

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи керування вітровою
електростанцією

Виконав: студент

VI курсу, групи КТМ-61

спеціальності

174 Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Кравчук М.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Тотосько О.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи керування вітровою
електростанцією

Виконав: студент

VI курсу, групи КТм-61

спеціальності

174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Лехняк В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Золотий Р.З.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Микитишин А.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Кравчуку Михайлу Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи керування вітровою електростанцією

Керівник роботи Тотосько Олег васильович, к.т.н., доцент кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « ____ » _____ 2023 року № _____

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про автоматизацію вітрових електростанцій

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна

Спеціальна частина

Безпека в надзвичайних ситуаціях, охорона праці, Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент кафедри КТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В. М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2023	Виконано
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2023-28.11.2023	Виконано
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2023-1.12.2023	Виконано
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2023-4.12.2023	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2023-7.12.2023	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2023-10.12.2023	Виконано
7.	Оформлення четвертого розділу	11.12.2023-13.12.2023	Виконано
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	14.12.2023-15.12.2023	Виконано
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2023-17.12.2023	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2023-19.12.2023	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.12.2023-20.12.2023	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	21.12.2023	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2023	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

_____ (підпис)

Кравчук М.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Тотосько О.В.

_____ (прізвище та ініціали)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент кафедри КТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В. М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2023	Виконано
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2023-28.11.2023	Виконано
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2023-1.12.2023	Виконано
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2023-4.12.2023	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2023-7.12.2023	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2023-10.12.2023	Виконано
7.	Оформлення четвертого розділу	11.12.2023-13.12.2023	Виконано
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	14.12.2023-15.12.2023	Виконано
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2023-17.12.2023	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2023-19.12.2023	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.12.2023-20.12.2023	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	21.12.2023	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2023	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

_____ (підпис)

Лехняк В.П.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Тотосько О.В.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає 78 друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано 54 літературних джерел.

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування вітровою електростанцією на базі SCADA системи.

Для досягнення поставленої мети було проаналізовано всі аспекти роботи вітрової станції. Описано всі параметри роботи системи керування, розглянуто всі сучасні інновації, які використовуються для оптимізації процесу роботи вітрової станції.

Для системи було розроблено алгоритм роботи, описано всі режими як стаціонарні так і аварійні. Результати роботи дозволять інженерам більш якісно обирати обладнання та алгоритми роботи для побудови ефективних вітрових електростанцій.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ВІТЕР, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ANNs (англ. Artificial neural networks) - Штучні нейронні мережі
- ANFIS (англ. Adaptive neuro-fuzzy inference systems) - Адаптивні нейронечіткі системи логічного висновку
- CCTV (англ. The closed-circuit television) - Системи замкнутого телебачення
- CM (англ. Condition monitoring) - Моніторинг стану
- CMS (англ. Condition monitoring system) - Система моніторингу стану
- DCS (англ. Distributed control system) - Розподілена система управління
- DC (англ. Direct current) - Постійний постійний струм
- EPON (англ. Ethernet Passive Optical Network) - Пасивна оптична мережа EPON Ethernet
- FIS (англ. Fuzzy inference system) - Система нечіткого логічного висновку
- HVDC (англ. High-voltage direct-current) - Високовольтний постійний струм
- HMI (англ. Human Machine Interface) - Людино-машинний інтерфейс
HMI
- HV-IGBT (англ. High voltage isolated gate bipolar transistor) - Високовольтний біполярний транзистор із ізольованим затвором
- IEDs (англ. Intelligent electronic devices) - Інтелектуальні електронні пристрої
- IT (англ. Information technology) - Інформаційні технології
- KPIs (англ. Key Performance Indicators) - Ключові показники ефективності
- LVRT (англ. Low Voltage Ride-Through) - Низька напруга Ride-Through
- MPH (англ. Mile per hour) - Миля на годину
- MV (англ. Medium voltage) - Середня напруга

NNs (англ. Neural networks) - Нейронні мережі

OLT (англ. Optical Line Terminal) - Термінал оптичної лінії

OPC (англ. Open connectivity) - Відкрите підключення

ONU (англ. Optical network unit) - Блок оптичної мережі

PCC (англ. PC Controller) - Контролер ПК

PLC (англ. Programmable Logic Controller) - Програмований логічний контролер

POS (англ. Passive optical splitter) - Пасивний оптичний розгалужувач

RTU (англ. Remote Terminal unit) - Віддалений термінал

RPM (англ. Revolution per minute) - Обороти за хвилину

SCADA (англ. Supervisory Control and Data Acquisition) - Контроль та збір даних

SOE (англ. Sequence of events) - Послідовність подій

SVM (англ. Support Vector Machine) - Векторна машина підтримки

TMA (англ. VAWT vertical axes wind turbine) - Вітрова турбіна з вертикальними осями

WTG (англ. Wind turbine generator) - Вітрогенератор

WTC (англ. Wind turbine controller) - Контролер вітрової турбіни

WPP (англ. Wind power farms) - Вітряні електростанції

WPP (англ. Wind power plant) - Вітроелектростанція

WTGs (англ. Wind turbine generation system) - Система виробництва вітрових турбін

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	12
1.1. Системи SCADA у роботі вітрових електростанцій	12
1.2. Характеристики системи SCADA вітряної електростанції	17
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	19
2.1. Керування вітрогенераторною системою за допомогою SCADA	19
2.2. Основні завдання системи керування вітрогенератором.....	21
2.3. Функціональність системи SCADA вітрової електростанції.	22
2.4. Структура SCADA для вітряної електростанції.	25
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	27
3.1 Конфігурація мережі даних для системи SCADA	27
3.2. Прилади системи SCADA.	32
3.3. Стандарти вітряних електростанцій, підключених до мережі.	36
3.4. Система керування WPP.....	39
3.5. Управління вітровими турбінами.....	40
3.6. Сталій контроль.....	41
3.7. Управління та керування вітряними електростанціями.....	46
4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	48
4.1 Аналіз роботи контролера зовнішнього контуру.....	48
4.2. Робота WTG зі змінною потужністю.	52
4.2. Робота WTG із постійною потужністю.....	53

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	57
5.1 Моніторинг стану вітрових електростанцій.....	57
6 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ, ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
6.1 Організація охорони праці при експлуатації системи.....	64
6.2 Розрахунок заземлення	66
6.3. Розрахунок стійкості об'єкта до вибуху газо-повітряної суміші.....	69
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	72

ВСТУП

SCADA — це абревіатура, яка означає «Диспетчерське керування та збір даних». Це важливий інструмент для контролю та моніторингу різних вимірювань системи генерації вітряних турбін (WTG), і його зазвичай додають разом із вітровими турбінами. SCADA служить основним інтерфейсом між оператором WTG та обладнанням WTG [1–4]. Це дозволяє інтегрувати всю інформацію про ВЕУ, метеорологічну щоглу та підстанцію в одній точці контролю, повторного захоплення та зберігання робочих даних від ВЕУ та різних сигналів тривоги.

Крім того, SCADA дозволяє надсилати керуючі сигнали від оператора вітрової електростанції до контролера вітрової турбіни. В даний час тенденція до виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії широко поширена в багатьох проектах. В найближчому майбутньому будуть побудовані вітрові електростанції (WPP). Очікуване зростання вітроелектростанцій (WPP) суттєво вплине на контроль, роботу та керування електричною мережею сьогодні.

Для вивчення підсистем WTG (WTG) (турбіни, колекторної системи, підстанцій тощо) проводиться багато досліджень та досліджень, які обговорювалися та розглядалися в багатьох публікаціях [5–10]. Однак інфраструктура систем SCADA та відповідних комунікаційних мереж на вітрових електростанціях відносно менше опрацьовуються та рідко обговорюються [10–12]. Типова вітроелектростанція складається з вітрових турбін, метеорологічної системи та місцевої мережі вітрових турбін, пункту збору та трансформаторної підстанції.

Силові кабелі різної площі поперечного перерізу використовуються для передачі електроенергії від вітрових турбін, які підключаються до системи об'єкта через трансформатори та розподільні лінії [13].

Суттєві характеристики SCADA, необхідні для системи вітрових електростанцій, можна підсумувати наступним чином:

- Для інтеграції даних ВЕУ, підстанції та метеорологічної вежі в єдину систему.
- Забезпечити частий доступ до даних вітроенергетики з локального ПК, розміщеного в будівлі підстанції, і віддалено з диспетчерських центрів.
- Щоб дозволити модифікувати різні параметри керування вітровими турбінами.
- Протоколи зв'язку, які використовує система, мають бути сумісними з іншими.
- Зазвичай, щоб гарантувати безпеку техніків, які працюють всередині вітрової електростанції, чітка ієрархія повинна бути заздалегідь визначена для всіх користувачів.
- Необхідно відобразити декілька параметрів для кожного компонента вітрової установки.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Системи SCADA у роботі вітрових електростанцій

Метою роботи є ознайомлення з найсучаснішими технологіями управління та автоматизації вітрових електростанцій.

Зазвичай при управлінні такими електростанціями необхідні наступні умови:

1. Дані WTG: цифрові дані, такі як активні тривоги та статус (готовий, працює, зупинено, призупинено). Аналогові дані, такі як потужність (кВт), коефіцієнт потужності, швидкість (вітрогенератора, ротора), температури, струми та напруги для трьох фаз.

2. Вимірювальна вежа: або Мет (метеорологічна) щогла, яка вимірює швидкість і напрям вітру, тиск, температуру, стан батареї. Вимірювальна вежа або мет-щогла можуть бути окремо стоячою вежею або рухомою щоглою, на якій розміщуються вимірювальні або метеорологічні прилади. Такі прилади використовуються для вимірювання швидкості та напрямку вітру, термометри. Метеорологічні щогли є важливими для розвитку вітряних електростанцій, оскільки точне знання швидкості вітру є основою для того, щоб знати, скільки енергії буде згенеровано та чи витримають турбіни на місці.

3. Підстанція: лінійна напруга та струм, передана активна та реактивна потужність, стан автоматичного вимикача, тривоги підстанції та події системи захисту. Користувач повинен мати можливість змінювати різні параметри системи в будь-який час. Це також включає команди відкриття та закриття головного вимикача.

4. WTG: команди запуску та зупинки WTG, використання системи орієнтації, передача даних про виробництво електроенергії. Однак різні звіти можуть бути створені з даними, наданими системою SCADA, такими як

вироблена потужність, визначення кривої потужності, доступність турбіни, статистика відмов, дані про вітер (швидкість і турбулентність), активна та реактивна потужність і потужність коефіцієнт ($\cos \phi$) на підстанції. Системи SCADA зберігають, витягують, і експортують величезну кількість даних різноманітним зацікавленим сторонам, кожен з різними потребами: Центр віддаленого керування: Центр керування повинен мати можливість швидко й ефективно маніпулювати сигналами тривоги та умовами системи, виявляючи першопричину несправностей, не приховуючи їх. за допомогою каскадної сигналізації.

Архітектура системи SCADA для вітряних електростанцій показана на рис. 1.1. Віддалений моніторинг і діагностика: віддалений операційний центр повинен мати можливість швидко маніпулювати та інтерпретувати дані для вирішення операційних і системних проблем.

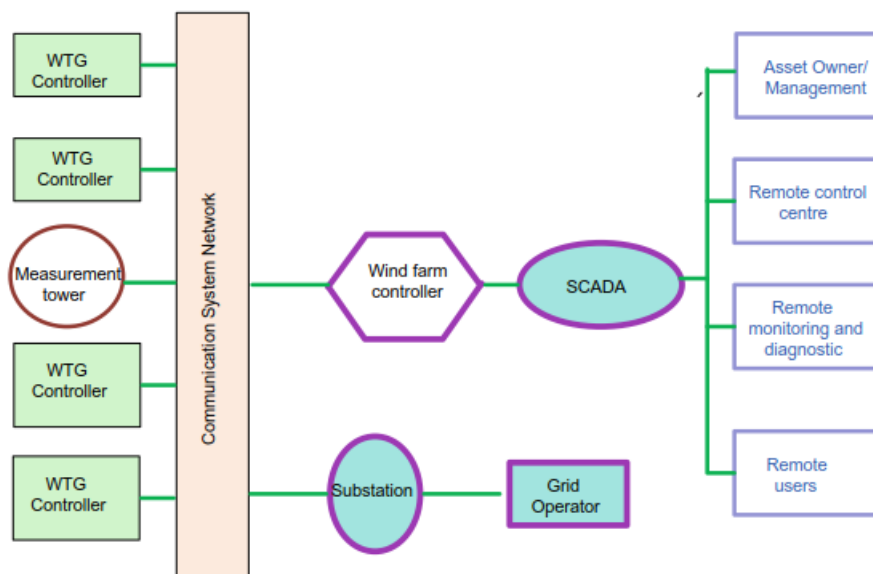


Рисунок 1.1 - Архітектура системи SCADA у вітряній електростанції

Крім того, історичні дані SCADA можна використовувати для аутентифікації обчислювальних моделей або вдосконалення нових моделей. Власники активів: цей пакет використовує вихідні дані SCADA для розрахунку доходу від електроенергії та розрахунку втрат енергії тощо.

Система SCADA вітряної ферми.

Генератор вітрової турбіни складається з тих самих вітрових турбін, автоматичних вимикачів і підвищувального трансформатора. Напруга генерації підвищується для кожної вітрової турбіни за допомогою перетворювача напруги. Вітрові турбіни розділені на групи, і кожна група підключена до колекторної шини через автоматичний вимикач. Кілька згрупованих фідерів підключаються до високовольтного трансформатора (HV), який підвищує напругу до рівня передачі [14–16].

На рис. 1.2 показана типова однолінійна схема WTG. Вітрові електростанції поділяються на різні регіони: зона вітрових турбін, зона живлення колектора, зона колекторної шини, зона високовольтних трансформаторів і зона лінії електропередач.

Основними компонентами WTG є вітрові турбіни, метеорологічна система та електрична система [15]. Однак системи SCADA корисні для віддаленого моніторингу, збору даних, реєстрації даних і контролю в реальному часі [16]. Дистанційно система збирає інформацію про роботу компонентів WTG і на основі зібраної інформації центр керування виконує відповідні процедури. Кожна WTG має спеціальне з'єднання з локальним диспетчерським центром для моніторингу та контролю в реальному часі.

Однак один центр управління може дистанційно керувати однією або декількома вітровими електростанціями.

Системи SCADA в WPP охоплюють багато застосувань. Три основні програми: турбінна система SCADA, система вітрової електростанції SCADA та система безпеки SCADA [6–8]. Програмна система включає два типи програмного забезпечення: SCADA та прикладне програмне забезпечення. Робочі станції оператора прив'язані до мережевої архітектури, що дозволяє контролювати операції в режимі реального часу.

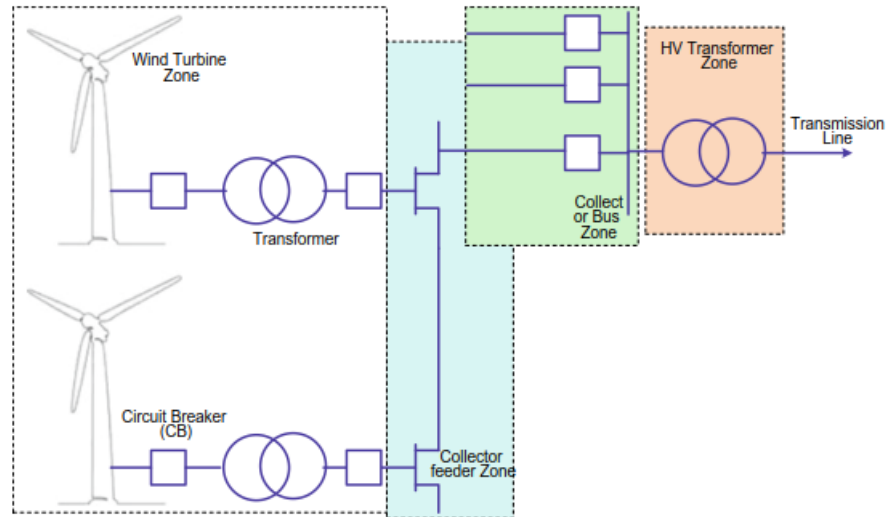


Рисунок 1.2 - Конфігурація типової вітрової електростанції

Рішення SCADA включають:

- Рішення SCADA для нагляду, моніторингу, керування та звітування про роботу WTG.
- Запис послідовності подій (SOE) для точної послідовності тривоги і подій, що скорочує час на усунення несправностей.
- Мережеві рішення включають служби, які допомагають з оцінкою, проектуванням, впровадженням - проектування, управління та аудит інфраструктури.
- Програмне забезпечення для вітрових електростанцій.
- Програмне забезпечення для проектування та експлуатації, яке дозволяє розширювати та оновлювати систему.
- Програмне забезпечення для брандмауера та безпеки для промислових мереж.
- Управління та контроль вітряної електростанції.

Для ефективного керування WTG необхідні різноманітні рішення. Високоєфективна система керування вітряними турбінами містить програмне забезпечення SCADA для моніторингу, збору даних, управління та звітності для генераторів вітрових турбін. Надійні системи автоматизації та мережеві

технології підтримують вітряні електростанції у відповідності до зростаючих норм мережевого кодексу.

Системи SCADA та надійні системи керування вітровими турбінами покращують роботу генератора вітрової турбіни або всієї вітрової електростанції. Як правило, системи керування вітряними турбінами розроблені для максимальної доступності. Вітряні електростанції повинні швидко реагувати на нестабільність попиту.

Для оптимізації роботи окремих вітряних електростанцій і керування цілим флотом для підвищення ефективності, економії витрат і покращення загального управління активами потрібне надійне рішення для керування.

Система керування разом із інтегрованим блоком керування вітряною турбіною та технологією SCADA може допомогти керувати як окремими вітровими турбінами, так і ширшими ресурсами вітрової електростанції, щоб допомогти зменшити час простою генератора турбіни та підвищити доступність. Рішення для керування вітровими турбінами охоплюють системи автоматизації для вітрових турбін і вітряних електростанцій.

Широкий спектр систем керування вітряними турбінами можна використовувати для офшорної та/або наземної вітроелектростанції та управління вітряними електростанціями. Ці рішення допомагають вітровим турбінам і фермам працювати безперебійно та економічно ефективно.

Прогнози енергії від вітрових електростанцій збираються системними операторами, щоб покращити графік передачі електроенергії для вітряних електростанцій і традиційних генераторів, щоб підтримувати безпеку системи з коливаннями потужності вітру [14, 15]. Загальна схема управління вітроенергетичною системою показана на рис. 1.3. Центр управління вітряною електростанцією приймає команди диспетчеризації електроенергії від оператора системи.

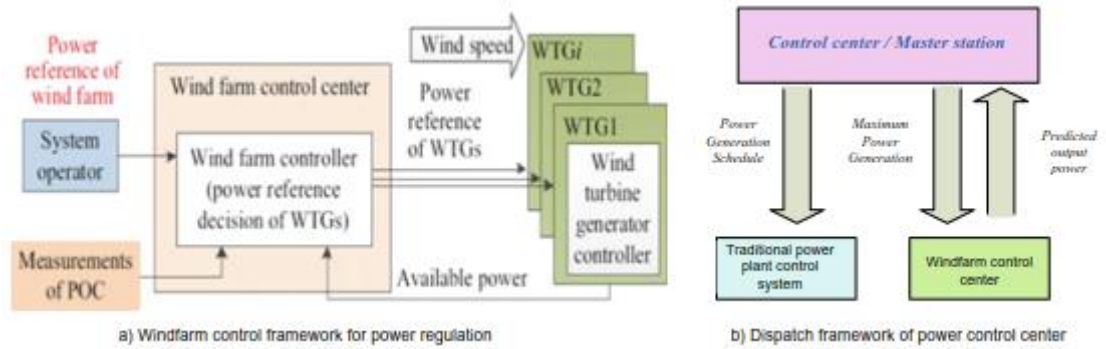


Рисунок 1.3 - Загальна структура керування для енергетичної системи та вітрової електростанції.

Отже, розподіляє опорні рівні потужності між контролерами окремих вітрогенераторів, що, у свою чергу, сприяє утриманню вітровою електростанцією вихідної потужності в межах диспетчераш замовлення оператора системи [16–19]. Крім того, вітроелектростанції, які мають компетенцію з управління потужністю, здатні зробити свій внесок на початковому етапі відновлення вітроенергетичної системи.

1.2. Характеристики системи SCADA вітряної електростанції

Вітер — це нескінченно поновлюване джерело енергії, яке можна використовувати як джерело енергії преміум-класу за умови правильного розташування та новітньої технології виробництва турбін. На фермі окремі вітрогенератори підключені до системи збору середньої напруги (СН) і мережі зв'язку [20].

Потім цю електроенергію середньої напруги підвищували за допомогою трансформатора до системи передачі високої напруги (HV) та електричної мережі. У міру збільшення кількості генераторів WTG на вітрової електростанції потреба в управлінні цими активами поступово стає більш важливою. Система SCADA пропонує доступ у режимі реального часу до діагностики генераторів вітрових турбін і генераторів, а також дозволяє

легко керувати даними вітроенергетики та безперервно спілкуватися з віддаленими об'єктами виробництва вітряної енергії.

Таким чином, ці системи повинні підтримувати кілька комунікаційних мереж (мікрохвильову, стільникову, волоконно-оптичну мережу, радіо тощо) і включати схеми резервування та відновлення після відмови. Управління генеруючими ресурсами вітрової електростанції допомагає скоротити час простою генерації турбін і підвищує доступність завдяки тому, що вітрова система SCADA є частиною стратегії вітрової автоматизації.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Керування вітрогенераторною системою за допомогою SCADA

SCADA використовується для нагляду, моніторингу та дистанційного керування вітровими турбінами та вітряними парками. SCADA забезпечує повне дистанційне керування та нагляд за цілим вітропарком та окремими вітровими турбінами [21–23]. Система SCADA може працювати на робочій станції оператора в диспетчерській вітрової електростанції або її можна відобразити на будь-якому підключеному до Інтернету комп'ютері, який має доступ до вітрової електростанції за допомогою протоколу зв'язку TCP/IP [24].

Загальна система керування вітряною електростанцією показана на рис.

2.1.

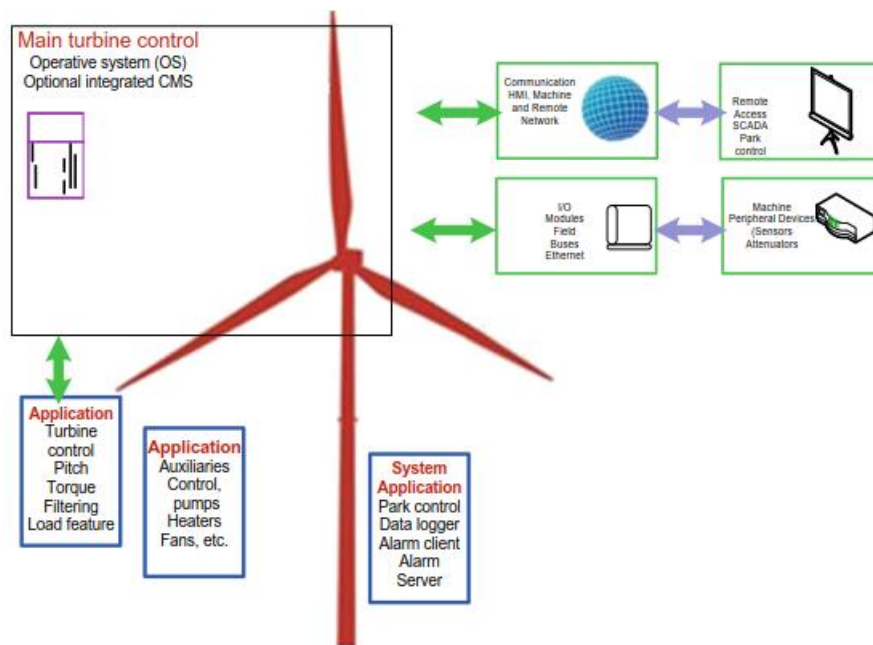


Рисунок 2.1 - Загальна система керування вітряною турбіною

Основні функції системи SCADA можна підсумувати наступним чином:

- Огляд вітряного парку.
- Керування вітряним парком.
- Огляд турбіни.
- Керування турбіною.
- Перегляд журналу.
- Створення звіту.

Системи SCADA у вітряному парку.

Система SCADA надає огляд вітряного парку за допомогою графічного інтерфейсу користувача вітряного парку, що відображає статус кожної окремої турбіни. Крім того, показано струми, напруги та дані про виробництво енергії вітру.

Контроль вітряного парку.

Система SCADA в огляді вітряного парку дозволяє запускати/зупиняти дії всієї вітрової електростанції, груп турбін або окремих вітряних турбін. Крім того, контроль парку використовується для встановлення лімітів виробництва енергії для всієї WTG. Метою керування вітряним парком є максимізація виробництва енергії для вітряної електростанції, одночасно зменшуючи витрати на інфраструктуру та експлуатацію.

Для більшості проектів економіка більш чутлива до змін у виробництві енергії, ніж до капітальних витрат на інфраструктуру. Тому доцільно використовувати виробництво енергії як домінуючий параметр планування. Однак повне проектування WTG здійснюється за допомогою інструментів проектування WTG.

Огляд вітрової турбіни.

Система SCADA має функції для огляду турбіни, які дають повний огляд усіх важливих параметрів вітряної турбіни, наприклад, електричних параметрів, швидкості обертання, кута нахилу, температури та системи

повороту тощо. Система SCADA використовується для моніторингу параметрів турбіни з віддаленої зони терміналу. WTG контролюється через центральний інтерфейс, який збирає дані з окремих компонентів зовнішньої станції.

Перегляд журналів.

Реєстратор подій SCADA надає повне високорівневе уявлення про процес виробництва електроенергії, який є безперервним у часі та фіксує інформацію про дії користувачів, системні зміни у вітрових парках, а також оновлення стану системи. Система SCADA переглядає гнучкі структури даних журналу вітрової турбіни. Усі відповідні дані журналу мають мітку часу, доступні та можуть бути впорядковані за різними параметрами.

Створення звіту.

Система SCADA створює звіт на основі сигналу тривоги, тригери стану створюють звіт, коли щось увімкнено або вимкнено. Більшість власників потребують інформації, яка регулярно вилучається з SCADA для цілей аналізу роботи (дослідження навантаження, аналіз продуктивності, ініціативи з енергозбереження тощо) [25, 26].

Звіти можуть бути створені автоматично або вручну. Звіти можуть бути створені шляхом вилучення інформації, а переформатування, як правило, одноразово перевищує витрати на виділення та автоматизацію звіту SCADA. Генератор звітів системи SCADA дозволяє створювати всі необхідні звіти на основі реєстрації даних. Згенеровані звіти можуть бути представлені графічно, щоб забезпечити найкращий перегляд даних.

2.2. Основні завдання системи керування вітрогенератором

На рис. 2.2 показано систему керування вітрогенератором. Однак основні завдання системи керування вітрогенератором можна підсумувати наступним чином:

- Оперативне управління та моніторинг.
- Діагностика вітрових парків, безпека.
- Зв'язок, звітність та реєстрація даних.

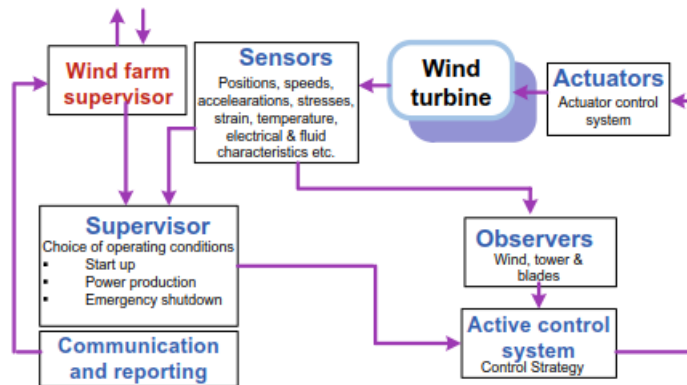


Рисунок 2.2 - Архітектура системи керування вітрогенератором.

Робочі стани вітрогенератора включають наступні стани: холостий хід, пуск, нормальне виробництво електроенергії, нормальне відключення та аварійне відключення [15, 27–35]. Основні вхідні дані для системи SCADA включають швидкість вітру, швидкість ротора, крок лопаті, електричну потужність і температуру в критичній зоні. Однак деякі системи включають деформації, напруги (вежа, лопаті), швидкість, положення (відкидання, лопаті, приводи, нахил ротора, кут балансування, властивості та рівні рідини, електричну систему (струми, напруги, характеристики електромережі), умови обледеніння, освітлення, вологість).

2.3. Функціональність системи SCADA вітрової електростанції.

Система SCADA відображає компоненти WTG у графічному інтерфейсі користувача та автоматично записує умови вітряної турбіни. Система записує дані про доступність турбіни, події, виробництво

електроенергії та дані про несправності в режимі реального часу. На панелі дисплея можна використовувати функції панорамування, нахилу та масштабування.

Таким чином, оператори вітряних електростанцій можуть натиснути на малюнок, що представляє вітряну турбіну, і контролювати продуктивність турбіни, отримуючи доступ до набору даних у реальному часі. Як правило, система SCADA у вітряних електростанціях створює компроміс безперервного та відкритого підключення (OPC), і оператор може отримати доступ до панелей приладів будь-де, будь-коли та на будь-якому підключеному пристрої.

Система SCADA вітряної електростанції дозволяє користувачам відстежувати та контролювати віддалені роботи та турбіни в режимі реального часу. Оператори можуть отримати доступ до точної інформації в режимі реального часу, включаючи оновлену інформацію про погоду та метеорологічні дані, а також повністю конфігуровані ключові показники ефективності (KPI).

Порівняння звітів про виробництво енергії з історичною інформацією допомагає отримати точні прогнози. Проте мережа головної станції показана на рисунку 2.3.

Системи SCADA вітряної електростанції надають користувачам багату візуалізацію SCADA та звіти, які інтегруються в режимі реального часу. Отже, історичні географічні карти місцевості та швидкий огляд кількох операцій і заводів, розташованих у будь-якій точці відповідної електричної мережа.

Системне програмне забезпечення вітряної електростанції SCADA розгортається через Інтернет, публікується, налаштовується в Інтернеті та доставляється на будь-яку платформу за допомогою різних програмних технологій [36, 37]. Завдяки відкритому підключенню через OPC, Modbus, BACnet і IEC61400-25 програмне забезпечення вітряної системи SCADA

дозволяє інтегрувати обладнання, технологічні та професійні дані в єдине інтегроване подання операцій установки, а також забезпечує контрольні дії роботи вітрової електростанції.

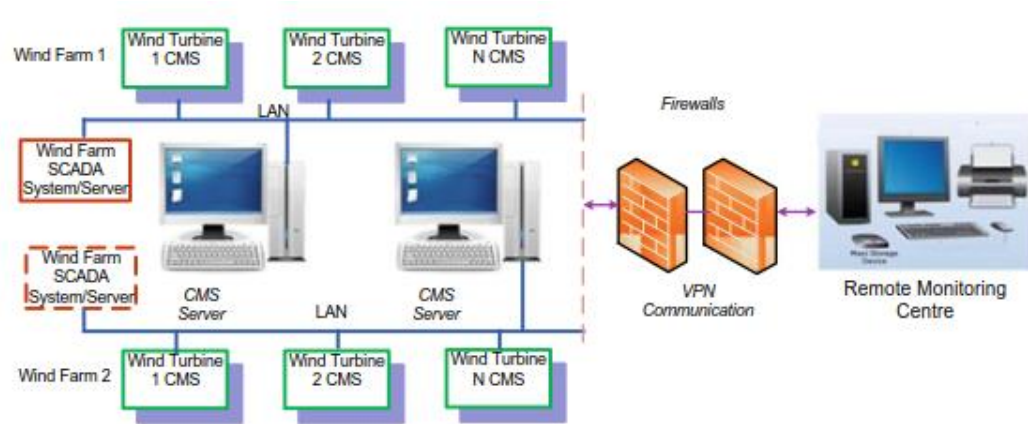


Рисунок 2.3 - Мережа головної станції

Користувачам надається надійна, безпечна та миттєва реакція на вимоги до енергії, навколишнього середовища та роботи. SCADA у вітрових електростанціях поєднує технологію масштабованого відображення з класичним диспетчерським керуванням і збором даних. Для територіально розподілених активів SCADA забезпечує безпечну, масштабовану та надійну візуалізацію та відстеження активів і вітрових турбін за допомогою координат GPS. Технологія SCADA забезпечує легку навігацію для швидкого відображення умов тривоги та стану будь-якого місця в усьому світі. За лічені секунди продуктивність активів, турбін, проблеми або умови тривоги можна знайти та визначити за допомогою інтеграції з прикладним програмним забезпеченням.

2.4. Структура SCADA для вітряної електростанції.

Система SCADA відповідає за збір і керування всіма даними, зібраними з віддаленого терміналу (RTU) на зовнішній вітротурбіні та сервера SCADA на головній станції центру керування для моніторингу та наглядовий контроль. Основний зв'язок у системі SCADA, що використовується з WTG, проілюстрований на рис. 2.4. Однак усі дані з вітряної електростанції збираються та надсилаються через канал зв'язку, такий як волоконно-оптичні кабелі, до головної станції (центру управління).

Сервер SCADA у WPP є промисловим комп'ютером, який вважається головним у системі SCADA, тоді як усі RTU діють як підлеглі [1]. Іноді один RTU діє як головний для збору інформації з підлеглих RTU.

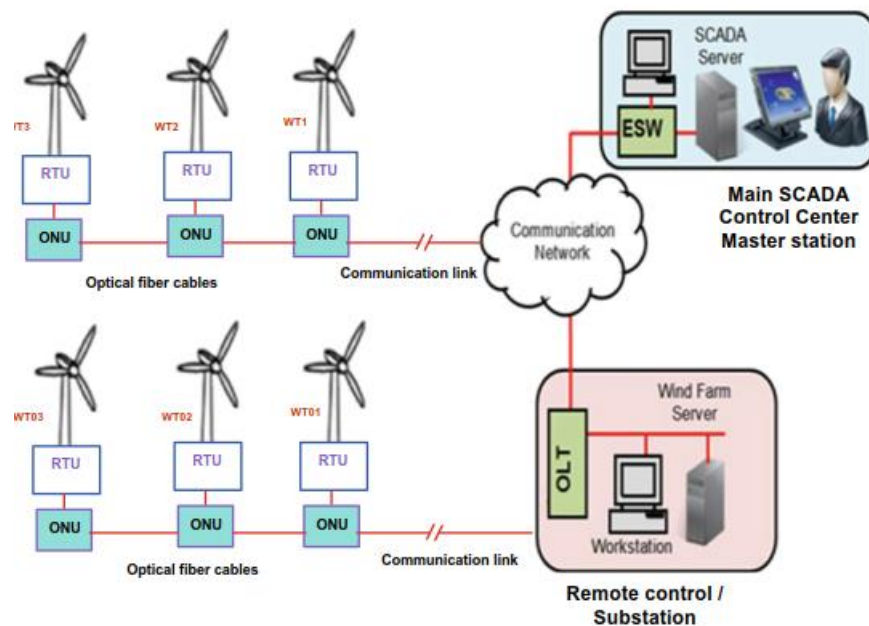


Рисунок 2.4 - Архітектура системи зв'язку у вітряній електростанції SCADA.

Через збільшення кількості вітряних електростанцій та пов'язаних з ними компонентів її слід інтегрувати в розумну мікромережу. Такими

компонентами є вторинні електропідстанції, розподілені енергетичні ресурси, громадські зарядні станції, віртуальні електростанції, мікромережі.

Однак нові програми автоматизації енергоспоживання, такі як автоматичне зчитування лічильників, керування даними лічильників або реагування на попит, призводять до додаткових потреб у зв'язку. Комунікаційні мережі для систем вітрових електростанцій слід ретельно проектувати.

У цьому відношенні розробка економічно ефективної та надійної комунікаційної архітектури є життєво важливою. У зв'язку з цим пасивна оптична мережа Ethernet (EPON) розглядається як перспективний і привабливий варіант. Волоконно-оптичні мережі зв'язку використовуються для вдосконалення рішень автоматизації.

Мережа складається з блоку оптичної мережі (ONU), який розгортається на місці вітряної турбіни. Усі сервери ONU, вітрові турбіни, підключені до головного оптичного терміналу (OLT). Архітектура EPON блоку OLT і блоку ONU, розміщеного на виносній станції вітрової турбіни, можна порівняти з роботою головного/підлеглого між сервером SCADA та RTU в WPP. Сервер SCADA опитує дані з RTU у чітко визначені періоди часу, і він може виконувати керуючі дії за потреби. Тому в системі EPON OLT опитує дані з ONU кожні кілька мілісекунд. Щоб пояснити цю теорію, проста схема опитування даних проілюстрована на рис. 2.4.

Наприклад, вважайте, що час циклу опитування дорівнює 2 мс, це означає, що вітрова турбіна скануватиме дані 500 разів протягом 1 с. У такому порядку центр керування OLT надсилає повідомлення GATE до WT_i, а потім чекає даних, поки центр керування не надішле їх до WT_{i+1}.

У такому розташуванні може бути досягнуто ефективне покращення продуктивності мережі OLT з точки зору використання каналу зв'язку та середньої затримки пакета.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Конфігурація мережі даних для системи SCADA

Система SCADA є життєво важливим компонентом цього процесу. Усі вітряні турбіни мають блок керування зверху, який містить ПЛК або RTU, адаптер живлення, панелі керування та вхід/вихід. Дані про швидкість вітру, напрямок вітру, датчики обертання валу збираються та передаються на ПЛК.

Визначивши напрямок вітру, система управління SCADA може використовувати мотор-редуктор повороту для повного перетворення турбіни в правильному напрямку для відстеження максимальної генерованої потужності.

Усі RTU (або PLC), пов'язані з вітровими турбінами, під'єднані до локальної мережі (LAN), де блок керування в кожній антені використовує мережу Ethernet для підключення до резервного волоконного зв'язку LAN, який закріплений у нижній частині вежі. Локальна мережа LAN підключена до головної станції дистанційного керування, яка керує системою керування, яка збирає та керує даними, регулює параметри турбіни, усунення несправностей, пропонує інтелектуальні сигнали тривоги та функції звітування на головній станції.

Ці окремі турбіни, підстанції, метеорологічні станції та інші системи моніторингу дикої природи підключені до центральної диспетчерської в Центрі управління вітром. Це забезпечує видимість для оператора, щоб контролювати поведінку всіх вітряних турбін на всіх вітрових електростанціях. Підтримуючи журнал активності на основі інтервалів, SCADA дозволяє оператору визначати коригувальні та коригувальні дії, якщо такі є, які необхідно вжити.

Система фіксує вихідну потужність, доступність, події та сигнали тривоги. Він надає можливість реалізувати різні вимоги до керування

падінням напруги, коефіцієнтом потужності та інтерактивним генеруванням енергії. Таким чином, полегшується вплив вітрової електростанції як на напругу, так і на частоту мережі.

Робоча станція оператора дозволяє операторам керувати вихідною потужністю відповідно до вимог мережі в режимі реального часу. SCADA спілкується з турбінами через канал зв'язку, який використовує оптичні волокна майже для всіх з'єднань. Вітрові турбіни різних типів можуть управлятися однією системою SCADA. Деякі постачальники турбін надають свою систему керування/індикації HMI.

Основні переваги системи SCADA полягають у тому, що її можна використовувати для різних типів вітрових турбін. ПЛК може надавати звіти про дані та формати аналізу незалежно від типу турбіни. Для операторів WTG важливо використовувати багато типів турбін і незліченну кількість типів ПЛК. SCADA має бути простим у використанні та легким у налаштуванні.

Можливість демонстрації анімованих імітацій, використання спливаючих вікон і зниження ризику перекриття важливої інформації демонструють спрощення програмного забезпечення SCADA. Крім того, створення шаблонів вмісту та поведінки забезпечує узгодженість усіх анімацій на панелях відображення. SCADA використовує права доступу та багаторівневі меню, які пов'язані з кожним оператором або користувачем.

Таким чином, навігація в програмі адаптована до дозволів і потреб кожного окремого користувача. Це забезпечує рівень безпеки, відстеження та контроль дій користувача. Вітрові турбіни встановлюються для роботи в координації з іншими джерелами, такими як атомна, сонячна та гідроенергія, у мережевій структурі для покращення продуктивності.

В даний час затори стали серйозною проблемою, оскільки постачальники вітрової енергії збалансовують виробництво енергії з ресурсами, доступними для передачі. Потрібна більш

масштабована/модульна система, щоб відповідати останнім тенденціям ринку відновлюваної енергії.

Щоб керувати промисловістю, що розвивається, волоконно-оптичні мережі були встановлені на вітрових електростанціях. Як правило, існує центральний об'єкт, за допомогою якого система SCADA може дистанційно отримувати доступ до вітряних електростанцій по всій країні та отримувати доступ до станційних сигналів тривоги, подій і умов.

Централізована конфігурація SCADA пропонує можливості для відстеження та керування різними вітровими системами. Він також автоматично оновлює події станцій. Загалом кожна вітрогенератор дає близько 300–350 точок даних. Сигналізація SCADA має широкі можливості конфігурації, щоб відповідати різноманітним вимогам обслуговування вітрових електростанцій. Тривожні повідомлення можуть відображатися, друкуватися і організовані в списки нагадувань і архівовані. Крім того, оператори WPP можуть налаштовувати тривоги за допомогою груп, сортування, підтвердження, фільтрів і приховування.

Він також створює лічильники тривоги та пов'язує певні дії з будь-якою тривоною. Оператори можуть розпізнавати тривоги безпосередньо з імітаторів, і ці дії можуть автоматично транслюватися на всі робочі станції в комп'ютерній мережі головної станції. SCADA у вітрових електростанціях використовує OPC як протокол зв'язку, окрім інших протоколів для збору даних від різних типів ПЛК/RTU.

Програми для вітрових електростанцій часто використовують OPC і драйвер для плавного зв'язку з різними системами. Клієнт доступу до даних OPC обмінюється даними з серверами зв'язку в режимі реального часу. Крім того, сервер збору даних OPC допомагає обмінюватися даними зі сторонніми програмами. Зібрані дані направляються назад на головну станцію центру керування.

Програмне забезпечення SCADA в головному центрі управління повинно бути доведено як функціональне та зручне для користувача. Крім того, він повинен бути масштабованим, надійним і простим у налаштуванні. Wind SCADA забезпечує однокористувацький перегляд, який забезпечує легкий візуальний перегляд і комплексне керування системами керування, оснащеними турбінами.

Для читання графічного інтерфейсу користувача потрібна проста та легка система, яка може автоматично взаємодіяти для моніторингу погоди, управління та контролю турбін. Програмне забезпечення SCADA спілкується з вітровими турбінами через графічний інтерфейс користувача (GUI), який діє як легкий клієнт для прикладної програми та елементів керування даними. Ця конфігурація надає користувачу/оператору всю необхідну інформацію про сигнали турбіни.

SCADA використовує розподілену клієнт-серверну архітектуру з механізмом ітерації, щоб гарантувати, що проект містить помилки. Використовуючи включені функції резервування, SCADA може забезпечити безперервний збір даних у разі збою компонента системи. Крім того, він також підтримує резервування подвійних мереж для зв'язку з польовим обладнанням і між станціями вітрових турбін, див. рис. 3.1. Кожен компонент будь-якої підстанції в конфігурації має статус дійсності, що дозволяє операторам відображати стан системи в режимі реального часу.

Ці клієнтські станції OPC спілкуються з розширеними передніми частинами, підключеними до мережі Ethernet TCP/IP 1000 Мбіт/с. Кожен інтерфейс може приймати до 60 000 ввідів/виводів. Сервер SCADA зв'язується з турбінами через мережу зв'язку. Спосіб зв'язку залежить від відстані від головної станції. Зазвичай WPP SCADA використовує оптичні волокна для зв'язку з розташованими поблизу вітровими турбінами. Використовуючи архітектуру SCADA, оператори WTG можуть у режимі реального часу бачити докладні дані, зібрані з віддалених вітряних турбін.

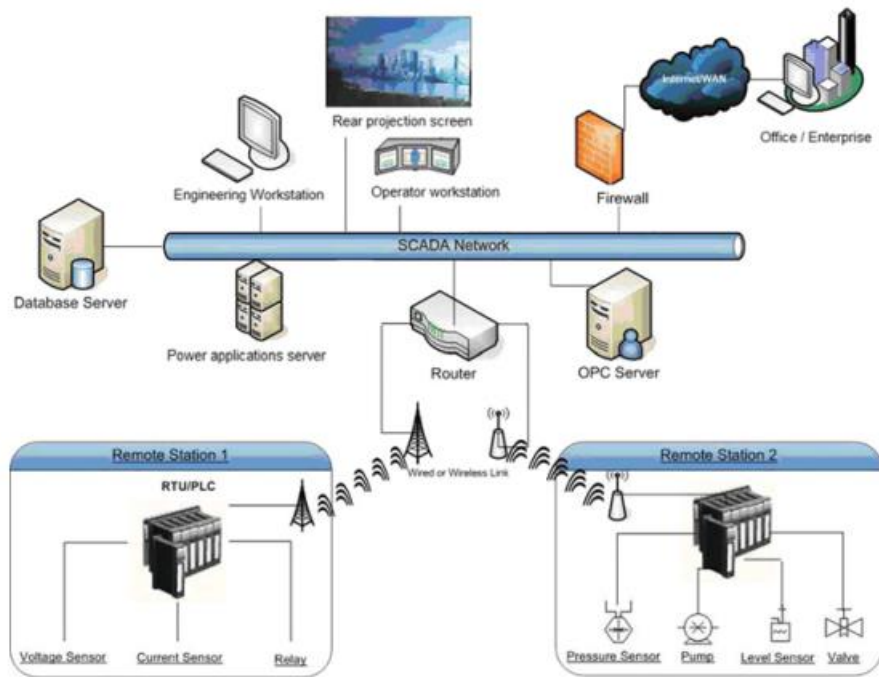


Рисунок 3.1 – Мережева конфігурація системи SCADA.

Нагляд за WTG організовано на двох рівнях, щоб керувати великою кількістю даних і забезпечити роботу та усунення несправностей об'єктів. Перший контрольний рівень пропонує огляд найважливіших попереджень, значень і лічильників, яких достатньо для спостереження за нормальними турбінами та виявлення несправностей, які необхідно виправити.

Більш детальний рівень контролю вмикається на вимогу для відображення конкретних даних з турбіни, щоб оператори могли миттєво діагностувати будь-які несправності, що виникли, і точно визначити операції з обробки. Отримані дані можуть бути оброблені як визначені точки, історичні звіти, керування аварійними сигналами та тенденції даних тощо.

Система керування збирає всю основну оперативну інформацію від зовнішніх станцій, генераторів і пов'язаних підстанцій. Система управління з'єднана з диспетчерським центром головної станції через віддалений канал зв'язку, що полегшує обслуговування. Центр отримує та обробляє цю

інформацію за допомогою раціоналізованої та спрощеної структури, що дозволяє легко ідентифікувати та діагностувати несправність.

Це запускає відповідні процедури для її вирішення: дистанційне скидання або активація локальних груп технічного обслуговування. В результаті середній час простою зменшується, а доступність системи підвищується.

3.2. Прилади системи SCADA.

Система SCADA в WTG з'єднує окремі турбіни, вітряну підстанцію та метеорологічні станції з центральною головною станцією. Пов'язана система зв'язку дозволяє оператору WTG контролювати роботу всіх вітряних турбін, а також наглядати за вітроелектростанцією в цілому. Система зберігає записи про всі події та дії, які дозволяють оператору визначати необхідні коригувальні дії.

Прилади SCADA записують вироблену енергію, вихідну готовність і сигнали помилок. Система SCADA працює з приладами для вимірювання реактивної потужності, напруги та частоти. WPP SCADA розподіляє вироблену електроенергію згідно з інструкціями оператора мережі (регіонального диспетчерського центру). На додаток до основного обладнання, необхідного для роботи WTG, також бажано, якщо розмір проекту може гарантувати інWTGтиці, встановити кілька постійних метеорологічних

інші пристрої на протилежних щоглах. Це обладнання дозволяє ретельно контролювати та розуміти роботу WTG. За відсутності даних про хороший вітер на сайті це рішення буде неможливим. Зазвичай великі вітроелектростанції містять одну або кілька постійних метеорологічних щогл, які встановлюються при монтажі вітрової електростанції. 6 Система керування вітряними електростанціями На даний момент велика увага

приділяється розробці інструментів планування та експлуатації для експлуатації електричної системи за умов випадкового попиту та виробництва (які все ще добре передбачувані).

Система має повний контроль лише над управлінням вітроелектростанцій, і загальна енергосистема може не працювати покращеним чином. Тому слід розглядати системи, які поєднують системи управління енергією на рівні транспортування та розподілу. Технології Smart Grid разом із інструментами прогнозування, складськими об'єктами та управлінням попитом можуть створити нові можливості для розширення можливостей інтеграції.

У цьому контексті інструменти прогнозування потужності WTG протягом максимум 48 годин повинні бути більш точними, ніж поточні. Крім того, знадобляться як великомасштабні, так і регіональні проектування передових мереж і систем управління енергією. Крім необхідності покращення фізичної інтеграції енергії вітру, знадобляться інструменти та системи управління для інтеграції випадкової енергії вітру в існуючі енергетичні ринки.

Знову ж таки, передові системи прогнозування в поєднанні з покращеними можливостями зберігання та заходами управління є ключовими для досягнення цієї мети. Потім будуть розглянуті технічні та економічні аспекти систем, щоб уможливити включення виробництва енергії вітру в мережу та на ринок електроенергії.

Система керування електроенергією розроблена для розподіленої вітроенергетичної системи; система управління живленням перемикає режим живлення та контролює систему відповідно до умов вітрової енергії та вимог до навантаження. Розподільча генеруюча система разом із акумуляторною батареєю може забезпечити користувача надійним електричним живленням, як показано на рис. 3.2. Система керування живленням реалізована за допомогою мікропроцесора та системи збору даних. Ця система управління

кут лопаті ротора відносно швидкості вітру, щоб підтримувати номінальну потужність за фіксованою вартістю. Спосіб регулювання вихідної потужності вітрової турбіни з принаймні однією обертовою лопаттю, встановленою під регульованим кутом ротора, який включає етапи: регулювання швидкості ротора в межах заданого діапазону швидкості вітру шляхом зміни кута лопаті ротора з метою регулювання номінальний вихід;

Робоча потужність турбіни, яка перевищує певне порогове значення, що залежить від швидкості вітру, зменшується до меншої величини номінальної потужності, але більшої, ніж вихідна потужність, коли вітряна турбіна вимкнена, де заданий вітер — залежно від швидкості порогове значення є певний кут для лопаті ротора.

Офшорне встановлення є одним із провідних напрямків у технології вітрових турбін. На морі є значні ресурси вітру для встановлення вітрових турбін у кількох районах, де море відносно мілке. Морські вітрові турбіни можуть мати дещо кращий енергетичний баланс, ніж наземні турбіни, залежно від умов швидкості вітру.

У місцях, де дикі вітряні турбіни зазвичай розміщуються на рівній місцевості, офшорні вітряні турбіни зазвичай можуть виробляти приблизно на 50% більше енергії, ніж турбіни, розміщені поблизу землі. Це тому, що на морі немає перешкод і менше тертя. Крім того, для будівництва та закладки фундаменту потрібно на 50% більше енергії, ніж для наземних турбін. Однак слід пам'ятати, що морські вітрові турбіни мають довший середній термін служби, ніж наземні. Причина в тому, що низька турбулентність на морі менше навантажує вітрові турбіни.

Тому офшорні вітрові турбіни потребують підвищеного захисту від корозії з одночасним скороченням вимог до технічного обслуговування та обслуговування та вдосконаленням системи нагляду та контролю. Внутрішній захист від корозії забезпечується покращеними системами

покриття та сухим середовищем усередині машини. Обов'язковою умовою сухого середовища в приміщенні є герметична машина.

Редуктор і генератор охолоджуються теплообмінниками, які рециркулюють повітря, що використовується в системі повітряного охолодження, замість традиційних компонентів з повітряним охолодженням у попередніх турбінах. Для підтримки низької вологості повітря в приміщенні осушувачі розміщують у башті та камері гондоли.

Система осушення підтримує внутрішню відносну вологість нижче будь-якого обмеження ризику корозії сталі (60%). Для додаткового захисту основні електричні компоненти (генератори, системи керування тощо) мають резервні системи підігріву, які запобігають утворенню конденсату навіть при різких перепадах температур.

3.3. Стандарти вітряних електростанцій, підключених до мережі.

Можливості вітряних турбін у разі замикання напруги.

Щоб забезпечити широке застосування енергії вітру без шкоди для стабільності енергосистеми, турбіни повинні залишатися підключеними та робити внесок в електричну мережу у випадку порушення, наприклад падіння напруги. Вітрові електростанції повинні WTGти себе як звичайні електростанції, щоб забезпечити активну та реактивну потужність для відновлення частоти та напруги відразу після виникнення помилки. Тепер вітряні турбіни вперше можуть залишатися в режимі онлайн, постачаючи реактивну потужність в електричну мережу через серйозні збої в системі. Функція Low Voltage Ride Through (LVRT) дозволяє вітровим турбінам відповідати стандартам надійності передачі, подібним до тих, що вимагаються від теплових генераторів. LVRT надає значної нової гнучкості роботі вітрових електростанцій, хоча цього вимагає більше об'єктів.

Проблеми з якістю електроенергії підключених до мережі WTG.

Причиною такого інтересу є те, що вітрові турбіни є потенційними джерелами низької якості енергії. Вимірювання показують, що за останні роки якість електроенергії вітрових турбін покращилася. Зокрема, вітрові турбіни зі змінною швидкістю мають деякі переваги, пов'язані з флікером.

Однак із вітровими турбінами із змінною швидкістю виникла нова проблема. Сучасні інвертори з функцією примусової комутації, що використовуються у вітрових турбінах із змінною швидкістю, виробляють не лише гармоніки, а й гармоніки.

Система передачі електроенергії з додатковим керуванням реактивною потужністю (VAR) забезпечує підтримку та контроль напруги локальної мережі, що покращує ефективність передачі, а також забезпечує інтерактивну мережу живлення (VAR), що підвищує стабільність мережі.

Функція VAR підтримує задані рівні напруги в мережі та якість електроенергії за частки секунди. Ця функція особливо корисна для слабких мереж або великих турбін.

Регулювання змінної швидкості.

Регулювання змінної швидкості використовується для максимізації захоплення енергії вітру та зменшення групових навантажень турбіни. Система керування вітряною турбіною за допомогою передових електронних пристроїв постійно регулює кут нахилу лопаті вітрової турбіни, щоб забезпечити оптимальну швидкість обертання та максимальну підйомну силу буксирування за будь-якої швидкості вітру. Робота зі змінною швидкістю збільшує здатність турбіни залишатися на найвищому рівні ефективності. Навпаки, вітрові турбіни постійної швидкості досягають найвищої ефективності при одній швидкості вітру.

Результат: збільшення річного виробництва енергії в порівнянні з установками, що працюють на постійній швидкості. Крім того, у той час як ротори з фіксованою швидкістю повинні бути розроблені для керування сильними вітровими навантаженнями, робота зі змінною швидкістю дозволяє

поглинати навантаження від шторму та перетворювати їх в електричну енергію. Крутний момент генератора регулюється перетворювачем частоти. Ця стратегія керування дозволяє регулювати обертання турбіни під час сильних вітрів і штормів, тим самим зменшуючи навантаження крутного моменту на трансмісію.

Вітрові турбіни із змінною швидкістю перетворюють додаткову енергію поривів вітру в електричну енергію. Діапазон швидкості турбіни помітно ширший, ніж діапазон «ковзання», який використовується іншими технологіями, які виробляють тепло, а не електричну енергію при регулюванні енергії під час сильного вітру.

Активне демпфування.

Робота зі змінною швидкістю забезпечує активне демпфування всієї системи вітроелектростанції, що призводить до значно менших коливань веж порівняно з вітровими турбінами з фіксованою швидкістю. Активне демпфування машини також зменшує максимальний крутний момент, що забезпечує більшу надійність трансмісії, знижує витрати на технічне обслуговування та збільшує термін служби турбін. Активне демпфування коливань башти здійснюється з використанням кута нахилу як керуючого входу. Гнучка багатоб'єктна система використовується для отримання спрямованої моделі для керування першим режимом вигину вежі, яка працює для розробки стабільного закону керування.

Демпфування коливань інтегровано із запланованим керуванням зворотним зв'язком для багатовимірного підсилення, що дозволяє відстежувати шляхи, необхідні для кутових швидкостей як турбіни, так і генератора.

3.4. Система керування WPP.

У цьому розділі розглядається операція зі змінною швидкістю розрахункові схеми для вітряних турбін. Основні цілі полягають у тому, щоб максимізувати виробництво енергії, забезпечити тісний запуск і зменшити навантаження крутного моменту на компоненти системи. Це робиться при підтримці стратегії управління, яка працює в режимі змінної генерації електроенергії між швидкістю включення до швидкості головного генератора 900 об/хв і працює в режимі безперервної роботи потужності від базової швидкості до максимальної швидкості генератора 1350 об/хв.

Основними функціями пропонованої системи контролю та управління є:

- Нагляд та контроль взаємозв'язку вітрової електростанції з комунальною мережею.
- Контролювати продуктивність вихідного перетворювача частоти.
- Підвищувати ефективність перетворення енергії вітряних турбін
- Забезпечувати вимірювання продуктивності системи для оцінки оператора.
- Досягати безпечного закриття за звичайних і аварійних обставин.

Показана тут стратегія керування використовує швидкість ротора, крутний момент і силу генератора як сигнали зворотного зв'язку. У нормальній робочій зоні швидкість ротора використовується для розрахунку цільової енергії, яка відповідає оптимальній роботі.

З потужністю в якості контрольної цілі, силовий трансформатор і генератор контролюються для відстеження цільової потужності на будь-якій швидкості обертання.

3.5. Управління вітровими турбінами.

Однією з головних цілей у розвитку офшорної вітроенергетики є зниження витрат і підвищення доступності. Через збільшення розмірів турбін контроль навантаження стає все більш важливим. Керування вітряною турбіною має важливе значення для гарантування низьких витрат на технічне обслуговування та ефективної роботи. Система керування також забезпечує безпечну роботу, оптимізує вихідну потужність і забезпечує тривалий термін служби конструкції.

Принципова схема блоку керування вітрової турбіни показана на рис. 3.3. Підтримувати стабільність системи стає все складніше, оскільки частоти турбіни наближаються одна до одної, а також до частот вітру та хвиль.

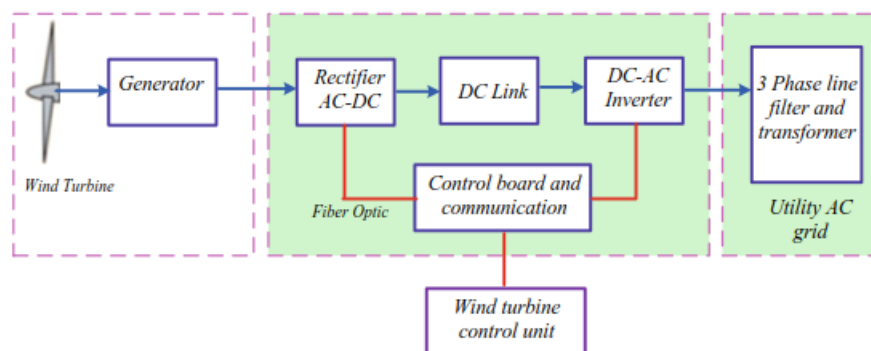


Рисунок 3.3 - Простий блок керування вітрогенератором

Тому система керування турбіною має вирішальне значення. У дослідницькій області були розроблені моделі для проектування передових алгоритмів керування вітровими турбінами. Система керування вітряною турбіною проілюстрована на рис. 3.4. Ці моделі та інструменти включають аеродинамічні та структурно-динамічні модулі. За допомогою інструментів управління можна розробити багатопараметричні алгоритми керування з урахуванням складних і сильних динамічних впливів, яким піддаються турбіни.

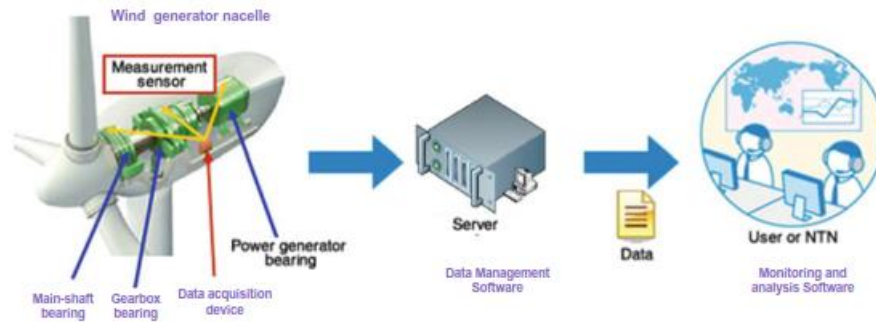


Рисунок 3.4 - Система керування вітряною турбіною

Цей підхід пропонує рішення для наступних конкретних операційних проблем:

- непотрібний простой через ізольований підхід систем керування та безпеки.
- високі витрати та обмежені можливості масштабування через високі навантаження на турбіни та проблеми стабільності.
- невизначеність вироблення енергії та високі навантаження при екстремальних погодних умовах.
- Накопичення збитків у разі зупинки турбіни внаслідок серйозної несправності.

3.6. Сталий контроль.

Сталий контроль є розробкою та інтегрованим підходом до проектування системи керування офшорними вітровими турбінами. У цьому підході можна виділити чотири частини:

- Оптимізоване керування зворотним зв'язком.
- Відмовостійке керування.
- Контроль екстремальних подій.
- Оптимальне керування відключенням.

Інструмент проектування для алгоритмів керування вітряними турбінами.

Завдяки зростаючій важливості, зростаючій складності та зростаючій взаємодії зі структурним та аеродинамічним дизайном, знаннями та інструментами, які дозволяють виробникам вітряних турбін розробляти та перевіряти власні розширені алгоритми керування. Середовище проектування з відкритим кодом є важливим для розробки та тестування систем керування в реальному часі.

На рис. 3.5 показано енергетичні системи вітрових електростанцій, які базуються на надійності та зрілості технологій. Розроблено моделі та стратегії керування вітровими електростанціями з метою покращення роботи вітрових електростанцій з урахуванням участі в управлінні енергетичною системою (частота) та реактивною енергією (напругою), максимізація виробництва енергії, покращення впливу на якість енергії та зменшення механічних навантажень і споживання протягом усього терміну експлуатації.

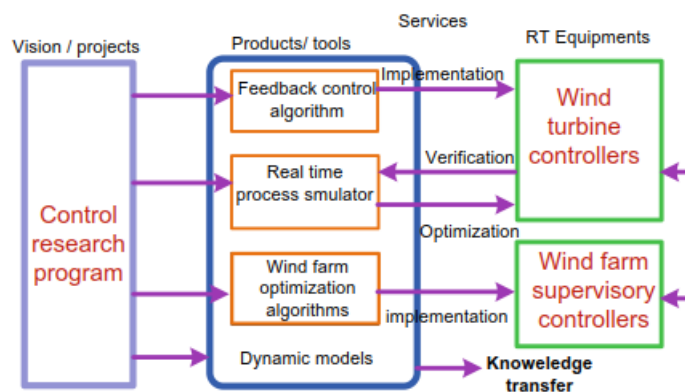


Рисунок 3.5 Огляд керування вітровими електростанціями

Управління WTG буде залежати від сигналів від контролерів WTG. Ці сигнали використовуватимуться для прогнозування швидкості вітру в окремих вітрових турбінах у короткостроковій перспективі (тобто від секунд

до хвилин), щоб дати можливість контролерам окремих вітрових турбін ідеально реагувати на коливання швидкості вітру.

Концепції вітряних електростанцій включають такі електричні компоненти, як індукційний генератор з короткозамкненою кліткою, індукційний генератор з подвійним живленням і сучасні технології постійного струму високої напруги (HVDC). Системи HVDC базуються на перетворювачах із повними можливостями керування, які базуються на напівпровідникових пристроях із силовою комутацією.

Вітрові турбіни, що входять до комплекту, будуть керуватися кроком, а також (активним) зривом. Отже, характерна крива обертового моменту швидкості формується для виходу генератора на збільшення перетворення енергії в зону захоплення максимальної потужності. Однак цільова потужність постійно оновлюється при будь-якій швидкості обертання (об/хв) у робочому діапазоні.

Під час екстремальних робочих умов, наприклад під час запуску, вимкнення, перевантаження генератора або перевищення швидкості, різні стратегії, керовані іншими системними міркуваннями, також повинні використовуватися як змінні для контролю вхідних даних. Енергія вітру пропорційна кубу швидкості вітру. Тому, щоб регулювати вихідну потужність із посиленням вітру, повинен існувати механізм зменшення вихідної потужності вітрової турбіни, в той час як площа захоплення залишається постійною.

Вітрові турбіни з постійною швидкістю досягають цього автоматично, оскільки під час сильного вітру їхні лопаті зупиняються. Внаслідок цього менша підйомна сила та збільшений опір значно зменшують здатність лопаті зменшувати потужність вітру.

Для перетворювачів частоти можна використовувати стратегію векторного керування. Використовуючи векторне керування, можна ефективно підтримувати заданий крутний момент і обмеження. За

допомогою замкнутого циклу управління можна досягти максимальної динамічної продуктивності.

Це пояснюється тим, що поточні компоненти крутного моменту та потоку можна контролювати незалежно одна від одної. Однак регулювання частоти по замкнутому контуру може бути реалізовано за допомогою датчика швидкості або безсенсорного керування.

Під час нормальної роботи вітряних електростанцій відбуваються постійні коливання швидкості та напрямку вітру. Зі збільшенням швидкості вітру швидкість обертання турбіни буде повільно збільшуватися. Шляхом регулювання частоти перетворювача частоти можна регулювати швидкість поля обертання статора, щоб досягти бажаного ковзання i , таким чином, отримати необхідний крутний момент.

Тому швидкість обертання вітрової турбіни повинна адаптуватися до переважної швидкості вітру. Якщо швидкість вітру вітрової турбіни зростає вище базової швидкості генератора, перетворювач частоти збільшує свою частоту, одночасно зменшуючи опорний крутний момент, щоб досягти номінальної або постійної вихідної потужності до максимальної швидкості обертання генератора.

Якщо швидкість вітру падає нижче початкової швидкості або пройденої швидкості, вітрогенератор зупиниться, а перетворювач частоти перейде в режим очікування. Таким чином, керуючи частотою, можна контролювати вихідну потужність і крутний момент вітрогенератора. Це забезпечує оптимальну продуктивність вітрової турбіни залежно від швидкості вітру та вітрових умов.

Є дві різні стратегії контролю. Перший полягає в управлінні швидкістю генератора по відношенню до швидкості вітру та швидкості обертання вітряної турбіни, надаючи опорний сигнал швидкості на перетворювач частоти. Другий метод полягає в управлінні крутним моментом генератора

по відношенню до швидкості вітру та крутним моментом вітрової турбіни шляхом надання еталонного крутного моменту перетворювачу частоти.

На рис. 3.6 показана спрощена стратегія керування вітровою турбіною. Оптимальною стратегією керування є генератор, яким керують для забезпечення необхідного співвідношення крутного моменту та швидкості вітру.

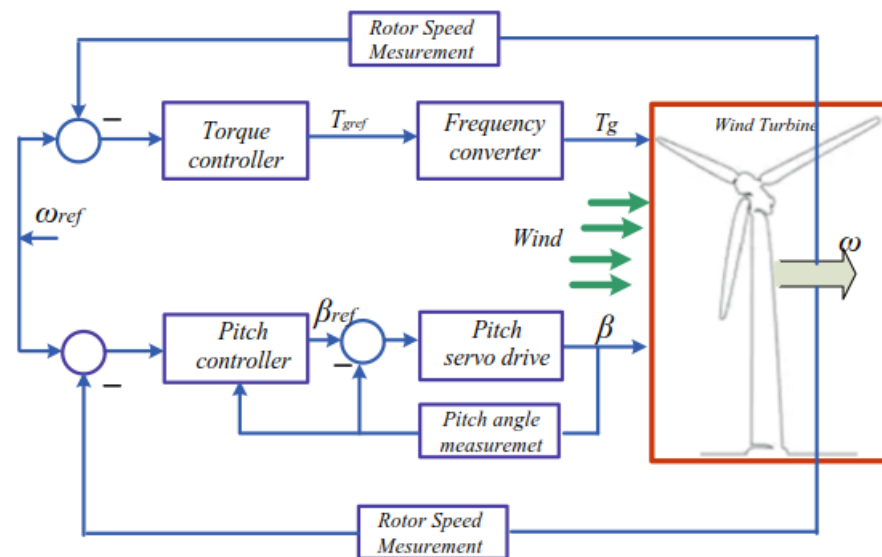


Рисунок 3.6 - Детальна система керування вітряною турбіною.

Вітряна турбіна може працювати поблизу максимального коефіцієнта потужності за низьких і помірних швидкостей вітру, що також представляє більшу частину захоплення енергії в певних місцях вітру. У разі високої швидкості вітру крутний момент контролюється для підтримки сталого виробництва енергії при збільшенні швидкості генератора WT. Крім того, перехід від помірної до високої швидкості вітру має відбуватися плавно, щоб уникнути перевантаження компонентів WTG.

Причина вибору наступної стратегії як кращої полягає в тому, що буде менше коливань енергії в мережі в місцях із високою швидкістю вітру. Зі зменшенням обертання вітрової турбіни максимальна сила, яку можна створити, зменшується. При низькій і середній швидкості вітру крутний

момент генератора регулюється так, щоб він працював поблизу оптимальної вихідної кривої, виробляючи максимальну енергію.

Очікується, що швидкість ротора регулюватиметься та обмежуватиметься в межах вищої межі частоти обертання генератора, хоча на майданчику WTG існують вищі швидкості вітру. Конструкція коробки передач і вибір передавального числа також мають вирішальне значення для забезпечення оптимальної роботи.

3.7. Управління та керування вітряними електростанціями.

Комп'ютерна консоль (PCC) — це система автоматизації, яка розроблена відповідно до вимог системи автоматизації та керування вітровими установками для підстанцій. PCC — це платформа для додатків управління інформацією та автоматизації, включаючи людино-підмашинний інтерфейс (HMI), дані підстанції, вилучення та індексування даних про несправності, збір послідовності на рівні підстанції (SOE), аналіз якості електроенергії, прогнозне/профілактичне обслуговування, розумні звіти та керування умовами. PCC також надає інструменти керування даними для обробки історичних і діагностичних даних відповідно до SOE.

Контролер вітрової турбіни складається із зовнішнього контролера контуру, який може бути RTU або PLC. ПЛК підключено до системи управління WTG. Комунікаційний інтерфейс реалізується комунікаційним сервером або процесором на кінці PCC і підключений до ПЛК через PROFIBUS.

PROFIBUS-DP — протокол розподіленого введення/виведення. Це забезпечує надшвидкісне періодичне підключення, яке включає невеликі обсяги даних зі швидкістю передачі даних до 12 Мбіт/с. PROFIBUS є системою передачі даних для зв'язку в мережах малих стільникових мереж і з польовими пристроями. PROFIBUS є європейським стандартом EN 50 170 і

використовується в усьому світі в екологічній сфері. PROFIBUS забезпечує переваги надійної та високошвидкісної мережі, яка може легко взаємодіяти з усіма інтелектуальними підсистемами, що використовуються у вітроелектростанції. PROFIBUS може бути екранований двома дротами з волокна або оптичними волокнами.

Оптичні волокна забезпечують перевагу використання у зовнішньому середовищі, уникаючи проблем через блискавку. Контроль і управління установкою повинні забезпечити надійність і автоматизовану роботу WTG. Щоб досягти цього, слід контролювати та контролювати відповідні компоненти та змінні WT.

Нагляд здійснюється шляхом постійного підтримання діапазонів значень і встановлення допустимих значень системних змінних. Контроль і управління визначають попередньо визначені робочі стани та негайно виявляють помилки та аварійні ситуації. Для цього об'єднаний перетворювач частоти вітряної турбіни, система керування зовнішнім контуром (PLC) і система управління заводом (PCC) разом повинні впливати на робочу поведінку вітроелектростанції на основі попередньо встановлених керуючих сигналів і необхідних значень, а також взаємодії змін у системі. змінні або помилки.

Окрім надійної роботи, ще однією дуже важливою метою є досягнення ідеальної відповідності між якістю вихідної потужності, низьким механічним тиском та електричним навантаженням установки на всі її компоненти. Електростанції оснащені перетворювачами частоти для перетворення енергії вітрових турбін в електричну енергію та забезпечення постійної низькоякісної спотвореної енергії до комунальної мережі. Зворотній зв'язок щодо несправностей буде визначено на основі умов експлуатації та логічних блок-схем керування разом із документами про реакцію, що додаються до вітряних турбін.

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Аналіз роботи контролера зовнішнього контуру

Система керування зовнішнім контуром реалізована за допомогою контролера PLC. Структура програми та всі функції та змінні внутрішнього перетворювача частоти постійно контролюються разом із багатьма функціями та варіаціями зовнішнього пристрою. Залежно від результатів логічних рішень, методу роботи та точок визначення заданого значення буде прийнято відповідне рішення та реакція. Окремі вітряні турбіни зазвичай працюють в автоматичному режимі. Однак під час введення в експлуатацію, усунення несправностей і обслуговування необхідні ручні та напівавтоматичні способи роботи з ручним введенням необхідних значень. Тимчасові умови експлуатації можуть діяти лише протягом обмеженого періоду. Таким чином контролюється його тривалість.

Після перевищення встановлених максимальних інтервалів помилка вимикається, оскільки помилка повинна бути припущена. Тривалість статичних операцій (S) не контролюється системою контролю та управління. Виробник залишається в цих випадках, доки виконуються всі нормальні умови експлуатації. За будь-яких умов експлуатації всі нормальні умови роботи необхідно постійно перевіряти.

Лише одна умова необхідна для перемикавання між станами «Зупинка роботи», «Нормальне вимкнення», «Збій/перевищення швидкості» або «Аварійна зупинка». Навпаки, для запуску робочих станів «старт» або «запуск» мають бути виконані всі умови.

Тестування вітряної електростанції.

Компоненти моніторингу, а також впливові та змінні змінні повинні бути протестовані та зафіксовані після успішного введення в експлуатацію систем контролю та управління. Виходи всіх підсистем повинні бути

запитані для значень вимкнення та всіх механічних приводів для цілей тестування. Датчики можуть перевіряти правильні реакції на конфігурації. Якщо трапляються помилки, їх необхідно зафіксувати.

Помилки призводять до зупинки додаткового процесу, доки помилку не буде виправлено та заводський реліз вручну. Усі компоненти установки та їх граничні значення слід перевіряти за будь-яких умов експлуатації. Ця система працює належним чином для всіх систем, робочих температур і стану помилки заземлення.

Після успішного випробування завод переходить до більш пізнього робочого стану; В іншому випадку перевірка заводського робочого стану повторюється, доки не будуть виконані всі умови випуску, такі як накази оператора, розблокування після аварійної зупинки, доступність мережі та відповідні функції, функція компонентів, виявлення заземлення, температури та граничні значення.

Операція зупинки.

Фіксований ротор характеризує стан зупинки. Крім того, у цьому робочому стані механічні гальма ротора активуються, і їх також можна перевірити, щоб отримати відповідні функції. Генератор вимикають і відключають від живильної мережі. Випробовуються умови, які перешкоджають переходу виробника до початкового робочого стану. Потім виконується сканування системи. Якщо всі умови позитивні, перевіряються умови запуску. Якщо це також досягнуто, відбудеться зміна на «старт».

Як і під час заводських випробувань, номер відповідного робочого стану розрізняє «блок механічного гальма» та «контактний перемикач» для розімкнутого генератора. Доступна швидкість вітру постійно контролюється в кожному окремому вітроелектрогенераторі незалежно за допомогою систем керування вітровими електростанціями на основі системи SCADA вітроміра, наприклад анеометра.

Включення окремих вітрогенераторів відбувається за наявності мінімальних швидкостей вітру.

Запуск системи вітрогенерації.

Ротор стабільний і все ще прикріплений до механічних гальм. У повторюваній послідовності перевіряються умови для вимкнення помилок і, якщо необхідно, ініціюються відповідні підпрограми. Під час цієї послідовності також перевіряється пусковий сигнал від системи керування. ПЛК передає провідний вихідний сигнал на цифровий блок керування для запуску перетворювача частоти.

Потім перетворювач частоти передає свою потужність на програму послідовності. Перевіряються біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) і перевіряються сигнали зворотного зв'язку, вентилятори охолодження вмикаються, з'єднання постійного струму попередньо заряджається, потім перетворювач частоти вимикає перемикач роз'єму генератора.

Після того, як ПЛК досягає статусу замкнутого контактора генератора, вітрова турбіна переходить у робочий стан «Режим очікування» за умови, що система управління WPP надає порядок запуску команди «Автоматично».

Стан очікування.

У разі готовності всі компоненти генератора вітрової турбіни постійно перевіряються, щоб визначити, чи вони справді готові до роботи (стан очікування). У повторюваній послідовності перевіряються умови для вимкнення помилок і, якщо необхідно, ініціюються відповідні підпрограми. Середня доступна швидкість вітру також постійно перевіряється, щоб визначити мінімальну доступну швидкість вітру.

Генераторна система вже підключена до системи електропостачання під час попереднього робочого стану. По черзі перевіряються умови усунення аварій, умови наказів оператора та параметри роботи. Якщо відповідні умови виконуються, вводяться відповідні операційні випадки.

Якщо режим очікування зберігається протягом тривалого часу, наприклад, п'ять хвилин або більше, система керування сповіщається повідомленням про те, що час очікування перевищено, і керування переходить до вимкнення, а потім повертається до стану сталого вимкнення.

Швидкість у стані розгону можна збільшити, якщо сукупна середня швидкість вітру перевищує 5 м/с, а миттєва швидкість вітру не дуже висока (розгін можливий). Перетворювач частоти спочатку перевіряється, щоб переконатися, що він готовий до вироблення електроенергії, а також систему підключення до мережі, яка все ще підключена.

У повторюваних послідовностях перевіряються умови нормального вимкнення та вимкнення та, якщо необхідно, ініціюються відповідні процедури. Задачі швидкості та крутного моменту перевіряються на початкове значення нуль, і якщо це правильно, то вентиль інвертора буде ввімкнено. Після того, як затвор інвертора ввімкнено, перетворювач частоти почне захоплення та синхронізацію обертового генератора.

Перевіряються граничні значення напрямку обертання та прискорення. Потім опорне значення крутного моменту або швидкості вивільняється з ПЛК і регулюється відповідно до значень зворотного зв'язку зарядженого ротора генератора. Якщо синхронізація досягнута протягом дозволеного періоду часу, швидкість ротора вітроелектростанції може бути доведена до значення, при якому може вироблятися достатня кількість активної енергії для мережі.

З невеликою інтерактивною силою, яка надходить від мережі через перетворювач частоти, швидкість ротора знаходиться в межах діапазону, визначеного системою керування зовнішнім кільцем, і на неї безпосередньо впливає лише доступна швидкість вітру. Тепер генератор вітряної турбіни готовий перейти в стабільний робочий стан із змінною потужністю.

4.2. Робота WTG зі змінною потужністю.

Коли бажана цільова швидкість досягнута, система генератора та перетворювач частоти здатні генерувати достатньо активної енергії для мережі живлення, після чого забезпечується електрична енергія системи електромережі. У процесі змінної енергії генераторна система забезпечує змінну електричну енергію (кВт·год) у мережі живлення.

Фазовий кут частоти ковзання регулюється або налаштовується на оптимальне значення, щоб була можлива максимальна вихідна потужність або мінімальне навантаження компонентів. Контролер зовнішнього контуру забезпечує опорне значення для вихідної потужності, пов'язаної зі швидкістю вітру та потребою в енергії.

У процесі змінної потужності швидкість або вихідна потужність регулюється частотним трансформатором генераторної системи. Крутний момент або швидкість підтримуються в допустимому діапазоні шляхом регулювання крутного моменту або швидкості відповідно до попередніх значень. При досягненні контрольного резервного значення цільове значення крутного моменту або швидкості змінюється відповідно до характерної лінії оптимальної швидкості потужності.

Під час роботи зі змінною потужністю постійно перевіряються умови нормального відключення, умови відключення через несправність і умови відключення в режимі очікування. У процесі змінної потужності також перевіряються всі умови нормальної роботи, і при необхідності ініціюються відповідні дії. Важливо періодично перевіряти температурні обмеження, обмеження прискорення, рівень вібрації, обмеження низької швидкості та обмеження стабільності живлення.

Основні повідомлення перераховані в режимі змінного живлення. Завдяки досить високій середній доступній швидкості вітру генератор

вітрової турбіни автоматично перемикається в сталий стан «безперервної потужності».

4.2. Робота WTG із постійною потужністю.

Якщо середня швидкість вітру є достатньо високою, вітрові турбіни всередині електростанції перейдуть від процесу «змінної енергії» до процесу «постійної енергії». У цьому робочому стані зовнішня система керування контуром визначає бажані значення номінальної вихідної потужності, номінальної вихідної потужності системи та діапазону коливань. Значення обертання для швидкості/крутного моменту, регулювання частоти ковзання та обмеження крутного моменту постійно контролюються для регулювання постійної вихідної потужності. Таким чином, вихідні коливання в турбіні призводять до невеликих змін швидкості.

Швидкість підтримується в діапазоні регулювання шляхом зниження крутного моменту та регулювання частоти ковзання. У разі миттєвих поривів вітру допускається невелике перевантаження, щоб швидкість вітрової турбіни не потрібно було швидко або часто регулювати. Однак діапазон перевантаження має бути обмеженим, залежно від теплової поведінки всієї системи. Під час безперервної роботи живлення постійно перевіряються нормальні умови відключення, умови несправності/надмірного відключення та умови «вимкнення в режимі очікування».

При безперервній роботі електроживлення також перевіряються всі нормальні робочі умови та, якщо необхідно, ініціюються відповідні процедури. Рівень вібрації, межі прискорення, температурні межі, межі перевищення швидкості та межі стабільності потужності постійно перевіряються. Рис. 4.1 ілюструє огляд роботи установки.

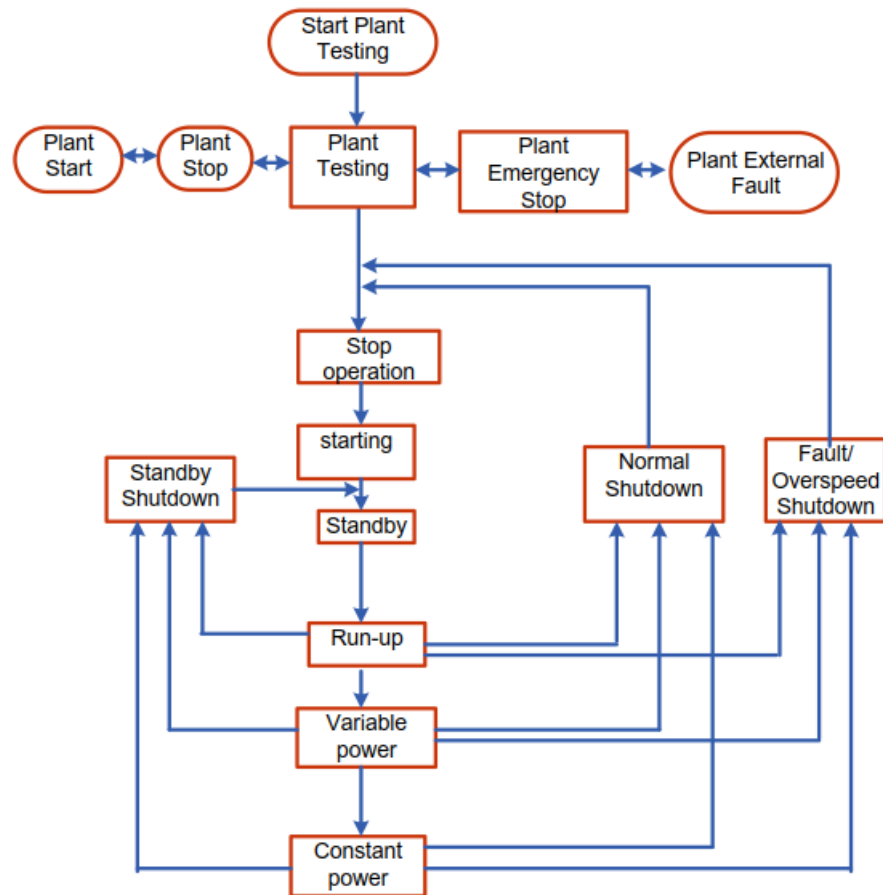


Рисунок 4.1 Огляд роботи установки

Умови зупинки цього робочого стану постійно перевіряються, і необхідні повідомлення з'являються в безперервній роботі живлення. Якщо швидкість ротора менша за мінімальне значення, попередньо встановлене системою керування зовнішнім кільцем для підтримки безперервної роботи потужності, один генератор вітрової турбіни повертається до робочого стану зі змінною потужністю.

Вимкнення в режимі очікування

Змінна потужність і безперервна робота живлення повинні бути можливими в будь-який час, щоб запустити режим очікування окремих вітрових турбін і привести їх у робочий стан у режимі очікування та повідомити про відповідні повідомлення. Якщо середня доступна швидкість

вітру менша за мінімальне значення, попередньо визначене системою керування зовнішнім кільцем, вітрова турбіна запуститься.

Режим очікування та окремі вітрові турбіни вимикаються, якщо ввімкнено режим очікування. Невдала зупинка/перевищення швидкості, крутного моменту або швидкості безперервно перевіряються в повторюваній послідовності. Після успішного вимкнення режиму очікування окремі вітрові турбіни повертаються до стану «очікування».

Нормальне відключення.

WTG Станція повинна бути здатна припинити будь-які робочі умови. Звичайний процес вимкнення подібний до процесу вимикання, за винятком того, що контактний вимикач генератора розмикається пізніше під час нормального процесу вимикання. Якщо швидкість впала нижче мінімального значення, попередньо визначеного зовнішньою системою керування контуром ($<2,5\%$), тоді гальмо вітрової турбіни буде механічним гальмом, а вітротурбіна вимкнена. Навіть у стані вимкнення слід перевіряти «перевищення швидкості/зупинка» та умови гальмування та відображати повідомлення про стан.

Вимкнення через перевищення швидкості/помилку.

Умови несправності впливають на конструкцію та термін служби вітряної електростанції через їхні перехідні процеси. WTG зупиняється, щоб запобігти пошкодженню або знищенню компонентів. У разі будь-яких проблем з електрикою відбувається безпечне відключення вітрової турбіни.

Процедура вимкнення через несправність подібна до звичайного вимкнення. Вимкнення за перевищення швидкості може бути запущено у разі більш високих робочих швидкостей, які порушують верхню межу швидкості. Таким чином, механічну гальмівну систему слід розумно брати до уваги в її номінальній потужності та коефіцієнтах робочого циклу.

Перевищення швидкості/перегрівання.

Коли вітроелектростанція працює в режимі постійної потужності, тобто при швидкості вітру вище номінального діапазону, швидкість підтримується в межах допустимого діапазону завдяки розширеному діапазону регулювання швидкості. Якщо робоча швидкість все ще перевищує максимальну верхню межу швидкості (наприклад, більше ніж на 150% від номінального значення), запускається «Відключення через помилку/перевищення швидкості».

У разі перегрівання компоненти WPP розроблені таким чином, що за нормальної роботи не виникає критично високих температур. Якщо температура виходить за межі, це означає, що в системі є збій або перевантаження. Тому необхідно розпочати операцію «Звичайне завершення роботи», і на дисплеї з'явиться відповідне повідомлення.

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Моніторинг стану вітрових електростанцій

Вітрові турбіни часто піддаються інтенсивному механічному впливу. Система CMS забезпечує стабільність, тривалий термін служби та оптимальну конструкцію компонентів вітрової турбіни (лопаті ротора, приводні вузли, інвертори...).

Таким чином, це запобігає повному виходу з ладу, є дорогим і дозволяє значно заощадити. Відмова коробки передач є причиною значної частини часу простою вітрової турбіни. Тому досягнення надійності та ефективності є важливим ключем. Таким чином, вимірювання можна використовувати як інструмент для збільшення обох. Завдяки моніторингу можна відстежувати стан компонентів і своєчасно виявляти можливі несправності, таким чином запобігаючи пошкодженням і, можливо, збільшуючи термін служби компонентів.

Діагностика та прогноз несправності.

Дефект – це фізичний дефект або дефект, який виникає в системі. Це може спричинити збій: деякі належні або очікувані дії не виконуються. Виявлення помилок – це визначення помилок у системі та часу виявлення. Виділення помилки — це визначення типу, місця та часу виникнення помилки. Далі йде виявлення помилок, що включає виділення та ідентифікацію помилок [38]. Прогноз — це підхід, який поєднує інформацію про поточний стан кожного пристрою з історичними даними машин того ж класу, фізичними моделями компонентів відмови та очікуваним короткостроковим використанням для прогнозування ймовірності відмови цього окремого пристрою в майбутньому.

Тобто, прогноз дає очікування ймовірності для кожної машини, що дозволяє стратегію збалансувати ризики експлуатації машини та показники

збитку проти доходу, втраченого під час очікування на обслуговування [39]. Аналіз даних вітрової турбіни за допомогою SCADA проілюстровано на рис. 5.1.

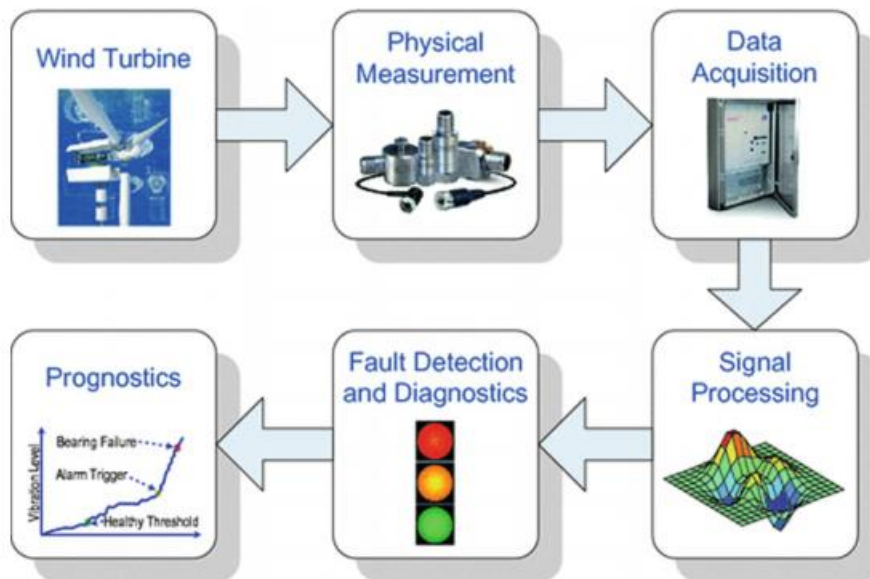


Рисунок 5.1 - Аналіз даних вітрової турбіни за допомогою даних SCADA

Інтелектуальний аналіз даних – це процес вилучення корисної інформації та шаблонів із великих даних. Його також називають процесом виявлення знань, видобутком знань з рис. 5.1. Аналіз даних вітрової турбіни з використанням даних SCADA, вилучення знань або аналіз даних/шаблонів [40]. Вирішальною метою діагностики та діагностики несправностей є визначення відповідного підходу до технічного обслуговування.

Системи діагностики та прогнозування несправностей на WT Моніторинг стану (CM) може завчасно виявляти помилки та запобігати серйозним несправностям. Це пов'язано зі значним зниженням витрат на технічне обслуговування. Крім того, це дозволяє покращити графіки технічного обслуговування, таким чином зменшуючи час простою та підвищуючи доступність, безпеку та надійність обладнання [41].

Увага була зосереджена на техніці зондування (збирання та аналіз даних для діагностики помилок [42]. Важлива життєво важлива інформація в області СМ була надана [43].

Основні несправності WT виникають через головну коробку передач; генератор, корінні підшипники та лопаті ротора, а ймовірність несправностей з точки зору пропорцій становить 32%, 23%, 11% і менше 10% відповідно, як визначено страховою компанією German Lloyd.CMS — це інструмент, який надає інформацію про стан компонентів і може також передбачити очікуваний збій/помилку. Таблиця 1 підсумовує діагностичні несправності та методи, які використовуються в CMS на різних частинах WT. Цифрова фільтрація, моделювання, аналіз сигналу та спектру є ключовими частинами обробки даних у CMS [39–42, 44].

Наступним кроком є прогнозування терміну служби компонентів і прийняття відповідної стратегії технічного обслуговування.

Моніторинг стану WT на основі SCADA.

Системи моніторингу стану по суті пропонують необхідний датчик і можливість збору даних, необхідних для моніторингу. Ці системи дозволяють встановити алгоритми діагностики та виявлення несправностей на датчику або RTU, встановленому на турбіні. Таким чином, зібрані дані SCADA необхідно проаналізувати, щоб зрозуміти загальний стан вітрової турбіни, а також пов'язаних з нею компонентів.

Працююча вітрова електростанція зазвичай генерує величезну кількість даних. Дані SCADA містять інформацію про кожен аспект ВЕС, включаючи вихідну потужність і швидкість вітру, а також будь-які інші помилки, зареєстровані в системі. Дані SCADA ефективно забезпечують раннє попередження про можливі збої. На рис. 5.2 показано схему діагностики несправностей. Типові параметри, які реєструє SCADA на WT, можна загалом класифікувати на параметри вітру, параметри продуктивності, параметри вібрації та параметри температури. Ці параметри можуть бути

використані для діагностики несправностей і прогнозування. Параметрами вітру є швидкість вітру та відхилення вітру.

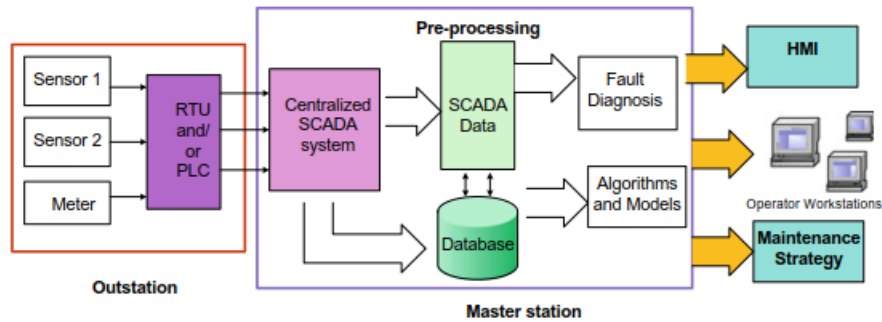


Рисунок 5.2 - Інтелектуальна структура для діагностики несправностей і прогнозування WT

Параметри продуктивності включають вихідну потужність, швидкість ротора та кут нахилу лопатей. Параметри вібрації включають прискорення башти та прискорення приводу. Температурні параметри включають температуру підшипників і температуру коробки передач. Дані вимірювання SCADA, моніторинг вібрації можуть бути використані для CM [43].

Для вдосконалення схеми виявлення несправностей для WT можна використовувати комбінацію методів виявлення ненормальних змін і трендів даних, узагальнених у багатоагентній структурі.

Методи AI для аналізу даних SCADA з WT.

Попередня обробка SCADA є обов'язковою для вилучення корисної інформації та шаблонів із величезних даних. Різноманітні методи штучного інтелекту, які використовуються для аналізу даних SCADA з WT, це штучні нейронні мережі (ANN), нечіткі системи та методи аранжування, такі як адаптивні нейронечіткі системи виведення (ANFIS). На рис. 5.3 узагальнено різні методи. ШНМ можна використовувати для широкого діапазону застосувань. Вони надихаються механізмом мозку і можуть бути класифіковані за різними категоріями, які залежать від механізму навчання. Одними з ключових характеристик нейронних мереж (НМ) є їх висока

швидкість обробки, яка зумовлена їх масивним паралелізмом, їхньою продемонстрованою здатністю навчатися та виробляти миттєві та правильні відповіді на зашумлені або частково неповні дані, а також їхньою здатністю узагальнювати інформацію над широкий діапазон.

Ці функції роблять їх гарним вибором для застосування в аналізі даних WT.

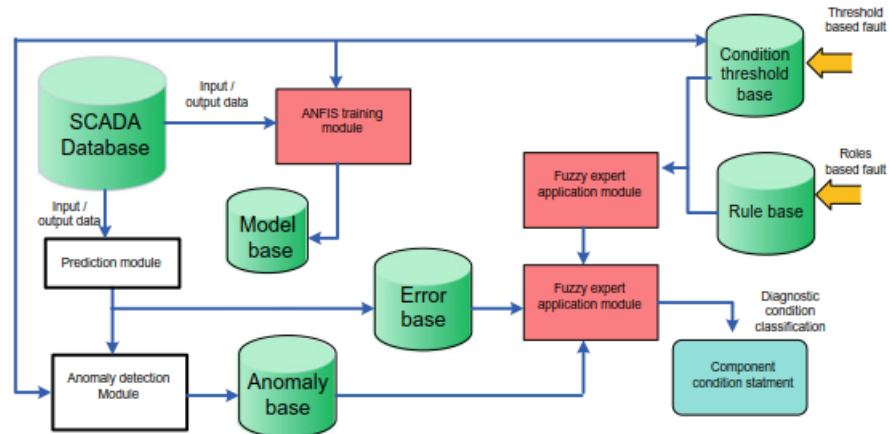


Рисунок 5.3 - Блок-схема методів штучного інтелекту в WT SCADA.

Нечіткі системи дуже корисні в двох загальних контекстах, наприклад у ситуаціях, пов'язаних із дуже складними системами, поведінка яких недостатньо зрозуміла, і в ситуаціях, коли потрібне приблизне, але швидке рішення. Ще одна перевага нечітких систем полягає в тому, що наявні експертні знання можуть бути використані для покращення апроксимації шляхом налаштування, видалення або додавання функцій і правил належності.

Нечіткі нейронні мережі показали свою перевагу при вирішенні проблем реального світу. Ці нейронечіткі системи поєднують переваги цих двох потужних парадигм в одній капсулі. Це дає можливість вмістити як дані, так і представлені експертні знання щодо досліджуваного питання. Нещодавно ANFIS запропонував моніторинг стану WT.

З цією метою були розроблені моделі нормальної поведінки ANFIS для загальних даних SCADA, щоб виявити аномальну поведінку зібраних сигналів і визначити несправності компонентів або несправності за допомогою прогнозування помилок.

Аномальне виявлення вітрової турбіни на основі SCADA.

Система SCADA змінює режим роботи систем вітрової електростанції забезпечуючи здорове робоче середовище та знижуючи витрати на експлуатацію та обслуговування. Однак широкий спектр високих розмірів і багато типів даних не повністю використовуються або розроблені; Зберігаючи лише дані в режимі реального часу та статистичні звіти, історичні дані зазвичай відстежуються або збираються.

Тому важливо повною мірою використовувати дані, зібрані електричними та електронними системами керування, які були визначені як такі, що найімовірніше вийшли з ладу, але несправності коробки передач і генератора спричинили найдовший простой. На рисунку 18 показано компоненти системи моніторингу стану вітрової турбіни.

Декілька дослідників провели дослідження зі спостереження за великими вітряними турбінами та діагностики несправностей [5] на основі методу статистичного навчання для виявлення нестандартних ситуацій за допомогою зваженої моделі найменших квадратів відповіді вітрової турбіни для підтримки векторного генератора вітрової енергії та зовнішніх умов схилу. [6]. Результати показали, що модель краща за традиційні методи прогнозування.

На підставі статистичного аналізу зазвичай потрібні великі набори даних, щоб забезпечити значущі показники: тому найпоширенішою точкою зору є те, що SCADA може виявляти початкові помилки на пізньому етапі [39] за допомогою штучних нейронних мережі, за їхню здатність реконструювати нелінійну залежність між входом і виходом, а також прості

формули для діагностики несправностей, які виникають на рівні коробки передач.

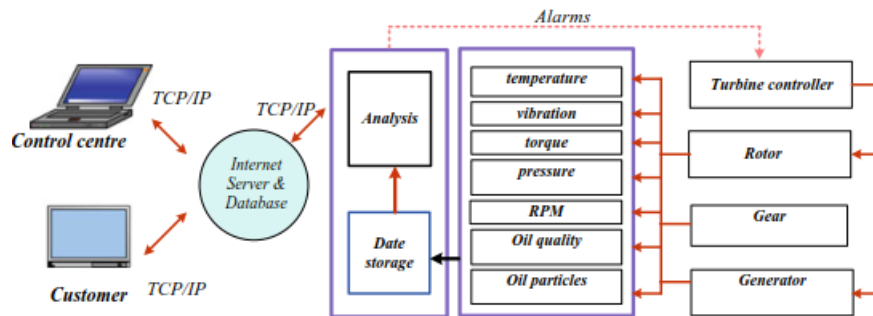


Рисунок 5.4. Система моніторингу стану для вітрових електростанцій.

Використані набори даних мають 10-хвилинний час вибірки для звичайних систем керування SCADA; Вібрації коробки передач і температури коробки передач визначаються як цільова вихідна потужність моделі. Часова точність SCADA виявиться дуже грубою для надійного аналізу вібрації, яку слід дотримуватися певною мірою на відповідному часовому масштабі (кілька Гц). В даний час методи інтелектуального аналізу даних, такі як агломерація та статистична модель, широко використовуються у вітчизняних та закордонних компаніях, але процес очищення є складним, а умови очищення суворими [45–49]. Таким чином, щоб виконати надійний аналіз ефективності вироблення електроенергії вітровими турбінами, терміново потрібен ефективний і різноманітний метод очищення. Зважаючи на це, у цьому розділі спочатку виділяються функції великих даних і великих розмірів, які збирає SCADA, і видаляються непов'язані та непотрібні параметри.

6 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ, ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Організація охорони праці при експлуатації системи

Охорона праці розглядає проблеми забезпечення здорових і безпечних умов праці. Виявляє і вивчає можливі причини нещасних випадків, професійних захворювань, аварій, вибухів, пожеж і розробляє систему заходів і вимог з метою виключення цих причин і створення безпечних і сприятливих для людини умов праці.

Завдання охорони праці є зведення до мінімуму імовірності пошкодження або захворювання працівників з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній продуктивності праці.

Навчання працівників безпеці праці проводять відповідно до вимог, які встановлюють порядок і види навчання. На всіх підприємствах і в організаціях незалежно від характеру і ступеню небезпеки виробництва навчання працівників проводять при підготовці нових робітників, проведенні різноманітних видів інструктажів і підвищенні кваліфікації.

Контроль за своєчасним і якісним навчанням виконує відділ охорони праці чи інженер з охорони праці, або ІТП, на якого наказом керівника підприємства покладено ці обов'язки. Ті, що вперше поступають на роботу, навчання проходять згідно з "Типовим положенням про підготовку і підвищення кваліфікації робітників". В журналі обліку навчальної роботи реєструють навчальну тему, за якою проводилось навчання.

Інструктаж працюючих поділяють на вступний, початковий, на робочому місці, повторний, позаплановий і початковий.

Вступний інструктаж з усіма, хто поступає на роботу незалежно від їх освіти і стажу роботи по даній професії, проводить інженер з охорони праці за програмою, затвердженою головним інженером підприємства, про

проведення вступного інструктажу з обов'язковим підписом того, хто проводив інструктаж і того, хто його отримував.

Початковий інструктаж на робочому місці, повторний, позаплановий і поточний проводить керівник робіт.

Початковий інструктаж на робочому місці проводять при прийомі на роботу нових робітників за інструкцією з охорони праці, розробленою для окремих професій або видів робіт. Всі робітники після цього інструктажу і перевірки знань 2-5 змін (залежно від навичок і стажу роботи) працюють під наглядом бригадира чи майстра, потім оформляється допуск до їх самостійної праці.

Повторний інструктаж проходять всі працівники незалежно від кваліфікації, освіти і стажу роботи через три місяці. Його проводять з метою перевірки знання робітниками правил і норм з охорони праці.

Позаплановий інструктаж проводять коли змінилися правила охорони праці або технологічний процес, обладнання, інструмент та інші фактори, що впливають на безпеку праці; коли працівники порушують правила охорони праці, що можуть призвести чи призвели до травм, аварій чи пожежі, вибуху. Його проводять індивідуально чи з групою робітників однієї професії за програмою початкового інструктажу на робочому місці. При його реєстрації вказують причину, яка спричинила його проведення.

Умови праці мають велике значення практично для всіх виробничих показників - продуктивності праці, якості робіт, безпеки працівників та інше.

Санітарно-гігієнічні умови праці характеризуються показниками виробничого середовища - рівнем освітлення, мікрокліматичними параметрами, загазованістю і запиленістю повітряного середовища, рівнем шуму і вібрації, наявністю іонізуючого випромінювання та інше.

6.2 Розрахунок заземлення

Розрахуємо систему заземлення для електроустаткування, яке працює від напруги 220 В.

$$R_{\text{заз}} \leq \frac{U}{I_p} = \frac{220}{66} = 3.3 \leq 4 \text{ Ом}$$

Визначаємо опір ґрунту: $\rho = k_n * \rho_n = 2 * 200 = 400 \text{ Ом м}$,

де k_n - коефіцієнт підсилення;

ρ_n — питомий опір ґрунту (вибирається з довідкової літератури).

Визначаємо опір одиночного вертикального заземлювача:

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} * \frac{4t+1}{4t-1} \right)$$

де t - відстань від середини заземлювача до поверхні ґрунту, м;

l, d - довжина і діаметр стержня заземлювача, м;

$$R_B = 96 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опір сталевий полоси, що з'єднує стержневі заземлювачі:

$$R_{II} = (\rho / 2\pi l) * \ln(l^2 / dt) = 61 \text{ Ом.}$$

Визначаємо орієнтовне число стержневих заземлювачів:

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / 4 * 1 = 24 \text{ шт.};$$

r_B - допустимий по нормам опір заземляючого пристрою,

η_B - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів (для орієнтовного розрахунку приймається рівним 1).

Приймаємо розміщення вертикальних заземлювачів по контуру з відстанню між сталевими заземлювачами рівним 21. З довідкової літератури визначаємо $\eta_B = 0,66$ і $\eta_I = 0,39$.

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів

$$n = R_B / [r_B] \eta_B = 96 / (4 * 0.66) = 36$$

Розраховуємо загальний розрахунковий опір аземлюючого пристрою R з врахуванням з'єднувальної полоси

$$R = R_B R_{II} / (R_B \eta_I + R_{II} \eta_B) = 3.9 \text{ Ом.}$$

Розрахунок проведено правильно, оскільки виконується умова $R \leq [r_B]$.

Розрахунок штучного заземлення:

Приймаємо, що опір захисного заземлення не повинен перевищувати 4 Ом:

$$R_{33} = \frac{R_c R_n}{R_c + R_n} \leq 4 \text{ Ом}$$

де R_{33} – опір захисного заземлення;

R_c – опір стержневих заземлювачів;

R_n – опір поперечних заземлювачів.

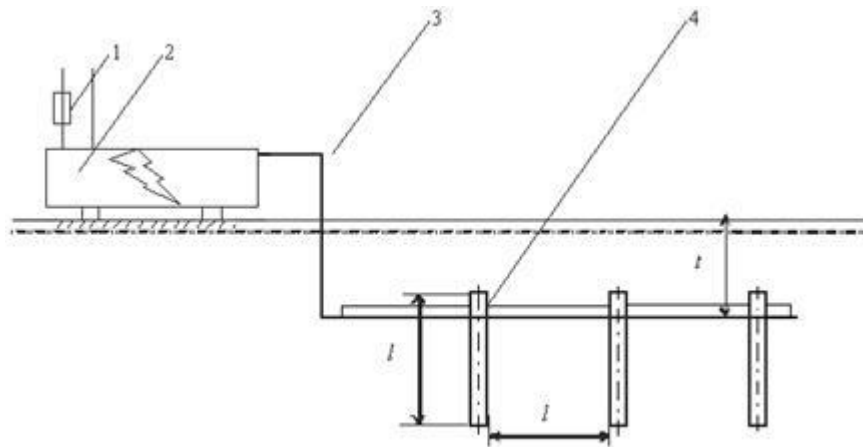


Рисунок 6.1 - Пристрій заземлення

1 – плавка вставка; 2 – електроустановка; 3 – з'єднувальна штаба; 4 – трубчатий заземлювач

Опір одиночного стержневого заземлювача розтіканню електричного струму:

$$R_{oc} = \frac{\rho_r}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{4h' + l}{4h' - l} \right)$$

де h – відстань від поверхні ґрунту до заземлювача і становить 0,8 м;

l – довжина стержневого заземлювача 3 м;

d – діаметр стержневого заземлювача 50 мм.

$$R_{oc} = \frac{750}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \ln \frac{4 \cdot 0,8 + 3}{4 \cdot 0,8 - 3} \right) = 39,8 \cdot (0,18 + 3,43) = 143,8 \text{ Ом}$$

Опір одиночного поперечного заземлювача:

Таблиця 6.1

Вибір кількості заземлювачів

n	R_n	R_c	R_o	η
1	398,1	143,8	105,6	26,1
5	398,1	143,8	105,6	5,2
10	398,1	143,8	105,6	2,6
15	398,1	143,8	105,6	1,7
20	398,1	143,8	105,6	1,3
25	398,1	143,8	105,6	1,1
26	398,1	143,8	105,6	1,0
27	398,1	143,8	105,6	0,9

З цієї формули методом ітерацій підбирають n , при якому $\eta = 1$:

$$R_{ок} = \frac{\rho_p}{2\pi} \ln \frac{2l^2}{bh'}$$

де l – довжина поперечного заземлювача 2,5 м;

b – ширина полоси заземлювача 30 мм;

ρ_p – розрахунковий опір ґрунту: для поперечних електродів 1000 Ом·м, для стержневих електродів 750 Ом·м.

$$R_{ок} = \frac{1000}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \ln \frac{2 \cdot 2,5^2}{0,03 \cdot 0,8} = 63,7 \cdot 6,25 = 398,1 \text{ Ом}$$

В наслідок взаємовпливу вводимо коефіцієнт використання заземлювачів:

$$\eta = \frac{R_0}{nR_d}$$

де R_d – допустимий опір заземлення, що становить 4 Ом;

R_0 – опір одиночного заземлювача.

Отже приймаємо кількість одиночних заземлюючих електродів рівною 26.

6.3. Розрахунок стійкості об'єкта до вибуху газо-повітряної суміші

Оцінити стійкість котла до дії вибуху газоповітряної суміші.

Характеристика котла:

- довжина 5,5 м;
- ширина 4,2 м;
- висота 4,1 м;
- об'єм топочного простору 19 м³.

Визначимо можливий надмірний тиск ударної хвилі в топочному просторі котла.

У вогнищі вибуху газоповітряної суміші створюються зони:

1 - зона дії детонуючої хвилі, радіус

$$r_1 = 17,5 \cdot Q^{1/3} = 17,5 \cdot 0,001^{1/3} = 2,3 \text{ м}$$

(об'ємна доля газу у повітрі при якій відбувається вибух становить 5%, тобто 1 м³ топочного простору; маса 1 м³ газу становить приблизно 1 кг);

Надлишковий тиск у цій зоні приймаємо

$$\Delta P_1 = 1700 \text{ кПа.}$$

2- зона дії продуктів вибуху, радіус

$$r_2 = 1,7 \cdot r_1 = 1,7 \cdot 2,3 = 3,9 \text{ м;}$$

Надлишковий тиск –

$$\Delta P_2 = 1300 \left(\frac{2,3}{3,9} \right)^3 + 50 = 505 \text{ кПа.}$$

В даному випадку при відсутності або несправності вибухових клапанів може відбутися повне зруйнування котельного агрегата, оскільки повні зруйнування котлів настають при надлишковому тиску понад 150 кПа.

Для попередження виникнення вибухів необхідно застосувати високонадійну систему автоматичного захисту котельного агрегата (для відсікання подачі газу до топки котла при погасанні полум'я факелу будь-якого з пальників).

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування вітровою електростанцією на базі SCADA системи.

Для досягнення поставленої мети було проаналізовано всі аспекти роботи вітрової станції. Описано всі параметри роботи системи керування, розглянуто всі сучасні інновації, які використовуються для оптимізації процесу роботи вітрової станції.

Для системи було розроблено алгоритм роботи, описано всі режими як стаціонарні так і аварійні. Результати роботи дозволять інженерам більш якісно обирати обладнання та алгоритми роботи для побудови ефективних вітрових електростанцій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sayed K., Gabbar H.A. Building energy management systems. BEMS. In: Energy conservation in residential, commercial, and industrial facilities, 2018. p 15–81.
2. Sayed K., Gabbar H.A. SCADA and smart energy grid control automation. In: Smart energy grid engineering, 2017.p. 481–514.
3. Ahmed M.A., Eltamaly A.M.. Wireless network architecture for cyber physical wind energy system. IEEE, 2020. p. 40180–40197.
4. Eltamaly A.M., Al-Saud M.S., Abo-Khalil A.G. Dynamic control of a DFIG wind power generation system to mitigate unbalanced grid voltage. IEEE Access, 2020. p. 39091–39103.
5. Tautz-Weinert J., Watson S. Using SCADA data for wind turbine condition monitoring—a review. IET Renew Power Gener 11, 2017. p. 382–394.
6. Sciacca S.C., Block W.R. Advanced SCADA concepts. IEEE Comput Appl Power 8, 1995. p. 23–28.
7. Chan E-K., Ebenhoh H. The implementation and evolution of a SCADA system for a large distribution network. IEEE Trans Power Syst 7, 1992. p. 320–326.
8. Leonardi A., Mathioudakis K., Wiesmaier A., Zeiger F. Towards the smart grid: substation automation architecture and technologies. In: Advances in electrical engineering, 2014. 13 p.
9. Hansen A.D., Sørensen P., Iov F. et al. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators. Renew Energy 31.7, 2006. p. 935–951.
10. Xie Y., Liu C., Wu Q. Optimized dispatch of wind farms with power control capability for power system restoration. J Mod Power Syst Clean Energy 5, 2017. p. 908–916.

11. Abo-Khalil A.G., Alghamdi A., Tlili I. Current controller design for DFIG-based wind turbines using state feedback control. *IET Renew Power Generat* 13, 2019. p. 1938–1948.
12. Singh N., Kliokys E., Feldmann H., Kiissel R. Power system modelling and analysis in a mixed energy management and distribution management system. *IEEE Trans Power Syst* 13, 1988. p. 1938–1948.
13. Noske S., Falkowski D., Swat K., Boboli T. UPGRID project: the management and control of LV network. In: 24th international conference & exhibition on electricity distribution CIRED., 12–15 June 2017, p. 1520–1522.
14. Etherden N., Johansson A.K., Ysberg U., Kvamme K., Pampliega D., Dryden C. Enhanced LV supervision by combining data from meters, secondary substation measurements and medium voltage supervisory control and data acquisition. In: 24th international conference & exhibition on electricity distribution. CIRED., 12–15 June 2017, p. 1089–1093.
15. Sayed K., Gabbar H.A. Supervisory control of a resilient DC microgrid for commercial buildings. *Int J Process Syst Eng* 4, 2017. p. 99–118.
16. Eltamaly AM, Mohamed YS, El-Sayed A-HM, Elghaffar ANA. Analyzing of wind distributed generation configuration in active distribution network. In: 2019 8th international conference on modeling simulation and applied optimization. ICMSAO. . IEEE, 2019. p. 1–5.
17. Dhiman H.S., Deb D., Muresan V., Balas V.E. Wake management in wind farms: an adaptive control approach. *Energies* 12, 2019. p. 1247.
18. Ahmed M.A., Pan J-K., Song M., Kim Y-C. Communication network architectures based on ethernet passive optical network for offshore wind power farms. *Appl Sci* 6, 2016. p. 81.
19. Stancu D.C., Federenciuc D., Golovanov N., Stanescu D. New functionalities of smart grid-enabled networks. In: 24th international conference & exhibition on electricity distribution CIRED., Open Access Proc J 2017, p. 1903–1906.

20. Huang M., Wei Z., Sun G., Zang H. Hybrid state estimation for distribution systems with AMI and SCADA measurements. *IEEE Access* 7, 2019. p. 120350–120359.
21. Zhao H., Ma L., Yan X., Zhao Y. Historical multi-station SCADA data compression of distribution management system based on tensor tucker decomposition. *IEEE Access* 7, 2019. p. 124390–124396.
22. Khaled U., Eltamaly A.M., Beroual A. Optimal power flow using particle swarm optimization of renewable hybrid distributed generation. *Energies* 10.7, 2017. p. 1013.
23. Vera YEG., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Energy management in microgrids with renewable energy sources: a literature review. *Appl Sci* 9, 2019 p. 3854.
24. Ahmed M.A., Kang Y.C., Kim Y-C. 2015. Modeling and simulation of ICT network architecture for cyber-physical wind energy system. In: *IEEE international conference on smart energy grid engineering. SEGE.* , Oshawa, Canada, 2015. p. 32-46
25. Goraj M., Epassa Y., Midence R., Meadows D. Designing and deploying ethernet networks for offshore wind power applications—a case study. In: *10th IET international conference on developments in power system protection. DPSP 2010.* . Managing the change, 2010. p. 84.
26. Li P., Song Y., Li D., Cai W., Zhang K.. Control and monitoring for grid-friendly wind turbines: research overview and suggested approach. *IEEE Trans Power Electron* 30, 2015. p. 1979– 1986.
27. Yang J.M., Cheng K.W.E., Wu J., Dong P., Wang B. The study of the energy management system based-on fuzzy control for distributed hybrid wind-solar power system. In: *Proceedings of first international conference on power electronics systems and applications*, 2004. p. 113–117.

28. Eltamaly A.M., Farh HM. Smart maximum power extraction for wind energy systems. In: 2015 IEEE international conference on smart energy grid engineering. SEGE. . IEEE, 2015.p. 1–6
29. Abo-Khalil AG, Alghamdi AS, Eltamaly AM, Al-Saud MS, Praveen RP, Sayed K. Design of state feedback current controller for fast synchronization of DFIG in wind power generation systems. *Energies* 12.12, 2019. 2427.
30. Abo-Khalil AG, Alyami S, Sayed K, Alhejji A. Dynamic modeling of wind turbines based on estimated wind speed under turbulent conditions. *Energies* 12.10, 2019. p. 117-126.
31. Sayed K., Abdel-Salam M. Dynamic performance of wind turbine conversion system using PMSG-based wind simulator. *Electri Eng J* 99, 2017. p. 431–439.
32. Sayed K., Gabbar H. Smart distribution system Volt/VAR control using the intelligence of smart transformer. In: Proceedings of the 4th IEEE international conference on smart energy grid engineering SEGE, 2016. p. 52–56
33. Abdel-Salam M., Ahmed A., Ziedan H., Sayed K., Amery M., Swify M. A solar-wind hybrid power system for irrigation in Toshka area. In: IEEE Jordan conference on applied electrical engineering and computing technologies AEECT, Amman, Jordan, 2011. p. 38–43.
34. Sayed K., Kassem A.M., Aboelhassan I., Aly A.M., Abo-Khalil A.G. Role of supercapacitor energy storage in DC microgrid. In: 1ST international conference on electronic engineering Iceem 2019, Egypt, 7–8 December 2019. p. 23-32.
35. Sayed K., Kassem A.M., Aboelhassan I., Aly A.M. Energy management and control strategy of DC microgrid including multiple energy storage systems. In: 21st international Middle East power systems conference. MEPCON. Tanta University, Egypt, 2019. p. 38-43.
36. Praveen R.P., Therattil J., Jose J., Abo-Khalil A., Alghamdi A., Bindu G.R., Sayed K. Hybrid control of a multi area multi machine power system with FACTS

- devices using non-linear modelling. *IET Generat Trans Distrib* 14.10, 2020. p. 1993–2003.
37. Sayed K., Abo-Khalil A.G., Alghamdi A.S. Optimum resilient operation and control DC microgrid based electric vehicles charging station powered by renewable energy sources. *Energies* 12, 2019. p. 4240.
38. Wang K-S, Sharma V.S., Zhang Z-Y. SCADA data based condition monitoring of wind turbines. *Adv Manuf* 2, 2014. p. 61–69.
39. Kusiak A., Li W. The prediction and diagnosis of wind turbine faults. *Renew Energy* 36, 2011. p. 16–23.
40. Eltamaly A.M., Alolah A.I., Farh H.M., Arman H. Maximum power extraction from utility- interfaced wind turbines. *New Develop Renew Energy* , 2013. p. 159–192.
41. Zhang Z., Kusiak A. Monitoring wind turbine vibration based on SCADA data. *J Sol Energy Eng* 134, 2012. p. 021004.
42. Elnozahy A., Sayed K., Bahyeldin M. Artificial neural network based fault classification and location for transmission lines. In: 2019 IEEE conference on power electronics and renew- able energy. CPERE. , Aswan City, Egypt, 2019. p. 140–144.
43. Dempsey P.J., Sheng S. Investigation of data fusion applied to health monitoring of wind turbine drivetrain components. *Wind Energy* 16.4, 2013 p. 479–489.
44. Eltamaly A.M., Khan A.A. Investigation of DC link capacitor failures in DFIG based wind energy conversion system. *Trends Electri Eng* 1.1, 2011. p. 12–21.
45. Wilkinson M., Darnell B., Harman K. Presented at EWEA 2013 annual comparison of methods for wind turbine condition monitoring with SCADA data. EWEA 2013 annual event, Vienna, 2013. p. 4–7.

46. Schlechtingen M., Ferreira Santos I. Comparative analysis of neural network and regression based condition monitoring approaches for wind turbine fault detection. *Mech Syst Signal Process* 25, 2011. p. 1849–1875.
47. Pandit R., Infield D.. SCADA—based wind turbine anomaly detection using Gaussian process models for wind turbine condition monitoring purposes. *IET Renew Power Generat* 12. 11. URL : <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.0156/>
48. Mokryani G., Siano P., Piccolo A., Cecati C. A novel fuzzy system for wind turbines reactive power control conference paper. In: *Proceedings of IEEE international conference on fuzzy systems, Taipei, Taiwan, 27–30 June 2011*. p. 236-244.
49. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
50. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
51. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
52. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
53. Введення в комп'ютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.

54. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.