

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

ДИПЛОМНА РОБОТА
на тему:
**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З
МОЖЛИВОСТЯМИ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА БАЗІ
ВІТРОГЕНЕРАТОРА**

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-
професійної програми «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ **Олексій ШТОГРІН**

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«___» _____ 2024 р.

Керівник проектної групи
(гарант освітньої програми)

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2024р.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить: сторінок – 100, рисунків – 41, таблиць – 25 та 56 посилань.

В магістерській роботі проведено дослідження системи генерування електроенергії з можливостями активної фільтрації. На основі аналітичного огляду для розглянутої системи було обрано генератор на базі машини подвійного живлення та розглянуто методи компенсації за допомогою такого генератора. Детально розглянуто гармонічні компенсації машини подвійного живлення засобами роторного та мережевого перетворювача.

Під час проведення дослідження було розроблено математичну модель системи генерування електроенергії та виконано моделювання роботи машини подвійного живлення з алгоритмам компенсації гармонік. Моделювання проводилось у програмі Pscs. Виконавши дослідження, було встановлено, що запропонована система є ефективною для компенсації спотворень струму.

МАШИНА ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ, АКТИВНИЙ ФІЛЬТР,
РОТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МЕРЕЖЕВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ,
НЕЛІНІЙНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,
КОМПЕНСАЦІЯ ГАРМОНІК

ЗМІСТ	
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІТРОГЕНЕРАТОРАМИ	12
1.1. Типові технічні рішення вітрогенераторів	12
1.2 Якість електроенергії та шляхи її покращення	16
1.3 Активні фільтри електроенергії.....	23
Висновок до розділу 1	25
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВІТРОГЕНЕРАТОРОМ.....	26
2.1. Математичне моделювання генератора на базі машини подвійного живлення	26
Висновки до розділу 2	35
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРА НА БАЗІ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ (МПЖ) З МОЖЛИВІСТЮ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ.....	36
3.1 Еквівалентна схема та аналіз МПЖ	36
3.2 МПЖ як гібрид синхронної та асинхронної машини.....	39
3.3 Режими роботи МПЖ	47
3.5 Принципи компенсації гармонік МПЖ	50
Висновок до розділу 3	54
РОЗДІЛ 4. КОМПЕНСАЦІЯ ГАРМОНІК ЗАСОБАМИ КЕРУВАННЯ РОТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ МПЖ	55

4.1 Підсистема роторного перетворювача.....	55
4.2 Передатна функція РП.....	59
Висновок до розділу 4	64
РОЗДІЛ 5. КОМПЕНСАЦІЯ ГАРМОНІК ЗАСОБАМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ МПЖ	65
5.1 Підсистема мережевого перетворювача.....	65
5.2 Передатна функція МП.....	68
Висновок до розділу 5	74
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ІЗ ЗАПРОПОНОВАНИМ АЛГОРИТМОМ КЕРУВАННЯ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	74
6.1 Активна фільтрація струму мережі за допомогою керування МПЖ	74
6.2 Результати моделювання системи генерування електроенергії на базі МПЖ	75
Висновок до розділу 6	80
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ	81
7.1 Опис ідеї проєкту	81
7.2 Технологічний аудит проєкту.....	83
7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	83
7.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	90
7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту.....	92
Висновки до розділу 7	94
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	97

ВСТУП

Актуальність роботи. Наявність гармонік у лініях електропередачі призводить до більш значних втрат електроенергії, може спричиняти шум у системах зв'язку та, іноді, призводить до збоїв у роботі електронного обладнання; які мають вищу чутливість через включення мікроелектронних систем керування, і ці системи є малопотужними пристроями, і тому невеликий шум може бути значним. Саме з цих причин питання про якість електроенергії є одним із найбільш актуальних для кінцевого користувача.

Міжнародні стандарти, щодо якості електроенергії, вимагають, щоби в електрообладнанні вміст гармонік не перевищував встановлених значень. Тим часом необхідно розв'язати гармонічні проблеми, спричинені вже встановленими пристроями. Використання пасивних фільтрів є одним з класичних рішень для розв'язання поточних гармонічних проблем, проте вони мають ряд недоліків, а саме: вони фільтрують тільки ті частоти, для яких вони були налаштовані раніше; їхня робота не може обмежуватися певним навантаженням; резонанси можуть виникати через взаємодію між пасивним фільтром та іншими навантаженнями, з непередбачуваними результатами. У результаті традиційні рішення, які спираються на пасивні фільтри для компенсування гармонік неефективні. У цих умовах було доведено, що найбільш ефективними рішеннями є активні фільтри, які можуть компенсувати не тільки гармоніки, а й асиметричні струми, спричинені нелінійними й незбалансованими навантаженнями.

Сучасні технології дають змогу керувати системами виробництва електроенергії на максимальній потужності більшу частину часу, використовуючи водночас певну потужність для додаткових функцій, які сприяють підвищенню якості електроенергії.

Комплекси генерування електроенергії на базі машини подвійного живлення (МПЖ) дають змогу досягти високої ефективності електромеханічного перетворення енергії, Такі комплекси характеризуються

тим, що цілі керування досягаються за варіації кутової швидкості в обмеженому діапазоні $\pm 30\%$ від синхронної швидкості обертання.

Поліпшення гармонічного складу вихідного струму перетворювачів під час роботи в складі систем генерування дає змогу зменшити додаткові втрати в електричній машині, зменшити пульсації моменту та небажані додаткові навантаження в механічній частині системи, що здатні спричинити резонансні явища та створювати акустичний шум.

Мета магістерської роботи. Метою магістерської роботи є дослідження можливості активної фільтрації в системі генерування електроенергії на основі машини подвійного живлення, задля компенсування гармонік та зменшення втрат.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати наявні конфігурації вітрогенераторів;
- побудувати математичну модель системи генерування електроенергії з вітрогенератором для майбутнього моделювання;
- розробити алгоритм керування для обраної системи;
- дослідити засоби компенсації гармонік;
- дослідити на математичній моделі систему керування з можливостями компенсації гармонік.

Об'єкт дослідження – процеси генерування електроенергії генератором на основі машини подвійного живлення.

Предмет дослідження – вітрогенератор на основі машини подвійного живлення (МПЖ) з функціями активної фільтрації струму.

Методи дослідження. У роботі використані фундаментальні положення теорії електропривода, теоретичної механіки, комп'ютерне моделювання. Для того, щоб підтвердити отримані теоретичні знання було проведено моделювання в програмі PLECS.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено алгоритм компенсації гармонічних складових струму за допомогою генератора на основі машини подвійного живлення, який, дає змогу здійснити компенсацію гармонічних складових струму.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведеного узагальненого огляду систем генерування електроенергії з вітроенергетичними генераторами показано необхідність системного підходу до досліджень систем компенсації гармонічних складових струму засобами перетворювача в ланці ротора машини подвійного живлення.

Досліджено алгоритм керування вітрогенератором на базі машини подвійного живлення з можливостями активної фільтрації дає змогу змінювати швидкість обертання ротора в діапазоні 30%, працювати з зменшенням втрат завдяки перетворювачу, а також компенсувати гармоніки роторним та мережевим перетворювачем.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянуто систему генерування електроенергії з можливостями активної фільтрації. Було визначено, що на теперішній час, найбільш ефективними рішеннями компенсації є активні фільтри, які можуть компенсувати не тільки гармоніки, а й асиметричні струми, викликані нелінійними і незбалансованими навантаженнями. У роботі було розглянуто алгоритм керування вітрогенератора на базі машини подвійного живлення з можливостями саме активної фільтрації й засоби компенсації гармонік під час керування роторним та мережевим перетворювачами МПЖ.

1. В аналітичному огляді були описані методи компенсації гармонік та загальні спотворення гармонічних характеристик. Розглянуто конфігурації вітрових турбін з фіксованою швидкістю, зі змінною швидкістю та на базі машини подвійного живлення. Були визначені переваги та недоліки цих конфігурацій. Також в цьому розділі розглянуто активний фільтр електроенергії та якість електроенергії й гармонічні спотворення.

2. Було представлено математичну модель генератора на базі МПЖ. Де було приведено, спрощено, описані різноманітні рівняння за допомогою трансформацій й не тільки.

3. Проаналізовано роботу машини подвійного живлення. МПЖ має більш складну конфігурацію, ніж традиційна асинхронна машина, але можливість керування має суттєві переваги. Потужність ротора може істотно сприяти збільшенню вихідної потужності на надсинхронних швидкостях й МПЖ може працювати як двигун або як генератор для будь якого значення ковзання.

4. Описано компенсацію гармонік за допомогою роторного перетворювача й коли її можна успішно застосувати для отримання синусоїдального струму в мережі. Але потрібно зазначити, якщо амплітуди гармонічних складових занадто високі, РП компенсація має обмеження, оскільки компенсація гармонічних струмів призводить до насичення силових перетворювачів.

5. Була представлена й розглянута система керування компенсації за допомогою мережевого перетворювача. Цей метод є альтернативою компенсації за допомогою роторного перетворювача. Основною перевагою компенсації за допомогою МП є можливість компенсувати потрібні гармоніки, якщо ланка постійного струму підключена до нейтралі.

6. На основі розробленої математичної моделі системи генерування електроенергії з МПЖ виконано математичне моделювання роботи машини подвійного живлення з алгоритмам компенсації гармонік. Де було зрозуміло, що запропонована система ефективна для компенсації струмових спотворень.