

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:

***«Інтелектуальна система управління відбором потужності
вітроустановки у складі вітроелектростанції»***

Виконав студент гр. АКІТ-22ск	_____	Бєляєв С. Е.
Керівник	_____	Жосан А. А.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 29 » січня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22ск Бєляєву Станіславу Едуардовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Інтелектуальна система управління відбором потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції у»

затверджено наказом по університету № 106с від 31.01.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 06.06.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 62с., презентація у Microsoft PowerPoint (14 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Жосан А. А.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.25</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.25</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.25</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.25</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>03.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2025р.

Керівник _____ / Жосан А. А./

7. **Запевнення:** Я, Бєляєв Станіслав Едуардович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Бєляєв С. Е./

АНОТАЦІЯ

Беляєв С. Е. Інтелектуальна система управління відбором потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 62 с.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи вітроустановки у складі вітроелектростанції в електроенергетичній системі.

У першому розділі розглянуто типову конструкцію вітрогенератора та визначено основні вузли. Визначено основні конструкції вітрогенераторів, що використовуються у складі вітроенергетичних установок. Проаналізовано основні переваги та недоліки кожного типу. Встановлено, що для розробки інтелектуальної системи доставки енергії вітру на вітрову електростанцію для великих і потужних вітроелектростанцій раціонально використовувати горизонтально-осьові вітроенергетичні установки, оскільки їх ККД значно вищий, ніж установок з вертикально осьовою конструкцією.

У другому розділі визначено, що для розробки моделі інтелектуальної системи видачі потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції найбільш підходящим програмним продуктом є програмний комплекс PSCAD. Виконано моделювання і порівняння результатів дозволяють стверджувати про адекватність моделі. Адекватність розробленої моделі дає можливість використовувати її для моделювання режимів роботи енергосистем за наявності генерації, заснованої на перетворенні енергії вітру.

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, ВІТРОТУРБИНА, ГЕНЕРУЮЧА
УСТАНОВКА, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ,
РОЗПОДІЛЬЧА ГЕНЕРАЦІЯ, PSCAD

					<i>КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ</i>						
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>АНОТАЦІЯ</i>				<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Беляєв С.Е</i>									
<i>Перевір.</i>		<i>Жосан А.А.</i>									
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>							<i>КНУ АКІТ-22ск</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>									

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПИТАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	9
1.1 Поняття об'єкта розподіленої генерації.....	9
1.2 Існуючі види схем видачі потужності об'єктів розподіленої генерації..	10
1.3 Інтелектуальна система керування відбором потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції.....	11
1.4 Існуючі конструкції вітротурбін.....	13
1.4.1 Вітротурбіни з горизонтальною віссю.....	13
1.4.2 Вітротурбіни з вертикальною віссю	14
1.5 Застосування генераторів різної конструкції в складі вітроенергетичних установок.....	15
1.6 Аналіз існуючих алгоритмів керування вітроустановками.....	16
1.7 Постановка дослідження.....	26
Висновки за розділом.....	27
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	29
2.1 Вибір програмного продукту для моделювання	29
2.2 Інтелектуальна модель вітроелектростанції у програмному комплексі PSCAD	30
2.3 Механічна частина моделі.....	33
2.4 Електрична частина моделі.....	37
2.5 Моделювання роботи моделі інтелектуальної вітроелектростанції та верифікація результатів моделювання.....	50

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Беляєв С.Е.			ЗМІСТ				
Перевір.		Жосан А.А.							
Н. Контр.		Маринич І.А.			КНУ АКІТ-22ск				
Затверд.		Маринич І.А.							
					Літ.	Арк.	Аркушів		
						4	2		

Висновки до розділу.....	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	59

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Тенденція розвитку розподіленої генерації здебільшого має стихійний, неконтрольований державою характер, що може завдати суттєвої шкоди енергетичній безпеці країни.

Основними передумовами розвитку розподіленої генерації є:

- Обмежена можливість розвитку розподільчих мереж у великих містах (замкнені центри живлення);
- Значне зростання вартості електроенергії та дороговартісне приєднання до мереж, що контролюється енергопостачальними компаніями;
- Зростання споживання електроенергії за умов обмеженої пропускної здатності мережевого господарства та зношеності енергетичного комплексу;
- Переважання монопродукції (виробництво електричної енергії на великих АЕС і ДРЕС; виробництво тепла на котельнях) з незначною часткою впровадження технологій когенерації та тригенерації;
- Збільшення частки розподіленої генерації в енергосистемі дозволить знизити витрати на передачу та розподіл електроенергії по магістральних і розподільчих мережах;
- Ефективне використання вторинних енергоресурсів (відходи лісопереробки та сільського господарства, різноманітні гази — доменний, конвертерний, нафтовий попутний газ, метан) дозволить підвищити економічну ефективність основного виробництва;
- Не менш важливим є забезпечення надійного електропостачання соціально значущих та особливо відповідальних споживачів з метою мінімізації економічних і соціальних ризиків.

Незважаючи на ці передумови, існує низка проблем технологічного приєднання об'єктів розподіленої генерації

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Беляєв С.Е.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								6	2
								КНУ АКІТ-22ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

- Відсутність ефективних стимулюючих економічних механізмів розвитку розподіленої генерації на державному рівні;
- Високі адміністративні бар'єри та пасивність мережевих компаній щодо розвитку об'єктів розподіленої генерації;
- Тарифні диспропорції та перехресне фінансування внаслідок «ринкового» підходу генеруючих компаній і соціальних зобов'язань з боку Уряду;
- Збереження високих бар'єрів для входу – відмова у визнанні Гарантованим постачальником об'єктів розподіленої генерації на відміну від великих гравців – генеруючих компаній.

На даний час відсутні затверджені вимоги до розробки схеми видачі потужності об'єктів розподіленої генерації. Тому розробка таких вимог дозволить ефективно здійснювати технологічне приєднання об'єктів, що займаються виробництвом електричної енергії.

У районах, де відсутня можливість підключення до загальних мереж електропостачання, зручно використовувати вітрогенератори у складі альтернативних гібридних електростанцій. Альтернативні гібридні електростанції, до складу яких входять вітрогенератори, сонячні панелі, а також дизельні електростанції, є економічною альтернативою традиційному електропостачанню і можуть бути використані для організації електропостачання різних об'єктів.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи вітроустановки у складі вітроелектростанції в електроенергетичній системі.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання:

- Аналіз наявної проблематики об'єктів розподіленої генерації і зокрема вітроелектростанції у складі електроенергетичної системи;
- Розробка складу інтелектуальної системи видачі потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції.
- Розробка комп'ютерної моделі вітроелектростанції з інтелектуальною системою керування відбором потужності та її апробація.

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Актуальність роботи полягає в ряді важливих аспектів, які сприяють розвитку відновлювальної енергетики та оптимізації використання ресурсів:

1. *Зростання значення відновлювальних джерел енергії:* З огляду на зростаючі екологічні вимоги та необхідність зниження викидів CO₂ в атмосферу, вітрова енергетика стає важливою частиною глобальної енергетичної стратегії. Вітроелектростанції мають великий потенціал для забезпечення стійкої та чистої енергії.

2. *Необхідність покращення ефективності вітроелектростанцій:* Вітрові установки мають непередбачувану та змінну продуктивність через залежність від погодних умов (швидкість вітру, напрямок тощо). Розробка інтелектуальних систем управління, які здатні оптимізувати роботу вітроустановок, дозволяє зменшити втрати потужності та підвищити ефективність використання наявних ресурсів.

3. *Підвищення надійності та стабільності енергопостачання:* Розробка систем, які можуть оптимізувати відбір потужності залежно від умов вітру, дозволяє зменшити коливання у виробництві енергії, що важливо для забезпечення стабільності енергосистеми.

4. *Інтелектуальні технології та автоматизація:* Впровадження сучасних технологій на основі штучного інтелекту, машинного навчання та алгоритмів прогнозування дозволяє створити адаптивні та самонавчаючі системи, які зможуть реагувати на зміни умов роботи без необхідності постійного втручання людини.

5. *Економічна вигода:* Підвищення ефективності роботи вітроелектростанцій через оптимізацію відбору потужності дозволяє знижувати витрати на експлуатацію та обслуговування, що, в свою чергу, знижує загальну вартість виробленої енергії.

Загалом, така інтелектуальна система може стати важливим кроком у розвитку інноваційних технологій у сфері відновлювальної енергетики, що допоможе зменшити залежність від традиційних джерел енергії та зробити енергетичні системи більш екологічними та стійкими.

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПИТАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Поняття об'єкта розподіленої генерації

У всьому світі сформувалася тенденція розвитку та поширення розподіленої генерації. Історія свідчить, що масове розповсюдження об'єктів розподіленої генерації у світі розпочалося у 90-х роках минулого століття. Причиною цього стало розвиток і здешевлення технологій виробництва електроенергії на основі відновлюваних джерел енергії та технологій когенерації на основі газотурбінних і газопоршневих установок. Багато країн закріплюють статус розподіленої генерації на законодавчому рівні та її сукупність техніко-технологічних ознак [5].

Під терміном «розподілена генерація» розуміється сукупність модульних генеруючих установок, які виробляють електроенергію поблизу точки споживання, до яких, зокрема, належать і об'єкти – вітроелектростанції.

Зарубіжні країни переважно розвивають розподілену генерацію на основі відновлюваних джерел енергії. Немаловажливою відмінністю для об'єктів розподіленої генерації є їхня встановлена потужність, у точці приєднання не вища за максимально допустиму для локальних і роздрібних ринків. Відповідно до наведених визначень у WG 37.23 та WG C3.05 (Міжнародна рада з великих електроенергетичних систем високої напруги) об'єкти розподіленої генерації не є централізовано диспетчеризованими.

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Беляєв С.Е.								
Перевір.		Жосан А.А.							9	15
								КНУ АКІТ-22ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

1.2 Існуючі види схем видачі потужності об'єктів розподіленої генерації

Для надійного функціонування об'єктів розподіленої генерації та електричних мереж необхідно опрацювати цілий ряд технічних та схемних рішень, які враховують особливості роботи генеруючих установок малої потужності та функціонування розподільчих мереж. Ці рішення доцільно опрацьовувати в рамках позастадійної роботи – схеми видачі потужності електростанції.

Наразі проектувальники стикаються з деякими проблемами при розробці схеми видачі потужності об'єктів розподіленої генерації, спричиненими недосконалістю нормативно-технічної бази – відсутні затверджені вимоги до розробки схеми видачі потужності об'єктів розподіленої генерації, вимоги до генеруючих установок. Розробка схеми видачі потужності об'єктів розподіленої генерації має особливості практично на всіх етапах роботи.

Притаманне всім схемам видачі потужності об'єктів розподіленої генерації виникнення такого явища, як реверсивні потоки потужності, які можуть призвести до перевантаження силового обладнання та до помилкових спрацьовувань релейного захисту.

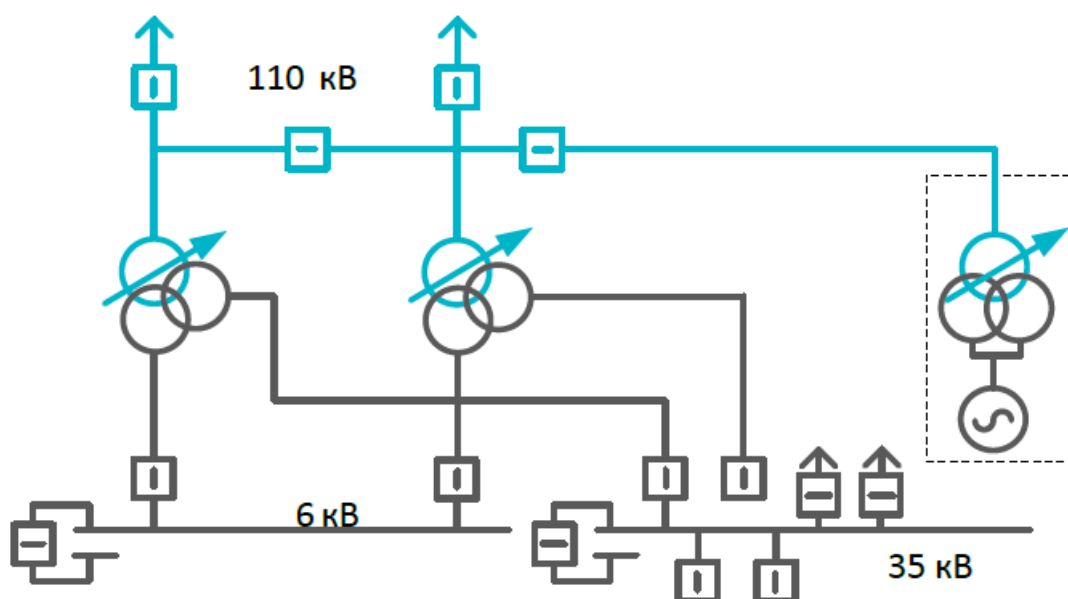


Рисунок 1.1 – Приклад схеми видачі потужності

1.3 Інтелектуальна система керування відбором потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції

На сьогоднішній день альтернативні джерела енергії стали популярними завдяки своїй високій екологічності. Інноваційні вітрогенератори, що працюють на середній потужності, досі мають низький коефіцієнт корисної дії. Для підвищення ефективності використовується перетворювач, підключений до вітрогенератора.

До складу сучасних вітроенергетичних установок входять різні сучасні технічні досягнення:

- система динамічної зміни кута атаки – призначена для динамічного змінювання кута розташування лопатей вітроколеса, тим самим забезпечуючи підтримання потрібної швидкості обертання вітроколеса;

- система динамічного регулювання швидкості обертання вітроколеса залежно від навантаження і швидкості вітру;

- система керування ризиканням (електронний флюгер) – призначена для стеження гондоли вітроенергетичних установок за напрямком вітру та відслідковування його змін;

- система регулювання магнітного ковзання для асинхронних двигунів.

Одним із останніх досягнень у галузі підвищення ефективності вітроенергетичних установок є установка з синхронним генератором, у статорі якого розміщені обмотки, виконані з кабелю, а ротор генератора виконано на постійних магнітах. Отриманий змінний струм низької частоти випрямляється, а потім перетворюється інвертором у змінний струм мережевої частоти. Генератор використовується без редуктора, оскільки має низьку швидкість обертання. Такі установки можна застосовувати на вітроелектростанціях потужністю від 500 кВт до 5 МВт і вище.

За станом вітроелектростанцій і режимами їх роботи слідкує контролер, який за показами датчиків фіксує короточасні перевищення напруги, що

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

виникають під час роботи. Такі підвищення відбуваються при коротких замиканнях, сильних поривах вітру та різкій зміні навантаження.

Основні особливості вітрогенераторів:

- Аеродинамічні характеристики ротора турбіни вітрогенератора - нелінійні.
- Діапазон зміни частоти обертання приводу - обмежений, швидкісний режим у зоні мінімальних значень, частотна смуга пропускання сигналу - незначна.

Головна мета керування полягає в зменшенні навантажень у турбіні, що дозволяє мінімізувати пошкодження. Остання вимога додає значну нелінійність у властивості всієї системи керування й дає незначний ефект за нормальних навантажень на турбіну, але фактично визначає ефективність та значущість проекту, а також його актуальність при виникненні випадкових сильних вітрових навантажень на щоглу вітрогенератора.

Основною проблемою роботи вітроелектростанцій великої потужності в складі централізованої енергосистеми є неможливість керування швидкістю вітру. Таким чином, потужність, яку видає вітроенергетична установка, може змінюватися в широких межах, а при перевищенні номінальної швидкості вітру для вітротурбіни необхідно від'єднувати генератор від мережі для запобігання його пошкодженню.

Для створення інтелектуальної системи керування видачею потужності необхідно:

- Розглянути різні типи вітротурбін, що застосовуються у потужних вітроенергетичних установках;
- Типи електричних генераторів, що застосовуються у складі вітроелектростанцій великої потужності;
- Існуючі алгоритми керування видаваною потужністю.

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.4 Існуючі конструкції вітротурбін

Усі конструкції вітротурбін можуть бути класифіковані, як показано на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Класифікація вітротурбін

Розглянемо детальніше кожен конструкцію вітротурбін щодо можливості їх застосування у складі потужної вітроустановки.

1.4.1 Вітротурбіни з горизонтальною віссю

Розглядаючи різні конструкції вітротурбін, можна сказати, що різні модифікації вітротурбін мають у своїй конструкції здебільшого від однієї до трьох лопатей, однак можуть зустрічатися і установки з більшою кількістю лопатей. Цей вид вітротурбін має такі переваги:

- Високий ККД, досягає 40–50%;
- Низькі масогабаритні характеристики;
- Можливість застосування пристроїв регулювання кута атаки лопатей;
- Висока інерційність;
- Початок роботи навіть за низьких швидкостей вітру.

До недоліків таких вітротурбін можна віднести:

– Необхідність орієнтації за напрямком вітру, а постійна орієнтація знижує їхню ефективність.

Орієнтуючись на міжнародний досвід використання вітротурбін у складі потужних вітроелектростанцій, можна сказати, що потужність вітрогенераторів з горизонтальною віссю може досягати 7 МВт, що є перевагою використання їх у складі вітроелектростанцій, а не в побутових вітроенергетичних установках.

1.4.2 Вітротурбіни з вертикальною віссю

У порівнянні з попередніми установками, вітротурбіни з вертикальною віссю мають більш низьку ефективність і застосовуються в основному в побутових і малопотужних вітроенергетичних установках – це є їх основним недоліком.

Причини більш низької ефективності установок з вертикальною віссю:

– Лопаті установки при обертанні зазнають більше опору, оскільки частина циклу обертання лопаті повинна рухатись у напрямку, протилежному напрямку вітру;

– Висота установки турбін значно нижча, ніж у турбін з горизонтальною віссю, тому швидкості вітру на висоті їх установок значно нижчі.

– Підвищена вібрація, шум внаслідок більшої турбулентності повітряного потоку на малій висоті установки вертикальної вісі турбіни і як наслідок швидкий вихід з ладу опорних конструкцій установок.

Таким чином можна зробити висновок, що для великих і потужних вітроенергетичних установок необхідно застосування турбін з горизонтальною віссю, оскільки їх ефективність значно вища, ніж у установок з вертикальною віссю. Висота установки такої турбіни може бути визначена в залежності від місцевості та регіону будівництва вітроенергетичних установок.

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5 Застосування генераторів різної конструкції в складі вітроенергетичних установок

Схематично конструкцію вітрогенератора можна представити, як показано на рисунку 1.3. До складу вітроустановки входить генератор, який з'єднаний через трансмісію з віротурбіною вертикального типу.

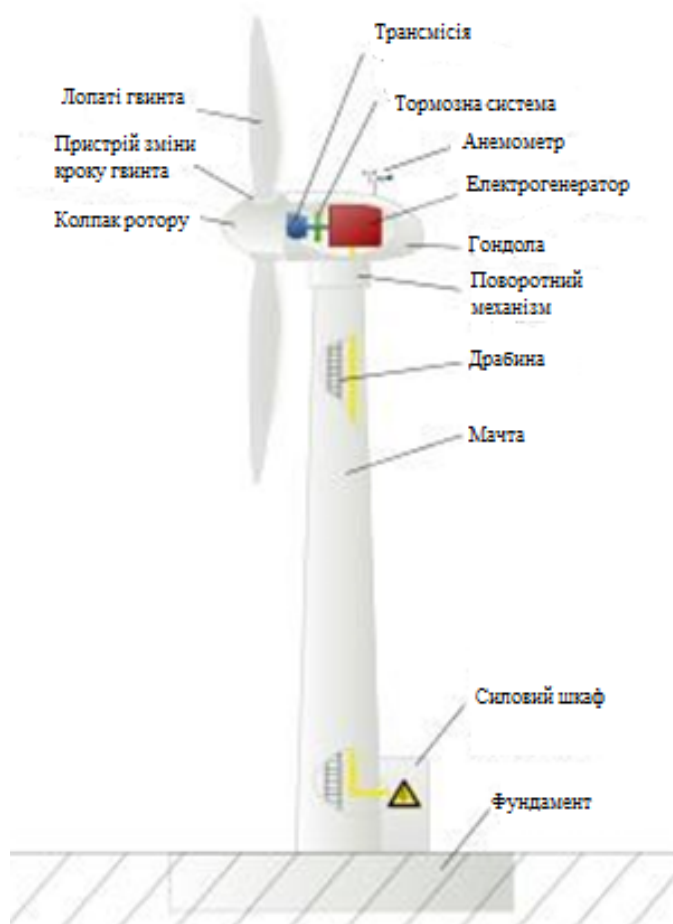


Рисунок 1.3 – Конструкція вітрогенератора

В складі вітроустановки можуть застосовуватися різні типи генераторів.

Виходячи з цього, аналізуючи різні типи генераторів для використання в складі потужної вітроелектростанції, що працює паралельно з мережею найбільш ефективним можна вважати використання синхронного генератора з класичною конструкцією. Перевагами є можливість видачі великої потужності. Недоліком цього генератора є висока ймовірність виникнення нестійкої роботи в режимі паралельної роботи з мережею при різких перепадах

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

вітрового навантаження. Для компенсації цього недоліку будуть розглянуті різні алгоритми управління та інтелектуальні системи видачі потужності вітроустановки в складі потужної вітроелектростанції.

1.6 Аналіз існуючих алгоритмів керування вітроустановками

Простішим варіантом системи управління вітроустановкою є системи, в яких використовується проміжний накопичувач енергії (акумуляторна батарея). Оскільки швидкість вітру непостійна, то і змінна напруга, що видається генератором вітроустановки, буде залежати від цього показника. Генератор підключається через випрямляч до накопичувача енергії та виконує його заряд. Блок-схема функціонування цього простого алгоритму представлена на рисунку 1.4.

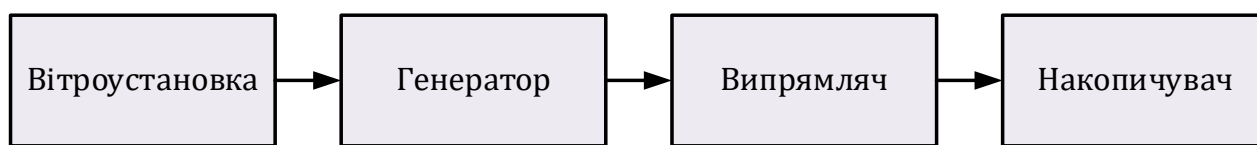


Рисунок 1.4– Блок схема алгоритму з генератором, що обертається на постійній частоті

Збільшення швидкості обертання вітроустановки призводить до збільшення струму заряду накопичувача енергії і, як наслідок, до збільшення електромагнітного моменту, що обмежує подальше збільшення швидкості обертання вітроустановки. Зменшення швидкості вітру, навпаки, призводить до зниження струму заряду накопичувача і, як наслідок, до зниження електромагнітного моменту, що дозволяє досягти стабільної частоти обертання вітроустановки.

Таким чином, при реалізації подібного алгоритму система автоматично прагне до стабілізації при відсутності зовнішнього управління. Простота реалізації цього алгоритму та відсутність великої кількості пристроїв свідчать про високу надійність його роботи, однак застосування цього алгоритму

вимагає встановлення додаткових обмежень на вітроустановки, спрямованих на захист її від роботи в ненормальних режимах.

Більш складним варіантом реалізації алгоритму управління вітроустановкою є алгоритм, що включає можливість перемикання обмоток генератора, тобто реалізація так званого ступінчатого регулювання видаваної потужності в залежності від швидкості вітру. Блок-схема реалізації цього алгоритму представлена на рис. 1.5.

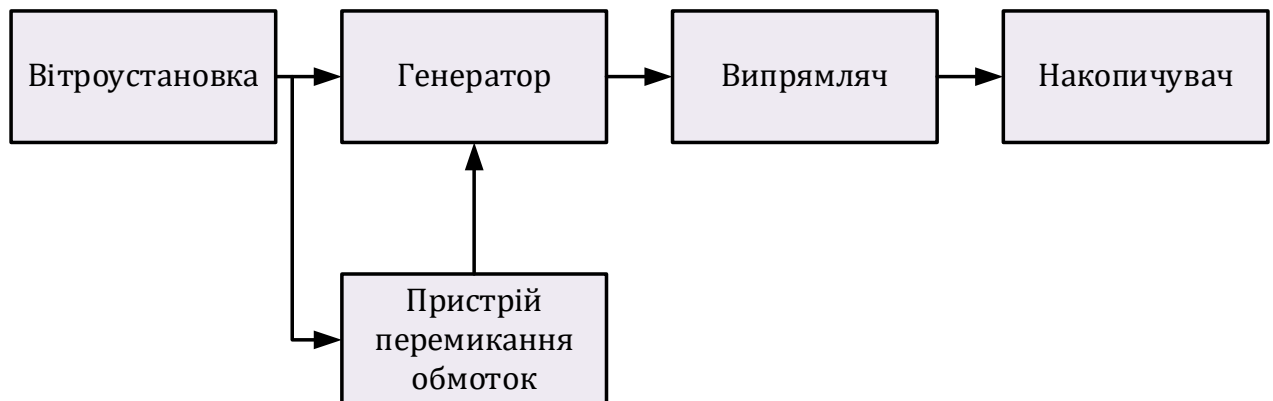


Рисунок 1.5 – Блок схема алгоритму з перемиканням обмоток генератора з застосуванням електромеханічних пристроїв

З ростом обертів збільшується відцентрова сила, що дозволяє використовувати механічні пристрої, які автоматично та безпосередньо перемикають обмотки.

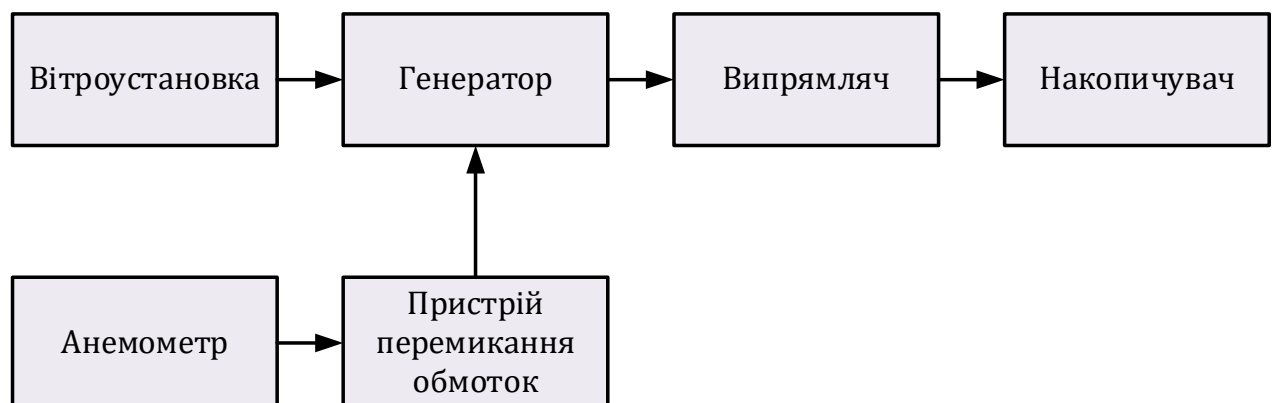


Рисунок 1.6 – Блок схема алгоритму з перемиканням обмоток генератора з застосуванням анеометра

Аналогічно, можливе застосування анемометрів, які дозволяють задати в системі параметри перемикання обмоток за певними значеннями швидкості вітру. Використання додаткових пристроїв призводить до зниження надійності цієї системи, однак вона є більш поширеною, ніж перший алгоритм (рис. 1. 6).

Ще однією варіацією алгоритму зі ступінчастим регулюванням є алгоритм із застосуванням проміжного пристрою передачі механічного моменту з вітроустановки на генератор (коробка передач, редуктор). Функціональна блок-схема такого алгоритму представлена на рисунку 1.7. Недоліком цього алгоритму є наявність додаткових механічних втрат у зв'язку з «Редуктором».

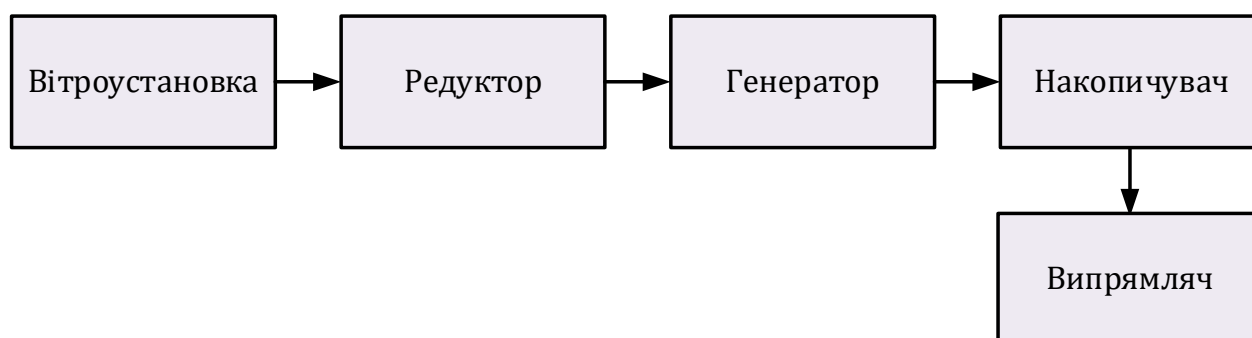


Рисунок 1.7– Блок схема алгоритму з редуктором

Принципово іншим способом управління вітроустановкою є регулювання аеродинамічних характеристик. Регулювання може здійснюватися за рахунок зміни установчого кута лопатей вітроустановки або інших її геометричних характеристик, здатних вплинути на частоту обертання вітроколеса. При реалізації цього алгоритму також присутній ряд недоліків, характерних для попередніх алгоритмів: застосування додаткових механічних пристроїв, які здійснюють регулювання геометричних параметрів вітроколеса. Однак, розглядаючи цей спосіб регулювання, можна відзначити переваги, пов'язані з більш точним і плавним регулюванням видаваної потужності

вітроустановкою. Блок-схема реалізації цього алгоритму представлена на рисунку 1.8.

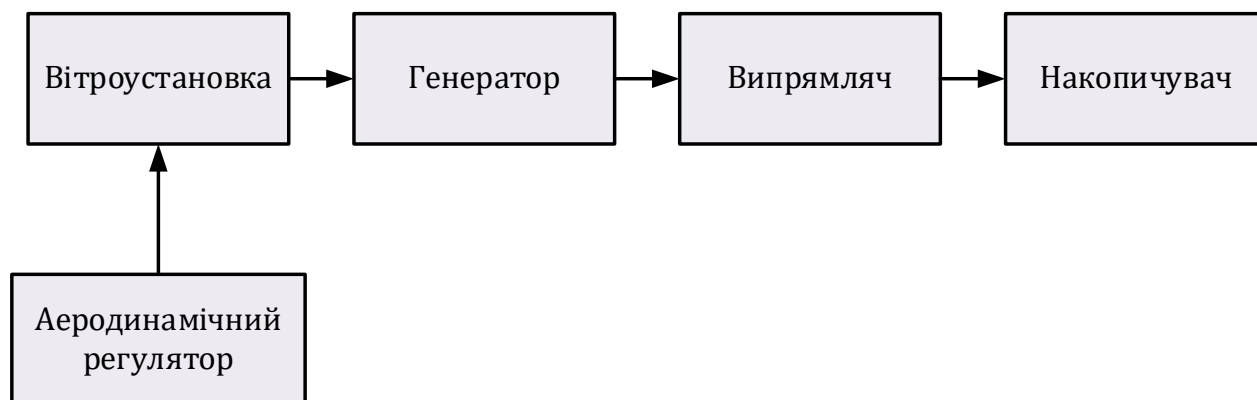


Рисунок 1.8 – Блок схема алгоритму з аеродинамічним регулятором

Проте, застосування механічних пристроїв веде до значного ускладнення конструкції вітроколеса, суттєвого зниження надійності та підвищення вартості установки. Окрім цього, виникає необхідність у отриманні регульовальної залежності потужності вітроустановки від кута установки лопаті. Крім того, суттєвим недоліком є також вузький діапазон регулювання: на великих швидкостях вітру потрібна досить велика жорсткість пружин, однак при високих швидкостях вітру надмірна жорсткість пружин не дозволить здійснити складення лопатей і гальмування вітроколеса.

Найбільш ефективними та поширеними в даний час системами є вітроенергетичні установки, що працюють на змінних швидкостях обертання і містять електричний перетворювач [10]. Його застосування дозволяє здійснювати управління без будь-яких допоміжних механічних регуляторів, хоча часто використовуються механічні або електромеханічні пристрої для аварійного гальмування в разі необхідності. Водночас, таке регулювання є досить плавним, щоб говорити про його високу ефективність на різних швидкостях вітру. З іншого боку, виникає потреба у застосуванні електричного перетворювача, виготовленого з якісних і надійних елементів. Структурна схема такої системи представлена на рисунку 1.9.

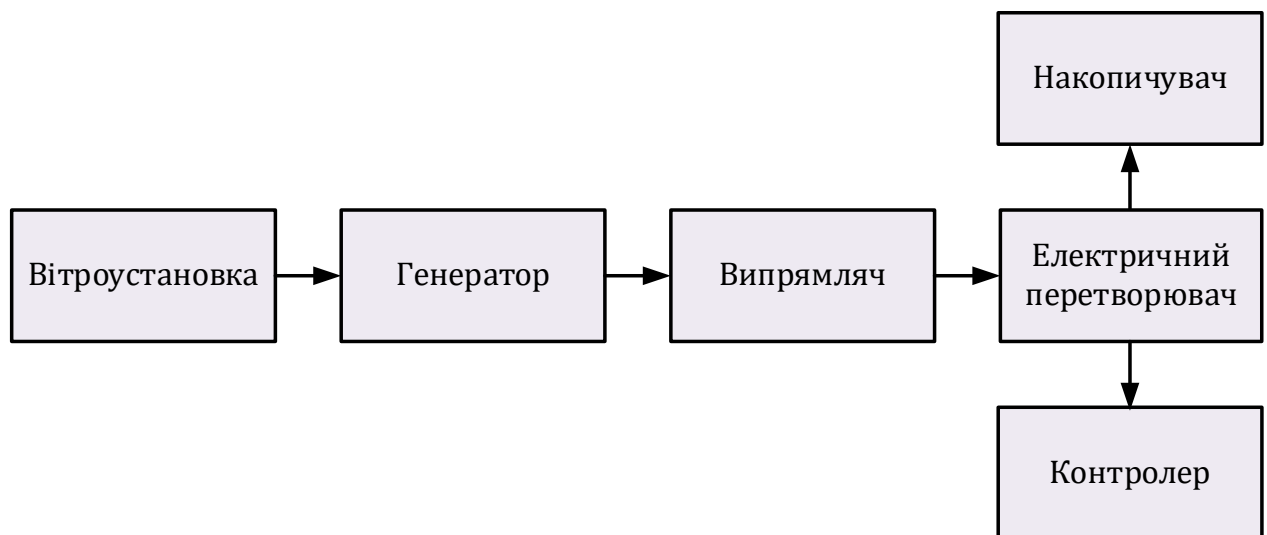


Рисунок 1.9 – Блок схема алгоритму з електричним перетворювачем

Як генератор у таких системах може бути використаний синхронний генератор на постійних магнітах, а в якості перетворювача – ШІМ-перетворювач на IGBT транзисторі, який показав свою високу ефективність у різних системах. ШІМ-перетворювачем керує контролер – окремий пристрій, який, спираючись на вимірювання різних величин, тим чи іншим чином впливає на перетворювач, намагаючись вийти на оптимальний режим видачі потужності. Поняттю максимальна потужність відповідає точка максимальної потужності (рисунок 1.10).

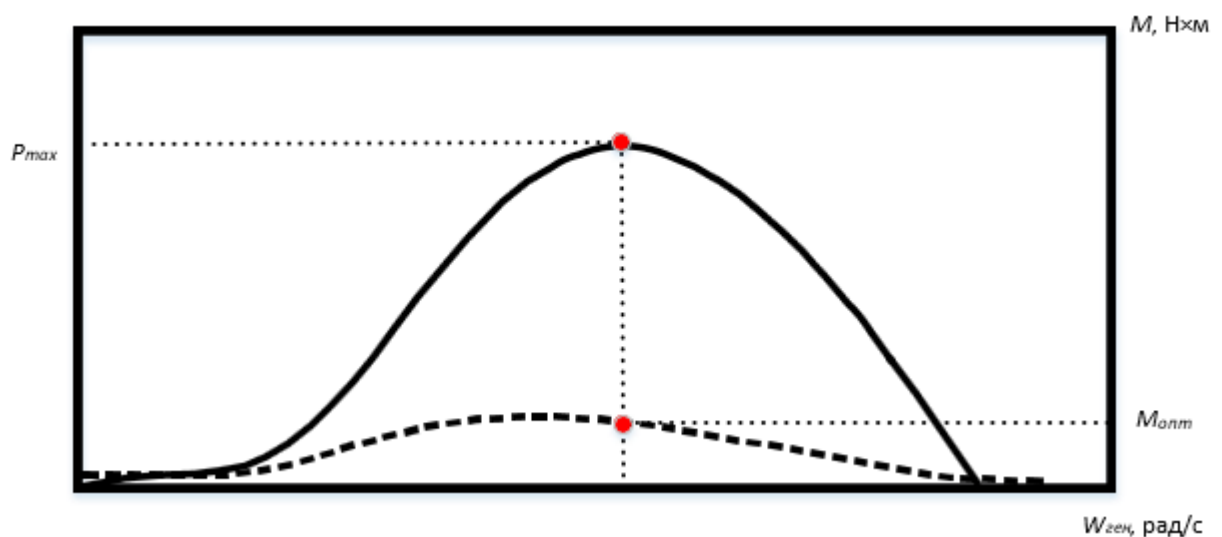


Рисунок 1.10 – Визначення точки максимальної потужності

Існує кілька способів відстеження точки максимальної потужності. Їх можна поділити на дві категорії – що використовують механічні датчики і не використовують їх.

До методів, що використовують механічні датчики, відноситься метод відстеження максимальної швидкості обертання. Метод, що використовує відстеження швидкості обертання, безпосередньо регулює швидкість вітроколеса або його момент, щоб підтримувати значення швидкості обертання оптимальним, вимірюючи при цьому поточні швидкості вітру та вітроколеса (рисунок 1.11). На рисунку позначено: ω_G – частота обертання генератора, об/хв; V – швидкість набігаючого потоку, м/с.

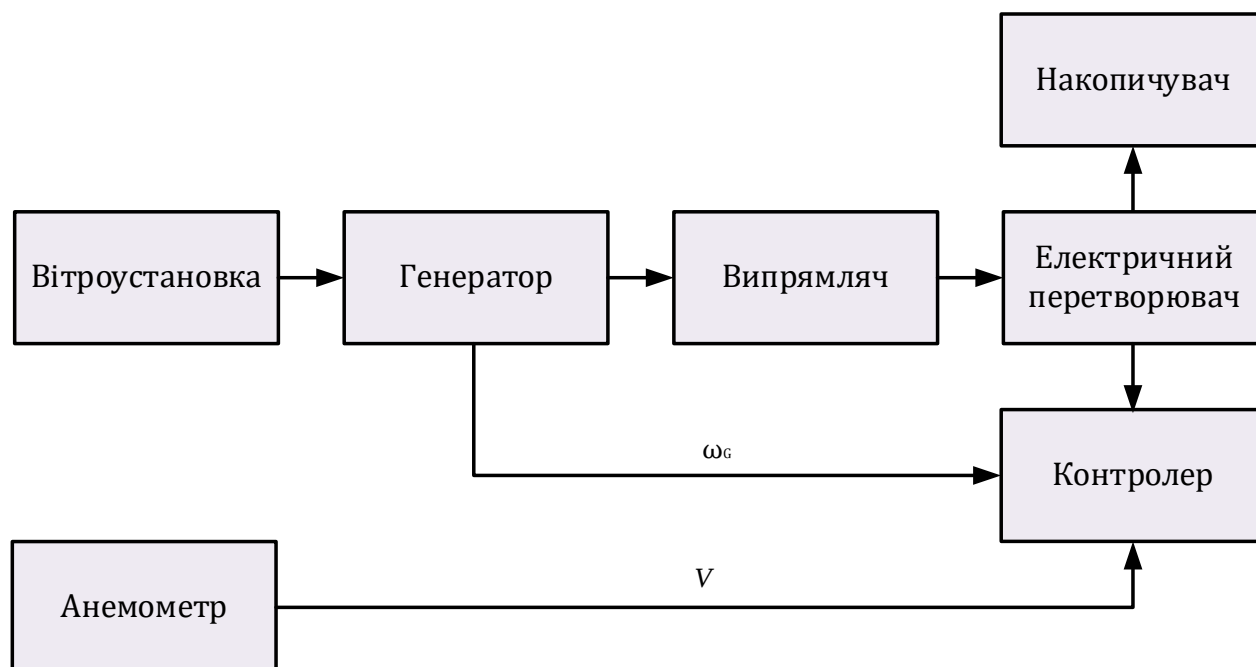


Рисунок 1.11 – Блок схема алгоритму з контролем швидкохідності вітроустановки

Суттєвим недоліком методів контролю є необхідність використання анемометра, який повинен бути розташований на одній висоті з вітроколесом (щоб забезпечувати достатньо точні вимірювання вітру, оскільки вони різняться на різних висотах від рівня землі), але одночасно – на певній відстані від нього, щоб порушення вітрового потоку, які виникають поруч з вітроколесом, не спотворювали результати вимірювань. Крім того, установка

додаткових пристроїв негативно впливає на надійність системи в цілому та її удорожчання. Окрім цього, виникає проблема отримання залежності потужності від швидкості вітру та частоти обертання для різних типів вітроколiс, а отже, таке рішення не буде універсальним.

Альтернативою методу контролю швидкості обертання є метод зворотного зв'язку за потужністю [21]. Цей метод передбачає отримання даних про поточну потужність та частоту обертання генератора. За заздалегідь заданою кривою, отриманою експериментально, математичним моделюванням або процесом «тренування» системи управління, розраховується поточне відхилення між поточною та оптимальною потужністю. Далі воно використовується для керування електричним перетворювачем (рисунок 1.12). Основний недолік цього методу полягає в тому, що необхідно заздалегідь отримати криву потужності, що не завжди можливо з достатньою точністю.

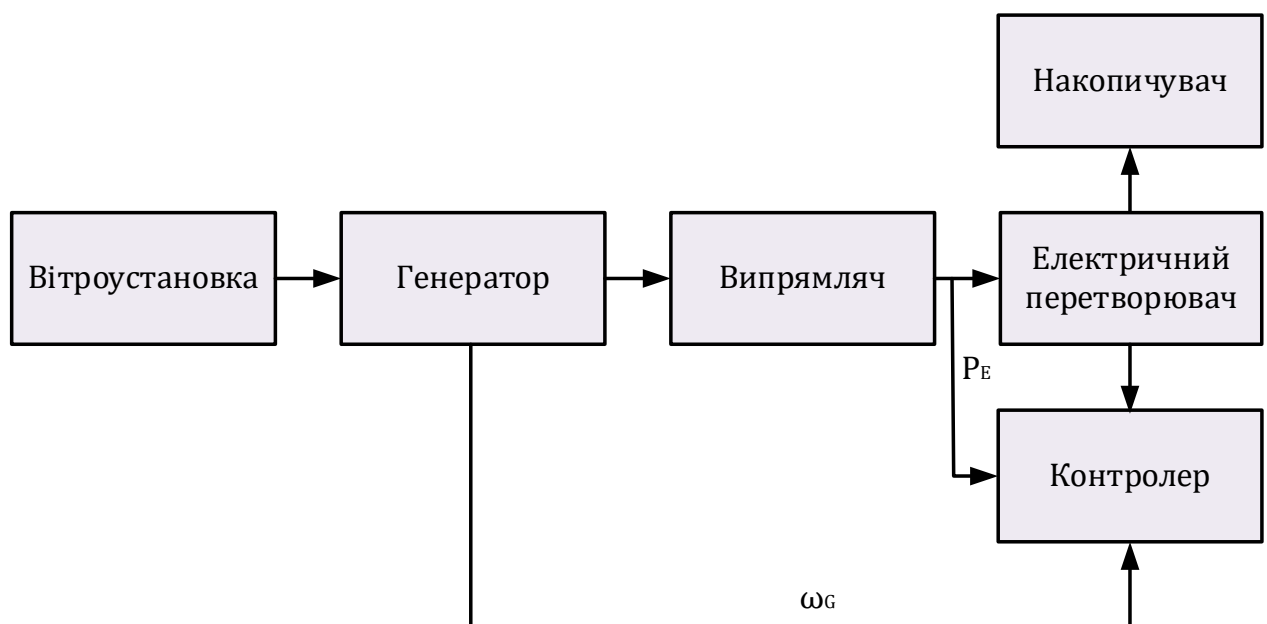


Рисунок 1.12 – Блок схема алгоритму з зворотним зв'язком за потужністю

Іншими методами відстеження максимальної точки є методи, які не використовують механічні датчики. Їх також називають "методи пошуку максимуму". Для кожної певної швидкості вітру існує оптимальна швидкість обертання вітроколеса, при якій потужність максимальна. Це свідчить, що

функція залежності потужності від швидкості обертання вітроколеса має одну точку максимуму. Умова максимуму для цієї функції - це рівність нулю похідної механічної потужності обертання вітроустановки (РВП) за часом:

$$\frac{dP_{BY}}{dt} \quad (1.1)$$

Цей факт використовується в усіх подібних алгоритмах. Один з таких алгоритмів управління використовує принцип пошуку, запам'ятовування та повторного використання [33]. Алгоритм починає свою роботу без будь-якої інформації про об'єкт управління – систему вітроенергетичних установок. У процесі навчання алгоритм знаходить точки максимуму, що відповідають різним швидкостям вітру, за умовою максимуму функції та зберігає їх параметри в пам'яті для подальшого використання. Це виконується до тих пір, поки не буде зібрано достатню кількість інформації про характеристики системи. Після цього процес отримання максимальної потужності є оптимізованим. Такий процес тренування також називають навчанням безпосередньо. До недоліків цього способу відносяться необхідність навчання, а значить, і неефективність роботи в цьому режимі, достатньо велика складність, що може бути важливим при реалізації алгоритму на кінцевих пристроях контролерів.

Інший метод ґрунтується на прямому регулюванні коефіцієнта заповнення ШІМ, виходячи з порівняння поточних вимірювань електричної потужності генератора з попередніми. Коефіцієнт заповнення виражається наступним чином.

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (1.2)$$

де D – коефіцієнт заповнення ШІМ; τ – час імпульсу, с;

Регулюючи коефіцієнт заповнення, можна змінювати напругу на виході ШІМ-перетворювача, а отже, й струм навантаження. Незважаючи на те, що швидкість вітру може змінюватися досить швидко і в широких межах, механічна потужність на валу вітроустановки змінюється досить повільно

через велику механічну інерцію колеса вітроустановки. У цьому випадку коефіцієнт заповнення ШІМ буде визначатися за виразом:

$$D_K = D_{K-1} + C_1 \frac{\Delta P_{K-1}}{\Delta D_{K-1}} \quad (1.3)$$

де D_K , D_{K-1} - коефіцієнт заповнення в k -ом відліку та попередній коефіцієнт заповнення відповідно; ΔP_{K-1} - зміна потужності між відліками, Вт; ΔD_{K-1} - зміна заповнення між відліками; C_1 - крок зміни, 1/Вт.

Ще одним методом пошуку екстремуму є метод, заснований на граничному циклі. Пошук точки максимальної потужності здійснюється за допомогою інтегральної ланки, яке керує струмом електричного перетворювача системи, підключеної до зовнішньої мережі, шляхом регулювання постійної напруги електричного перетворювача. Опорний струм збільшується до тих пір, поки виконується умова максимуму. Якщо він збільшується далі, постійна напруга електричного перетворювача не може залишатися постійною, оскільки умова балансу потужності в цьому випадку не виконується. Тому постійна напруга починає знижуватися і, якщо вона стає меншою за деяке порогове значення, керівний вплив інтегратора змінює знак, зменшуючи опорний струм. У цьому випадку виникають нелінійні коливання навколо точки максимуму, які називають граничним циклом. Через ці коливання система автоматично прагне до точки максимуму; при цьому система керування не використовує жодних даних про генератор і вітроколесо.

Іншим перспективним розробленням у галузі методів пошуку екстремуму функції потужності є застосування змінного кроку зміни швидкості обертання вітроколеса. Замість постійного кроку зміни використовується крок, пропорційний відношенню зміни потужності до зміни швидкості обертання:

$$\Delta \omega_K = K \cdot \frac{\Delta P_{K-1}}{\Delta \omega_{K-1}} \quad (1.4)$$

де K - емпіричний коефіцієнт пропорційності; $\Delta\omega_{K-1}$ - зміна частоти обертання між поточним та попереднім відліком, рад/с; ω_k - нова зміна частоти обертання, рад/с; ΔP_{K-1} - зміна потужності між відліками, Вт.

Таким чином, частота обертання буде змінюватися швидше, якщо поточна потужність далеким від точки максимальної потужності. Однак чим ближче поточна потужність до екстремуму, тим повільніше відбудеться зміна.

Ще одним методом контролю точки максимальної потужності є метод, в якому в якості вхідного параметра використовується потужність, а в якості керованого параметра - момент. Оптимальне значення моменту застосовується в ланцюгу керування моментом у синхронних генераторах на постійних магнітах з управлінням моментом. У цьому випадку контролер не потребує додаткових даних про швидкість вітру.

Існують методи, що поєднують кілька різних підходів до пошуку максимальної потужності. Одним з них є підхід, що поєднує контроль швидкості обертання і пошук екстремуму функції потужності [27,28]. На першому етапі точка максимуму відслідковується за допомогою наближеної оптимальної швидкості обертання. Коли вимірювана швидкість вітру стабілізується, подальший пошук фактичної точки максимуму здійснюється класичним методом пошуку екстремуму. Коли фактичний пік досягнутий, в пам'ять заносяться відповідні значення оптимальної швидкості генератора і відповідна їй швидкість вітру; після цього коригується оптимальне значення швидкості обертання. Коли швидкість вітру змінюється, у подальших розрахунках використовується вже скориговане значення швидкості обертання. Перевагою перед простим методом відслідковування швидкості обертання є відсутність необхідності в попередньому отриманні характеристик вітроколеса, однак інші недоліки залишаються.

Крім того, такі алгоритми показують гіршу ефективність, ніж класичні алгоритми, що відслідковують швидкість обертання.

Ще одним комбінованим методом є метод, який включає переваги двох алгоритмів: контролю точки максимуму за характеристикою «потужність -

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкість обертання» та метод пошуку екстремуму. Цей алгоритм вимірює швидкість обертання генератора і обчислює оптимальний крутний момент M_{opt} . Дійсне значення крутного моменту $M_{дійс}$ також вимірюється.

У нормальних умовах, коли різниця ΔM між M_{opt} і $M_{дійс}$ не велика, застосовується так званий метод збурення і спостереження, заснований на обчисленні потужності, ігноруючи характеристику $M - \omega$. Якщо різниця ΔM з якихось причин (наприклад, різкі пориви вітру, неправильна ініціалізація програми через ненадійні дані з датчиків) стає достатньо великою, коефіцієнт заповнення встановлюється відповідно до цієї характеристики.

1.7 Постановка дослідження

Пропонується створити комп'ютерну модель вітроенергетичної установки із використанням сучасного програмного продукту. На основі складеної моделі дослідити роботу вітроенергетичної установки за різних режимів вітрового навантаження, а також різних режимів роботи зовнішньої розподільної мережі. Швидкість вітру непостійна, тому пропонується використовувати додатковий накопичувач енергії. При цьому стає неможливим використання синхронного генератора у складі вітроенергетичної установки великої потужності. Недоліки цього генератора, які були визначені раніше не дозволяють досягти стійкої роботи при різких змінах вітру, а також при різких змінах режиму роботи системи, пов'язаних насамперед із добовими коливаннями навантаження. Потрібне використання автоматики для підтримання синхронної роботи генеруючих установок з мережею, що складно реалізувати саме для великих вітроелектростанцій із великою кількістю генеруючого обладнання та високими значеннями встановленої потужності. Пропонується використати інший підхід до управління видачею потужності, який буде розглянутий у наступному розділі роботи.

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Як правило, в автономній вітроелектростанції в якості електроенергетичного перетворювача використовується активний випрямляч, який випрямляє змінну напругу генератора для зарядки акумулятора.

Швидкість вітру непостійна, тому енергію доводиться зберігати в акумуляторі. Тому, коли батарея заряджена, перетворення енергії вітру зупиняється. Пропонується створити групу контролерів вітру, що дозволить розподіляти потужність між блоками таким чином, щоб акумулятор не заряджався, а вся вироблена потужність передавалася споживачеві.

Для перевірки методу групового управління необхідно реалізувати метод технічної автоматики, такий як запуск, плавна зупинка, аварійна зупинка.

Висновки за розділом:

Визначено, що на сьогодні порядок технологічного приєднання об'єктів розподіленої генерації не відрізняється від порядку приєднання звичайного споживача у зв'язку з відсутністю законодавчого поділу. У зв'язку з цим споруди часто встановлюються без відпрацювання схеми розподілу електроенергії. В результаті виникають невраховані схеморежимні ситуації, в яких стабільна робота об'єкта розподіленої генерації неможлива.

Встановлено, що розвиток систем управління вітрогенераторами залежить від великої кількості найважливіших факторів: таких як тип генеруючого пристрою, режим роботи вітрогенератора, система, що регулює кут повороту лопатей, вартість системи управління. Таким чином, планується розробити систему управління, яка ефективно керує вітроелектростанцією та діагностує можливу несправність або вихід з ладу генератора.

Розглянуто типову конструкцію вітрогенератора, визначено основні вузли вітрогенератора. Визначено основні конструкції вітрогенераторів, що використовуються у складі вітроенергетичних установок. Визначено основні переваги та недоліки кожного типу вітрогенераторів.

Встановлено, що для розробки інтелектуальної системи доставки енергії вітру на вітрову електростанцію для великих і потужних вітроелектростанцій

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

раціонально використовувати горизонтально-осьові вітроенергетичні установки, оскільки їх ККД значно вищий, ніж установок з вертикально осьовою конструкцією. Висота установки з горизонтальною осьовою турбіною може бути визначена в залежності від площі і регіону будівництва вітрової електростанції.

Визначено, що для використання в потужних вітрових електростанціях найбільш ефективним є використання синхронного генератора з класичною конструкцією. Перевагою є можливість видачі високої потужності. Недоліком даного генератора є висока ймовірність нестабільної роботи паралельно з мережею при різких змінах вітрового навантаження.

Встановлено, що для компенсації недоліків використання синхронного генератора можна розглянути використання генератора з постійним магнітом, а також певної комбінації з акумулятором у моделі інтелектуальної системи розподілу електроенергії

					КНУ КРБ.151.25.01.01.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Вибір програмного продукту для моделювання

Першим етапом створення моделі інтелектуальної системи видачі потужності необхідно обрати програмний продукт для її реалізації. Програмний продукт має володіти такими перевагами та властивостями: простотою, наочністю розроблюваних схем, достовірністю отриманих результатів та використовуваних моделей.

На ринку програмних продуктів існує велика кількість різноманітних програмних комплексів, що дозволяють вирішувати задачі, поставлені в рамках виконання і підготовки магістерської дисертації. Серед усього розмаїття програмних продуктів можна виділити два, що отримали найширше розповсюдження: MATLAB/Simulink з використанням вбудованої бібліотеки SimPowerSystems та PSCAD.

Перший з них (MATLAB/Simulink) має великі можливості для створення і моделювання режимів та алгоритмів роботи різних пристроїв і об'єктів електроенергетичної галузі, включаючи об'єкти силової (тобто високовольтної) частини та об'єкти управління. Головною перевагою програмного комплексу є його універсальність. Іншими словами, його можна використовувати не тільки для моделювання електричних режимів, але й механічних зусиль, теплових процесів тощо. Це обумовлює й універсальність використовуваних алгоритмів розрахунку у ньому. Однак саме універсальність не дозволяє досягти високої швидкості моделювання порівняно з іншими, спеціалізованими, програмними комплексами.

					КНУ КРБ.151.25.01.02.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Беляєв С.Е.			РОЗДІЛ 2			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								29	37
								КНУ АКІТ-22ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Для порівняння з програмним комплексом MATLAB/Simulink із бібліотекою SimPowerSystems обрано спеціалізований для електроенергетичної галузі програмний комплекс моделювання в реальному часі PSCAD. Цей програмний комплекс створено спеціально для вирішення завдань електроенергетики і призначений для моделювання перехідних процесів в електроенергетичних системах, ustalених режимів роботи електроенергетичних систем, аварійних ситуацій і реакції автоматики на різні зовнішні та внутрішні збурення.

Бібліотека стандартних елементів PSCAD містить велику кількість моделей, що спрощує створення власної моделі. Розроблена модель інтелектуальної системи управління вітроустановкою у складі вітроелектростанції може бути змодельована для управління стандартною моделлю вітрогенератора, що полегшує можливість складання і тестування алгоритму роботи інтелектуальної системи управління. Тому для реалізації інтелектуальної системи відбору потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції, що виконується в рамках дисертаційного дослідження, пропонується використовувати програмний комплекс PSCAD. Перевагою програмного комплексу PSCAD є можливість створення сценаріїв, які дозволяють детально змодельовати різні режими роботи вітроелектростанції з інтелектуальною системою управління та вплив інтелектуальної системи управління на режими видачі потужності в мережу при різних аварійних перехідних процесах або режимних перемиканнях у системі.

2.2 Інтелектуальна модель вітроелектростанції у програмному комплексі PSCAD

На рисунку 2.1 представлена модель вітроелектростанції, яка складається з двох частин:

1. Механічна частина;
2. Електрична частина.

					КНУ КРБ.151.25.01.02.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

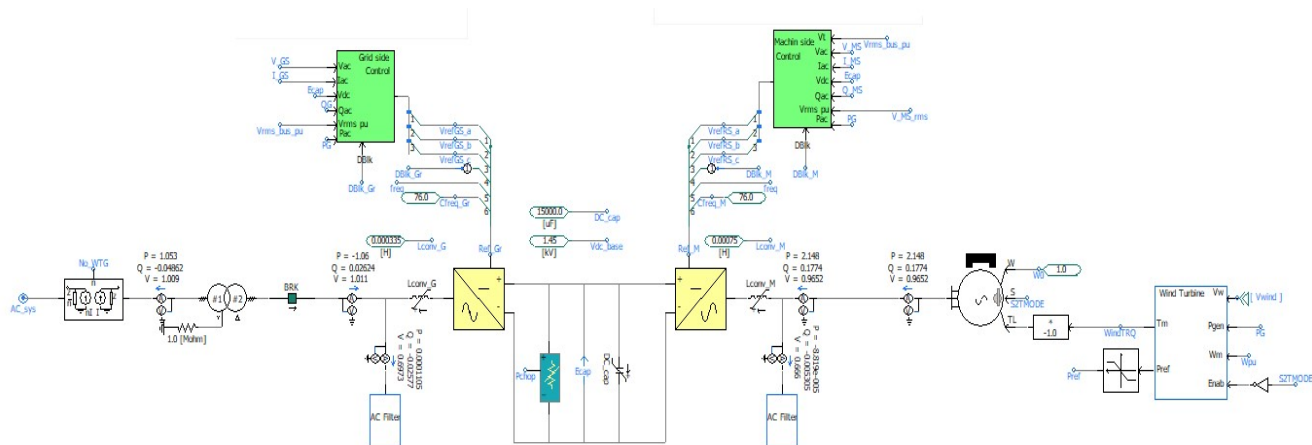


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд моделі вітроелектростанції

Механічна частина моделі відповідає за створення механічної потужності, яка відповідає певним швидкостям вітру. Вихідним параметром механічної системи є механічний момент.

Електрична частина моделі відповідає за перетворення механічного моменту в електричний. За перетворення механічного моменту в електричний у моделі відповідає модель електричної машини. У комп'ютерній моделі використана модель електричної машини на постійних магнітах. Дана модель генератора, що використовується у складі вітроелектростанцій, була розглянута у першому розділі роботи.

Розглянемо склад комп'ютерної моделі, виконаної в програмному комплексі PSCAD.

Механічна частина складається з:

- Вітротурбіни;
- Контролера кута нахилу лопатей вітротурбіни.

Модель електричної частини складається з:

- Вузла зв'язку та контролю параметрів мережі;
- Вузла контролю параметрів генератора;
- Захисту вставки постійного струму з конвертером постійного струму;
- Низькочастотного фільтра;

- Трансформатора;
- Блоку масштабування, що відповідає за збільшення видаваної потужності з моделі вітрогенератора в модель вітроелектростанції.

На рисунку 2.2 представлено повний вигляд моделі ділянки електроенергетичної системи, в якій модель вітроелектростанції через лінію електропередачі підключена до джерела нескінченної потужності, що моделює вихід в енергосистему з кратністю струму короткого замикання 10, тобто система, що моделюється даним виходом, є досить стабільною та стійкою.

Модель вітроелектростанції може перейти в нестійкий режим, якщо підключення буде виконано до моделі енергосистеми з меншою кратністю струмів короткого замикання в точці підключення.

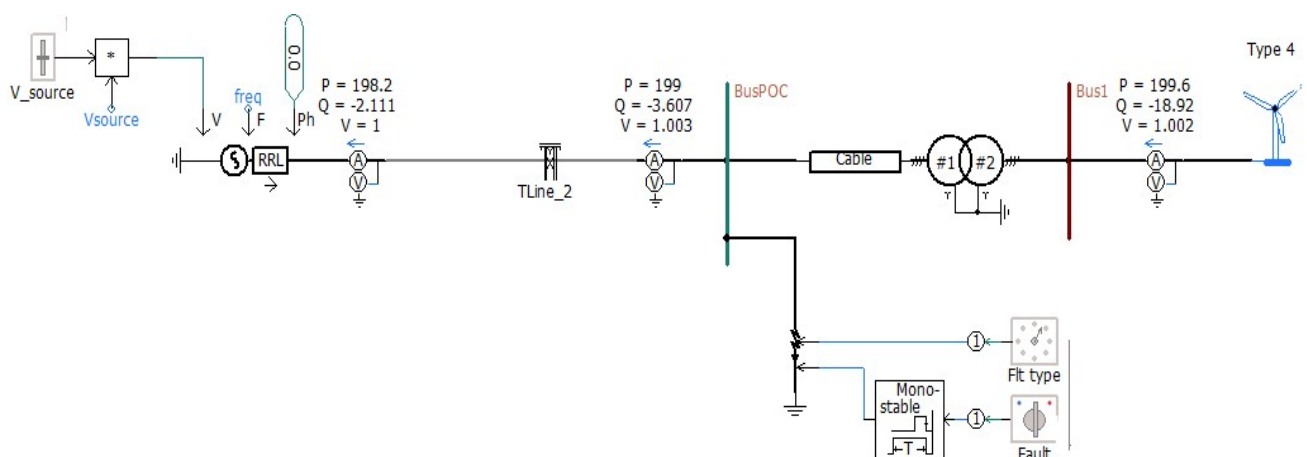


Рисунок 2.2 – Повний вигляд моделі ділянки електроенергетичної системи

У таблиці 2.1 представлені параметри моделі вітрогенератора.

Таблиця 2.1 – Параметри моделі вітрогенератора

Позначення параметра	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Dblk	Вмикання/Вимикання вітротурбіни	-	Dblk

Продовження табл. 2.1

Vtrf_HV	Номинальна напруга обмотки трансформатора	кВ	Vbase
No_WTG	Загальна кількість вітрогенераторів		UN
Sbase	Встановлена потужність однієї установки	MBA	2
Vrated_PM	Встановлена потужність генератора на постійних магнітах	кВ	Vrated_PM
Vwind	Вхідне значення швидкості вітру	м/с	Vw
vWcutin	Швидкість вітру, при якій вітрогенератор може видавати потужність	м/с	3
vWcutout	Максимально допустима швидкість вітру для вітрогенератору	м/с	25
VRot_nom	Швидкість обертання вітротурбіни при номінальній швидкості обертання генератора	об/хв	12
freq	Номинальна частота системи	Гц	freq
freq_PM	Базова частота генератора	Гц	30

Розглянемо докладніше окремі частини моделі.

2.3 Механічна частина моделі

Модель вітротурбіни представлена на рисунку. Вона використовується для моделювання механічної потужності та механічного моменту, який

передається з контролера завдання швидкості вітру та кута нахилу лопатей вітроколеса. Вхідні параметри моделі вітротурбіни наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри моделі вітротурбіни

Позначення параметра	Параметр	Одиниця виміру	Значення
Rad_turb	Радіус вітроколеса турбіни	м	50
vWcutin	Початкова швидкість обертання вітроколеса	м/с	vWcutin
vWcutout	Мінімальний кут нахилу лопатей вітроколеса	м/с	vWcutout
VRot_nom	Швидкість обертання вітротурбіни за номінальної швидкості обертання генератора	об/мин	VRot_nom
Pitch_min	Мінімально допустимий кут нахилу лопатей вітроколеса	градус	0
Pitch_max	Максимальний кут нахилу лопатей вітроколеса	градус	28
Wref_sp	Точка встановлення розрахункової швидкості генератора	від.од.	W0
Pbase	Базова активна потужність	МВт	Sbase
Kp_Ptch	Регулятор посилення	від.од.	Kp_Ptch
Ti_Ptch	Регулятор постійного часу	від.од.	Ti_Ptch

Схема моделі контролера кута нахилу наведена на рисунку 2.3.

Контролер порівнює похибки за швидкістю та за потужністю. Параметри швидкості вітру, за яких вітротурбіна починає обертатися, а також критична швидкість вітру для турбіни є важливими параметрами моделі.

На основі цих параметрів здійснюється ранжування швидкостей вітру в моделі. Для моделі задані значення мінімальної швидкості 3 м/с, а максимальної - 25 м/с. Ці параметри швидкості вітру обрано на підставі характеристик для

великих вітротурбін, встановлених на вітроелектростанціях; значення взяті для турбін виробництва General Electric.

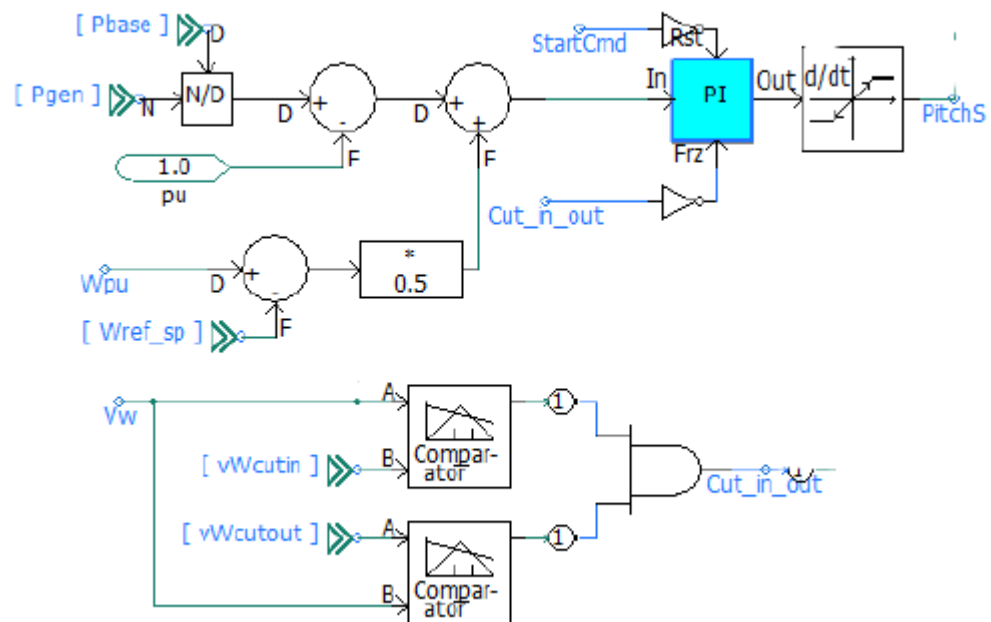


Рисунок 2.3 – Схема контролера куту нахилу

Механічна потужність, що перетворюється від значень швидкості вітру, може бути визначена за допомогою виразу:

$$P = \frac{\rho}{2} A_r \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda, \theta), \quad (2.1)$$

де ρ - щільність повітря, кг/м³; A_r - площа охоплена лопатями вітроколеса, м²; V_w - швидкість вітру, м/с; λ - швидкохідність; θ - кут нахилу лопатей вітроколеса; C_p - коефіцієнт потужності, що є функцією швидкохідності вітроколеса і кута нахилу лопатей.

Коефіцієнт C_p відноситься до паспортних параметрів вітротурбіни і надається виробником на кожен тип виробленої ним турбіни у вигляді графіка або табличних значень. Вигляд кривих для коефіцієнта потужності турбін виробництва General Electric представлені рисунку 2.4.

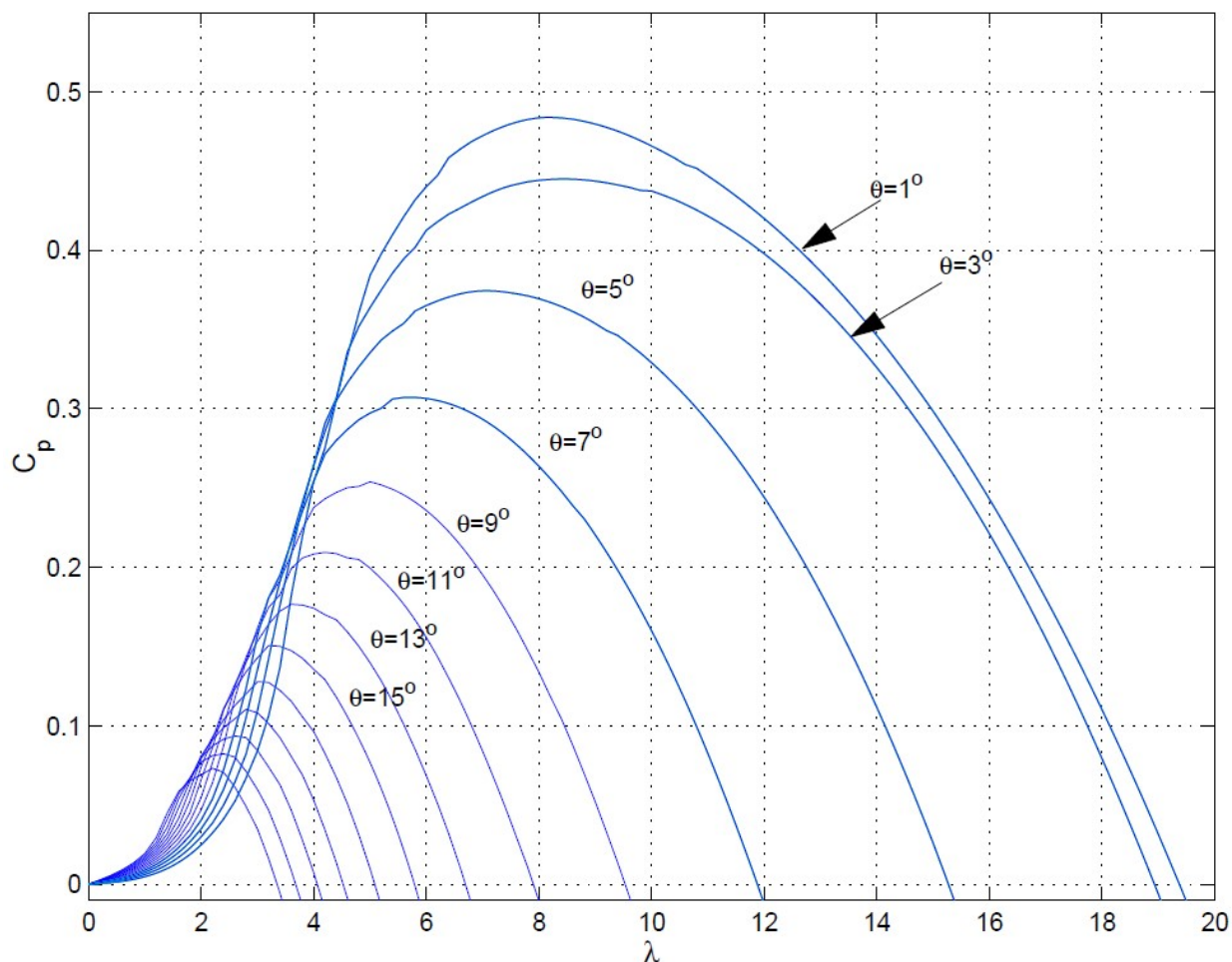


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта потужності вітротурбіни при різних значеннях кута нахилу та швидкохідності турбіни

Для режиму, що встановився, вираз для визначення швидкохідності набуде вигляду:

$$\lambda = \frac{W_{BY} \cdot R}{V_W} = \frac{2\pi \cdot n_{BY} \cdot R}{V_W}, \quad (2.2)$$

Реалізація виразу для швидкохідності в режимі, що встановився, за допомогою блоків програмного комплексу PSCAD представлена на рисунку 2.5.

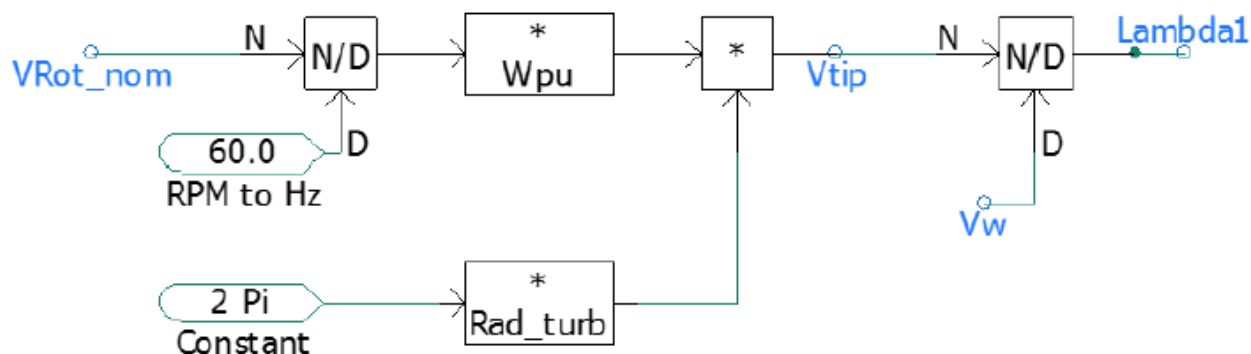


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд моделі блоку розрахунку швидкохідності

Розрахунок коефіцієнта потужності C_p у моделі заданий у вигляді полінома четвертого порядку згідно з виразом:

$$C_p(\theta, \lambda) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 (a_{i,j} \cdot \theta^i \cdot \lambda^j). \quad (2.3)$$

Отримана крива за (2.3) добре апроксимується для значень швидкохідності, що лежать у межах $3 < \lambda < 15$, а від'ємне значення C_p обмежене значенням -0,05. Для моделі згідно (2.3) параметр $a_{i,j}$ задається матрицею розміром 5x5 із загальною кількістю коефіцієнтів 25.

2.4 Електрична частина моделі

У моделі електрична частина вітротурбіни складається з генератора на постійних магнітах і перетворювача напруги «Змінний струм – постійний струм – змінний струм».

На рисунку 2.6 наведено вигляд моделі генератора на постійних магнітах.

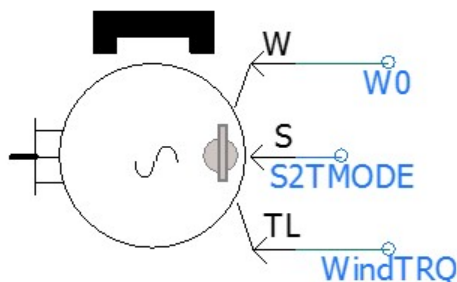


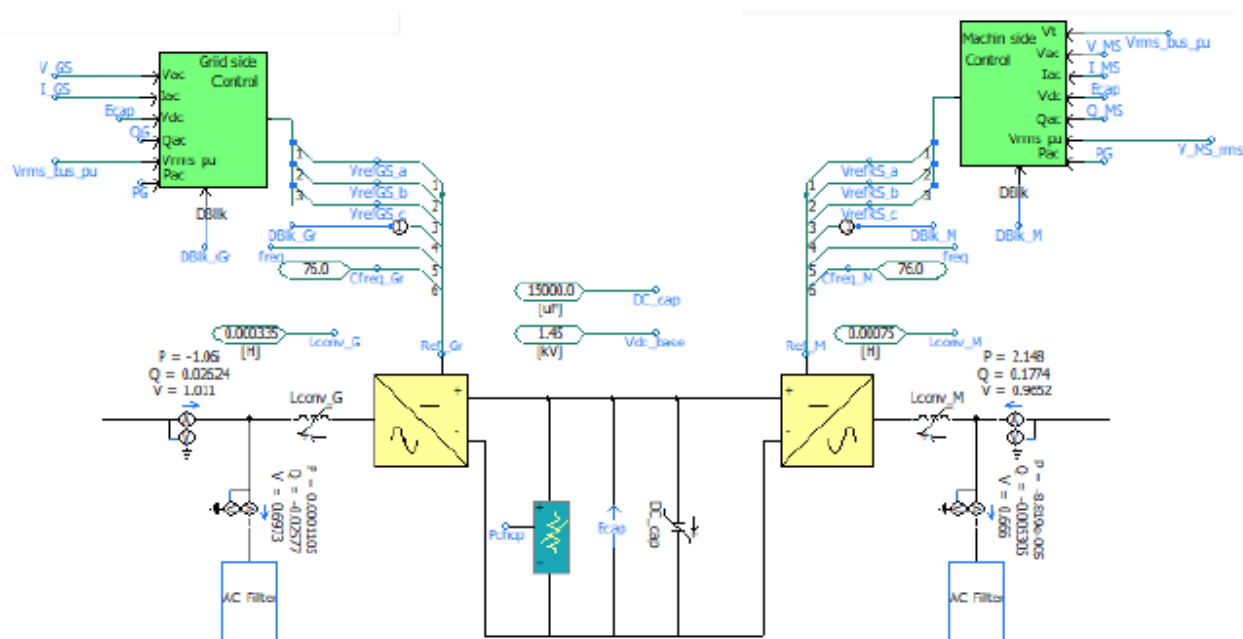
Рисунок 2.6 – Загальний вигляд моделі генератора на постійних магнітах

На рисунку 2.6 показано входи моделі генератора, де W - вхідна швидкість, від. один., при цьому, коли модель працює в режимі контролю швидкості, генератор починає обертання зі швидкості W_0 .

S - параметр, який відповідає за перемикання між режимом контролю швидкості та режимом контролю моменту. Для режиму контролю швидкості $S=1$, для режиму контролю моменту $S=0$.

T - вхідне значення моменту, від. один. Якщо модель функціонує в режимі контролю моменту, тоді машина визначає швидкість, базуючись на коефіцієнті інерції та коефіцієнті демпфування, а також на вхідному та вихідному значеннях моменту.

Перетворювач «змінний струм – постійний струм – змінний струм» представлений на рисунку 2.7.



1-перетворювач і контролер мережі; 2 -контролер і конвертер генератора; 3-інвертор; 4 - фільтр низьких частот; 5 - підсилювач.

Рисунок 2.7 – Загальний вигляд моделі конвертера напруги

Перетворювач і контролер мережі контролює напругу на шинах постійного струму, тоді як контролер і конвертер генератора контролює активну потужність на вітротурбіні. У моделі обидва контролери реалізовані як перетворювачі напруги.

Інвертор використовується для захисту шин постійного струму від перенапруг.

Фільтр низьких частот використовується з боку змінної напруги для фільтрації гармонічних спотворень, викликаних наявністю у моделі блоку перетворення «змінний струм – постійний струм – змінний струм».

Перетворювач і контролер мережі, показаний на рисунку, необхідний у моделі для регулювання напруги на шинах постійного та змінного струму. Значення величини змінної напруги встановлено на рівні 1 від. один.

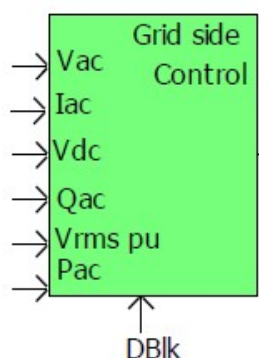


Рисунок 2.8 – Перетворювач та контролер мережі

Параметри блоку «Перетворювач та контролер мережі» представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри блока «Перетворювач та контролер мережі»

Позначення параметра	Параметр	Тип змінної	Одиниця вимірювання	Значення
ILimPriority	Пріоритет d або q координати: 0-q, 1-d	Integer	-	0
Sbase	Встановлена потужність	Real	MBA	Sbase
freq	Частота в мережі змінного струму	Real	Гц	freq
Vacbase	Номінальне значення змінної напруги	Real	кВ	Vrated_PM

Vdc_base	Базове значення постійної напруги	Real		Vdc_base
Lconv	Індуктивність перетворювача напруги	Real	Гн	Lconv_G
Imax_puinteger	Максимальне значення струму	Real	від. один.	1,1

Ініціалізація в відносних одиницях і трансформація вимірювань струму та напруги показані на рисунках 2.9 і 2.10. Фільтри з частотною характеристикою 360 Гц використовуються для підвищення якості значення постійного струму завдяки фільтрації вищих гармонік від силових перетворювачів.

Базові показники перетворювача і контролера мережі, а також перетворювача максимального струму розраховуються на основі встановленої потужності (S_{base}) і діючого значення фазної базової змінної напруги (V_{acbase}).

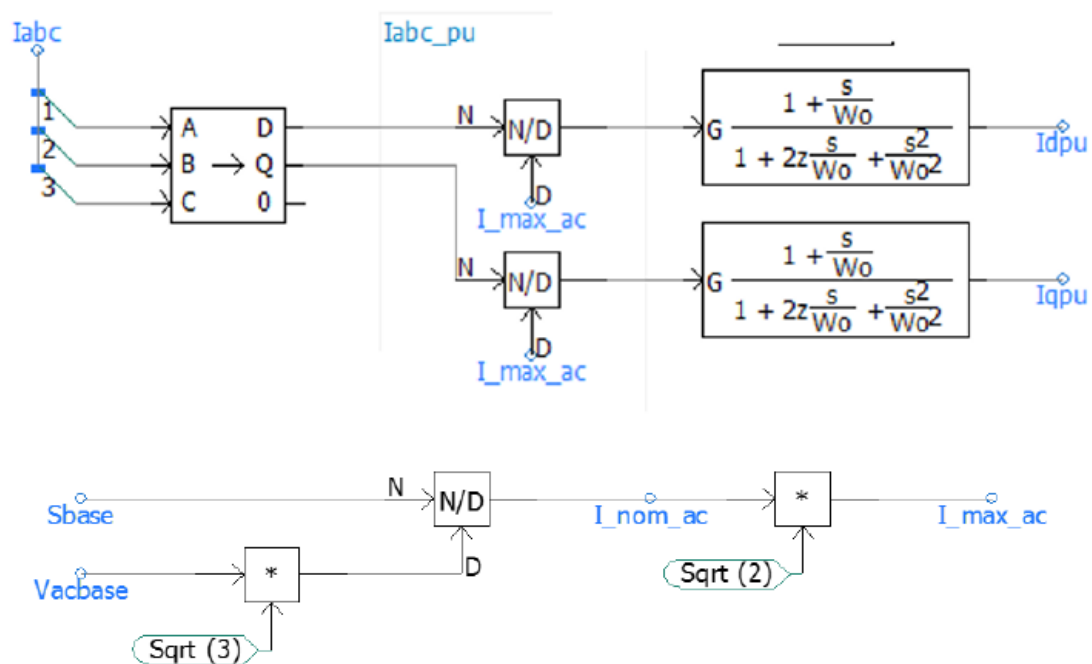


Рисунок 2.9 – Переведення в відносні одиниці та перетворення струму з фазних координат (ABC) на полярні (dq)

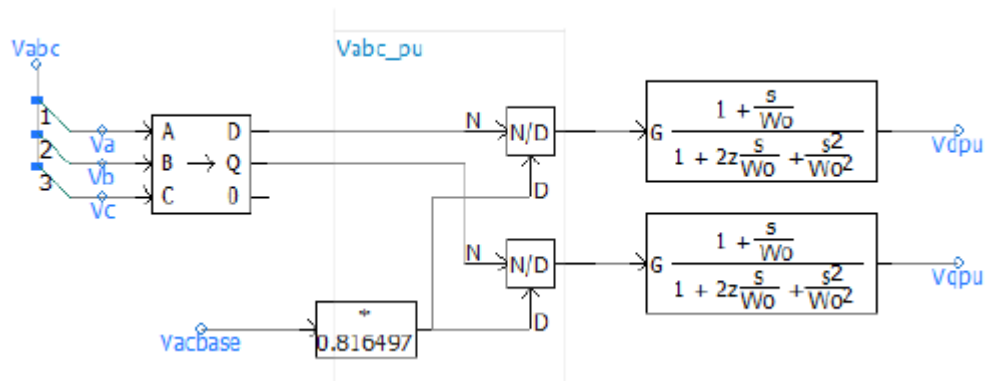


Рисунок 2.10 – Переведення в відносні одиниці та перетворення напруги з фазних координат (ABC) на полярні (dq)

Контролери постійної напруги, каскадний перетворювач змінної напруги та контролер реактивної потужності представлені на рисунках 2.11 і 2.12. Ці контролери необхідні для генерації порядку координат струму d та q для реалізації незв'язного регулювання відповідно. Слайдери потрібні для зміни коефіцієнтів K_p і T_i для ПІ-регулятора в разі необхідності його налаштування. Використовуваний ПІ-регулятор не піддається інтегральному насиченню. Каскадний контролер змінної напруги та реактивної потужності має можливість вводити реактивну потужність у разі аварійних ситуацій, таких як коротке замикання. Контролер використовується з детектором відхилення напруги для збільшення або зменшення струму опорного сигналу.

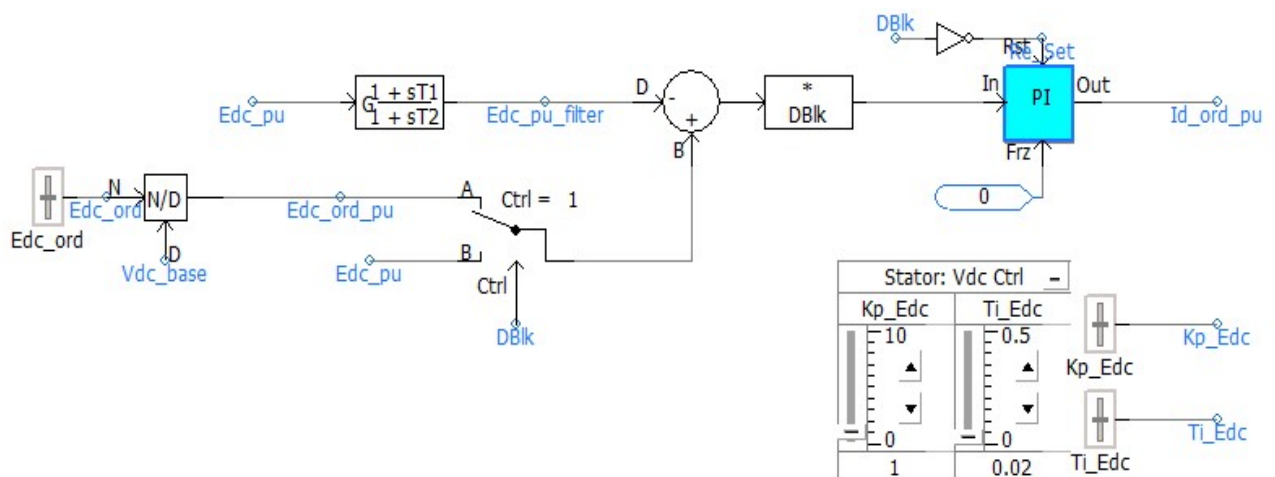


Рисунок 2.11 – Вид моделі контролера постійної напруги

Для цього перетворювача, пріоритет за замовчуванням може бути визначений для d або q координати, як показано в таблиці 2.3, сигнал пріоритету прийнятий рівним 0.

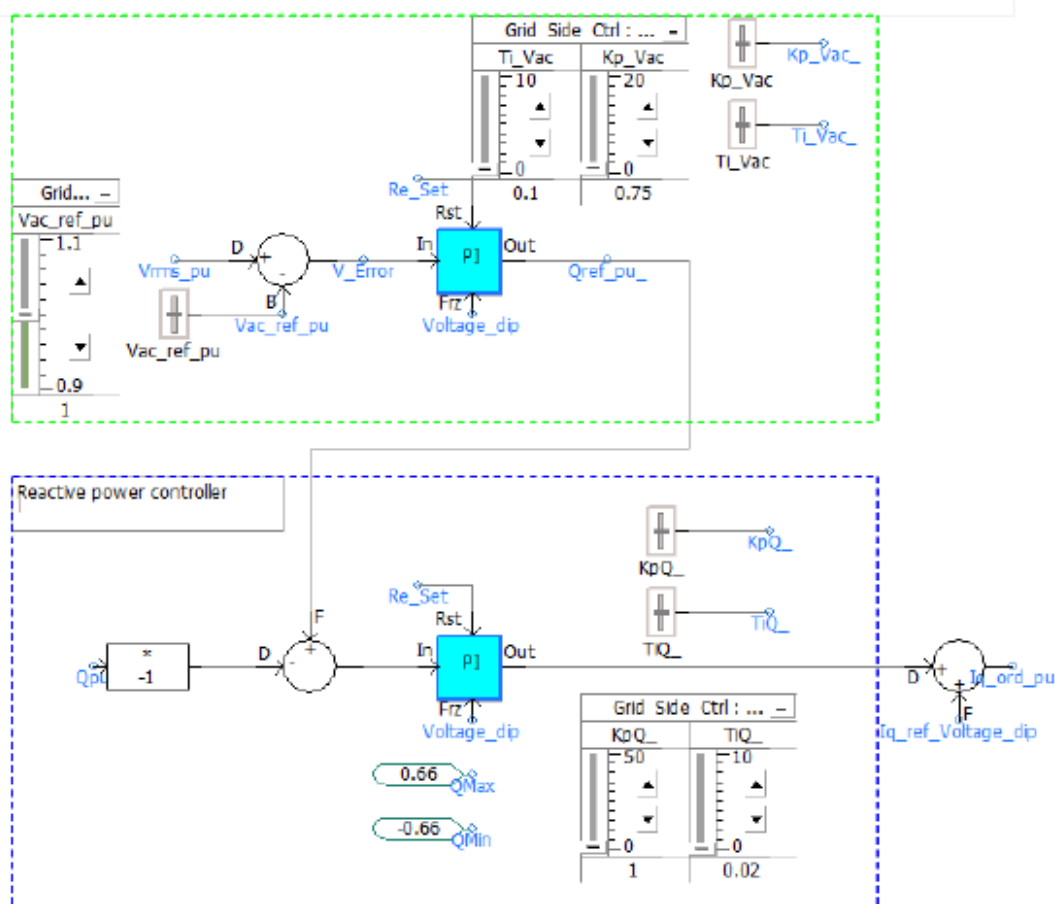


Рисунок 2.12 – Каскадний контролер реактивної потужності та змінної напруги

Система роздільного управління струмом, модель якої представлена на рисунку 2.13, використовується для перетворення базових напруг, а саме напруг, що зберігаються в змінних $vd1ref$ і $vq1ref$.

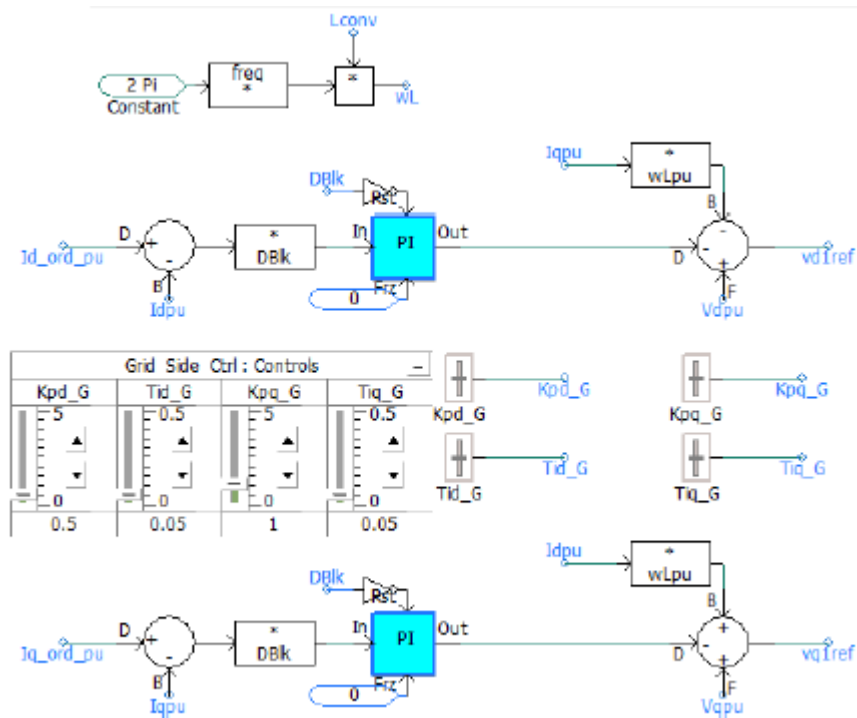


Рисунок 2.13 – Загальний вигляд моделі контролера незв'язного регулювання координат d і q для отримання базових значень напруг

Для поділу координат d та q , щоб виключити їх взаємний вплив, використовується віднімання співвідношень ($I_{qpu} wL_{pu}$) та ($I_{dpu} wL_{pu}$) які додаються до відповідних координат d та q . Слайдери в моделі, представлений на рисунку 2.12, необхідні для налаштування роботи контролера, якщо це буде потрібно.

Як показано на рисунку 2.14, змінні з базовими напругами, такі як $vd1ref$ та $vq1ref$, перетворюються з прямокутних координат у полярні. При цьому амплітуда M обмежена значенням 1,15 в відносних одиницях (від. один.). Синусоїда трифазної базової напруги отримується шляхом імпорту перетворення $dq0$ в ABC з використанням змінних $vd1ref$ та $vq1ref$, а також кута перетворення $theta_{PLL}$. До цього етапу базові синусоїди напруги розраховуються в відносних одиницях, беручи за основу базове значення напруги, рівне піковому фазному значенню змінної напруги.

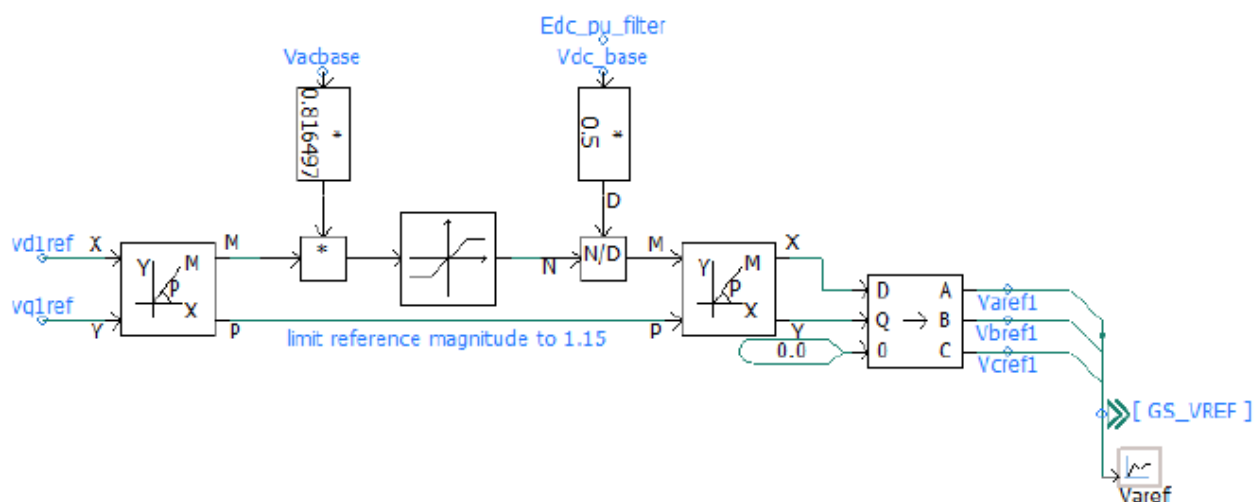


Рисунок 2.14 – Базові напруги, що надаються контролером мережі

Призначення контролера генератора полягає в контролі активної потужності та змінної напруги на терміналі моделі генератора на постійних магнітах. Контролер необхідний для отримання відповідних розрахункових параметрів на терміналі вітротурбіни. Загальний вигляд моделі контролера генератора представлений на рисунку 2.15.

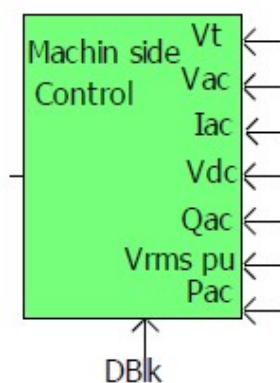


Рисунок 2.15 – Загальний вигляд моделі контролера генератора (показані вхідні змінні)

Параметри моделі контролера генератора та їх опис наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри контролера вітрогенератора

Позначення параметра	Параметр	Тип змінної	Одиниця вимірювання	Значення
ILimPriority	Визначення пріоритету d або q координати: 0-q, 1-d	Integer	-	0
Pref	Значення активної потужності	Real	від. один.	Pref
Q_ord	Значення реактивної потужності	Real	Мвар	0
Sbase	Базова потужність	Real	МВА	Sbase
freq	Частота системи	Real	Гц	freq_PM
Vacbase	Базове значення змінної напруги системи	Real	кВ	Vrated_PM
Vdc_base	Базове значення постійної напруги	Real	-	Vdc_base
Lconv	Індуктивність перетворювача напр.	Real	Гн	Lconv_G
Imax_pu	Максимальний струм	Real	від. один.	1,1

Контролер активної потужності з боку генератора представлений на рисунку 2.16.

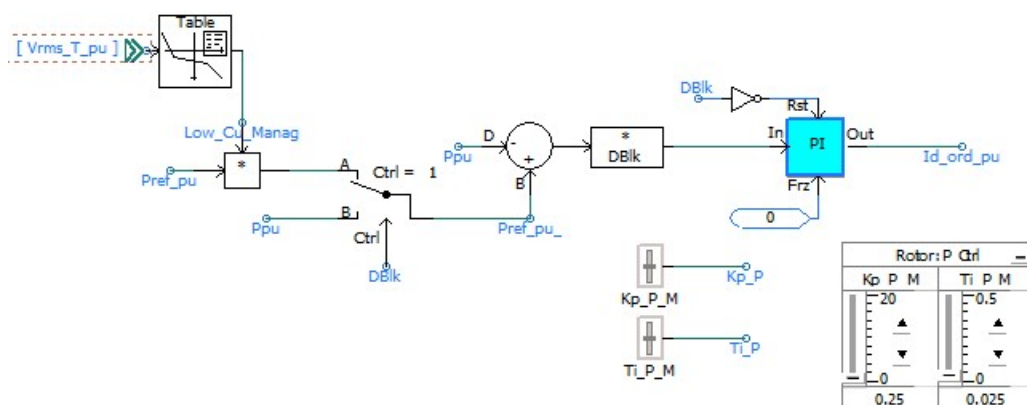


Рисунок 2.16 – Загальний вигляд моделі контролера потужності генератора

Контролер потужності генератора визначається за значеннями активної потужності за співвідношенням із таблицею під час низьких значень напруги. Такий підхід дозволяє підвищити стійкість роботи моделі вітроелектростанції під час аварійних ситуацій – коротких замикань. Контролер змінної напруги, показаний на рисунку 2.17, встановлений на базове значення напруги, що дорівнює 1 від. один.

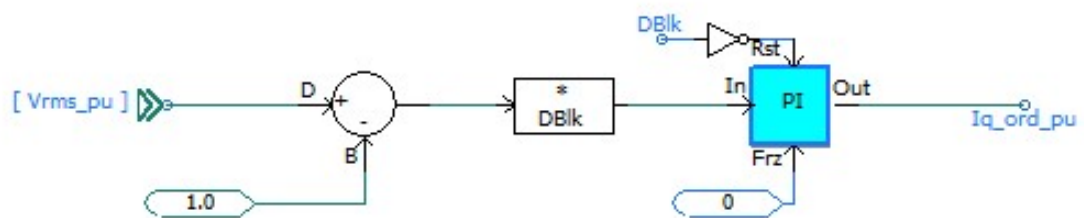
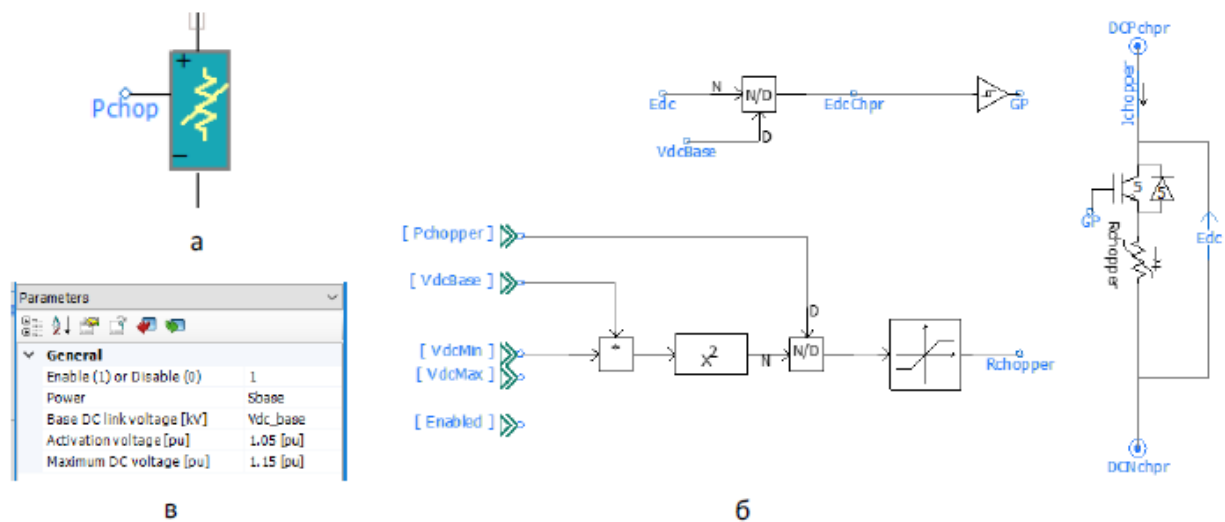


Рисунок 2.17– Контролер напруги з боку генератора

Алгоритм роботи контролера напруги мережі та алгоритм отримання базових напруг аналогічний алгоритмам контролера мережі, який було розглянуто вище.

Допоміжний захист під час аварійних ситуацій – коротких замикань, вимагає запобігання виникненню перенапруг на ємностях перетворювача постійного струму. Цей захист забезпечується блоком «Перетворювач постійного струму», який керується опором біполярного транзистора з ізолюваним затвором, що гасить перенапруги.

Контроль затримки напруги використовується для генерації імпульсів відмикання транзисторів у перетворювачі постійного струму. Логіка роботи блоку «Перетворювач постійного струму» ілюструється схемою, представленою на рисунку 2.18

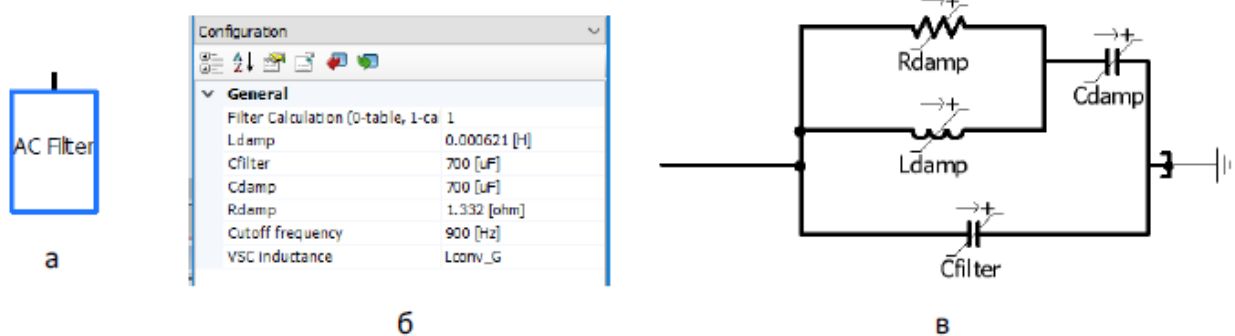


а – загальний вигляд блоку, б-електрична схема та контроль запізнення; в – входні параметри блоку

Рисунок 2.18 – Перетворювач постійного струму

Конвертери, що містять у своєму складі велику кількість компонентів силової електроніки, під час своєї роботи генерують велику кількість вищих гармонік, які потрапляють у мережу. Тому для зниження рівня вищих гармонік у зовнішній мережі використовується блок із фільтром.

Структура фільтра вищих гармонік представлена на рисунку 2.19.



а-вид блоку фільтра, б – параметри блоку, в – електрична схема фільтра

Рисунок 2.19 – Фільтр гармонік струму

Методика розрахунку параметрів фільтра найвищих гармонік. Методика представлена в [14,17] та застосована щодо моделі.

Частота вимкнення:

$$f_{\text{вимк}} = \frac{U_{DC}}{8 \cdot I_{\text{ПС}} \cdot L_{\text{інв}}}$$

де $I_{\text{ПС}}$ - подвоєне значення амплітуди пульсацій струму, яке може бути прийняте як 20% від двійного значення номінального струму, що визначається за виразом:

$$I_{\text{max.AC}} = \sqrt{2} I_{\text{ном.AC}}$$

де $I_{\text{ном.AC}}$ - номінальне значення змінного струму визначиться виразом:

$$I_{\text{ном.AC}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\sqrt{3} U_{\phi}}$$

Для моделі значення, що визначаються за виразами набудуть вигляду:

$$I_{\text{ном.AC}} = \frac{2,14}{\sqrt{3} \cdot 0,69} = 1,79 \text{ кА}$$

$$I_{\text{max.AC}} = \sqrt{2} \cdot 1,79 = 2,54 \text{ кА}$$

Значення пульсуючого струму $I_{\text{ПС}}$ отримаємо як:

$$I_{\text{ПС}} = \frac{20}{100} \cdot 2,54 = 0,508 \text{ кА}$$

Тоді частота вимкнення:

$$f_{\text{вимк}} = \frac{1,45}{8 \cdot 0,508 \cdot 10,6 \times 10^{-5}} = 3369 \text{ Гц}$$

Несуча частота визначається за базовою частотою мережі:

$$C_{f_{\text{несуча}}} = \frac{f_{\text{вимк}}}{f_{\text{мережі}}} = 67,38$$

Для фільтра використовується частота зрізу 200 Гц.

Місткість фільтра, яка необхідна для забезпечення необхідної частоти зрізу визначається за виразом:

$$C_{\text{фільтру}} = \frac{1}{(2\pi f_{\text{зрізу}})^2 \cdot L}$$

Тоді для моделі отримаємо:

$$C_{\text{фільтру}} = \frac{1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 200)^2 \cdot 10,6 \times 10^{-5}} = 5974 \text{ мкФ}$$

					КНУ КРБ.151.25.01.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Демпфуюча гілка необхідна для зниження або повного виключення можливих резонансних коливань, викликаних комбінацією. $LC_{\text{фільтра}}$. Індуктивність демпфуючої гілки визначається як:

$$L_{\text{демпф}} = 5L_{VSC}$$

де L_{VSC} - індуктивність перетворювача напруги. Для моделі відзначимо значення:

Демпфуючий опір визначається за виразом:

$$L_{\text{демпф}} = 5 \cdot 10,6 \times 10^{-5} = 5,3 \times 10^{-4} \text{ Гн}$$

де $C_{\text{демпф}}$ - ємність демпфуючої гілки визначиться за виразом:

$$C_{\text{демпф}} = \frac{C_{\text{фільтру}}}{2}$$

Тоді використовуючи вирази для моделі отримаємо:

$$C_{\text{демпф}} = \frac{5974}{2} = 2987 \text{ мкФ}$$

$$R_{\text{демпф}} = \sqrt{\frac{L_{\text{демпф}}}{C_{\text{демпф}}}} = \sqrt{\frac{5,3 \times 10^{-4}}{2987 \times 10^{-3}}} = 0,42 \text{ Ом}$$

На рисунку 2.20 представлено загальний вигляд моделі блока масштабування, який відповідає за сумарну видавану потужність моделі вітроелектростанції. Таким чином, моделюючи роботу одного генератора і вітротурбіни з визначенням їх параметрів і режиму роботи, можна виконати масштабування на загальну кількість подібних блоків на електростанції, оскільки великі вітроелектростанції зазвичай складаються з великої кількості однотипних вітроустановок. Для моделі прийняте значення кількості установок у складі вітроелектростанції - 100 шт.

Алгоритм роботи блока масштабування передбачає множення вихідного струму з вітротурбіни на загальну кількість вітротурбін і вводиться в систему, використовуючи керовані джерела струму. Також блок масштабування має враховуватися, коли він переходить у реактивну потужність.

Блок масштабування моделюється так само, як і компонент ЛЕП (TLine) з кроком затримки розрахунку (dt).

					КНУ КРБ.151.25.01.02.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

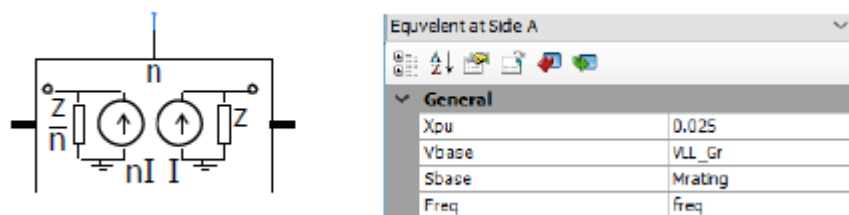


Рисунок 2.20 – Блок масштабування та його параметри

Для блоку масштабування еквівалентна ємність може бути розрахована як:

$$C = \frac{dt}{Z_c}$$

де dt - шаг моделювання, Z_c - хвильовий опір.

Еквівалентний хвильовий опір визначається за виразом:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Для мінімізації впливу послідовно включеної індуктивності в блоці масштабування можна частково використовувати опір розсіювання трансформатора системи, або повітряної чи кабельної лінії енергосистеми, якщо такі є в моделі.

Демпфуючий опір може бути підключений паралельно до блока масштабування для зменшення нестійкості розв'язку.

2.5 Моделювання роботи моделі інтелектуальної вітроелектростанції та верифікація результатів моделювання

Для перевірки адекватності моделі проведено порівняння результатів моделювання зі спрощеною моделлю вітроелектростанцій.

У програмному комплексі PSCAD представлена спрощена модель вітроелектростанції, ця модель дозволяє виконувати моделювання режимів роботи енергосистем за наявності генерації, заснованої на використанні енергії

вітру. Однак, спрощена модель не дозволяє виконувати масштабування блоків і у своєму складі має тільки один генератор.

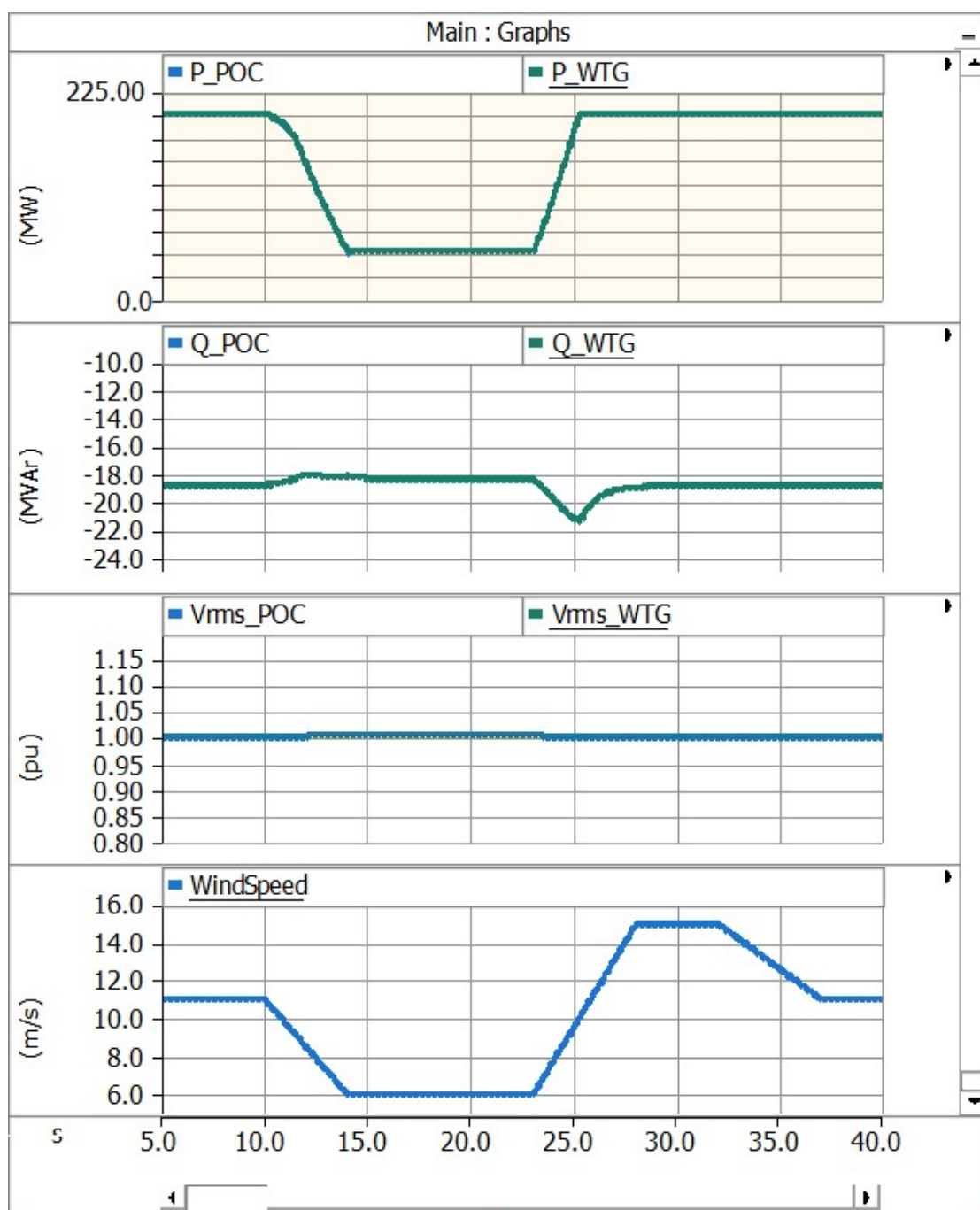


Рисунок 2.21 – Динамічні характеристики, отримані під час використання спрощеної моделі

Запропонована модель – повна модель, має можливість зміни параметрів обладнання та самого обладнання, тобто генератори в моделі можуть бути

замінені на генератори іншого типу. Модель блоків генераторів представлена в бібліотеці стандартних моделей програмного комплексу PSCAD.

Виконаємо порівняння результатів, отриманих при використанні спрощеної моделі та при використанні повної моделі. На рисунках 2.21 та 2.22 представлені динамічні характеристики спрощеної та повної моделі при зміні швидкості вітру.

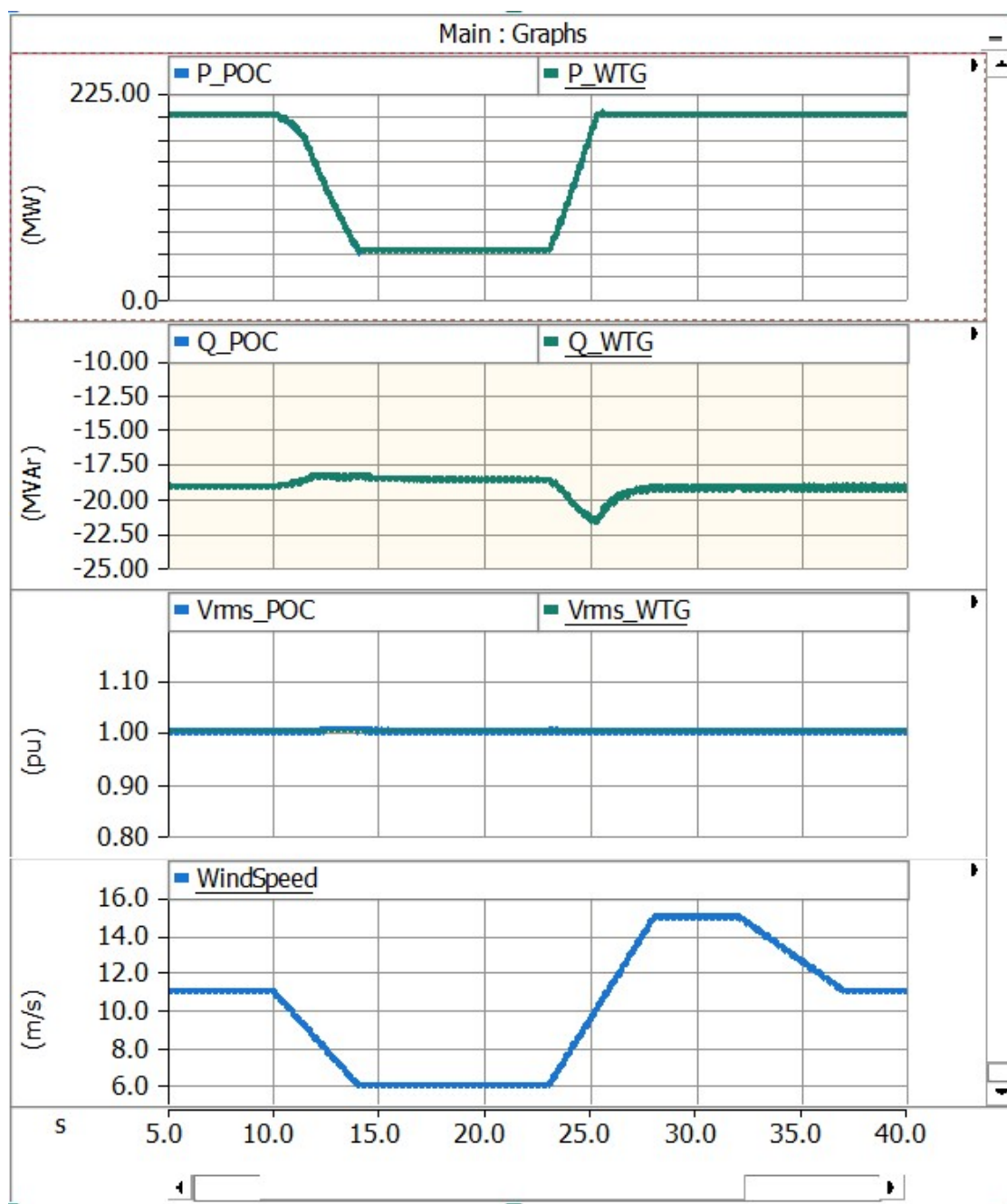


Рисунок 2.22 – Динамічні характеристики, отримані при використанні повної моделі

На рисунках 2.23 та 2.24 показані динамічні характеристики спрощеної та повної моделі під час моделювання трифазного короткого замикання на землю на шинах виходу в енергосистему в момент часу 2 секунди від початку розрахунку.

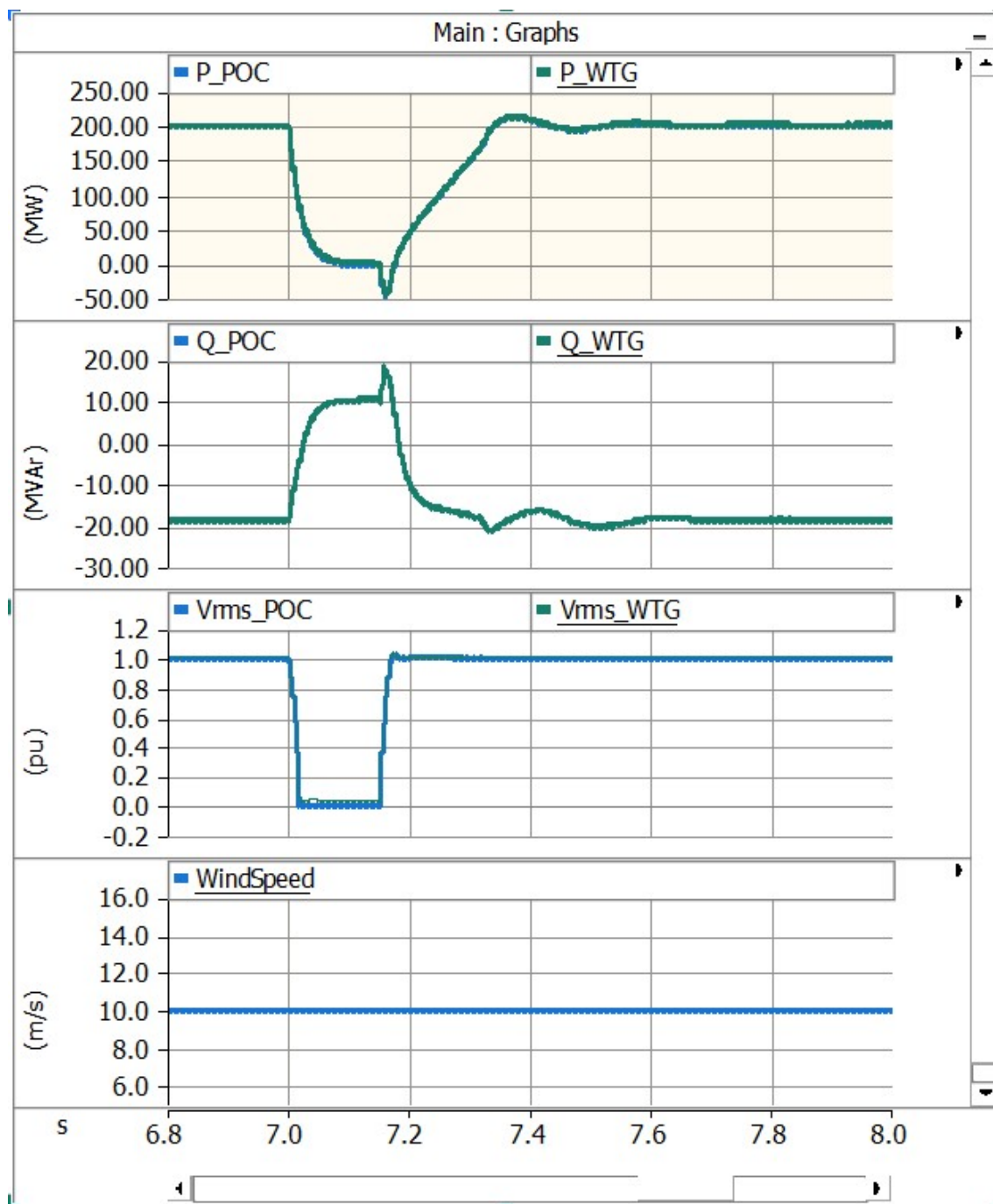


Рисунок 2.23 – Динамічні характеристики, отримані для спрощеної моделі при КЗ на шинах енергосистеми в момент часу 7 с

Перехідні процеси для постійної напруги, активної та реактивної потужностей і швидкості вітру однакові. Швидкість вітру встановлена на номінальне значення 10 м/с, як було отримано у попередньому розрахунку.

У результаті моделювання отримано, що швидкість розрахунку повної моделі перевищує в сім разів швидкість розрахунку спрощеної моделі.

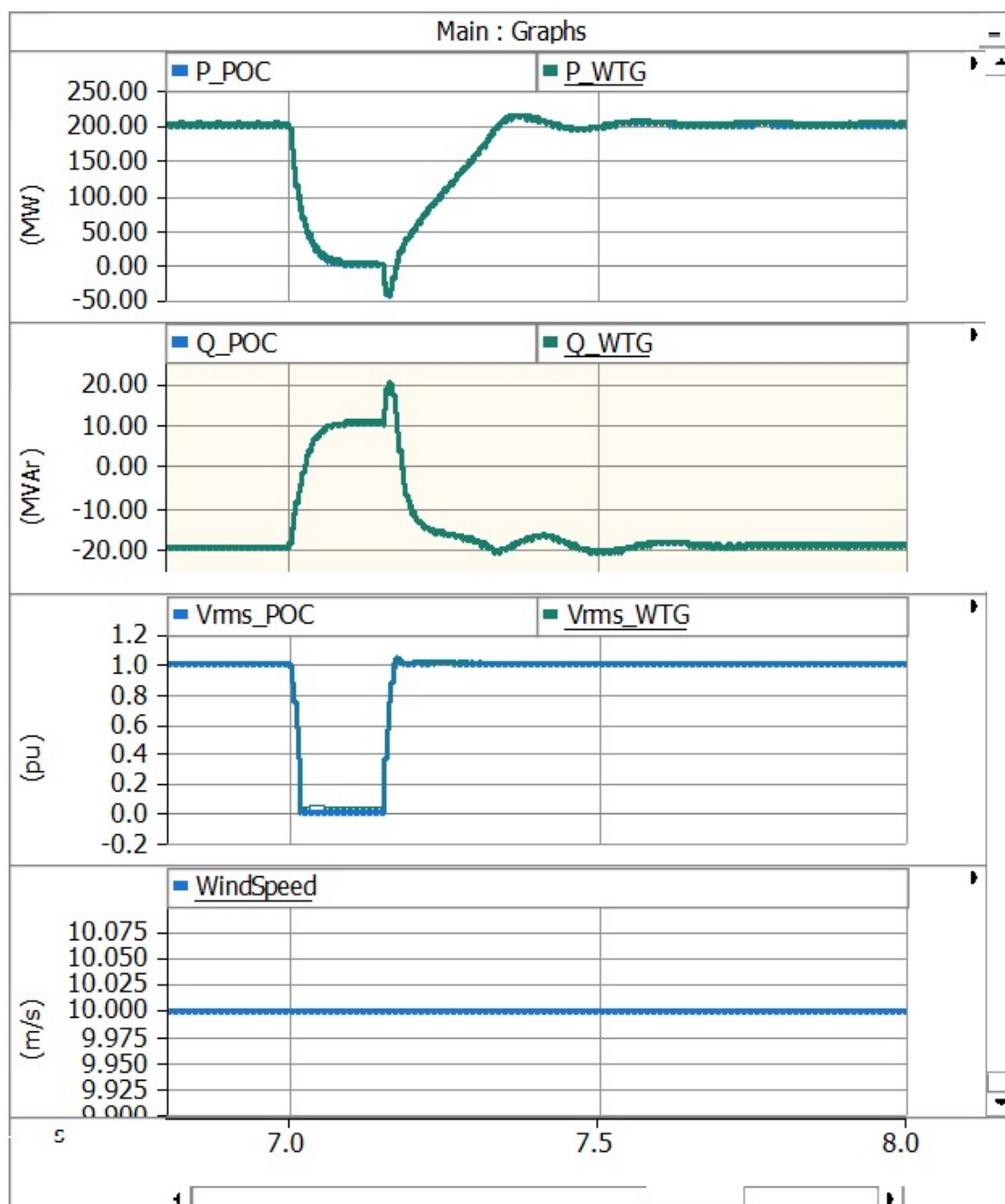


Рисунок 2.24 – Динамічні характеристики, отримані для повної моделі при КЗ на шинах енергосистеми на момент часу 7 с

Отримані результати дозволяють стверджувати про адекватність моделі. Адекватність розробленої моделі дає можливість використовувати її для моделювання режимів роботи енергосистем за наявності генерації, заснованої на перетворенні енергії вітру.

Завдання моделювання перехідних режимів для енергосистем з вітроелектростанції дозволить визначати необхідні параметри режимів енергосистем, виконувати розрахунок уставок релейного захисту та режимної автоматики, що є необхідною вимогою для стійкого функціонування енергосистеми в цілому.

Висновки до розділу:

Для створення моделі інтелектуальної системи видачі потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції виконано аналіз програмних комплексів, визначено їх переваги та недоліки при реалізації конкретно поставленого завдання розробки інтелектуальної системи видачі потужності.

Визначено, що для розробки моделі інтелектуальної системи видачі потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції найбільш підходящим програмним продуктом є програмний комплекс PSCAD.

Розроблена модель інтелектуальної системи видачі потужності вітроелектростанції у програмному комплексі PSCAD. Модель інтелектуальної системи видачі потужності дозволить моделювати різну кількість вітроустановок у складі вітроелектростанції та визначати режими функціонування вітроелектростанції і її вплив на режими роботи електроенергетичної системи.

Виконано моделювання і порівняння результатів зі стандартною моделлю вітроелектростанції. Отримані результати дозволяють стверджувати про адекватність моделі. Адекватність розробленої моделі дає можливість використовувати її для моделювання режимів роботи енергосистем за наявності генерації, заснованої на перетворенні енергії вітру. Завдання моделювання перехідних режимів для енергосистем з вітроелектростанції дозволить

					КНУ КРБ.151.25.01.02.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначати необхідні параметри режимів енергосистем, виконувати розрахунок уставок релейного захисту та режимної автоматики, що є необхідною вимогою для стійкого функціонування енергосистеми в цілому

					<i>КНУ КРБ.151.25.01.02.ПЗ</i>	Арк.
						56
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВИСНОВКИ

Визначено, що на даний момент процедура технологічного приєднання об'єктів розподіленої генерації не відрізняється від процедури приєднання звичайного споживача через відсутність законодавчого розмежування. У зв'язку з цим об'єкти часто встановлюються без розробки схеми видачі потужності. У результаті виникають не враховані схематично-режимні ситуації, в яких стабільна робота об'єкта розподіленої генерації неможлива.

Встановлено, що розвиток систем управління вітрогенераторами залежить від великої кількості важливих факторів: таких як тип генеруючого пристрою, режим роботи вітрового генератора, система регулювання кута повороту лопатей, вартість системи управління. Таким чином, планується розробити систему управління, ефективно керуючу вітроелектростанцією та діагностуючу можливі несправності чи відмови генератора.

Встановлено, що для аналізу режимів роботи вітроелектростанцій, що належать до об'єктів розподіленої генерації, необхідно створити комп'ютерну модель. Яка дозволить враховувати різну кількість генеруючих установок і алгоритми їх роботи, що дозволить виконувати аналіз режимів роботи енергосистеми та їх вплив на параметри вітроелектростанцій.

Розглянуто типову конструкцію вітроелектрогенератора, визначено основні складові частини вітроелектрогенератора. Визначено основні конструкції вітротурбін, що використовуються в складі установок вітрогенераторів. Визначено основні переваги та недоліки кожного типу вітротурбіни. Для розробки інтелектуальної системи видачі потужності вітроелектростанції раціональним для великих і потужних вітроелектростанцій є застосування горизонтально-осьових установок вітротурбін, оскільки їх ефективність набагато вища, ніж вертикально-

					<i>КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВИСНОВКИі</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Беляєв С.Е.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Жосан АєАє</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22ск</i>		
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						57	2

осьових установок.

Висота установки з горизонтально-осьовою турбіною може бути визначена в залежності від місцевості та регіону будівництва вітроелектростанції. Для використання в потужних вітроелектростанціях найбільш ефективним є використання синхронного генератора з класичною конструкцією. Перевагами є можливість видачі великої потужності. Недоліком цього генератора є висока ймовірність виникнення нестабільної роботи в режимі паралельно з мережею при різких перепадах вітрового навантаження.

Для створення моделі інтелектуальної системи видачі потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції виконано аналіз програмних комплексів, визначено їх переваги та недоліки при реалізації конкретно поставленого завдання розробки інтелектуальної системи видачі потужності.

Визначено, що для розробки моделі інтелектуальної системи видачі потужності вітроустановки у складі вітроелектростанції найбільш підходящим програмним продуктом є програмний комплекс PSCAD.

Розроблено модель інтелектуальної системи видачі потужності вітроелектростанції у програмному комплексі PSCAD. Модель інтелектуальної системи видачі потужності дозволить моделювати різну кількість вітроустановок у складі вітроелектростанції та визначати режими функціонування вітроелектростанції і її вплив на режими роботи електроенергетичної системи.

Адекватність розробленої моделі дозволяє використовувати її для моделювання режимів роботи енергосистем у присутності генерації, заснованої на перетворенні енергії вітру. Моделювання перехідних режимів для енергосистем з вітроелектростанцій дозволить визначати необхідні параметри режимів енергосистем, виконувати розрахунок установок релейного захисту та режимної автоматики, що є необхідною вимогою для стійкого функціонування енергосистеми в цілому.

					<i>КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Koutroulis E., Kalaitzakis K. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. № 2. PP. 486–494.
2. Kwon J.M., Kim J.H., Kwak S.H., Lee H.H. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems /*Proc. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technology*, Singapour. 2008. № 11. P. 639–643.
3. Matsui M., Xu D., Kang L., Yang Z. Limit Cycle Based Simple MPPT Control Scheme for a Small Sized Wind Turbine Generator System / *Proc. of 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Xi'an. 2004. № 14. P. 1746–1750.
4. Patsios, C., Chaniotis, A., Kladas, A. A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators / *IEEE PESC* 2008, Rhodes. 2008. № 6. P. 1749–1754.
5. Thongam J.S., Ouhrouche M. MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems /*Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. 2011. № 1. P.339–360.
6. Wang Q., Chang L. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems / *IEEE Trans. Power Electron* 2004. № 5. P. 1242–1249.
7. Yaoqin J., Zhongqing Y., Binggang C. A new maximum power point tracking control scheme for wind generation / *Proc. International Conference on Power System Technology*. 2002. № 13. P. 144–148.
8. Ackermann Th., Andersson G. Soder L. Distributed Generation: A Definition / *Electric Power System Research*. 2001. Vol. 57, № 4. P 195-204.

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Беляєв С.Е.			СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Жосан А.А.								59	3
								КНУ АКІТ-22ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затвердив		Маринич І.А.									

9. Праховник, А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения. К.: Освита України, 2007. 464 с.

10. Siegfried H. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998

11. Clark K., Miller N.W., Sanchez-Gasca J.J. Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies. Version 4.5, April 16, 2010

12. Сабірзянов Т., Кубкін М., Солдатенко В., Мартиненко В., «Узагальнена математична модель накопичувача енергії. Збірник наукових праць кіровоградського національного технічного університету, р. 145–150, 2012.

13. Ладієва Л. Оптимальне керування системами. Навчальний посібник., 2000: КПІ ім.. Ігоря Сікорського, Київ.

14. Барило А., Бенменні М., Будько В., Будько М., Васько П., Відроджувальні джерела енергії. Монографія, Київ, 2020.

15. Павловський В., Лук'яненко Л., Гончаренко І., Захаров А. Обмеження потужності відроджуваних джерел енергії за умови приєднання до електричної мережі, *Праці ІЕД НАНУ*, № 43, pp. 18-23, 2016.

16. Medykovskyy M., Melnyk R. Modeling of the energy-dynamic modes of the wind farm with the battery energy storage system (BESS), *Journal of Computational Problems of Electrical Engineering*, т. 11, № 1, 2021.

17. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

18. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

19. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

					КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

21. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					<i>КНУ КРБ.151.25.01.00.ПЗ</i>	Арк.
						61
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

