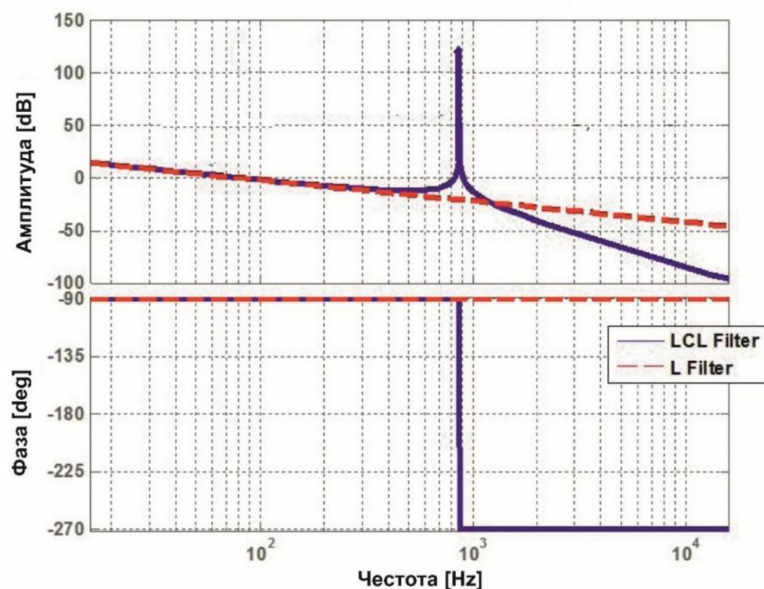
За да се избере модел е направено сравнение и анализ на този с комутираща функция и на осреднения. За целта е направена симулация на машина, работеща съвместно с преобразувател на напрежение. По време на симулацията скоростта на въртене на машината е постоянна като се изменя натоварването. Резултатите показват, че и при двата модела формите на токовете остават близки. При модела с комутираща функция ясно се наблюдават колебанията, породени от широчинно-импулсната модулация. Направен е изводът, че най-подходящ за нуждите на дисертацията е комутационният модел. Именно той дава нужната точност като същевременно предоставя възможност за увеличаване на периода за изучаване на системата.

2.7 Моделиране на филтър

2.7.1. Избор на конфигурация на филтъра

За връзката на инвертора с мрежата трябва да се вземе предвид изходният филтър за променлив ток. Има няколко възможности за избор на [134], [135], [136], [137]. L – филтър, LC – филтър, LCL – филтър

Ако се сравнят L и LCL филтри с една и съща индуктивност, ще се види, че LCL филтърът има много по-добро затихване на височестотните съставки, отколкото L филтърът (Фиг. 52).



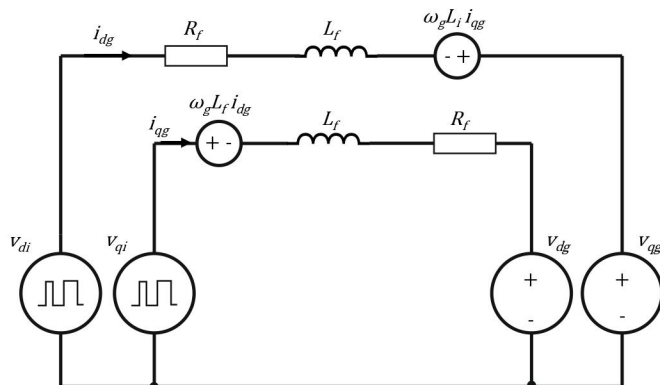
Фиг. 52 Амплитудно честотна и фазово честотна характеристика на L и LCL филтри.

В тази работа е използван L филтър, тъй като той е по-лесен за проектиране и изпълнение и осигурява нужната стабилност на регулатора на тока към мрежата.

2.7.3. Моделиране на филтър

Схема на филтъра в dq е показано на Фиг.54. Индексите d и q съответстват на двете оси на синхронната координатна система. Всички променливи в dq са по природа постоянноточкови. V_{di} и V_{qi}

са съответно напреженията на инвертора в dq . v_{dg} и v_{qg} са напреженията на мрежата. i_{dg} и i_{qg} са мрежовите токове в dq . ω_g е ъгловата честота, (rad/s). Членовете $-\omega_g L_f i_{qg}$ и $\omega_g L_f i_{dg}$ представляват индуцираните напрежения, причинени от преобразуването на променливите от abc в dq . Те принципно се компенсират от системата за управление на инвертора.

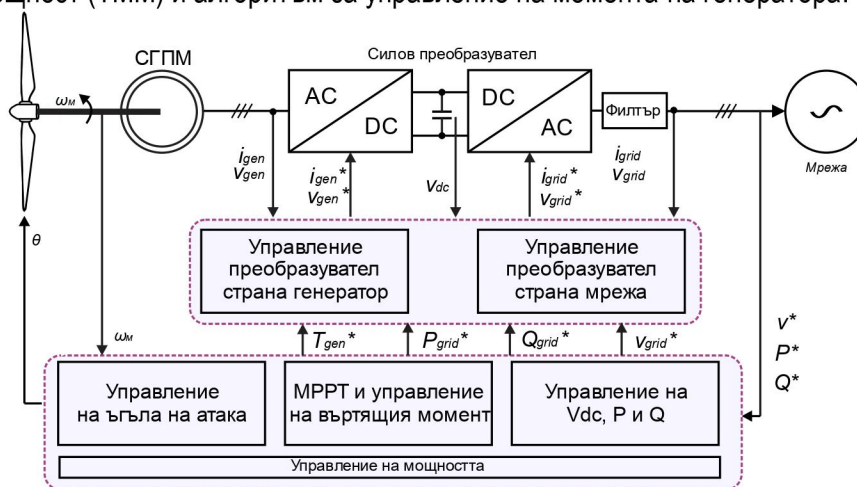


Фиг. 54 Схема на филтъра, работещ с преобразувателя и мрежата в dq .

$$\begin{bmatrix} v_{di} \\ v_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & -\omega_g L_f \\ \omega_g L_f & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dg} \\ i_{qg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & 0 \\ 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dg} \\ i_{qg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{dg} \\ v_{qg} \end{bmatrix} \quad (66)$$

ГЛАВА 3. Управление на ветроенергийна преобразователна система

Блоковата диаграма на управлението на мощността на ВЕПС е показана на Фиг.55. Управлението на преобразувателя от страна генератор съчетава алгоритъм за следене на точката на максимална мощност (ТММ) и алгоритъм за управление на момента на генератора.



Фиг. 55 Блокова диаграма на ВЕПС и системите за управление.

3.1. Методи за следене на точката на максимална мощност на вятърна турбина

В литературата се дискутират множество различни методи за следене на точката на максимална мощност. Повечето от тях са първоначално разработени за управлението на фотоволтаични панели. Като цяло MPPT методите могат да спадат към някоя от следните групи: . Управление на оптималното скоростно отношение (Optimum Tip Speed Ratio TSR), Управление чрез обратна връзка по мощност (Power Signal Feedback PSF), Оптимално управление на момента (Optimum Torque Control OTC) и Управление чрез най-бързото изкачване (Hill Climbing Search HCS).

3.1.2. Избиране на подходящи методи за сравнение

Базирайки се на досега направените проучвания, два от методите се открояват като най-обещаващи за приложение в изследваната ВЕПС. Това са оптимален TSR и оптимално управление на момента.

3.1.3. Сравнение на подходящите методи за следене на точката на максимална мощност

3.1.3.1. Оптимално скоростно отношение

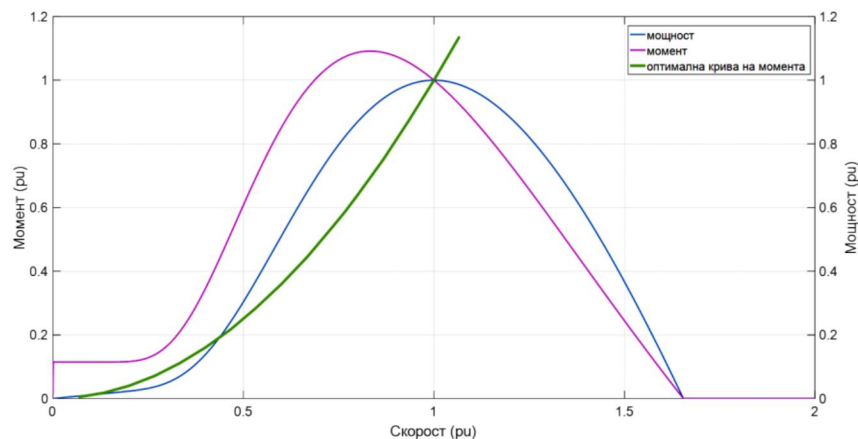
Оптималният TSR използва само скоростта на вятъра като вход за регулатора на MPPT. Заданието за скорост на турбината или генератора след това се изчислява въз основа на известното оптимално скоростно отношение λ_{opt} и радиуса на турбината r :

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_m r}{v} \quad (68)$$

Разработен е симулационен модел в Matlab/Simulink осъществяващ този метод.

3.1.3.2. Оптимално управление на момента

Оптималното управление на момента е един от най-често използвани MPPT методи. Той се основава на факта, че за всяка скорост на ротора ω_m има оптимален момент T_{opt} , при който турбината работи с максималната си мощност Фиг.62. Тази връзка е известна като оптималната крива на момента. Всяка точка от тази крива съответства на определена скорост на вятъра. Това съотношение може да се изчисли, ако е известна характеристиката на вятърната турбина.



Фиг. 62 Връзка мощност момент на вятърна турбина.

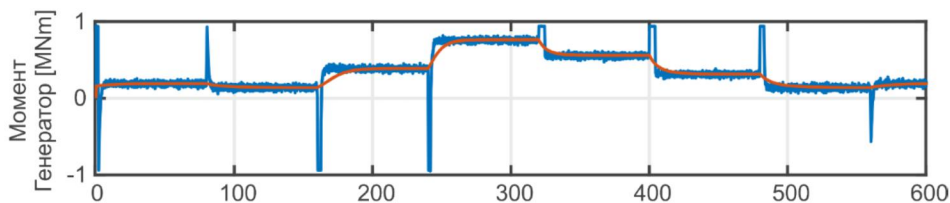
Оптималният момент се намира както следва:

$$T_{opt} = k_{opt} \omega_m^2 \quad (72)$$

3.1.3.3. Сравнение на методите за следене на ТММ

Работата на двата метода за следене на ТММ е изследвана чрез разработения модел в MATLAB / Simulink на 2MW ВЕПС. За симулацията се използва предварително определен профил на скоростта на вятъра. При симулацията напрежението на DC-шината се поддържа равно на 1450V. И в двата случая се използва стратегията за управление на въртящия момент на генератора МТРА.

В първия случай скоростта на вятъра се променя със стъпки. По този начин се проследява поведението на двата метода за управление при ускорение и забавяне. Към скоростта на вятъра е добавен и бял шум. На Фиг.65 са показани резултатите, получени с двата метода.

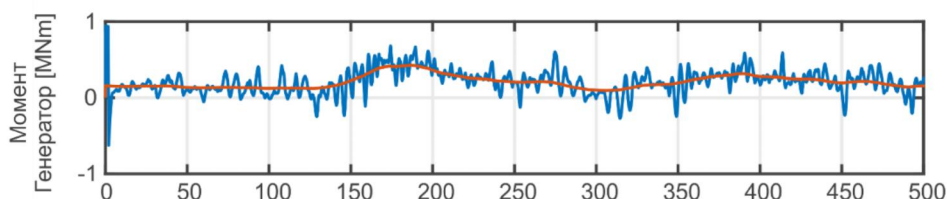


Фиг. 65 Сравнение на реакцията на системата с двата метода за следене на ТММ при резки промени на скоростта на вятъра.

Ясно се вижда, че методът TSR има по-бърза реакция и системата се връща към своя максимален коефициент на мощност по-бързо. Поради това чрез този метод се извлича повече енергия от вятъра, но има големи колебания на въртящия момент. По време на промяната на скоростта на вятъра TSR за кратко време пуска генератора в двигателен режим, за да ускори турбината и да достигне бързо до желаната скорост за постигане на максималния коефициент на

мощност. Освен това алгоритмът TSR задава максимален електромагнитен момент, което води до реакция от страна на защитата от претоварване на генератора.

Във втория случай при изследването се използва реалистичен профил на вятъра с вариации в скоростта и турбулентност. Същите величини в системата, както в предишния случай, се сравняват на Фиг.67.



Фиг. 67 Сравнение на реакцията на системата при двата метода за следене на ТММ с прилагане на реалистична скорост на вятъра.

На базата на извършените симулации се сравняват качествата на двата метода за управление на мегаватова ВЕПС.

През симулирания период, показан на Фиг.67, общото количество на извлечената енергия с използване на оптимален TSR е 97,87 kWh спрямо 96,70 kWh за оптимално управление на момента. Следователно, методът оптимален TSR е извлякъл по-голямо количество енергия. Симулациите показват, че с оптималното управление на момента, системата работи по-гладко, както може да се види от кривите на мощността на генератора. Няма никакви пикове на напрежението на постояннотоковата връзка и механичното натоварване е по-малко (което се вижда от кривите на въртящия момент).

Основната разлика между изследваните методи за следене на ТММ е скоростта на реакция на системата. Наблюдава се по-бавна реакция от страна на оптималното управление на момента. Това може да бъде обяснено с голямата инерция на системата и това, че разликата между двата въртящи момента - на турбината и на генератора, остава доста ограничена. Методът оптимално управление на момента предлага по-гладка работа на системата. От друга страна, методът оптимален TSR предлага по-бърза реакция, но е съпроводен от по-големи колебания във въртящия момент и големи механични натоварвания, което влияе върху надеждността на цялата система и е предпоставка за евентуални повреди.

3.2 Управление на мощността на генератора

3.2.1. Видове стратегии за управление на въртящия момент

Управлението с ориентация по потокосцепление (FOC) е метод за управление, който придава на променливотоковата машина поведение, сходно с това на постояннотокова. Разгледани са различни стратегии за управление като Управление по постоянен ъгъл на момента, Управление с постоянен фактор на мощността, Максимален въртящ момент за ампер, Управление с постоянно статорно потокосцепление и Управление с минимизиране на загубите в машината.

3.2.2. Избиране на подходящите стратегии за сравнение

Позовавайки се на литературата, предимствата и недостатъците на стратегиите могат да се анализират спрямо избраната машина. На базата на това могат да се изберат подходящите типове управления за целите на дисертацията и да се направят сравнения.

От проведеното проучване може да се направи заключение, че двете стратегии, представляващи интерес за това проучване, са ZDAC и МТРА.

Управление по постоянен ъгъл на момента ($\gamma=90^\circ$) (Zero d-axis Control ZDAC)

При това управление съставката на тока по оста d се поддържа равна на нула. Поддържането на ъгъла на въртящия момент на 90° води до минимален ток за даден въртящ момент и по този начин до минимум електрически загуби [147], при неявнополусни машини. За машини с повърхностни магнити тази стратегия е широко използвана, защото при тях $L_d=L_q$ и реактивният момент е нула. Трябва обаче да се отбележи, че тази стратегия не може да се използва пълноценно при машини с вътрешно разположени магнити, при които $L_d \neq L_q$ и притежаващи реактивен момент.

3.2.3. Сравнение на подходящите методи за управление на мощността на генератора

Алгоритъм на управление по постоянен ъгъл на момента ($\gamma=90^\circ$)

Ако $L_d = L_q$, изразът за електромагнитния момент в (73) се опростява, както следва:

$$T_e = 1.5 p_p \psi_r i_q \quad (80)$$

В СМПМ стойността на роторното потокосцепление ψ_r е постоянна. За да се постигне линейна връзка между въртящия момент и тока на статора, токът по оста d се насочва да стане равен на нула, т.е.

$$\begin{aligned} i_d &= 0 \\ i_s &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = i_q \end{aligned} \quad (81)$$

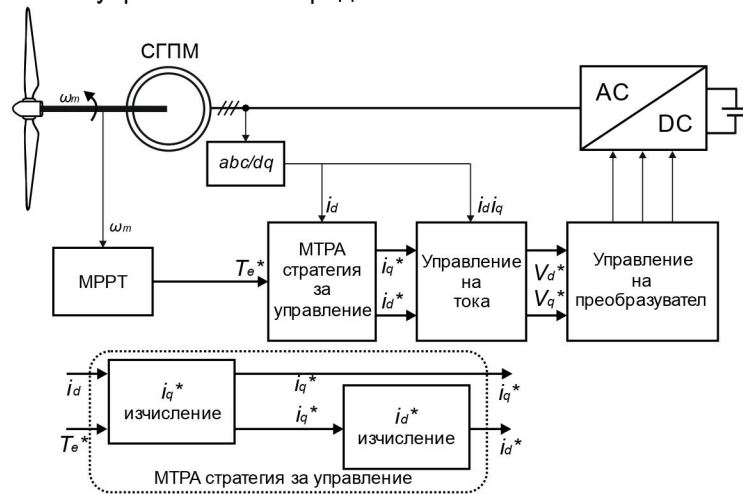
Пространственият вектор на статорния ток се оказва перпендикулярен на вектора на потокосцеплението на ротора (Фиг.68). По този начин ъгълът на въртящия момент γ става:

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{i_q}{i_d} = -\frac{\pi}{2} \text{ rad} \quad (82)$$

Разработен е симулационен модел в Matlab/Simulink, който реализира тази стратегия за управление на избрания генератор.

Максимален въртящ момент за ампер (Maximum Torque per Ampere MTPA)

При тази стратегия на управление се намира минималната стойност на статорния ток, с който да се достигне необходимият електромагнитен момент [148]. Следователно, за дадена работна точка загубите в медта могат да са минимални. Тук токът по оста d не е нула, а се изчислява така, че комбинацията от i_d и i_q да доведе до намаляване на общия ток i_s . Това се прави с цел използване на реактивния момент на машината. Тази стратегия е интересна за приложение при явнополусни машини. Блокова схема на управлението е представена на Фиг.72.



Фиг. 72 Блокова схема на управлението максимален момент за ампер.

Алгоритъм на управление максимален въртящ момент за ампер

От проучените по-горе алгоритми за постигане на МТПА, тук се използва именно алгоритъмът, разчитащ на връзката между двете съставки на тока.

За да се приложи стратегията за управление, след като оптималният въртящ момент се изчисли от алгоритъма за следене на ТММ, той се използва като референтна стойност. След това заданието i_q^* се изчислява от заданието за въртящ момент и измерения ток i_d , използвайки израза (88), който е изведен от уравнението за въртящ момент (84).

$$i_q^* = \frac{2T_e^*}{3p_p [\psi_r + (L_d - L_q)i_d]} \quad (88)$$

Всъщност i_q^* е токът по оста q , който ще създаде необходимия момент T_e^* с измерения ток i_d . След това заданието за i_d^* се изчислява като се използва изразът (87)

$$i_d^* = -\frac{\psi_r}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\psi_r^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^{2*}} \quad (89)$$

Това е стойността на i_d , с която се постига максимален въртящ момент с вече изчислената стойност i_q^* . Заданията за i_q^* и i_d^* се подават към токовия регулатор. Токът регулатор генерира заданията за напреженията v_q^* и v_d^* , които се използват за управление на преобразувателя.

3.2.3.4. Сравнение на методите за управление на момента

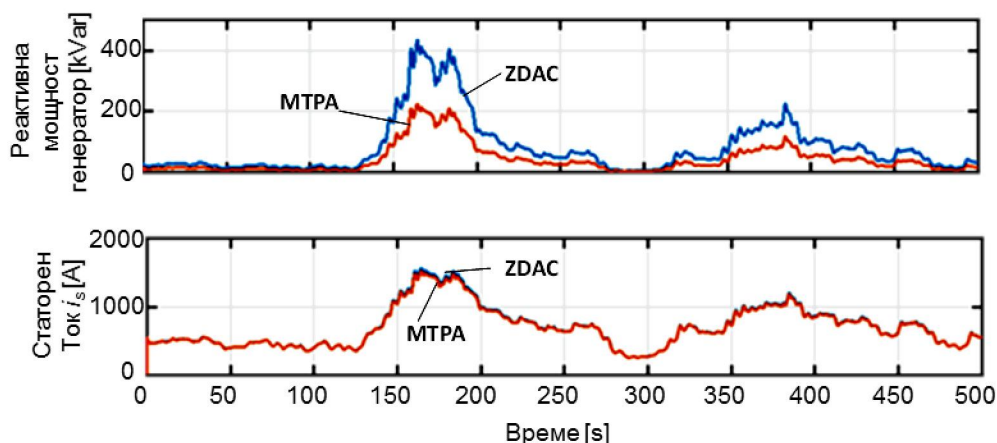
За да се оцени качеството на стратегията за управление на МТРА, е направено сравнение със стратегията ZDAC. При използване на ZDAC машината се нуждае от по-голям статорен ток, за да създаде същия въртящ момент. При номинален товар токът дори надвишава обявения. Резултатите показват, че електрическите загуби в статорните намотки при използване на МТРА стратегията са намалени съответно с 6.4% и 15.3% при частично и пълно натоварване на генератора.

Симулации при динамичен режим на работа

Изследвани са двата метода за управление на въртящия момент на генератора чрез разработените модели в MATLAB / Simulink на 2MW ВЕПС.

В първия случай скоростта на вятъра се променя със стъпки. Така може да се анализира реакцията на двете управления при ускорение и забавяне. Към скоростта на вятъра е добавен и бял шум, с цел проверка на устойчивостта на регулаторите

Във втория случай при изследването се използва реалистичен профил на вятъра с вариации в скоростта и турбулентност. Резултатите от симулацията са показани на Фиг.86.



Фиг. 86 Реакция на системата при реалистично изменение на вятъра при сравнение между две стратегии за управление на момента на СГПМ.

И двете управления достигат заданието за електромагнитен момент и го следят добре. Няма разлика във въртящия момент. Активната мощност, отдадена в постояннотоковия кръг, е една и съща. И при двата метода машината отдава активна мощност, но консумира реактивна мощност, която е необходима за L_d и L_q . При управлението с постоянен ъгъл на момента се изисква повече реактивна мощност. Последната диаграма показва статорния ток i_s , използван от двете управления. На нея, между 150 и 200 секунда, когато машината се натоварва, се вижда повишаване в статорния ток, при управлението ZDAC.

3.2.4 Управление на СГПМ с отчитане на влиянието на насищането

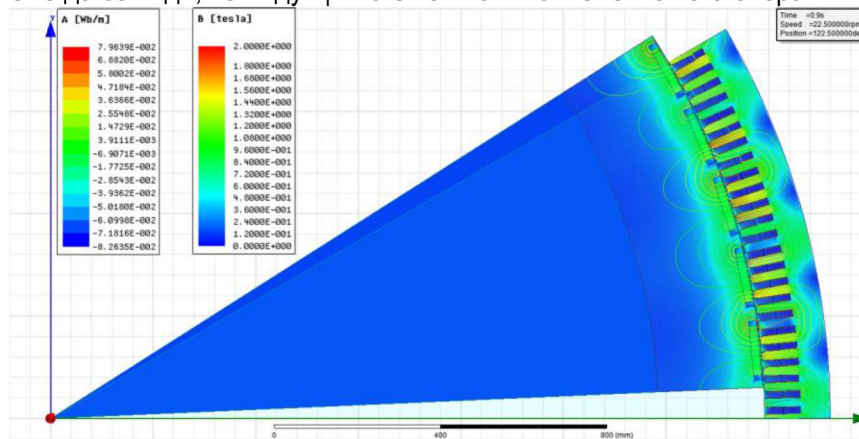
Както беше споменато по-рано, машините с вътрешно разположени магнити са по-интересни, тъй като техният реактивен въртящ момент може да се използва за увеличаване на ефективността, като същевременно се намаляват загубите. Този тип машини притежават явнополюсност, което означава, че индуктивностите по осите d и q не са еднакви. Магнитното насищане в машината оказва влияние на нейната работа заради промяната в нейните индуктивности. Поради това то не трябва да бъде пренебрегвано в управлението.

3.2.4.2. Определяне на индуктивностите с отчитане на насищането

Разглежда се синхронният генератор с вътрешно разположени магнити, чиито параметри са представени в глава 2. Ефектите на магнитното насищане са по-големи по оста q , тъй като по нея ефективната въздушна междина е по-малка, отколкото по d . Следователно индуктивността L_q е по-голяма от L_d [154], [155]. За да се анализира поведението на машината, работеща в зоната на насищане, е създаден 2D FEM модел на генератора. Индуктивностите се изчисляват чрез софтуера Ansys Maxwell.

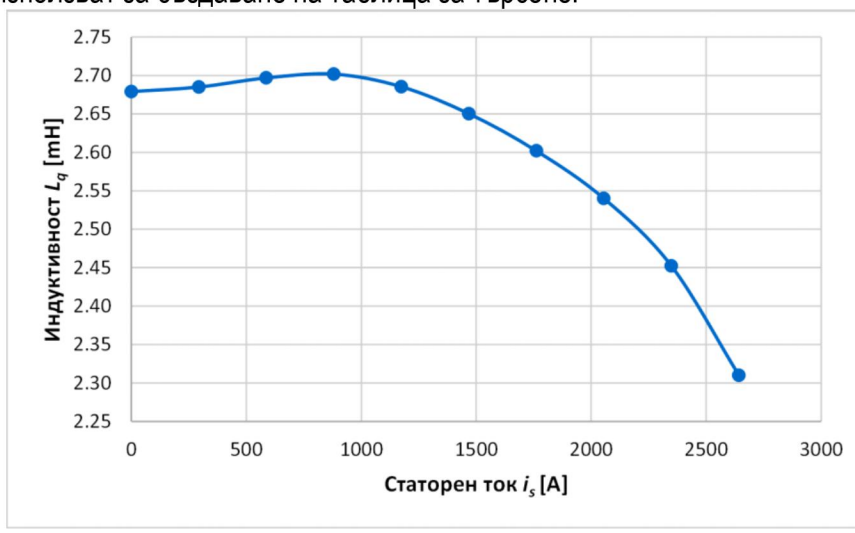
Методът с крайните елементи се използва и за изследване на работата на машината при номинално натоварване. При анализа машината работи като автономен генератор, отделен от електрическата мрежа. Генераторът произвежда 2 MW

На Фиг.92 е показано разпределението на магнитната индукция при условия на пълно натоварване. Може да се види, че индукцията е най-голяма в зъбите на статора.

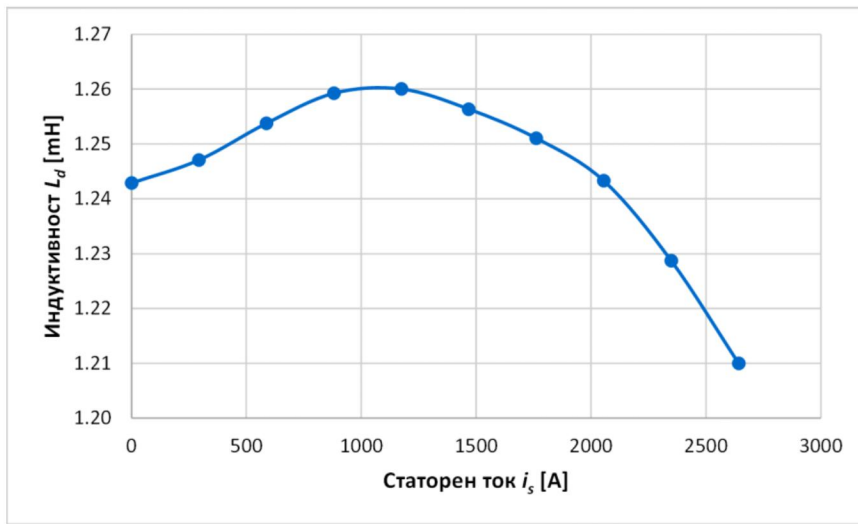


Фиг. 92 Разпределение на магнитната индукция в генератора.

Изчислението на индуктивностите е направено за десет стойности на тока, като е приложена стратегия за управление с МТРА. За всяка точка се изчисляват токовете съгласно уравнение (46). След това с всеки от тези токове се симулира състоянието на машината, използвайки FEM модела, и се изчисляват индуктивностите. Получените резултати за L_d и L_q са показани на Фиг.94. Те се използват за създаване на таблица за търсене.



a)



б)

Фиг. 94 Индуктивности на генератора във функция от статорния ток.

3.2.4.3. Усъвършенстван математически модел на генератора

Базирайки се на теорията, изложена по горе, моделът, използван досега, е линеен и той не може да отчете насищанията на машината.

Основавайки се на (26), можем да запишем уравненията за напреженията на нелинейния модел. Тук стойностите на индуктивностите не са постоянни, а се обновяват, използвайки зависимостите показани на Фиг. 94.

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d - \omega_r L_q(i_s) i_q + L_d(i_s) \frac{di_d}{dt} \\ v_q = R_s i_q + \omega_r L_d(i_s) i_d + \omega_r \psi_r + L_q(i_s) \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (100)$$

където v_d и v_q са напреженията на генератора по осите d и q , L_d е индуктивността на оста d , L_q е индуктивността на оста q , R_s е съпротивлението на статорната намотка, ψ_r е потокосцеплението от магнита, i_d и i_q са компонентите на статорния ток по осите d и q , а ω_r е електрическата ъглова скорост на ротора на генератора.

Тогава електромагнитният момент се изразява като:

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \{ \psi_r i_q + [L_d(i_s) - L_q(i_s)] i_d i_q \} \quad (101)$$

където p_p е броят на двойките полюси.

Механичното уравнение на вала, без да се отчитат загубите от триене, е:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \quad (102)$$

където T_m е механичният въртящ момент на вала на генератора, J_m е общият инерционен момент на системата и ω_m е механичната скорост на ротора.

3.2.4.4. Усъвършенстване на МТРА

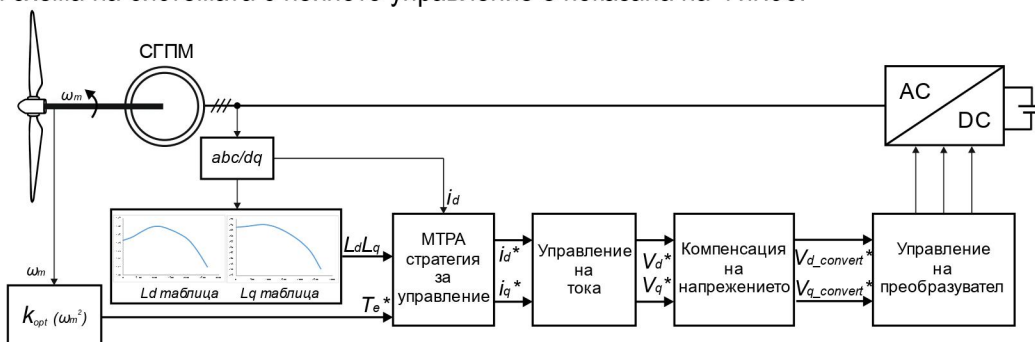
След направените промени в уравненията на машината е необходимо да се модифицира и управлението, за да може да следи промените в машината и да реагира на тях. Новите уравнения са базирани на вече използваните (88) и (89), но тук стойностите на индуктивностите се обновяват като се следи промяната на статорния ток i_s в генератора. Така се получават следните уравнения за определяне на заданията на токовете за реализация на МТРА:

$$\begin{cases} i_q^* = \frac{2T_e^*}{3p_p \{ \psi_r + [L_d(i_s) - L_q(i_s)] i_d \}} \\ i_d^* = -\frac{\psi_r}{2[L_d(i_s) - L_q(i_s)]} + \sqrt{\frac{\psi_r^2}{4[L_d(i_s) - L_q(i_s)]^2} + (i_q^*)^2} \end{cases} \quad (103)$$

Тук на всяка стъпка от изчислението се обновяват стойностите $L_d(i_s)$ и $L_q(i_s)$ на базата на стойностите на i_s и зависимостите, показани на Фиг.94.

3.2.4.5. Симулационни резултати и анализи

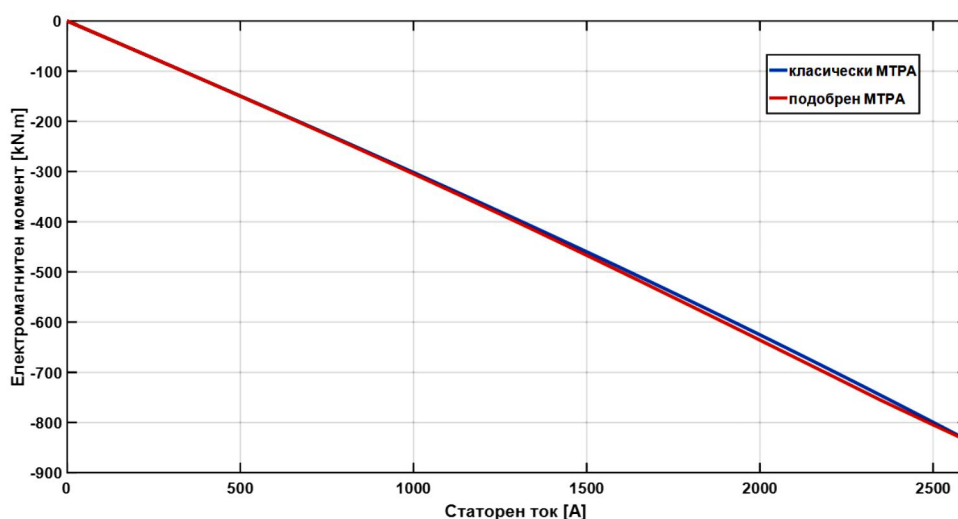
За да се потвърдят качествата на подобреното управление с МТРА, са създадени компютърни симулационни модели на всички компоненти на системата в среда Matlab / Simulink. Блокова схема на системата с нейното управление е показана на Фиг.96.



Фиг. 96 Блокова схема на подобреното управление с МТРА.

Направените с него симулации представляват сравнение между класическата стратегия МТРА и предложената версия на МТРА, където индуктивностите се актуализират според тока на машината и се отчита насищането. При класическия метод за L_d и L_q се вземат наситените стойности.

Целта на първия анализ е да се сравни ефективността на традиционния МТРА и предложени алгоритъм с променливи индуктивности. Резултатът от симулацията е показан на Фиг.98 и показва връзката между тока на статора и електромагнитния въртящ момент с двата вида МТРА управление. Наблюдава се, че предложеното управление МТРА с отчитане на насищането дава по-висок въртящ момент при даден ток.



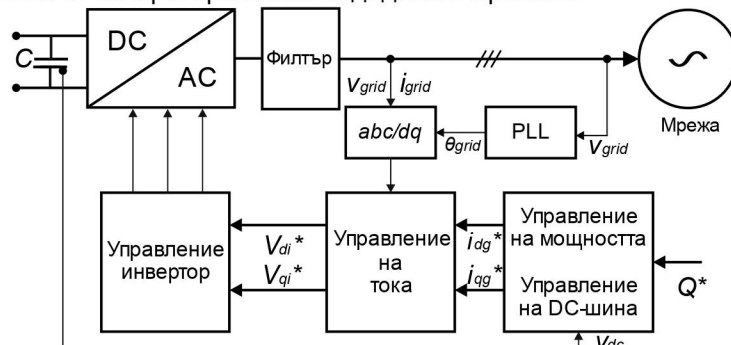
Фиг. 98 Сравнение на електромагнитния момент във функция от статорния ток.

3.3 Управление на преобразувателя страна мрежа

Съществуват различни методи, използвани за осъществяване на управлението на преобразувателя от страната на мрежата (ПСМ). Всички те са фокусирани върху едни и същи проблеми: управление на напрежението на DC-шината, активната и реактивната мощност, доставяна на мрежата, синхронизация с мрежата, осигуряване на високо качество на отдаваната мощност и съгласуване на мощностите на изправителя и инвертора (съгласуване на произведената от СГ мощност и отдаваната в мрежата мощност) [157].

Един от методите е известен като управление с ориентация по напрежението (VOC). Този метод се основава на трансформация между abc и dq координатна система.

Методът за управление на инвертора съдържа два каскадни контура, Фиг.103. Вътрешният управлява токовете към мрежата, а външният контур управлява напрежението на DC-шината. Токовият контур е отговорен за качеството на електроенергията, поради което може да бъде добавено компенсиране на хармониците. Външният контур регулира потока на мощност в системата, като управлява активната и реактивна мощност, доставени в мрежата [157]. Чрез него се осигурява равенство на мощността от генератора и тази отдадена в мрежата.



Фиг. 103 Блокова схема на управление на инвертор, свързан с мрежата, ориентирано по напрежението.

Уравненията на активната и реактивната мощност в dq -координатна система, при ориентация по напрежението на мрежата са:

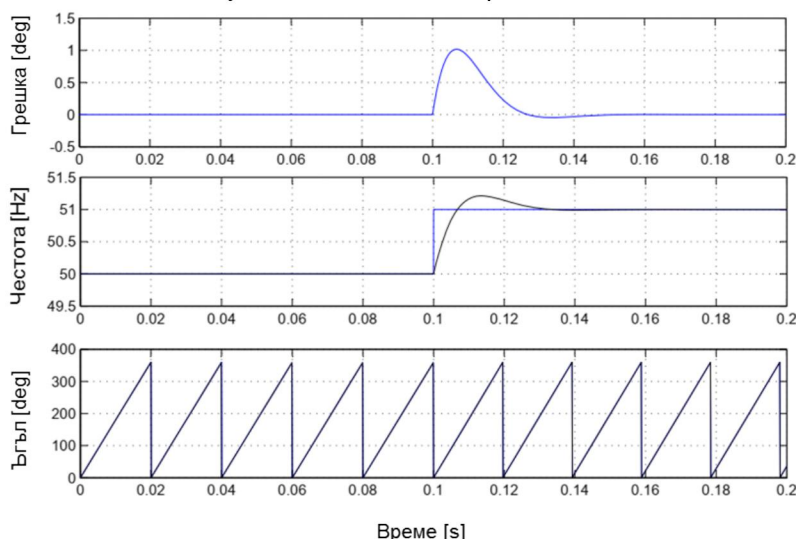
$$P_g = 1.5(v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg}) \quad (104)$$

$$Q_g = 1.5(v_{qg}i_{dg} - v_{dg}i_{qg}) \quad (105)$$

Чрез промяна на d и q -съставките на тока, съответно се управляват активната и реактивната мощност. По принцип целта на управлението е да се прехвърли цялата активна мощност, произведена от ВТ и СГ, към мрежата и при това без да се обменя реактивна мощност. Или казано иначе, коефициентът на мощността да е единица. За да се прехвърли цялата активна мощност, генерирана от СГ, напрежението на DC-шината се поддържа с постоянна стойност.

3.3.1. Синхронизация с мрежата PLL

Критерият за избора на подходящ метод за синхронизация се основава на най-добрата реакция при мрежови смущения, например хармоници и падове на напрежението [157]. Резултат от симулация на работата на PLL, получен с описания алгоритъм, е показан на Фиг.106.

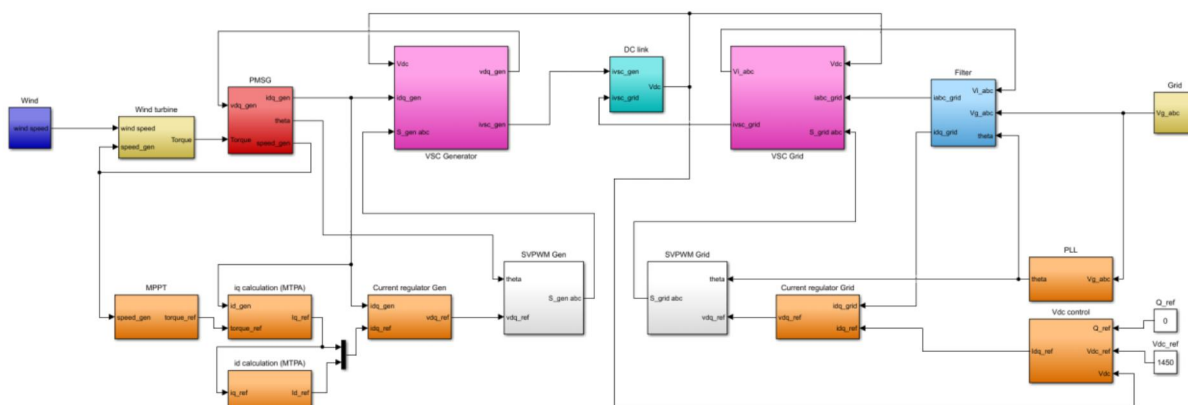


Фиг. 106 Реакция на PLL на при стъпкова промяна на честотата с 1Hz.

3.5. Цялостен модел на ВЕПС с управление на мощността

След като са създадени модели на отделните подсистеми с тяхното управление, следващата стъпка е те да бъдат обединени в едно. За целта е създаден цялостен симулационен модел на ВЕПС в MATLAB / Simulink, показан на Фиг.109. Той включва избраните от сравнения управления, а

именно оптимално управление на момента, за метод за следене на ТММ, стратегията максимален момент за ампер, за метод за управление на въртящия момент и управление, ориентирано по напрежението на мрежата, за управление на връзката с мрежата.

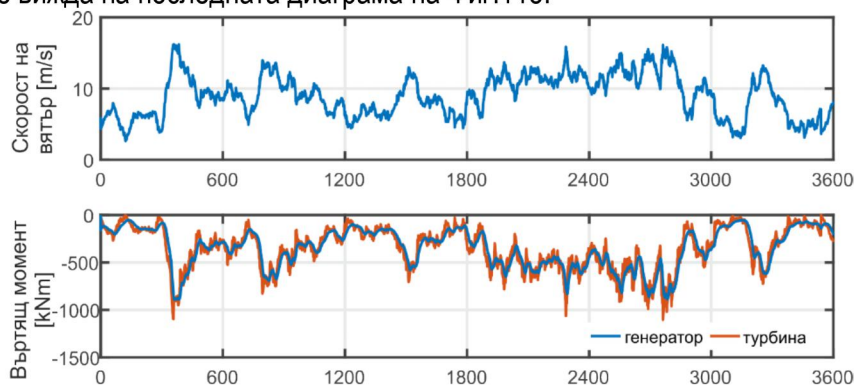


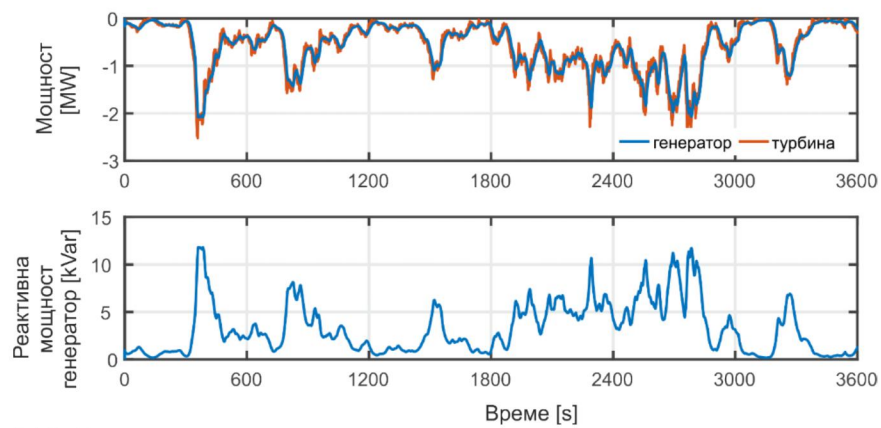
Фиг. 109 Симулационен модел на ВЕПС с управление на мощността.

Симулациите на системата са извършени с променлива скорост на вятъра в два случая – с предварително определен профил на скоростта на вятъра и с реалистична скорост на вятъра (от Фиг.113 до Фиг.115).

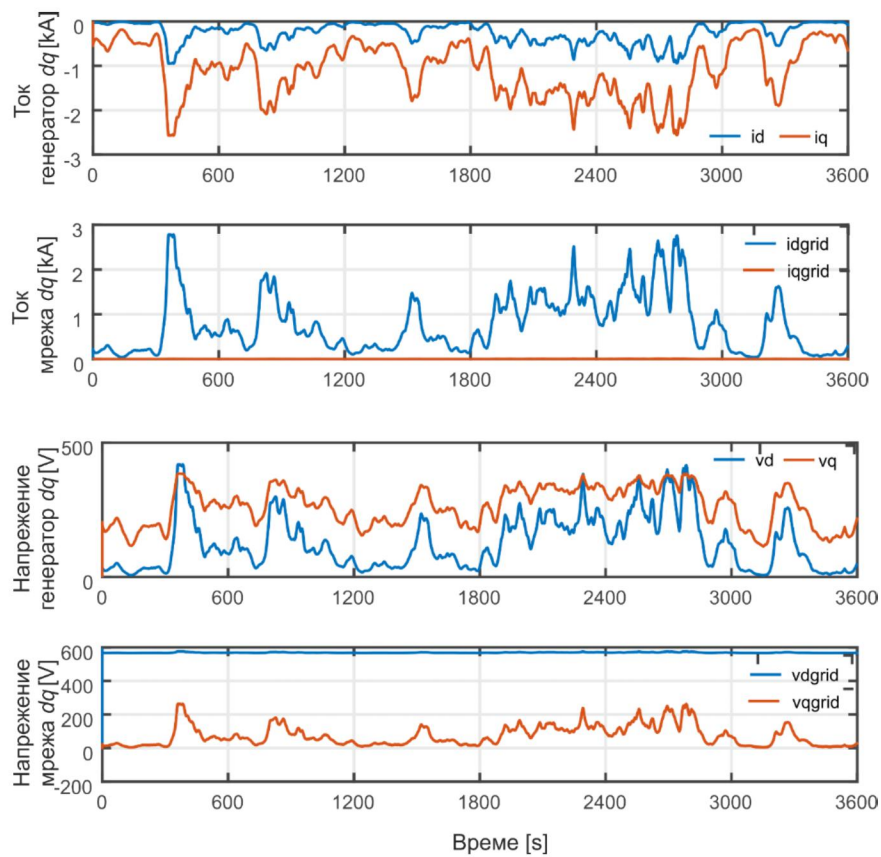
Първо реакцията на системата се анализира чрез прилагане на поредица от различни стъпки на скоростта на вятъра. Освен това в сигнала за скоростта на вятъра се добавя бял шум, за да се провери стабилността на управлението. Скоростта на вала на генератора следва изменението на скоростта на вятъра. Поради високия инерционен момент на механичната система преходните процеси след стъпките на скоростта на вятъра отнемат известно време за установяване.

При използването на реалистичен профил на вятъра няма стъпкови промени на скоростта на вятъра. Преходните процеси са сравнително бавни и управлението на генератора следва много добре зададения въртящ момент от алгоритъма за следене на ТММ, което води до много добро съвпадение между мощността на турбината и на генератора. Няма пикове в тока или напрежението. Електромагнитният момент е много по-стабилен от механичния. Може да се забележи, че в зоната над 15 m/s, се намесват алгоритмите за защита. Поради това електромагнитният момент остава постоянен, докато в този на турбината се наблюдава пик. Токът на оста d се поддържа възможно най-малък. Това може да се наблюдава около 1400-та секунда, когато скоростта на вятъра е по-стабилна. Последната диаграма на Фиг.113 показва реактивната мощност на генератора. Тя е право пропорционална на тока по оста d , който създава реактивния въртящ момент и се задава от МТРА. Наличието на реактивна мощност дава възможност оптимално да се използва реактивният въртящ момент на генератора. Напрежението на постояннотоковия контур остава сравнително постоянно. Токът на мрежата по оста q е равен на нула и заданието да се обменя само активна мощност е спазено, както се вижда на последната диаграма на Фиг.115.

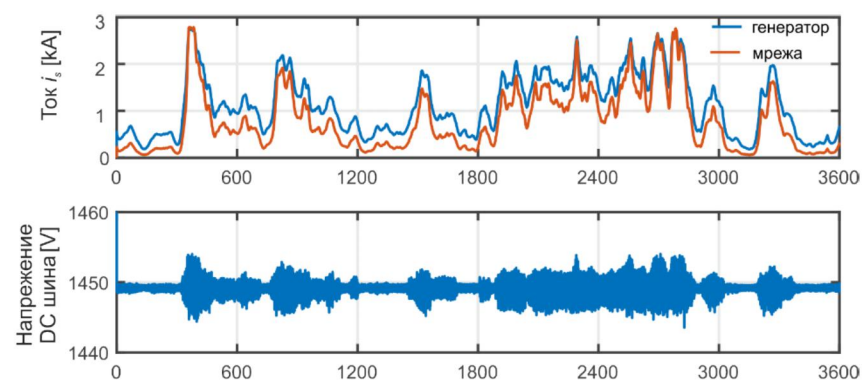


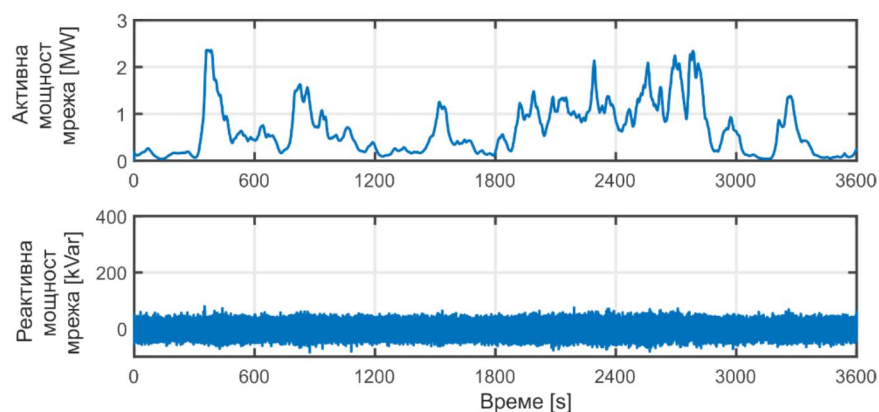


Фиг. 113 Реакция на системата при реално изменение на скоростта на вятъра.



Фиг. 114 Реакция на системата при реално изменение на скоростта на вятъра.



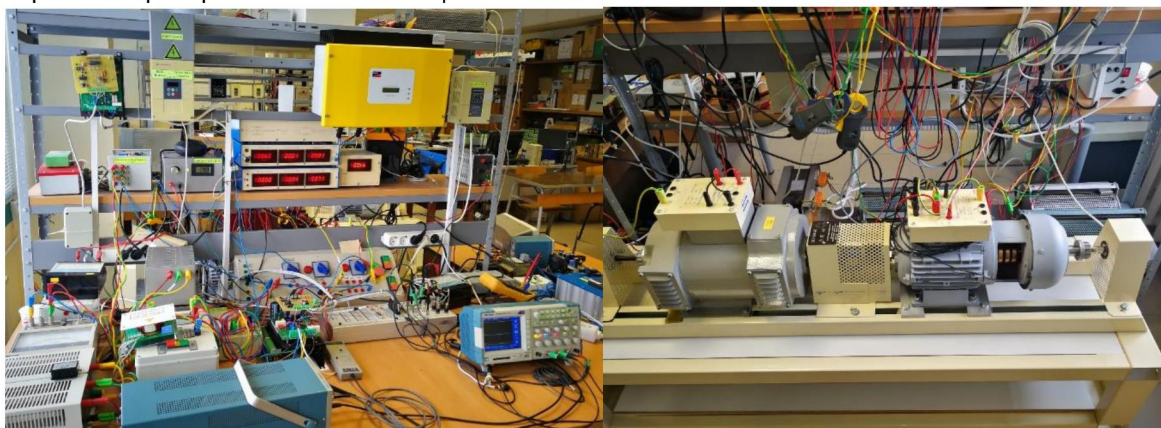


Фиг. 115 Реакция на системата при реално изменение на скоростта на вятъра.

ГЛАВА 4. Експериментално валидиране на управлението на мощността

4.1. Въведение

Микропроцесорната платформа dSPACE управлява електронните преобразуватели и имплементира създадените стратегии за управление в средата на Matlab/Simulink в опитната постановка. Задвижването на генератора се осъществява от постоянен ток двигател с електронно управление на скоростта на въртене. Той има за цел да замести вятърната турбина. За осъществяване на управлението на електронните преобразуватели, а от там и на енергийните потоци в системата, е осигурено измерване на токове и напрежения в различни точки от схемата, скоростта на въртене на ротора и неговата позиция. Реалната постановка е показана на Фиг.116 и 117.

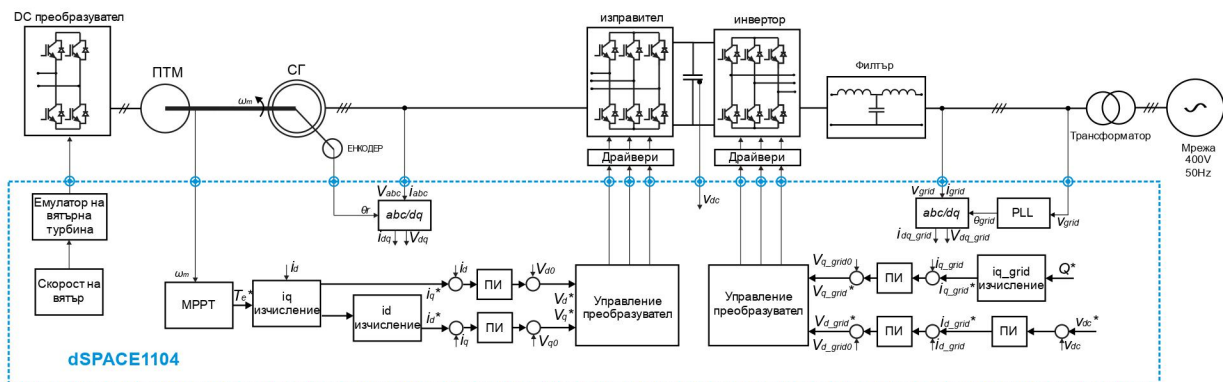


Фиг. 116 и 117 Изглед на експерименталния стенд.

4.1.1. Експериментална постановка

Експерименталният стенд се състои от:

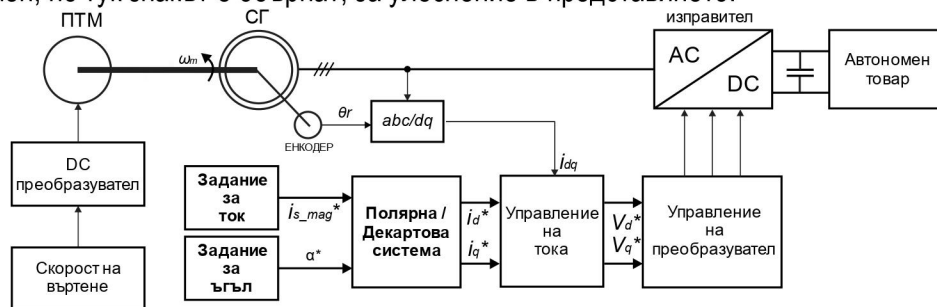
- Тестово устройство за емуляция на вятърни турбини с мощност 1500 W: То се състои от двигател за постоянен ток, захранван с електронен преобразувател, който се управлява от микропроцесорната платформа dSPACE 1104.



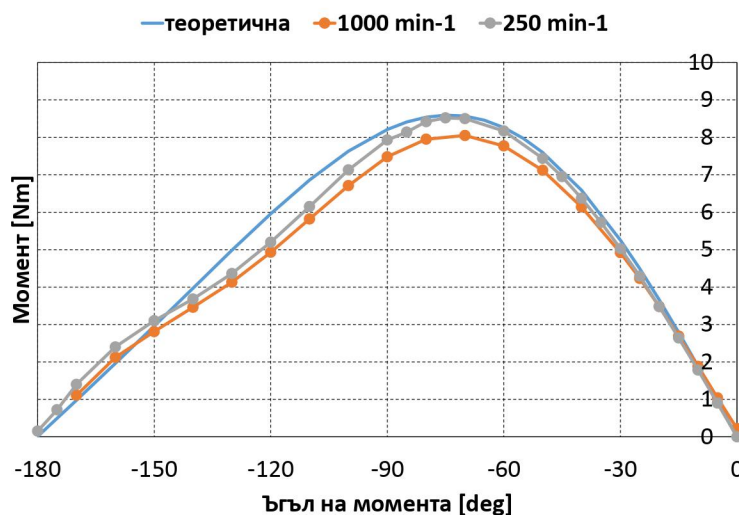
Фиг. 120 Схема на стенда с управлението.

4.3.1. Валидиране на векторното управление

Първо е направено валидиране на векторното управление. Схема на постановката е показана на Фиг.125. За целта преобразувателят страна мрежа е отделен и към постояннотоковия кръг е свързан диоден токоизправител. Целта е напрежението на DC шината да остане постоянно. Към нея е свързан също така и резистивен товар. Експериментът представлява управление на вектора на тока i_s . Опитът е проведен за скорост 1000 и 250 оборота в минута като измерванията са сравнени с теоретичната крива при 250 оборота в минута на Фиг.126. Съгласно избраната конвенция моментът е отрицателен, но тук знакът е обрънат, за улеснение в представянето.

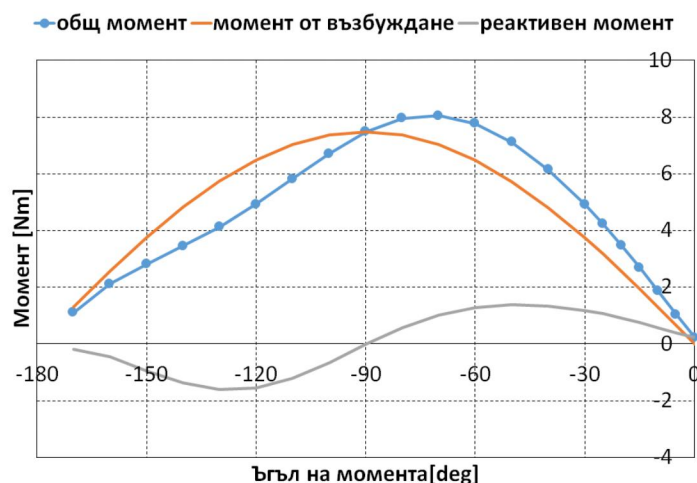


Фиг. 125 Схема на опитната постановка.



Фиг. 126 Експериментално получени ъгови характеристики на машината.

От направените експерименти са събрани данни, които чрез използването на формулите от глава 3, могат да се разделят активната и реактивната компонента на момента на машината. Това е показано на Фиг.127.

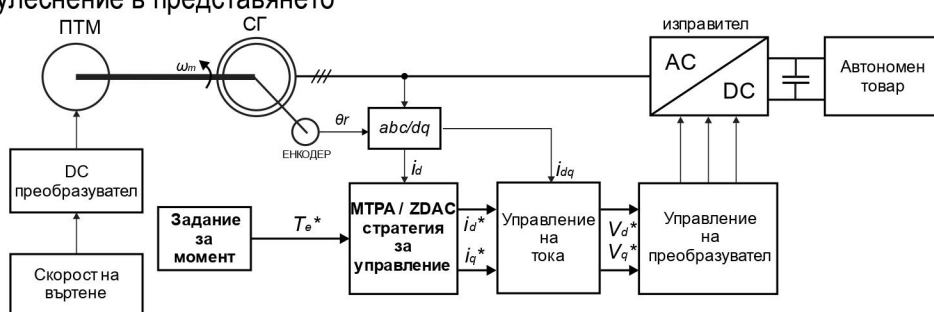


Фиг. 127 Активен, реактивен и пълен момент на машината.

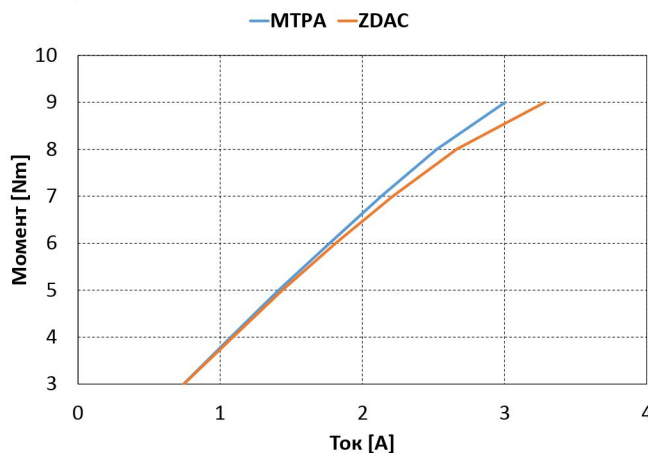
Характеристиката е снета при $n=\text{const}$, 1000 мин⁻¹ и при амплитуда на тока 3,1 А, която е обявената за машината. От данните се вижда, че моментът на използвания генератор е със сравнително малка реактивната съставна.

4.3.2. Валидиране на стратегиите за управление на момента

След като е установено правилното функциониране на векторното управление, са имплементирани двете стратегии за управление. Схема е показана на Фиг.128. Хардуерната част от постановката остава същата както при предишния опит, но софтуерната част е преработена. Тук се задават различни референтни стойности на въртящия момент, които се обработват от алгоритмите за управление. На базата на референтния момент и измервания се изчисляват заданията за токове i_d^* i_q^* . Резултати за скорост 250 и 1000 оборота в минута са показани на Фиг.130. Знакът на момента е обърнат за улеснение в представянето



Фиг. 128 Схема на управлението на мощността на генератора.

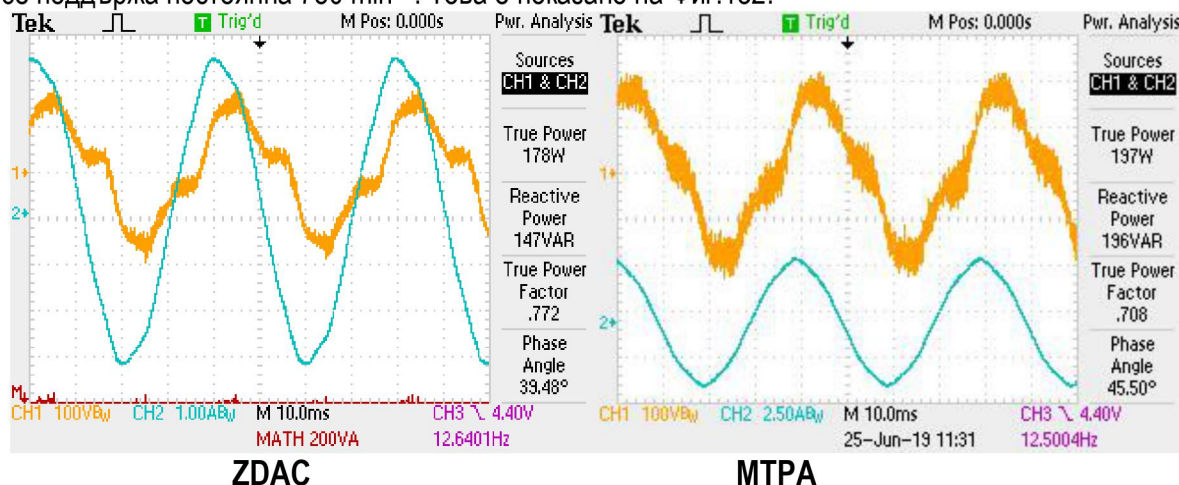


Фиг. 130 Общ статорен ток в зависимост от момента при 1000 мин⁻¹.

Експерименталното изследване потвърждава симулациите и показва, че стратегията за управление на максималния въртящ момент за ампер при явнополусна машина е по-ефективното управление в сравнение зануляването на тока по оста d . Генераторът, работещ с МТРА, постига

еднакъв въртящ момент в сравнение със ZDAC, но МТРА намалява статорния ток. При МТРА електрическите загуби в машината се свеждат до минимум. Така използването на МТРА оптимизира к.п.д. на системата. Методът става все по-подходящ с увеличаване на явноплюсността на машината.

След това двете управления са сравнени при еднакво задание за въртящ момент. Скоростта се поддържа постоянна 750 min^{-1} . Това е показано на Фиг.132.

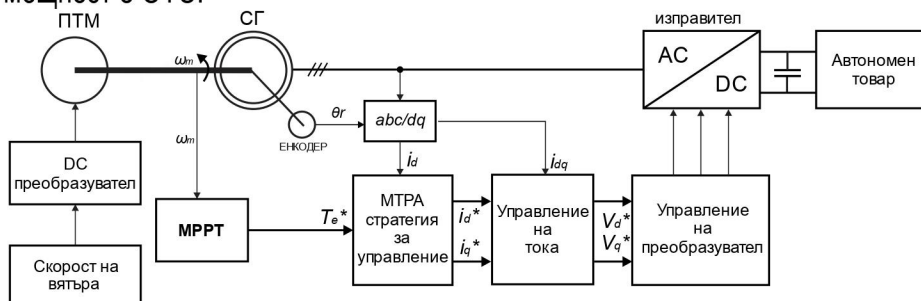


Фиг. 132 Ток и напрежение при 750 min^{-1} и при натоварване $8,2\text{Nm}$ и $9,03\text{Nm}$.

Резултатите показват, че с нарастване на натоварването използването на МТРА увеличава изходната мощност до 9,8% спрямо ZDAC. Също така се постига по-голям момент с една и съща стойност на статорния ток.

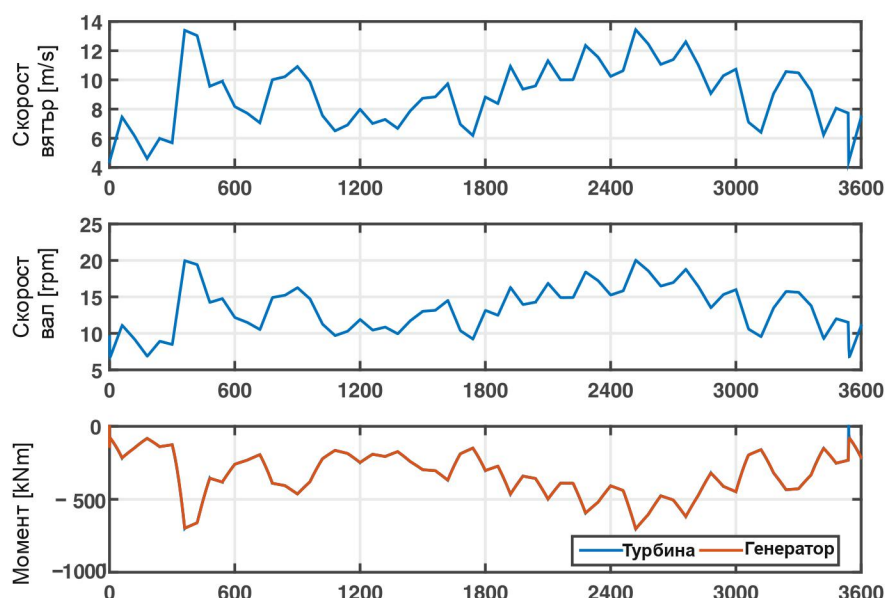
4.3.3. Валидиране на управление за търсене на точката на максимална мощност

Схема на експеримента е показана на Фиг.133. Целта е да се провери стабилността на управлението на мощността страна генератор. Използваният метод за следене на точката на максимална мощност е ОТС.



Фиг. 133 Схема на опитната постановка.

За провеждане на експериментите е използвана скорост на вятъра с редуциран брой точки, отчитайки възможностите на контролера. Симулираната скорост на вятъра съдържа 60 точки. Фиг.135 показва резултатите от симулация на работата на вятърна турбина за период 3600 s.

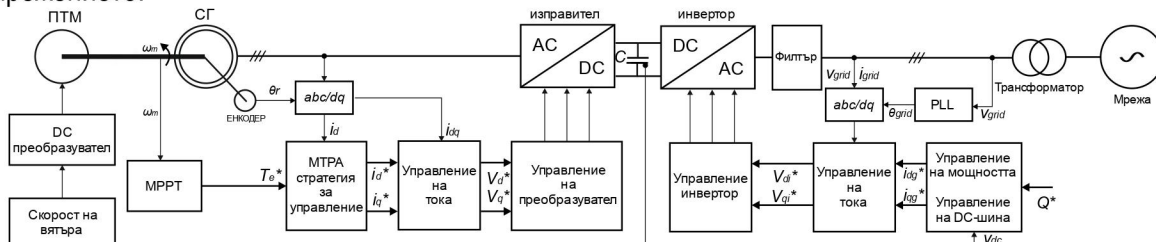


Фиг. 135 Симулация на системата.

Емулаторът следва заданието за скорости на вятъра. Резултатите от експеримента показват устойчивостта, ефективността и способността за изглаждане на мощността при използване на ОТС стратегията за следене на максимална мощност на турбината.

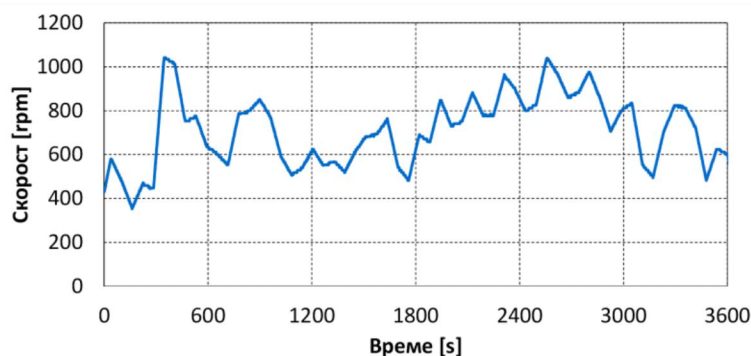
4.3.4. Валидиране на управлението с ориентация по напрежението

В тази точка са описани резултатите от експеримента на цялата система. Схема на постановката е показана на Фиг.142. Страната на генератора работи под описаната в предната точка комбинация, ОТС+МТРА. Преобразувателят страна мрежа, се управлява с метода за ориентация по напрежението.

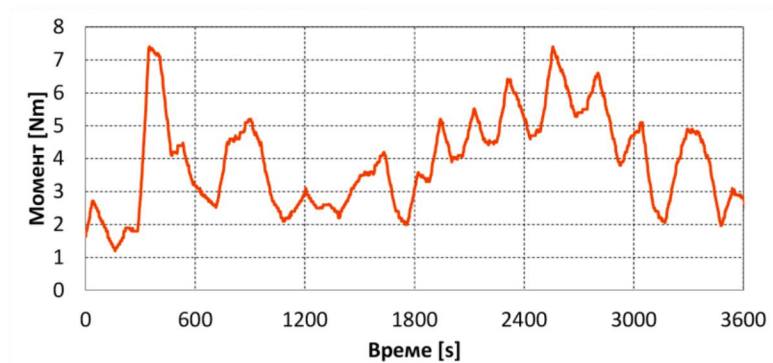


Фиг. 142 Схема на опитната постановка.

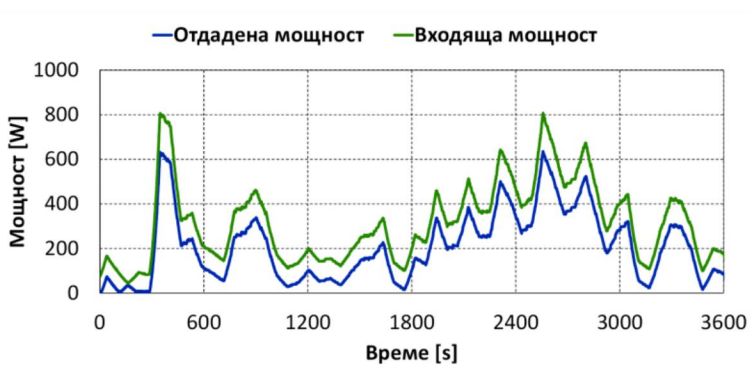
Експериментът е проведен за период от 3600s. Постигнатите резултати от работата на системата са представени на фигури от Фиг.143 до Фиг.147. Резултатите показват, че изходната мощност на системата има добра динамика. От Фиг.147 ясно се вижда, че i_{q_grid} остава нула, тоест заданието да се отдава само активна мощност се спазва. Забелязва се, че в началото и в края на цикъла токът i_{d_grid} обръща своя знак. Причината е, че системата започва да консумира мощност от мрежата, за да запази напрежението на постояннотоковия кръг и да покрие загубите в преобразувателите.



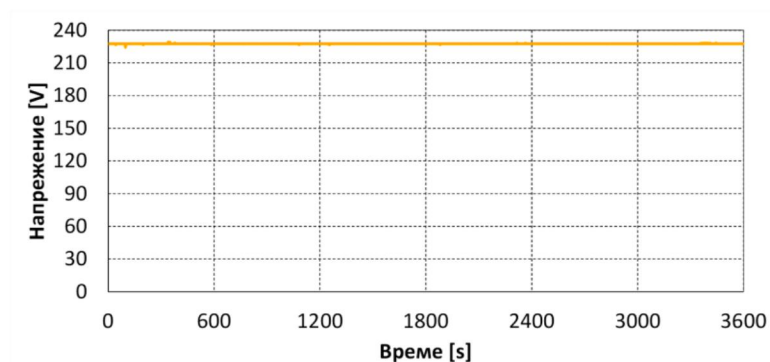
Фиг. 143 Скорост въртене на вала (експеримент).



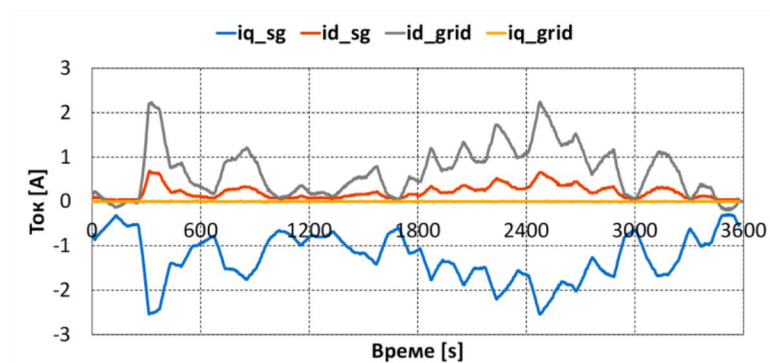
Фиг. 144 Въртящ момент на генератора (експеримент).



Фиг. 145 Входяща мощност на вала и отдадена мощност в мрежата (експеримент).

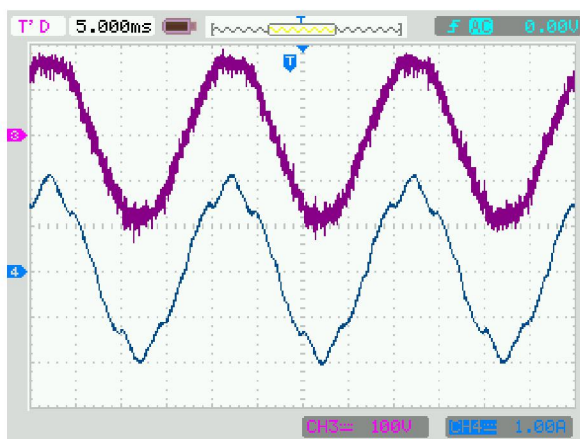


Фиг. 146 Напрежение на мрежата (експеримент).



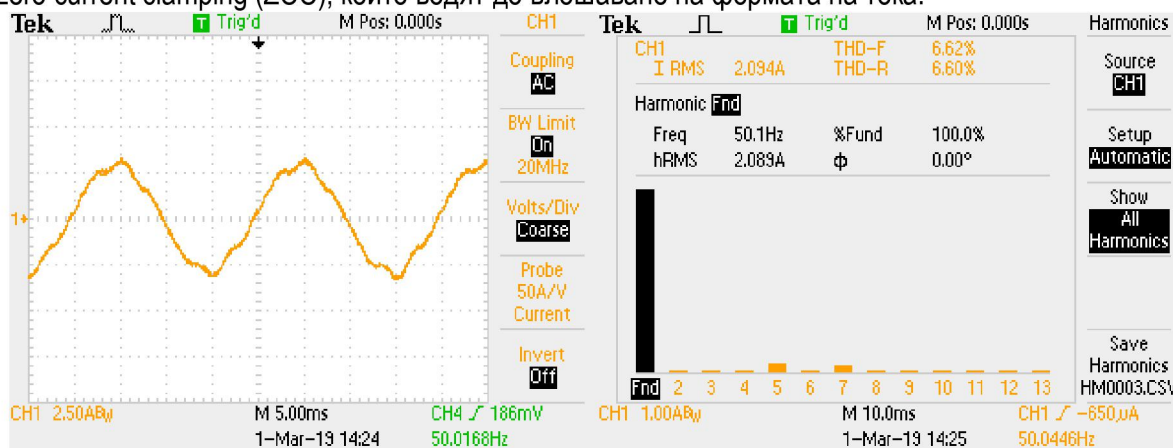
Фиг. 147 Статорен ток и ток отдаван в мрежата, в dq координатна система (експеримент).

Друго важно изследване представлява това за качеството на отдавана в мрежата енергия. Осцилограми на тока и напрежението са показани на Фиг.149. Осцилограмата е снета при пълно натоварване на системата.



Фиг. 149 Линеен ток и фазово напрежение на мрежата (преди трансформатора).

Формата на тока е близка до синусоида, но се наблюдават изкривявания. Основната причина за този резултат е наличието на нискочестотни хармоници. Хармоничният анализ на Фиг.150 показва явно изразено наличие на 5ти и 7ми хармоник в тока. Те са типични за преобразувателите поради мъртвото време на превключващите сигнали. Когато импулсите са прекалено къси, мъртвото време спира PWM и няколко импулса се пропускат. Резултатите са ефектът на мъртвото време и ефектът zero current clamping (ZCC), които водят до влошаване на формата на тока.



Фиг. 150 Ток фаза А, отдаван в мрежата.

Общият хармоничен състав на тока е 6,62%, като 5тият хармоник е 4,7%, а 7мият е 3,9%. Наличието на хармоници в тока може да се обясни и с тяхното наличие в напрежението на мрежата, както се вижда от Фиг.149.

Изследванията показват, че наличието на хармоници в тока към мрежата се дължи на:

- изкривяванията в напрежението на мрежата, което не е чисто синусоидално.
- изкривявания в напрежението на инвертора, дължащи се най-вече на мъртвото време при превключванията на транзисторите.
- наличието на кондензатори във филтъра, които усилват хармоничните съставки от нисък ред на тока.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Разработен е симулационен модел на вятър, обединяващ нискочестотната и високочестотната компонента и модел на вятърна турбина с директно задвижване.
- Разработен е симулационен модел на многополюсен синхронен генератор с вътрешно разположени магнити с използване на обобщената теория на електрическите машини.
- Разработени са симулационни модели на двупосочен трифазен преобразувател, активен изправител работещ съвместно със СГПМ и осъществяващ заложените стратегии за управление на генератора, и трифазен инвертор с филтър за връзка с към мрежата.
- Разработено е управление на мощността на ВЕПС, съставено от три подсистеми: управление за следене на точката на максимална мощност, управление на момента на генератора и управление на връзката с мрежата, включващо алгоритъм за синхронизация по честота и фаза (PLL) и управление на отдадената мощност.
- Сравнени са различни методи за управление на турбината и генератора, като е доказано, че оптималното управление на момента, съчетано с управлението максимален въртящ момент за ампер са най-подходящи за системата.
- Разработен е цялостен симулационен модел на ВЕПС с СГПМ и електронни преобразуватели, който включва подсистема за преобразуване на енергията и подсистема за управление на мощността при променлива скорост на вятъра.
- Предложен е симулационен модел на СГПМ с отчитане на нелинейността на магнитната система и променливи индуктивности.
- Разработен е 3D модел с МКЕ на многополюсен СГ с ПМ и са определени зависимостите на синхронните индуктивности от съставките на тока.
- Предложен е усъвършенстван метод „Максимален въртящ момент за ампер (МТРА)“ за управление на СГПМ с отчитане на промяната на индуктивностите и е доказано, че с прилагането му се намаляват загубите в машината.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Усъвършенстван е стенд за изследване на ВЕПС със синхронен генератор в лабораторни условия.
- Разработено е програмно осигуряване, имплементиращо предложените методи за управление на ВЕПС върху платформата dSPACE.
- Проведени са експериментални изследвания и са получени потвърдителни резултати за валидността на разработените алгоритми и модели на управлението на мощността на ВЕПС.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Зарков, З., Б. Демирков, Л. Стоянов, И. Бачев, В. Лазаров, Състояние и развитие на съвременните ветроенергийни преобразувателни системи (1 част), Годишник на Технически Университет - София, т. 67, кн. 1, 2017, стр. 311-319.
2. Зарков, З., Б. Демирков, Л. Стоянов, И. Бачев, В. Лазаров, Състояние и развитие на съвременните ветроенергийни преобразувателни системи (2 част), Годишник на Технически Университет - София, т. 67, кн. 1, 2017, стр. 321-330.
3. Z. Zarkov, B. Demirkov, Power control of PMSG for wind turbine using maximum torque per ampere strategy," 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 2017, pp. 292-297.

4. Зарков, З., В. Лазаров, Л. Стоянов, И. Бачев, Б. Демирков, *Физическо моделиране на ветроенергийни преобразователни системи със синхронни генератори с постоянни магнити*, *Годишник на Технически Университет - София*, т. 68, кн. 1, 2018, стр. 263-272.
5. B. Demirkov and Z. Zarkov, "Study of Two MPPT Methods for High Inertia Wind Turbine with Direct Driven PMSG," *2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, 2018, pp. 1-4.
6. B. Demirkov, "Improved Wind Turbine Control using Maximum Torque per Ampere control strategy taking into account the magnetic saturation," *ELECTROTECHNICA & ELECTRONICA*, vol. 54, 1-2, pp. 26-34, 2019
7. B. Demirkov and Z. Zarkov, "Study of Physical Model of WECS with Synchronous Generator and Back-to-back Converter," *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-6.

SUMMARY

The dissertation studies the power control in variable speed wind energy conversion systems (WECS). Different areas of work and the specific area for which the developed power control system will be used are presented. The models of the elements of the entire wind conversion system are described in detail. The turbine and blade orientation system, the permanent magnet synchronous generator, and the two-way converter controlled by space-vector modulation connected to the grid via a filter. A mathematical and simulation model was created for each of them in Matlab / Simulink. The wind turbine model is selected from the literature. The generator is modeled by expressing the voltage stator equations in a synchronous coordinate system. A WECS power control system was developed by incorporating a generator control using the MTPA strategy and the maximum power point method - Optimal Torque Control (OTC). Voltage Orientation Control (VOC) is used for the control of the grid side converter. The field oriented vector control of the generator is developed by a current control consisting of two PI controllers. They are theoretically developed and validated by the simulation results. The main advantage of the strategy used in the control is that it can generate the required torque with minimal stator current. This is validated through simulations and experiments. It is proposed to upgrade the control strategy maximum torque per ampere, by taking into account the machine saturation. A mathematical and simulation model of PMSG with saturation and variable inductances L_d and L_q is proposed. The developed power control was implemented in an experimental bench using dSPACE DS1104. Experiments confirm the results of the simulations. The system maximizes wind energy extraction and delivers it to the grid. The control is stable and shows good dynamics under variable wind speeds.