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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(назва освітнього ступеня)

на тему: **МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕРТОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ**

Виконав(ла): студент 6 курсу, групи ЕТм спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності)

Колівошко А.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.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 Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Тарасенко М. Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«13» листопад 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня **магістр**
(НАЗВА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Колівошкові Андрію Михайловичу
(Прізвище, Ім'я, По Батькові)

1. Тема роботи Моделювання інверторних генераторів в електромережах

Керівник роботи Мовчан Леонід Темофійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 10 » листопада 2023 року № 4/7-1040

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Провести моделювання та аналіз інверторних генераторів в мережах з послідовною компенсацією в умовах слабкої мережі. Провести моделювання одноступеневого гібридного підвищувального перетворювач для одночасного живлення навантаження постійного та змінного струму в інверторних генераторів, підключених до мережі.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналітичний розділ
2. Розрахунково-дослідницький розділ
3. Проектно-конструкторський розділ
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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. Безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Клепчик В.М., старший викладач		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 13 листопада 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	**Примітка**
1	Вступ	14.11.2023	
2	Аналітичний розділ	18.11.2023	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	22.11.2023	
4	Проектно-конструкторський розділ	25.11.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.11.2023	
6	Висновки	01.12.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2023	
8	Оформлення графічної частини	12.12.2023	

Студент _____ Колівошко А.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Колівошко А.М. Моделювання інверторних генераторів в електромережах.

Стор.63; рис.26; табл.1; креслень - ; джерел -15; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи було вивчення динамічних параметрів енергетичної системи, пов’язаних з інтеграцією в мережу.

У першому розділі дається огляд літератури та теоретичної бази теми. Це також пояснює деякі концепції розуміння проблеми та деякі очікувані результати.

В другому розділі було представляє моделювання та аналіз інверторних генераторів в мережах з послідовною компенсацією в умовах слабкої мережі. Досліджено субсинхронне коливання у вітряних електросистемах типу 4. На основі аналітичних моделей виконується аналіз стабільності малого сигналу на основі власних значень і імпедансу. Аналітичні результати перевірялися на двох випробувальних стендах електромагнітних перехідних процесів з повною динамікою, включаючи динаміку мережі, механічну динаміку вітряної турбіни, а також усі етапи керування перетворювачем.

У третьому розділі проведено аналіз ефективності і надійністі гібридного підвищувального перетворювача з одночасним виходом змінного і постійного струму, коли подається один вхід постійного струму. Результати комп’ютерного моделювання підтверджують, що трифазний гібридний підвищувальний перетворювач здатний правильно регулювати вихід постійного та змінного струму, а також вихідну напругу постійного струму та реактивну потужність на шині загального з’єднання.

Ключові слова: Інверторний генератор, мережевий перетворювач, синхроний генератор.

ЗМІСТ

Реферат 3

ЗМІСТ 4

ВСТУП 6

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ 8

1.1. Загальні характеристики інверторного генератора 8

1.1.1 Елементи керування мережевим перетворювачем 9

1.2. Структура каскадного векторного керування 10

1.2.1 Зовнішній контур керування 12

1.2.2 Внутрішній контур керування 13

1.2.3 Контур фазового автопідстроювання 13

1.3 Інверторний генератор з гібридним підвищуючим перетворювачем 14

1.4 Висновок до розділу 16

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ 17

2.1. Моделювання та аналіз ІГ у слабкій та серійній компенсації мережі 17

2.2 Модель вітрогенератора типу 4 в мережах із послідовною компенсацією 18

2.2.1 Контур із фазовим автопідстроюванням 21

2.2.2 Моделювання динаміки мережі в координатній системі відліку 24

2.3 Аналіз моделі 1 з мережевим перетворювачем 27

2.3.1 Перевірка тестового стенда на електромагнітні перехідні процеси 31

2.4 Аналіз моделі 2 з мережевим перетворювачем 33

2.4.1 Перевірка тестового стенда на електромагнітні перехідні процеси 35

2.5 Аналіз стабільності на основі імпедансу 36

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ 41

3.1. Трифазний гібридний підвищувальний перетворювач для інверторних генераторів 41

3.2 Робота гібридного підвищувального перетворювача підключеного до мережі 42

3.3 Моделювання системи керування гібридним підвищувальним перетворювачем 46

3.3.1 Зовнішній контур керування 46
3.3.2 Методологія керування гібридним ШІМ 48
3.4 Результати моделювання трифазного гібридного підвищувального перетворювача 50
3.5 Висновки до роздлу 53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 54
4.1. Охорона праці 54
4.1.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок 54
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях 57
4.2.1 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху 57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 62

ВСТУП

Актуальність теми роботи.

В даний час інверторні генератори, такі як вітрогенератори та сонячні фотоелектричні установки, все активніше інтегруються в енергосистеми через проблеми екології та енергозбереження. За оцінками, у 2030 році вітряні та сонячні фотоелектричні установки забезпечать до 30% виробництва електроенергії в країні. У минулому динаміка енергосистеми значною мірою визначалася характеристиками синхронних генераторів. У той час як зараз проникнення генераторів, що стрімко зростає, на основі інверторів починає надавати переважний вплив на динаміку сучасної енергосистеми. Динамічні реакції генераторів на основі інверторів (визначаються контролерами) відрізняються від звичайних синхронних генераторів (що визначаються потокозчепленням тощо).

В даний час оператори мереж стикаються із ситуацією, коли генерація від інверторних генераторів витісняє значний обсяг генерації від синхронних генераторів. Інверторні генератори взаємодіють із енергосистемою через силові електронні інвертори. Проблемою є взаємодія між генераторами на базі інверторів та електромережею, що призводить до проблем стабільності енергосистем. Наприклад, в об'єднаній системі інверторних генераторів часто спостерігаються субсинхронні коливання (SSO).

Однак широке поширення інверторних генераторів з малою інерційністю призводить до виникнення нових проблем із стійкістю системи. У зв'язку з цим розробка нових схемотехнічних рішень одноступеневих гібридних підвищувальних перетворювачів для одночасного живлення навантаження постійного та змінного струму в інверторних генераторів є актуальним.

Мета і завдання роботи: є дослідження одноступеневого гібридного підвищувального перетворювача для одночасного регулювання навантажень постійного та змінного струму, забезпечення високого коефіцієнта підсилення напруги та стабільність всієї енергосистеми

Досягнення мети визначається вирішенням наступних завдань:

1. Провести моделювання та аналіз інверторних генераторів в мережах з послідовною компенсацією в умовах слабкої мережі.

2. Провести моделювання одноступеневого гібридного підвищувального перетворювач для одночасного живлення навантаження постійного та змінного струму в інверторних генераторів, підключених до мережі.

Об'єкт дослідження: Гбридні підвищувальні перетворювачі для одночасного живлення навантаження постійного та змінного струму в інверторних генераторах.

Предмет дослідження: Техніко-енергетичні характеристики основних показників якості інверторних генераторів у вітрогенераторах.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано аналітичну модель простору станів і модель імпедансу для аналіз стабільності сигналу вітрової системи у послідовно компенсованій мережі.

2. Запропоновано методику випробування електромагнітних перехідних процесів з повною динамікою, включаючи динаміку мережі, механічну динаміку вітряної турбіни, а також усі етапи керування перетворювачем.

Практична цінність результатів дослідження полягає в розробці одноступеневого гібридного підвищувального перетворювач для одночасного живлення навантаження постійного та змінного струму в інвертирних генераторах, підключених до мережі.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2023 р.)

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Загальні характеристики інверторного генератора

У цьому розділі представлені характеристики генераторів на основі інверторів (ІГ), підключених до шини загального з'єднання (PCC) на рівні передачі або розподілу. Особливу увагу буде приділено вітряним турбінним генераторам (ВТГ) типу 4, які взаємодіють з електромережами через перетворювачі джерел напруги, що відповідають мережі. Це призводить до впливу на динаміку енергосистеми, головним чином покладаючись на перетворювач на стороні мережі. Детальне моделювання кожного компонента ІГ збільшить складність і введе велике обчислювальне навантаження на моделювання. У мережевій індустрії зазвичай використовуються спрощені моделі, що враховують досліджувані явища. Таким чином, деякі припущення моделювання приймаються для ефективного обчислення.

Широкомасштабний ІГ зазвичай складається з десятків сотень блоків на основі інвертора. Представляти кожен генератор окремо з точки зору системних порядків і часу моделювання непрактично. Як повідомлялося в кількох недавніх дослідженнях [1–8], немає взаємної взаємодії між вітровими турбінами або сонячними фотоелектричними установками у випадку добре налаштованих перетворювачів. Між тим, враховуючи той факт, що вітрова електростанція зазвичай включає ВТГ одного типу, які працюють у дуже схожих умовах. Таким чином, еквівалент однієї машини є доцільним для представлення кількох ідентичних ВТГ або сонячних фотоелектричних блоків, якщо їхні статичні та динамічні параметри однакові. Це спрощення було використано в кількох дослідженнях [5-9], які показують, що еквівалент однієї машини є адекватним для аналізу динаміки енергосистеми.

Певні дослідження системної взаємодії, такі як субсинхронний резонанс (ССР), є динамічною поведінкою більше передачі, ніж інші частини. Таким чином, локальна передача ігнорується. Це припущення було доведено в більшості публікацій з хорошим наближенням у таких дослідженнях.

Еквівалентна передача на великі відстані представлена підвищуючими трансформаторами та лінією передачі, в якій переважають котушки індуктивності. Слід зазначити, що проста радіальна RLC-лінія здатна створювати як перехідні процеси, так і проблеми самозбудження настільки серйозні, як будь-які спостережувані при аналізі реальної системи. Це спрощення є розумним і підтверджується кількома дослідженнями [11-12]. Таким чином, у цьому дослідженні для представлення лінії передачі використовується схема RL або RLC. Високий реактивний опір мережі використовується для імітації міжміської лінії в умовах слабкої мережі. Цей метод також використовується в [2–4] для аналізу проблем стабільності в умовах слабкої мережі.

Моделювання електромагнітних перехідних процесів (ЕПП) з повними деталями відіграє важливу роль у вивченні динаміки енергосистеми.

Існуючі моделі динамічного моделювання ЕПП включають два типи моделей: середню (неперемикальну) модель ЕПП і детальну модель ЕПП перемикання. Різниця полягає в тому, що усереднена модель замінює комутаційну модель перетворювача джерела напруги (ПН) еквівалентною динамічною моделлю середнього значення (МСЗ). У порівнянні з дискретною формою сигналу, отриманою за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), МСЗ розглядає лише фундаментальну частину і, таким чином, приймає трифазне кероване джерело напруги для представлення ПН. Згенерована напруга змінного струму усереднюється за один цикл частоти перемикання без урахування гармонік. Техніка усереднення запропонована для представлення безперервного нелінійного перетворювача в [5].

І середня модель, і детальна модель здатні точно досліджувати динаміку, пов’язану з інтеграцією в мережу. Але середня модель має значну ефективність моделювання порівняно з детальною моделлю, оскільки моделювання подій перемикання створює непотрібне обчислювальне навантаження.

1.1.1 Елементи керування мережевим перетворювачем

Повідомляється, що динамічні реакції ІГ визначаються контролером мережевого перетворювача (МП) і лінії передачі [9]. Доцільно розглядати лише особливості управління МП, ігноруючи решту динаміки.

Використовуючи каскадне векторне керування, зовнішній контур керування віссю *d* МП може приймати режим керування напругою кола постійного струму або режим керування реальною потужністю [14]. Якщо розглядати динаміку кола постійного струму, режим керування напругою кола постійного струму регулює напругу кола постійного струму, щоб відповідно модулювати реальну потужність усієї системи. Режим керування реальною потужністю припускає, що напруга кола постійного струму є постійною, а реальна потужність регулюється напряму за опорним значенням керування. МП великого розміру ІГ надає перевагу режиму керування потужністю [15]. Цей факт також підтверджується [15], дослідженням, проведеним Siemens, де режим керування потужністю передбачається для МП.

Для регулювання реактивної потужності є два контури керування по осі q МП: один режим керування реактивною потужністю, а інший режим керування напругою загального з'єднання [15]. Режим керування реактивною потужністю модулює реактивну потужність відносно її контрольного опорного значення. Режим керування напругою загального з'єднання, регулює напругу загального з'єднання, яка пов'язана з реактивною потужністю всієї системи.

1.2. Структура каскадного векторного керування

Схема спрощеної ІГ з мережевим способом керування наведена на рис. 1.1. ІГ підключається до електромережі через МП, який подає активну та реактивну потужність в електромережі на основі зовнішніх заданих значень керування.

МП синхронізує напругу точки загального підключення (PCC) з напругою мережі за допомогою фазового автопідлаштування частоти (PLL). Загальна структура каскадного управління показана на рис. 1.2. Він включає

зовнішній контур керування та швидший внутрішній контур керування струмом. Контролери обох контурів використовують пропорційно-інтегральні (ПІ) контролери та моделюються в системі відліку dq перетворювача, яка є системою відліку (позначеною верхнім індексом c), яка обертається синхронно з напругою загального з'єднання. Вихідна напруга МП (v_d, v_q) генеруються з поточних замовлень i^*_{1d} і i^*_{1q} розв'язаним внутрішнім контуром керування струмом. Опорний струм i^*_{1d} визначається або реальним керуванням потужністю, або керуванням напругою кола постійного струму. Тим часом, i^*_{1q} генерується або регулятором напруги PCC, або регулятором реактивної потужності.

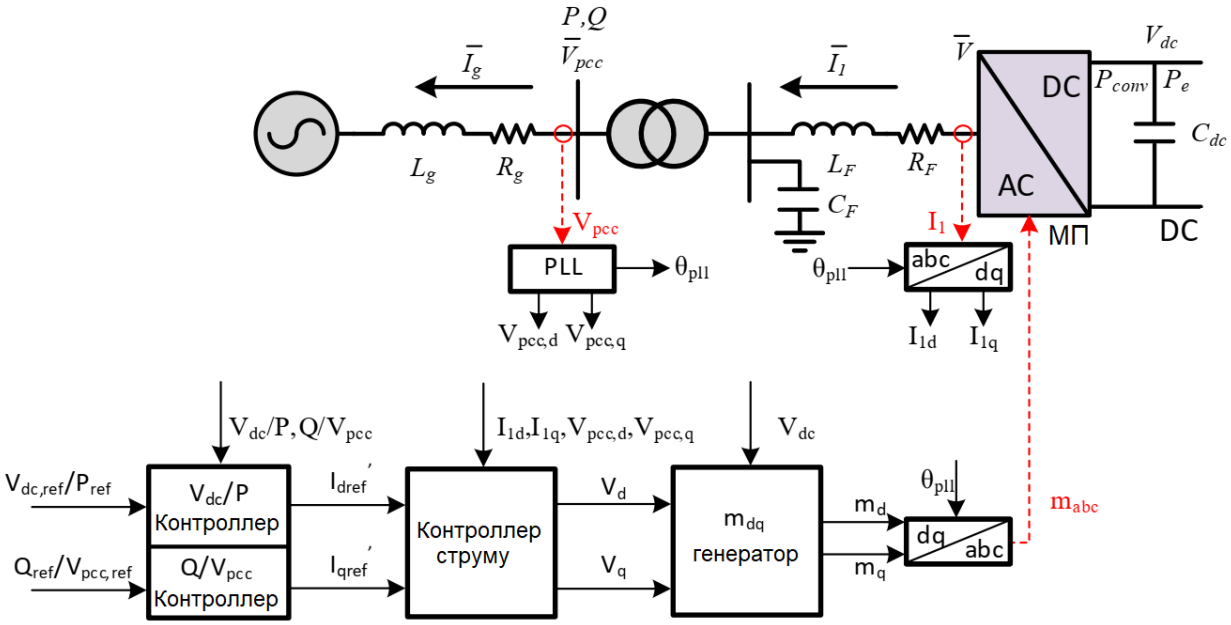


Рисунок 1.1: Схема спрощеного ІГ з мережевим методом керування.

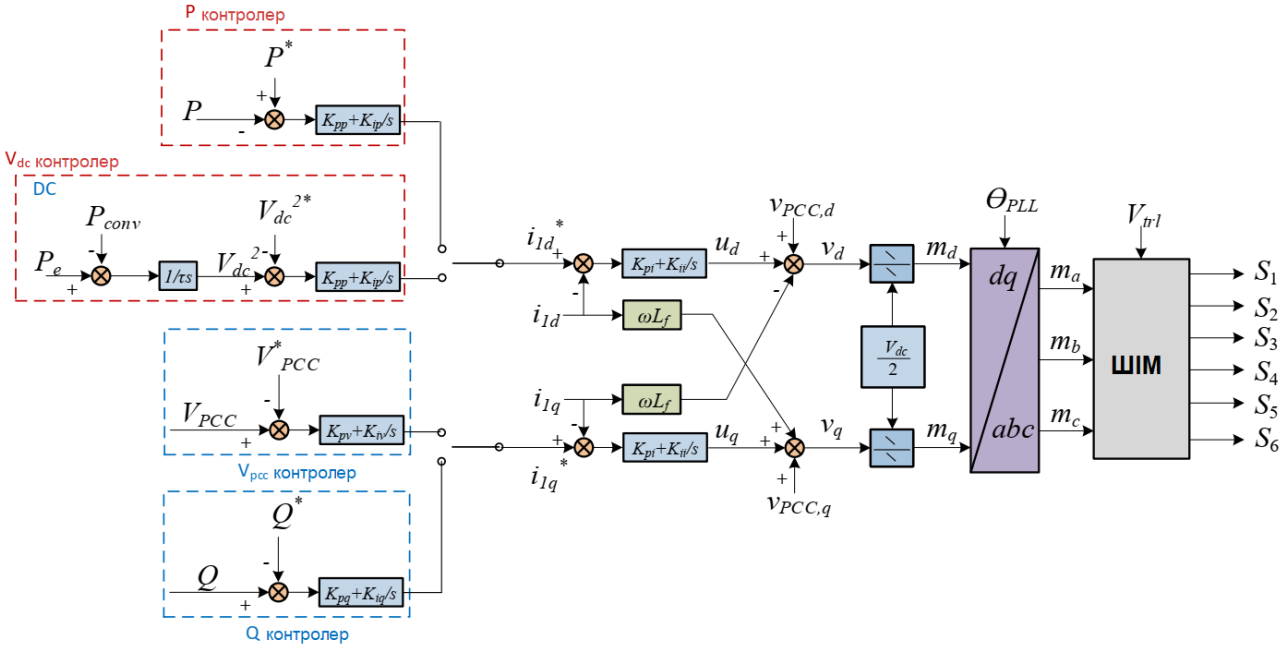


Рисунок 1.2: Контур керування МП, що слідкує за мережею.

1.2.1 Зовнішній контур керування

Як зазначено в [7], зовнішній контролер напруги кола постійного струму використовується для генерації опорного сигналу i^*_d регулювати напругу кола постійного струму і, таким чином, балансувати потік потужності в системі. Енергію в конденсаторі можна виразити як

$$\frac{C_{dc}}{2}\frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_e - P_{conv} \tag{1.1}$$

де P_e- активна потужність перед конденсатором кола постійного струму, а P - активна потужність від МП. Відповідно до уніфікації вищенаведеного рівняння ведеться до

$$\underbrace{\frac{C_{dc}V_{base,dc}^2}{2P_{base}}}_{\tau}\frac{dV_{dc}^{\mathrm{pu}2}}{dt} = P_e^{\mathrm{pu}} - P_{conv}^{\mathrm{pu}} \tag{1.2}$$

Використовуючи перетворення Парку, активна та реактивна потужності, що надходять в електромережу в системі координат dq перетворювача, представлені таким чином:

$$\begin{cases} P &= v_{\mathrm{pcc},d}^c i_{1d}^c + v_{\mathrm{pcc},q}^c i_{1q}^c \\ Q &= v_{\mathrm{pcc},q}^c i_{1d}^c - v_{\mathrm{pcc},d}^c i_{1q}^c \end{cases} \tag{1.3}$$

де індекси "*d*" і "*q*" позначають величини в системі відліку *d-q*. Реалізовано метод роз'єднаного керування віссю *dq*, де вісь *d* вирівнюється з фазою напруги PCC за допомогою фазового автопідлаштування частоти, щоб досягти незалежного керування ($v^c_{\mathrm{pcc},d} = V_{\mathrm{PCC}}, v^c_{\mathrm{PCC},q} = 0$). Потужності можна спростити як $P = V_{\mathrm{PCC}} i^c_{1d}$ і $Q = -V_{\mathrm{PCC}} i^c_{1q}$. Видно, що активну потужність можна регулюватися за допомогою осі d струм i^c_{1d}. Тим часом, з цим спрощенням (1.2) можна переписати як

$$\tau \frac{dV^{\mathrm{pu}2}_{dc}}{dt} \approx P^{\mathrm{pu}}_e - V_{\mathrm{PCC}} i^c_{1d} \tag{1.4}$$

Виявлено, що квадрат напруги кола постійного струму також можна контролювати за допомогою струму і по осі i^c_{1d}.

Подібним чином, контур керування напругою загального з'єднання або контур керування реактивною потужністю, використовуючи той самий критерій, що й для контуру керування напругою кола постійного струму, струм по осі *q* i^c_{1q} контролюється напругою загального з'єднання або реактивною потужністю.

1.2.2 Внутрішній контур керування

Динамічне рівняння ac-сторони можна виразити таким чином:

$$L_F \frac{di_{abc}}{dt} = V_{abc} - R_F i_{1,abc} - V_{pcc,abc} \tag{1.5}$$

де V_{abc} це вихідна напруга змінного струму МП.

Використовуючи перетворення Парка, (2.5) можна виразити в dq-фреймі наступним чином:

$$L_F \frac{di_{1d}}{dt} = L_F \omega(t) i_{1q} + v_d - R_F i_{1d} - v_{pcc,d} \tag{1.6}$$

$$L_F \frac{di_{1q}}{dt} = -L_F \omega(t) i_{1d} + v_q - R_F i_{1q} - v_{pcc,q} \tag{1.7}$$

Поточні рівняння в області Лапласа записуються наступним чином:

$$i_{1d}(s) = \frac{1}{L_F s + R_F} \underbrace{(L_F \omega i_{1q} + v_d - v_{pcc,d})}_{u_d(s)} \tag{1.8}$$

$$i_{1q}(s) = \frac{1}{L_F s + R_F} \underbrace{(-L_F \omega i_{1d} + v_q - v_{pcc,q})}_{u_q(s)} \tag{1.9}$$

де тиda тиqє виходами ПІ-контролерів, які призначені для відстеження поточних посилань i^*_{1d} і i^*_{1q}.

1.2.3 Контур фазового автопідстроювання

Існує кілька схем фазового автопідстроювання частоти (PLL), таких як квадратурний фазовий автопідстроювач частоти (Q-PLL), розширений фазовий автопідстроювач частоти (E-PLL), узагальнений інтегратор другого порядку (SOGI-PLL) і синхронний опорний контур з фазовим автопідстроювачем частоти (SRF-PLL).

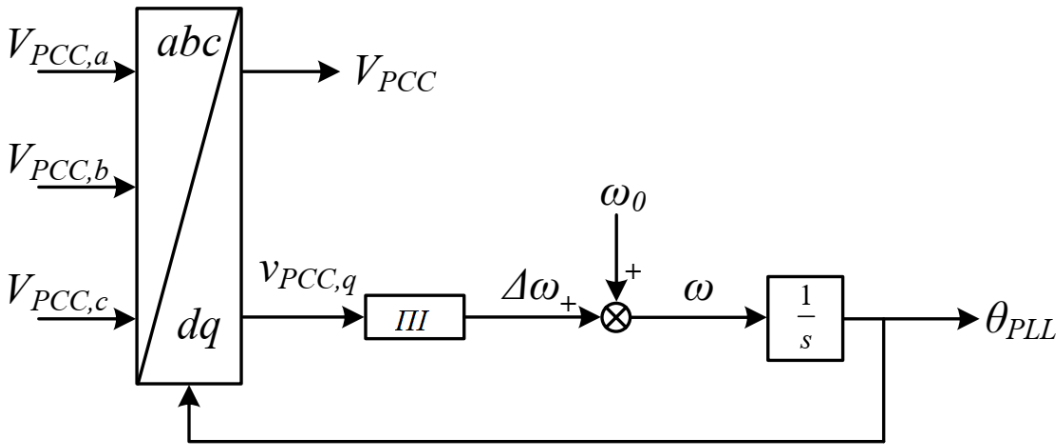


Рисунок 1.3: Блок-схема синхронного опорного контура з фазовим автопідстроювачем частоти.

На рис. 1.3 показана конфігурація фазового автопідстроювача частоти. Вихідний кут θ фазового автопідстроювання частоти, створюється контуром зворотного зв'язку, який регулює $v_{PCC,q}$ до нуля, можна отримати як

$$\begin{cases} \theta_{PLL} & = \theta_0 + \int \omega dt \\ \omega & = \omega_0 + K_p v_{PCC,q} + K_i \int v_{PCC,q} dt \end{cases} \tag{1.10}$$

де θ_0– сталий фазовий кут напруги загального з'єднання, ω_0 є основною частотою мережі, а K_p і K_i є пропорційним та інтегральним підсиленнями ПІ-

регулятора відповідно. Таким чином, просторовий вектор вхідної напруги тепер вирівнюється з напругою PCC на основі θ_{PLL}. Тобто, $v_{PCC,d} = V_{PCCi}$ і $v_{PCC,q} = 0$.

1.3 Інверторний генератор з гібридним підвищуючим перетворювачем

У системах живлення на основі змінного струму (AC), таких як великі електростанції, широко використовуваним ІГ є генератор вітрової турбіни, який виробляє змінний струм. Необхідні як випрямляч змінного/постійного струму, так і інвертори постійного/змінного струму. У системах живлення на основі постійного струму (DC), таких як мікромережі постійного струму або системи розподілу постійного струму, сонячні фотоелектричні панелі є перевагами, оскільки вони мають високу якість електроенергії, низьку вартість обслуговування та придатність для невеликих установок. Вихід від сонячної фотоелектричної енергії є постійним струмом. Потрібні інвертори постійного/змінного струму. Однією з проблем у випадку застосування високої напруги постійного струму або додатків, підключених до мережі, є низька напруга постійного струму (15-45 В) сонячної фотоелектричної системи [4], для чого, у свою чергу, потрібні підвищуючі перетворювачі постійного струму. Бажано, щоб коефіцієнт підсилення постійної напруги був високим, але практично обмеженим через вплив силових перемикачів, випрямних діодів, еквівалентного послідовного опору котушок індуктивності та конденсаторів, а також ефекти насичення індукторів і конденсаторів [1]. Дуже часто в літературі представлено, що архітектура системи живлення на основі постійного струму використовує підвищувальний перетворювач постійного струму для живлення навантажень постійного струму та каскадного підключення перетворювача джерела напруги, підключеного до мережі (ПН), для підвищення постійного струму. перетворювач для живлення навантажень змінного струму [2–4]. Цю архітектуру добре вивчили завдяки обширним дослідженням останніх років. У разі великого проникнення ІГ інтегрованих в енергомережу, окремий перетворювач з індивідуальним контролером потрібен для досягнення

перетворення DC/DC та DC/AC. Це значною мірою збільшує втрати потужності, ускладнює систему та знижує надійність усієї енергосистеми.

Таким чином, інтерес до нової архітектури системи живлення на основі постійного струму, яка спрямована на зведення процесу перетворення до мінімуму, швидко зростає. Деякі дослідники запропонували гібридний підвищуючий перетворювач (ГПП) [5–8]. Термін «ГПП» означає, що перетворювач має здатність забезпечувати двонаправлений потік потужності між навантаженнями змінного та постійного струму одночасно з наявністю джерела живлення постійного струму. ГПП має просту архітектуру, що скорочує непотрібні процеси перетворення DC в DC і DC/AC порівняно зі звичайною архітектурою.

1.4 Висновок до розділу

У цьому розділі представлено докладні характеристики генераторів на основі інверторів в електричних мережах. Для полегшення планування та аналізу системи представлені сучасні припущення моделювання генераторів на основі інверторів. Крім того, представлена структура векторного каскадного управління перетворювачем напруги з джерелом живлення при інтеграції в енергосистему.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Моделювання та аналіз ІГ у слабкій та серійній компенсації мережі

Представлено моделювання та аналіз стабільності типу 4 вітру в мережах з послідовною компенсацією з урахуванням слабкої мережі. Стверджується, що вітер типу 4 захищений від субсинхронних резонансів (ССР), яких відчуває вітер типу 3 із радіальним підключенням до послідовно компенсованих ліній. Сильні припущення мережі зазвичай робляться в системах дослідження. Але коли мережа слабка, моделі ВЕС для дослідження динаміки енергосистеми, наприклад, модель WECC, можуть призвести до неточного аналізу стабільності. Таким чином, у цій главі буде розроблено динамічну модель, придатну для аналізу стабільності вітрових електростанцій типу 4 зі слабким мережевим зв’язком, і вивчено це твердження за допомогою спрощеної аналітичної побудови моделі, аналізу на основі лінеаризованих моделей і валідації проти електромагнітних перехідних процесів (ЕПП) з повним тестуванням. деталі.

Як вказується в [9], при дослідженні динаміки енергосистеми можна знехтувати динамікою машини ВТГ типу 4 та динамікою перетворювача на стороні машини (ПСМ). Іншими словами, в динаміці мережі домінують функції керування мережевим перетворювачем (МП). Таким чином, дві аналітичні моделі ВЕС типу 4 з радіальним підключенням до послідовної компенсованої лінії побудовані в dq-координатах з включеним МП керуванням. МП представлений середньою моделлю. Тобто деталі перемикання МП ігноруються, а перетворювач розглядається як джерело напруги dq-координатах. Основна відмінність між двома моделями полягає в режимі керування МП, причому одна модель передбачає реальне керування потужністю, а інша передбачає керування напругою кола постійного струму. Спираючись на аналітичні моделі, продемонстровано ефективний підхід до отримання моделей імпедансу в частотній області. За допомогою процедур ініціалізації для знаходження точок рівноваги розроблені аналітичні моделі можна потім лінеаризувати за певних робочих умов, а аналіз малих сигналів

буде здійснюватися за допомогою аналізу власних значень і аналіз на основі моделі імпедансу в частотній області. Продемонстровано потенційний ризик стабільності та досліджено фактори, що викликають ризик стабільності. Результати аналізу малого сигналу будуть перевірені на двох тестових стендах ЕПП з повною інформацією в MATLAB/Simscape та PSCAD/EMTDC відповідно.

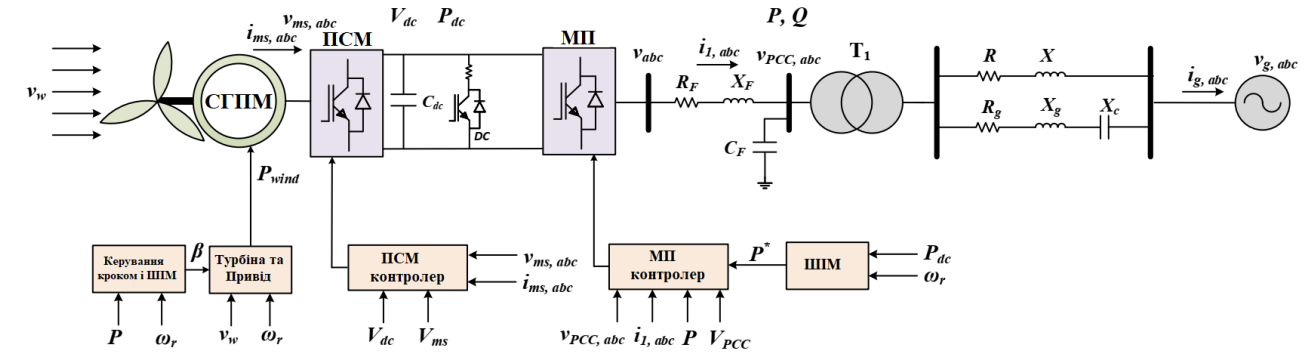
2.2 Модель вітрогенератора типу 4 в мережах із послідовною компенсацією

Перший випробувальний стенд – це система інтеграції вітряної електромережі потужністю 5 МВт типу 4 у PSCAD/EMTDC. Принципова схема випробувального стенду 1 показана на рис. 2.1 а. Ця вітряна турбіна типу 4 складається з синхронного генератора з постійними магнітами (СГПМ) для перетворення механічної енергії в електричну енергію та зворотних перетворювачів джерела напруги для перетворення змінної частоти змінного струму в змінний струм 50 Гц. Цей тестовий стенд розроблено на основі демонстраційної системи в PSCAD/EMTDC, де перетворювач на стороні машини (ПСМ) реалізує відстеження точки максимальної потужності (MPPT), а МП передбачає керування напругою кола постійного струму. Випробувальний стенд налаштований таким чином, щоб МП реалізовував керування MPPT, щоб зовнішнє керування МП було в режимі реального керування потужністю. ПСМ налаштований на контроль напруги кола постійного струму. Між двома перетворювачами використовується переривник постійного струму, щоб уникнути перенапруги на конденсаторі кола постійного струму.

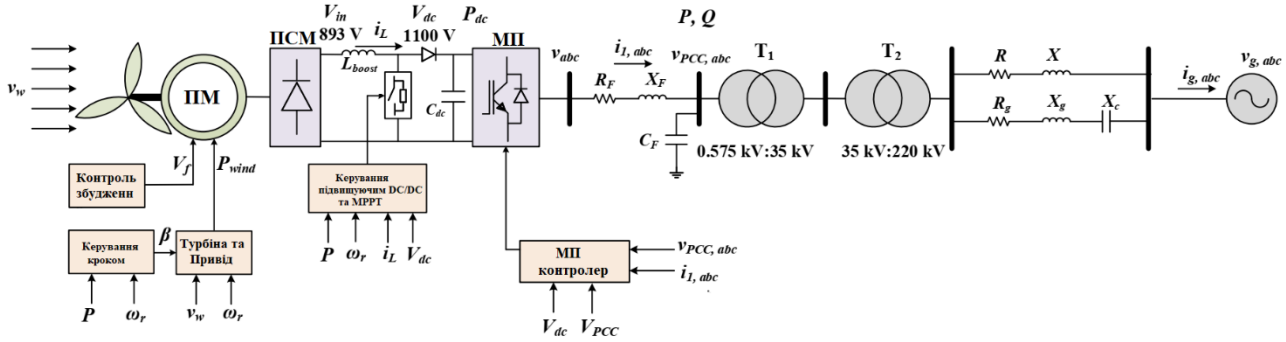
Другий тестовий стенд - це середня модель, яка розроблена на основі демонстраційної системи в MATLAB/Simscape. На рис. 2.1 б показано випробувальний стенд інтеграції вітрової електромережі потужністю 100 МВт типу 4 із мережевим перетворювачем у режимі керування напругою кола постійного струму. Електроенергія, вироблена синхронним генератором СГ, випрямляється в електрику постійного струму через діодний мостовий випрямляч. Потім електрика постійного струму проходить через

підвищувальний перетворювач постійного струму для досягнення напруги постійного струму на іншому рівні напруги. MPPT реалізовано в підвищувальному перетворювачі постійного струму. Значення вказано в відносних одиницях (в.о), якщо не вказано.

Дві аналітичні моделі створено для відображення двох тестових стендів. В аналітичних моделях представлення вітряної турбіни спрощено, включаючи лише керування МП. Для МП з режимом керування напругою кола постійного струму також включено динаміку конденсатора кола постійного струму. Деталі моделювання аналітичної моделі зі слабкою сіткою детально описано в. Для цього дослідження динаміка мережі тепер включає динаміку LC-резонансу.



(а)



(б)

Рисунок 2.1: Випробувальні моделі ЕПП для вітрогенератора типу 4 в мережах з послідовною компенсацією.

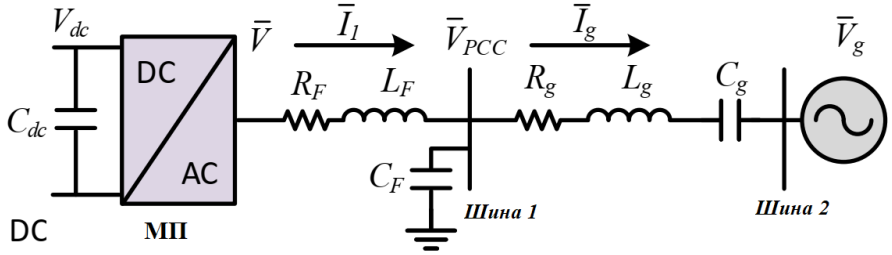
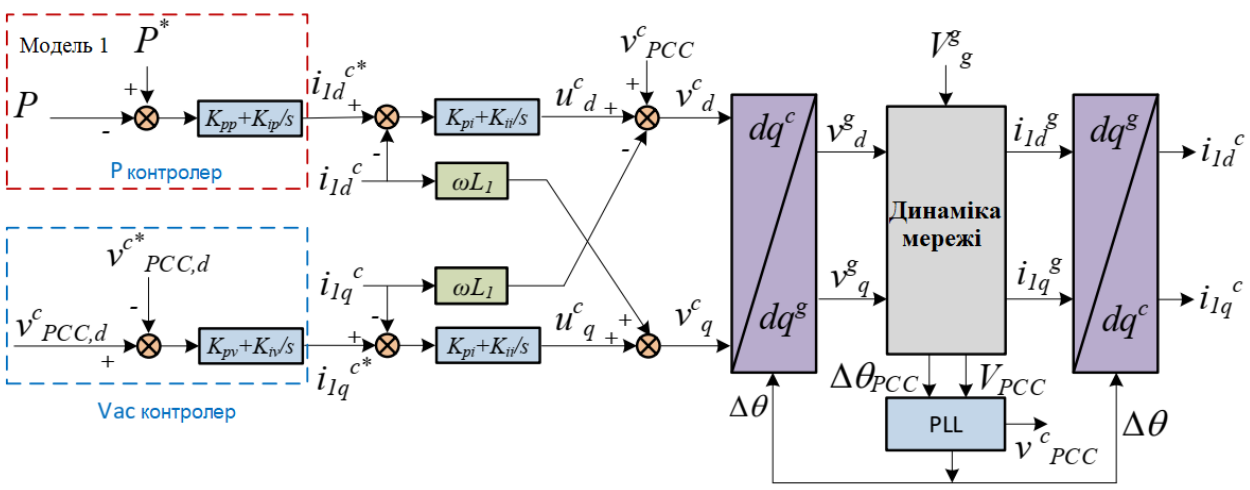


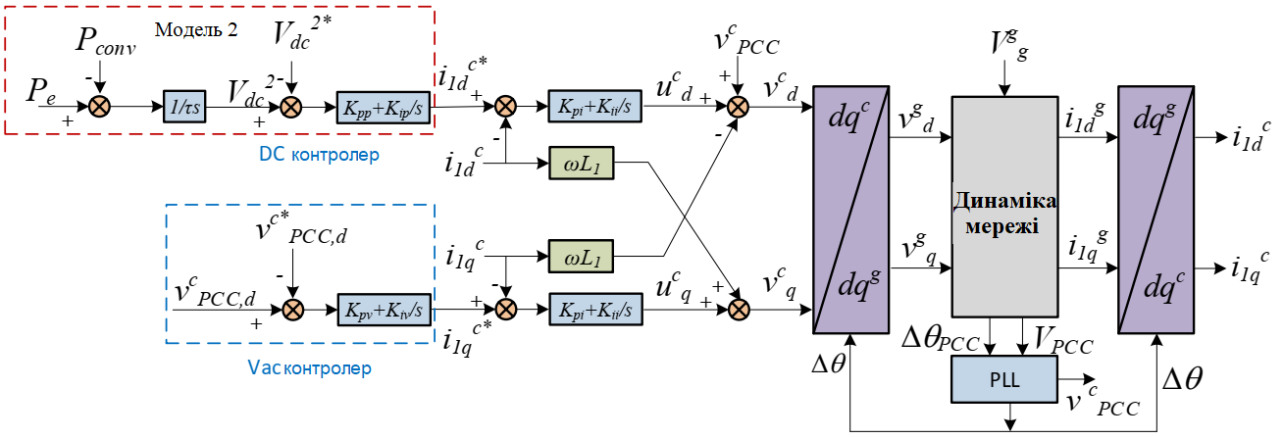
Рисунок 2.2 - Вітряна електростанція типу 4 з радіальним підключенням до мережі із послідовною компенсацією.

На рис. 2.2 представлена схеми вітряної електростанції ВЕС типу 4 з радіальним підключенням до лінії із послідовною компенсацією. Аналітичні моделі представлені на рис. 2.3, щоб представити досліджувану систему із зовнішніми контурами керування МП, внутрішніми контурами керування струмом, фазовим автопідлаштуванням частоти (PLL). МП представлений усередненою моделлю і розглядається як джерело напруги dq-координатах. Зовнішній і внутрішній контури керування використовують пропорційно-інтегральні (ПІ) контролери та моделюються в системі відліку dq перетворювача, яка позначається верхнім індексом c. Враховуючи, що фазове автопідлаштування частоти використовується, щоб гарантувати, що вісь d системи координат dq вирівнюється з вектором напруги v_{PCC}, передбачається, що $v^c_{PCC,d} = V_{PCC} = V_{PLL}$, $v^c_{PCC,q} = 0$.. Динаміка мережі моделюється в системі відліку dq. Отже, у стаціонарному стані всі змінні стану постійні. Завдяки цій функції лінійні моделі можна отримати за допомогою чисельних збурень.

Модель 1 МП знаходиться в режимі керування потужністю. Порядок потужності вважається відомим параметром. У моделі 2 МП знаходиться в режимі керування напругою кола постійного струму. Моделювання зовнішнього та внутрішнього контурів керування зворотнім зв'язком детально описано в розділі 1. PLL, динаміка мережі та ініціалізація системи для запропонованих аналітичних моделей будуть наведені нижче.



(а)



(б)

Рисунок 2.3 - Аналітична модель 1 із МП у режимі керування потужністю та аналітична модель 2 із МП у режимі керування напругою кола постійного струму.

2.2.1 Контур із фазовим автопідстроюванням

Як показано на рис. 2.3 dq-система в аналітичній моделі включають dq-систему перетворювача (позначена надрядковим індексом 'c') і dq-систему мережі (позначена надрядковим індексом 'g'). Найважливішим етапом системного моделювання є перетворення від системи координат dq до мережевої системи координат dq. На рис. 2.4 зображено просторово-векторну діаграму напруги PCC і просторову діаграму зв'язку між обома системами відліку. Кутова частота напруги PCC становить ω на відміну від номінальної частоти мережі ω0. Враховуючи, що PLL точно відстежує кут напруги PCC (θ_{PCC}), щоб синхронізувати напругу перетворювача з напругою мережі в усталеному стані, таким чином у стаціонарному стані $\omega = \omega_0$ і фазовий зсув θ_{PCC} між просторовим вектором напруги PCC і опорною віссю d координатної мережі можна вважати такою ж, як кутова різниця між обома dq-кадрами. Тобто $\theta_{PCC} = \theta$.

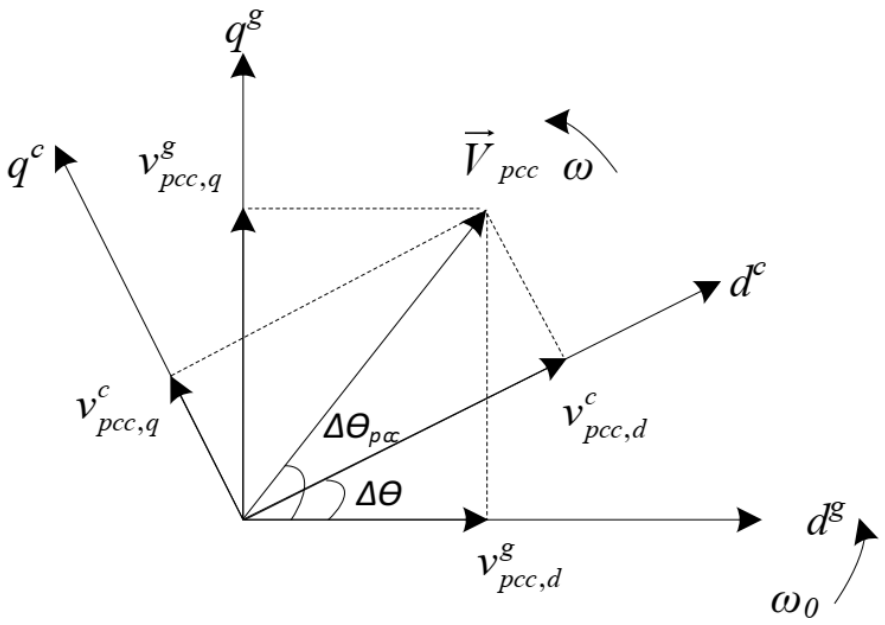


Рисунок 2.4 - Просторові зв'язки між мережею та системою відліку dq перетворювача.

Відношення між просторовими векторами напруги в системі відліку dq перетворювача та системі відліку dq мережі показано таким чином:

$$\left(v^g_{pcc,d} + jv^g_{pcc,q}\right) e^{j\omega_0 t} = \vec{v}_{pcc,abc} = \left(v^c_{pcc,d} + jv^c_{pcc,q}\right) e^{j\theta} \tag{2.1}$$

Реорганізувавши вище рівняння, можна отримати наступне рівняння обох перетворень dq-координатах:

$$v^g_{pcc,d} + jv^g_{pcc,q} = \left(v^c_{pcc,d} + jv^c_{pcc,q}\right) e^{j\Delta\theta} \tag{2.2}$$

де $\Delta\theta = \theta - \omega_0 t$.

Передбачається проста структура фазового автопідлаштування частоти (PLL) другого порядку. Структура PLL показана на рис.2.5. Величина напруги V_{PCC} та $\Delta\theta_{PCC}$ таким чином можна отримати

$$\begin{cases} V_{\mathrm{PCC}} & = \sqrt{v^{g^2}_{\mathrm{PCC},d} + v^{g^2}_{\mathrm{PCC},q}} \\ \Delta\theta_{\mathrm{PCC}} & = \tan^{-1}\left(\frac{v^g_{\mathrm{PCC},q}}{v^g_{\mathrm{PCC},d}}\right) \end{cases} \tag{2.3}$$

V_{PCC} та $\Delta\theta_{PCC}$ подаються в PLL для генерації V_{PLL}та $\Delta\theta$. Компоненти $dq\vec{v}_{PCCc}$в перетворювачі dq-система відліку виводяться наступним чином:

$$\begin{cases} v^c_{\mathrm{PCC},d} &= V_{\mathrm{PCC}} \cos\left(\Delta\theta_{\mathrm{PCC}} - \Delta\theta\right) \\ v^c_{\mathrm{PCC},q} &= V_{\mathrm{PCC}} \sin\left(\Delta\theta_{\mathrm{PCC}} - \Delta\theta\right) \end{cases} \tag{2.4}$$

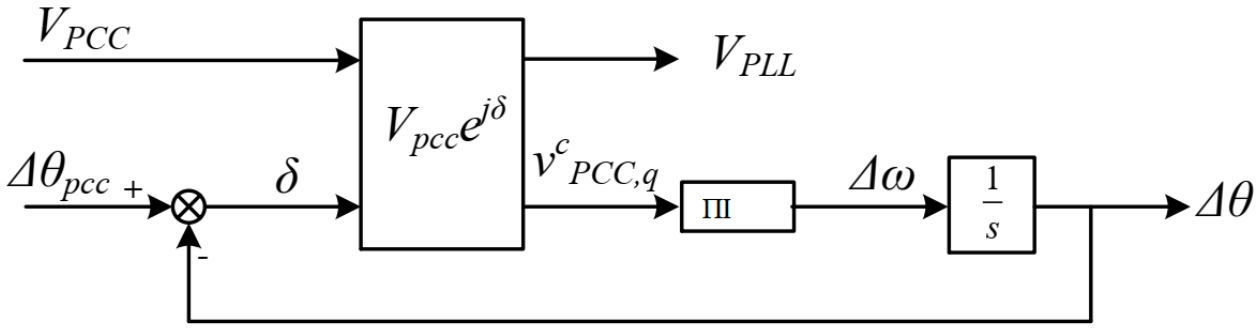


Рисунок 2.5 - Блок-схема простого фазового автопідлаштування частоти другого порядку.

Прийнято $\Delta\theta = \Delta\theta_{PCC}$ у стаціонарному стані ми маємо $v_{PCCc,d} = V_{PCC} = V_{PLL}$ і $v_{PCCc,q} = 0$. $v_{PCCc,q}$ є входом ПІ-регулятора для генерування девіації частоти $\Delta\omega$. Потім вихідний кут PLL $\Delta\theta$ отримується шляхом інтегрування $\Delta\omega$.

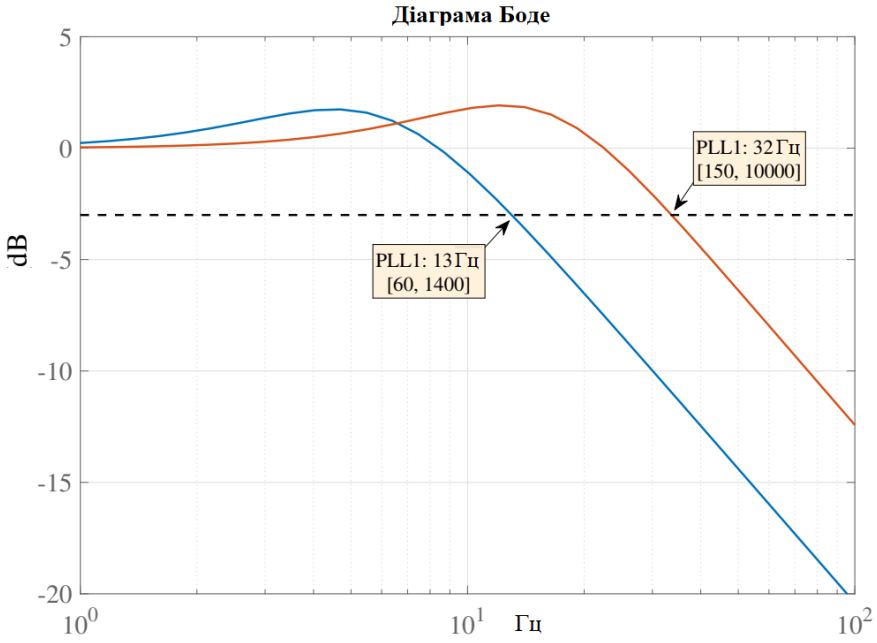


Рисунок 2.6 - PLL 1 і PLL 2 з різною пропускною здатністю.

Досліджено вплив параметрів PLL на стабільність. Розглядаються два набори параметрів. PLL 1 має пропорційні та інтегральні підсилення як (60, 1400). PLL 2 має пропорційні та інтегральні підсилення як (150, 10000). Два

PLL мають смугу пропускання 13 Гц і 32 Гц відповідно. Їх замкнуті функції передачі від вхідного кута до вихідного кута нанесені на графік і показані на рис. 2.6.

2.2.2 Моделювання динаміки мережі в координатній системі відліку

Динаміка мережі моделюється в координатній системі відліку мережі dq, яка обертається з номінальною швидкістю ω_0. Блок динаміки мережі має напругу перетворювача та напругу мережі як вхідний або відомий параметр. Як напруга перетворювача, так і напруга мережі вважаються трифазними збалансованими.

У стаціонарному стані, усі їхні змінні dq-системи приймають постійні значення. Змінні стану блоку динаміки мережі включають напругу послідовного конденсатора, шунт напруга конденсатора, струм мережі та вихідний струм перетворювача, все в системі координат dq. Всього, там вісім змінних стану.

Динаміка мережі в dq-системі координат мережі може бути отримана з просторового вектора abc-системи диференціальних рівняння. Диференціальні рівняння dq-системи виражаються таким чином:

$$\begin{cases} \frac{di_{1d}^g}{dt} & = \frac{1}{L_F}(v_d^g - v_{PCC,d}^g - R_F i_{1d}^g + L_F \omega_0 i_{1q}^g) \\ \frac{di_{1q}^g}{dt} & = \frac{1}{L_F}(v_q^g - v_{PCC,q}^g - R_F i_{1q}^g - L_F \omega_0 i_{1d}^g) \\ \frac{di_{g,d}^g}{dt} & = \frac{1}{L_g}(v_{PCC,d}^g - v_{c,d}^g - v_{g,d}^g - R_g i_{g,d}^g + L_g \omega_0 i_{g,q}^g) \\ \frac{di_{g,q}^g}{dt} & = \frac{1}{L_g}(v_{PCC,q}^g - v_{c,q}^g - v_{g,q}^g - R_g i_{g,q}^g - L_g \omega_0 i_{g,d}^g) \\ \frac{dv_{PCC,d}^g}{dt} & = \frac{1}{C_F}(i_{1d}^g - i_{g,d}^g + C_F \omega_0 v_{PCC,q}^g) \\ \frac{dv_{PCC,q}^g}{dt} & = \frac{1}{C_F}(i_{1q}^g - i_{g,q}^g - C_F \omega_0 v_{PCC,d}^g) \\ \frac{dv_{c,d}^g}{dt} & = \frac{1}{C_g}(i_{g,d}^g + C_g \omega_0 v_{c,q}^g) \\ \frac{dv_{c,q}^g}{dt} & = \frac{1}{C_g}(i_{g,q}^g - C_g \omega_0 v_{c,d}^g) \end{cases}$$

Для проведення аналізу власних значень необхідна ініціалізація для обчислення стаціонарного стану, початкові значення змінних стану [14]. Метод

Ньютона-Рафсона (НР) використовується тут для визначення певної умови роботи.

У цьому дослідженні аналітична модель являє собою динамічну систему чотирнадцятого порядку з чотирнадцятьма змінними стану, що включає вісім змінних стану, пов'язаних з динамікою мережі, дві змінні стану, пов’язані з PLL ($\Delta\omega$, $\Delta\theta$), дві змінні стану, пов’язані із зовнішніми контурами керування, і дві змінні стану, пов’язані з внутрішніми контурами керування струмом (u_d, u_q), які слід ініціалізувати.

Згідно з рис. 2.2, вузлова матриця допусків Y формується наступним чином

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

де

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = \begin{cases} Z_g^{-1} & i = j \\ -Z_g^{-1} & i \neq j \end{cases} \tag{2.6}$$

Для незалежного регулювання струму по осі q у практичному підході до моделювання використовується або режим керування реактивною потужністю, або режим керування напругою PCC.

Якщо аналітична модель приймає режим керування реактивною потужністю, просторовий вектор напруги шини 2 (мережа) закріплені на $V_2=1<0^0$. Тим часом початкові припущення величини напруги та кута шини 1 (шина PCC) вибираються як $V1^{(0)}= 1$ та $\theta1^{(0)}= 0^\circ$ відповідно, які оновлюються на кожній ітерації k.

Чиста реальна та реактивна потужність інжекції на шині PCC записуються у вигляді рівнянь (2.7) і

$$P^{c(k)} = \sum_{j=1}^{2} V_1 V_j \left[G_{1j} \cos(\theta_1 - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_1 - \theta_j) \right] \tag{2.7}$$

$$Q^{c(k)} = \sum_{j=1}^{2} V_1 V_j \left[G_{1j} \sin\left(\theta_1 - \theta_j\right) - B_{1j} \cos\left(\theta_1 - \theta_j\right) \right] \tag{2.8}$$

де V_j величина напруги шини j і θ_j кут напруги шини j. Розрахунок потужностей потім порівнюється із запланованими значеннями, щоб отримати невідповідність:

$$\Delta^{(k)} = \begin{bmatrix} P^{c(k)} - P^{sch} & Q^{c(k)} - Q^{sch} \end{bmatrix}^T \tag{2.9}$$

де P^{sch} і Q^{sch} є плановою реальною та реактивною потужністю на шині 1 відповідно. Верхній індекс T означає транспонування матриці. Ітераційну схему методу НР можна представити у вигляді

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - J^{-1} \cdot \Delta^{(k)} \tag{2.10}$$

де

$$x = \begin{bmatrix} V_1 & \theta_1 \end{bmatrix}^T \tag{2.11}$$

і J — матриця Якобі, частинних похідних (2.7) і (2.8) по x, як показано в (2.12). Елементи матриці Якобі потрібно обчислювати на кожній ітерації.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P^c}{\partial V_1} & \frac{\partial P^c}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial Q^c}{\partial V_1} & \frac{\partial Q^c}{\partial \theta_1} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Повторення (2.10), буде доки допуск невідповідності потужностей у (2.9) не стане меншим за 0,00001. Після того, як допуск досягне збіжності, фази напруги $V_{PCC}= V_1<\theta_1$ можна отримати. Потім можна знайти поточний вектор лінії передачі, шунтуючого фільтра та RL-фільтра відповідно.

$$\bar{I}_g = \frac{\bar{V}_{pcc} - \bar{V}_g}{Z_g} \tag{2.13}$$

$$\bar{I}_F = \bar{V}_{pcc} \times j\omega C_F \tag{2.14}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_g + \bar{I}_F \tag{2.15}$$

Отже, вихідна напруга перетворювача та напруга на послідовному конденсаторі можуть бути розраховані як

$$\bar{V} = \bar{V}_{pcc} + (R_F + j\omega_0 L_F)\bar{I}_1 \tag{2.16}$$

$$\bar{V}_C = \bar{I}_g \times (-jX_{C_g}) \tag{2.17}$$

Як показано на рис. 2.5, початковому значенню Δθ присвоюється значення від кута напруги PCC θ_1. Початкове значення Δω вважається нульовим. Застосування перетворення систему abc до мережі dq, вісім компонентів напруги (v_{dg}, v_{qg}, $v_{PCCg,d}$, $v_{PCCg,q}$, $v_{c,dg}$, $v_{c,qg}$і $v_{g,\ dg}$, $v_{g,qg}$) і чотири компоненти струму (i^g_{1d}, g^g_{1q} і $g^g_{g,d}$, $g^g_{g,q}$) отримують. З початковим значенням Δθ можна виконати перетворення мережі в кадр перетворювача, використовуючи рівняння (2.2), щоб знайти v_{dc}, v_{qc}, $v_{PCCc,d}$, $v_{PCCc,q}$, v_{CDC}, $v_{c,qc}$, $v_{g,\ dc}$, $v_{g,qc}$, i^g_{1d}, g^g_{1q} і $g^g_{g,d}$, $g^g_{g,q}$). Розглядаючи $v_{PCCc,d}= V_{PLL}$і $v_{PCCc,q}= 0$ у сталому стані початкові значення u_d а u_q (виходи ПІ-регуляторів контуру струму) можна обчислити наступним чином:

$$\begin{cases} u_d &= L\omega i_q^c + v_{1d}^c - V_{\mathrm{PLL}} \\ u_q &= -L\omega i_d^c + v_{1q}^c \end{cases} \tag{2.18}$$

Якщо аналітична модель приймає режим керування напругою PCC, просторовий вектор напруги шини 2 і величина напруги шини 1 задана як $\bar{V}_2 = 1\angle 0°$ і $V_1= 1$ відповідно. Кут напруги θ_1 шини 1 легко обчислюється за допомогою рівняння реальної потужності $\bar{}$і в (2.7). Потім поточний просторовий вектор обчислюється за допомогою (2.13), (2.14) і (2.15). Інші вихідні параметри отримують так само/

Після визначення робочих умов за допомогою ініціалізації, у наступних розділах буде досліджено стабільність системи зі змінним рівнем компенсації серії.

2.3 Аналіз моделі 1 з мережевим перетворювачем

Аналітична модель (модель 1) з мережевим перетворювачем. Моделі керування активною потужністю показана на рис. 2.3 а. Передбачається, що система працює та надсилає 1 в.о. енергії вітру в мережу (P = 1) і напруга точки загального звязку знаходиться на номінальному рівні (V_{PCC}= 1 в.о.). Міцність мережі без послідовної компенсації вважається слабкою (X_g= 1 в.о.). Аналітичну модель лінеаризують за різних умов роботи, щоб отримати лінійні моделі, і слідує аналіз малих сигналів. Валідація здійснюється за допомогою тестового стенда PSCAD/EMTDC з повною динамікою.

Рівень послідовної компенсації (пк) коливається від 10% до 75% із кроком 2,5%. Власні значення нанесені та представлені на рис. 2.7. Рис. 2.7а і 2.7б демонструють вплив PLL 1 і PLL 2 на стабільність системи відповідно. Рис. 2.7в і рис. 2.7г є збільшенням графіків, що фокусуються на підсинхронному діапазоні.

Встановлено, що послідовна компенсація значно впливає на три режими з частотою менше 100 Гц. Виявлено, що коли PLL має низьку смугу пропускання, домінуючим режимом є режим 3 Гц. Зі збільшенням послідовної компенсації цей режим переміщується до лівої півплощини (LHP), і система стає більш стабільною. З іншого боку, коли PLL має вищу смугу пропускання, домінуючим режимом є режим 15 Гц. Зі збільшенням послідовної компенсації цей режим переміщується до правої півплощини (RHP), і система стає менш стабільною. Якщо послідовна компенсація становить 27,5% або більше, система втрачає стабільність.

У моделі 1 є чотирнадцять власних значень. Коефіцієнти потужності (КП) обчислюються для кожного власного значення, щоб визначити найбільш впливові стани. Власні значення коливань $\lambda=\alpha+j\beta$ за граничних умов використовуються для визначення частоти коливань, а також коефіцієнта демпфування. Частота коливань визначається як $f=\beta/2\pi$ і коефіцієнт демпфування $\zeta=-\alpha/\ \alpha 2+\ \beta 2$. Видно, що існує дві моди $\lambda_{1,2}$, $\lambda_{4,5}$ вище 100 Гц, розташованих у лівій півплощині (LHP) далеко від уявної осі. Аналіз КУ

показує, що два режими пов’язані з шунтуючим конденсатором та індуктивністю лінії передачі.

КУ обчислюються для трьох режимів: режим $\lambda_{6,7}$ в межах 60~65 Гц, режим $\lambda_{8,9}$ в межах 8~20 Гц, а режим $\lambda_{11,12}$ приблизно 3~5 Гц.

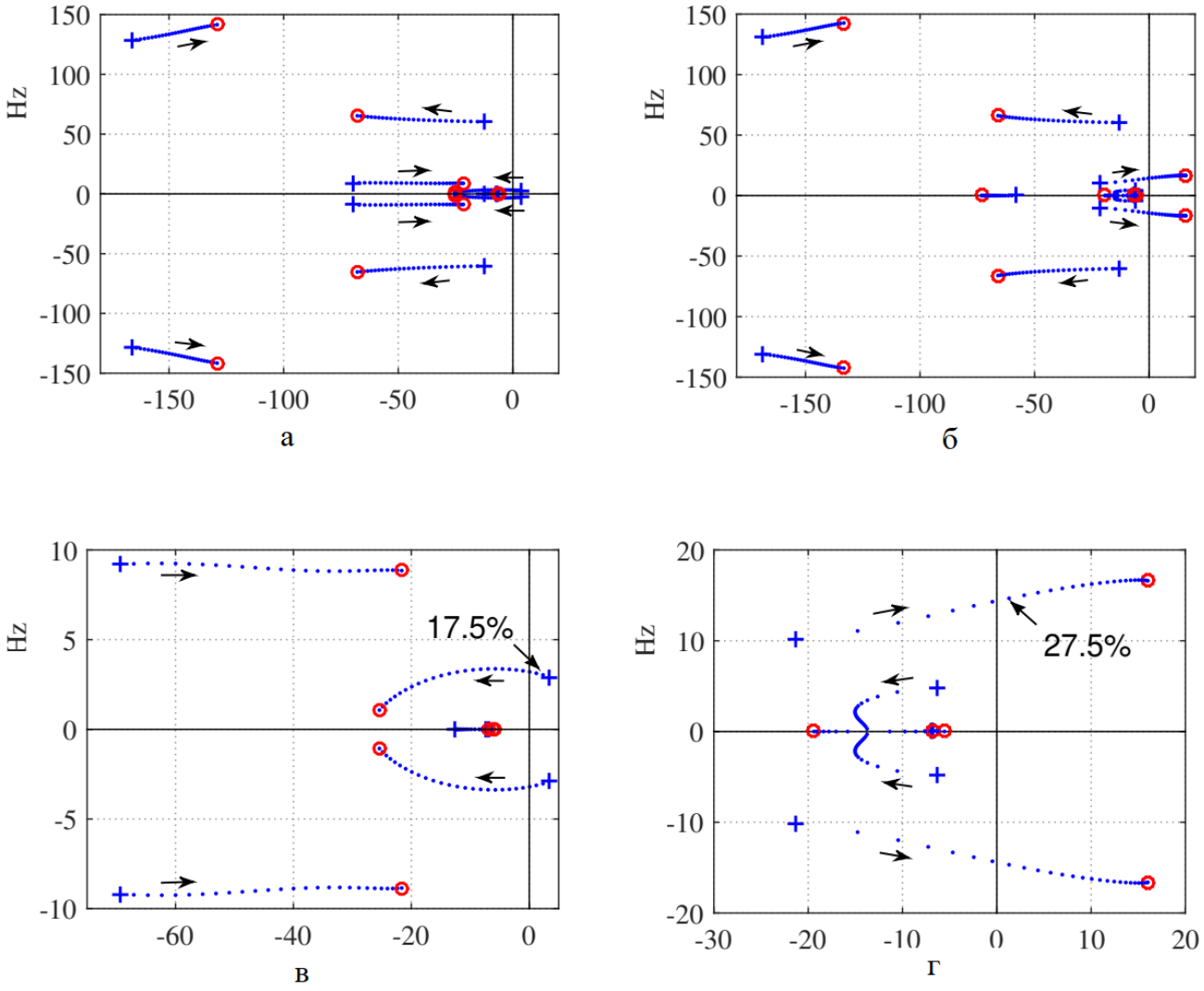


Рисунок 2.7: Параметри власних значень для моделі 1, де мережевий преретворювач перебуває в режимі керування потужністю з PLL 1 і PLL 2.

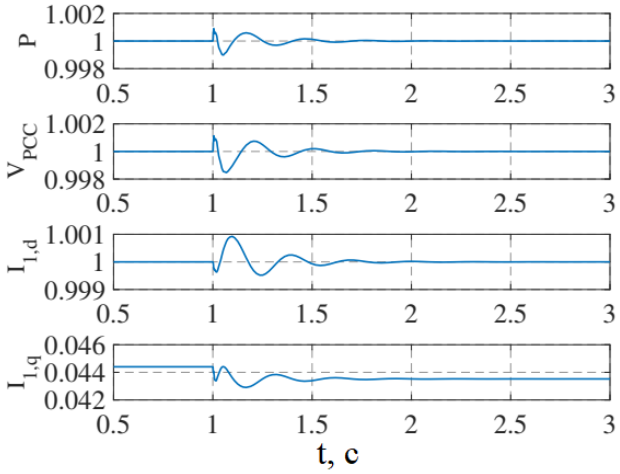
Показано, що $\lambda_{6,7}$ і $\lambda_{8,9}$ пов'язані з динамікою кола послідовного кола RLC. 60~ 65 Гц режим $\lambda_{6,7}$ переходить до розташуванння у лівій півплощині зі збільшенням рівня послідовної компенсації, тоді як 8~20 Гц режим $\lambda_{8,9}$ переходить до правої півплощини.

У підсинхронному діапазоні частот дві моди коливань $\lambda_{11,12}$ і $\lambda_{8,9}$ на які істотно впливає рівень компенсації та PLL. Нижня частотна мода $\lambda_{11,12}$ має тенденцію до переміщення вліво, тоді як більш висока частота моди $\lambda_{8,9}$ має

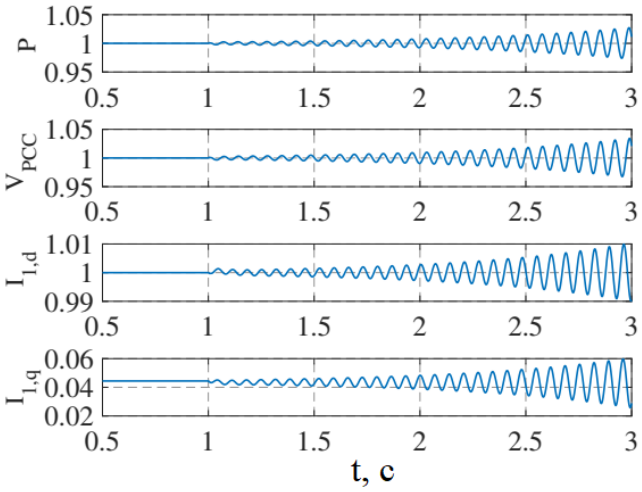
тенденцію рухатися вправо. Для повільнішого фазового автопідлаштування частоти із нижчою смугою пропускання (PLL 1) режим низької частоти на 3 Гц є домінуючим режимом, і цей режим переходить до лівої півплощини зі збільшенням послідовної компенсації. Отже, збільшення послідовної компенсації не створює ризику стабільності.

Для швидшого PLL з більшою пропускною здатністю (PLL 2), 8~ 20 Гц створює потенційні проблеми зі стабільністю. Коли послідовна компенсація збільшується, цей режим рухається до RHP. Більш висока смуга пропускання PLL змушує цей режим рухатися далі до RHP.

Результати моделювання в часовій області з використанням моделі 1 представлені на рис. 2.8. Система спочатку працює з паралельними лініями передачі (один контур RL і один контур RLC). Передбачено рівень компенсації 27,5%. При t = 1 с відключається коло RL. Для PLL 1, як показано на рис. 2.8 а, система є стабільною. Для PLL 2, як показано на рис. 2.8 б, система нестабільна. Результати підтверджуються аналізом власних значень.



а



б

Рисунок 2.8 - Динамічна відповідь моделі 1 після події відключення лінії через 1 секунду у відносних одиницях.

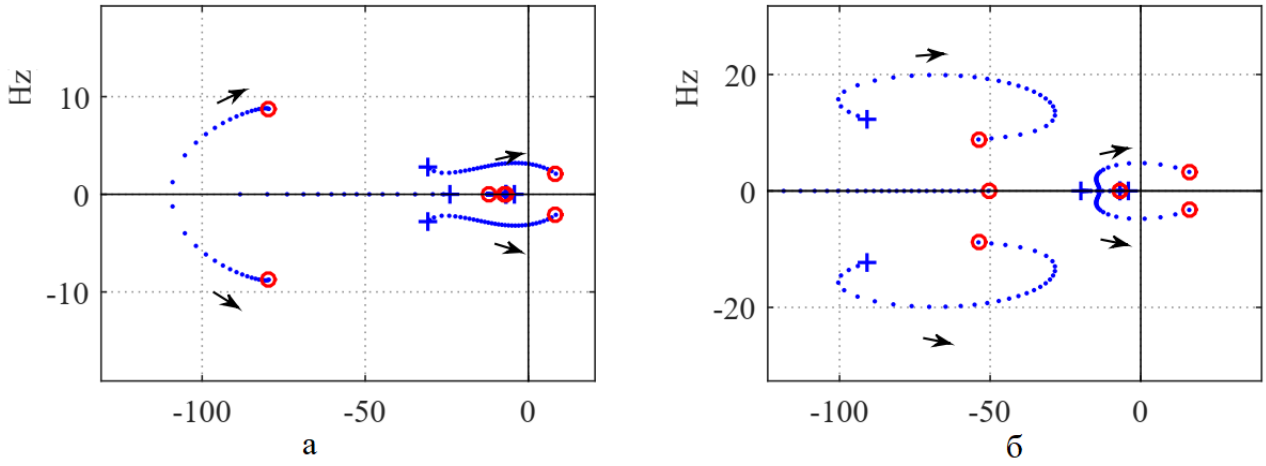


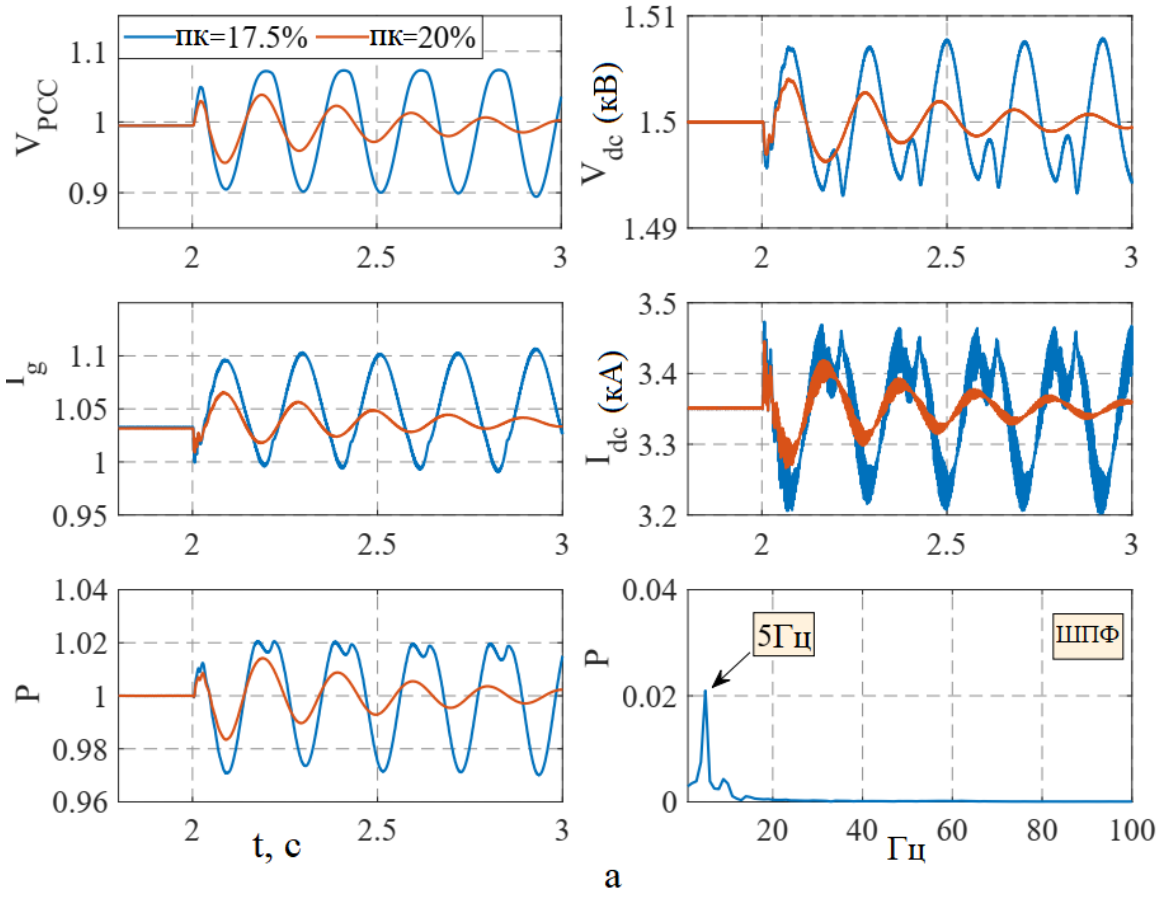
Рисунок 2.9 - Параметри власних значень моделі 1 зі зниженою міцністю мережі для некомпенсованої лінії електропередачі.

Для порівняння ми представляємо локуси власних значень на рис. 2.9, коли компенсація серії відсутня. Рис. 2.9 a зображено з PLL 1, а рис. 2.9 b – з PLL 2. X_g варіюється від 0,2 в.о. до 1 в.о. з розміром кроку 2,5%, щоб відобразити зменшення міцності мережі. Можна побачити два режими в частотному діапазоні 2~20 Гц перемістіть праворуч із зменшенням сили мережі. Ці два режими можна класифікувати як режими, пов'язані зі слабкими мережами. Підвищення рівня компенсації схоже на посилення мережі. Таким чином, розумно, що режим низької частоти 2-5 Гц переміщається вліво для підвищення рівня компенсації. З іншого боку, завдяки взаємодії режиму RLC на

частоті близько 60 Гц, режим в діапазоні 8~20 Гц переміститься вправо для підвищення рівня компенсації.

2.3.1 Перевірка тестового стенда на електромагнітні перехідні процеси

Нарешті, надається перевірка випробувальної системи ЕПП. У випробувальному стенді 1, показаному на рис. 2.1 а, вітрова електростанція типу 4 підключена до електромережі через дві паралельні лінії електропередачі (одну некомпенсовану лінію та одну послідовну компенсовану лінію). Некомпенсована лінія вимикається через несправність. Згодом вітроелектростанція радіально підключається до лінії з послідовною компенсацією.



а

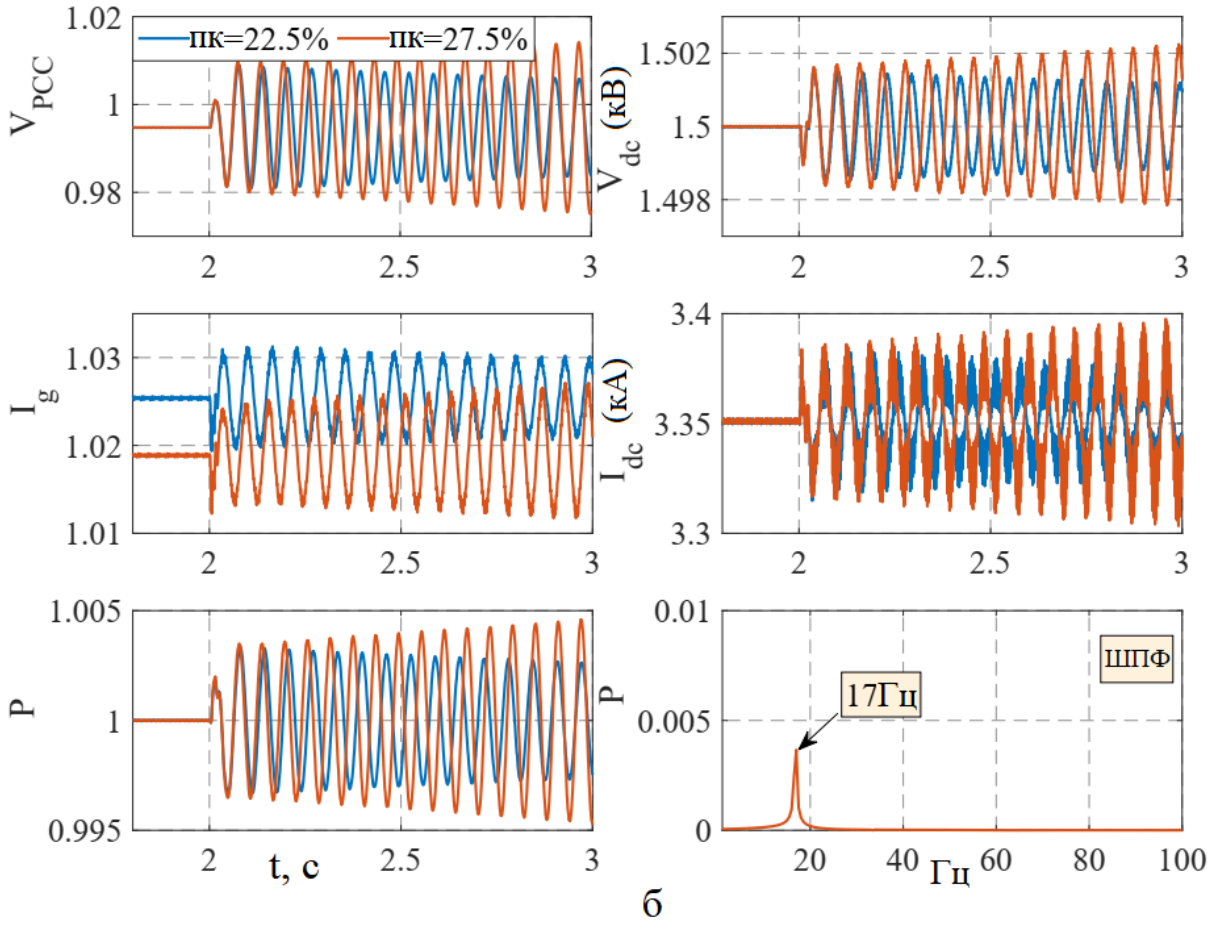


Рисунок 2.10: Динамічні показники двох різних рівнів компенсації під керуванням P контролера у PSCAD.

Динаміка напруги PCC, струму лінії передачі, реального експорту електроенергії від вітру, напруги кола постійного струму, бічного струму постійного струму та швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) експорту вітрової енергії P показано на рис2.10. PLL 1 і PLL 2 використовуються на рис. 2.10 а і рис. 2.10 б відповідно. При t = 2 с відбувається відключення кола RL. Система страждає від коливань 5 Гц, якщо застосовується PLL 1. Підвищення рівня компенсації призводить до підвищення стабільності. З іншого боку, система буде страждати від коливань 17 Гц з PLL 2 на місці. Крім того, ці коливання будуть більш серйозними, якщо компенсація послідовності збільшується.

Продуктивність узгоджується з аналітичними результатами, представленими на рис. 2.7. Якщо застосовано PLL 1, зі збільшенням рівня компенсації режим низьких частот буде переходити до LHP, і система буде більш стабільною. Якщо застосовано PLL 2, 8~Режим 20 Гц стає домінуючим. Збільшення рівня послідовної компенсації може спричинити нестабільність.

2.4 Аналіз моделі 2 з мережевим перетворювачем

У моделі 2 МП використовує режим керування напругою кола постійного струму, як показано на рис. 2.3 б. Передбачається, що система працює на V_{dc}= 1 в.о., V_{PCC}= 1 в.о. і X_g= 0,7 в.о. Для перевірки буде використано тестовий стенд 2 у MATLAB/Simscape.

На рис. 2.11 представлені параметри власних значень із рівнем послідовної компенсації, що змінюється від 10% до 75% з розміром кроку 2,5%. Рис. 2.11в і 2.11г є графіками збільшення рис. 2.11 а (приймає PLL 1) і 2.11 б (приймає PLL 2) для субсинхронних режимів діапазону. У моделі 2 є п’ятнадцять станів і п’ятнадцять власних значень. Представлені коефіцієнти потужності для трьох режимів із частотою нижче 100 Гц.

Параметри власних значень на рис. 2.11 ідентифікували два високочастотні режими понад 100 Гц ($\lambda_{1,2}$ і $\lambda_{4,5}$) і три режими коливань нижче 100 Гц ($\lambda_{6,7}$, $\lambda_{8,9}$, і $\lambda_{11,12}$), на які суттєво впливає різний рівень компенсації.

Високочастотні режими понад 100 Гц пов'язані з динамікою шунтуючого конденсатора та мережевого індуктора. Режим $\lambda_{6,7}$ з частотним діапазоном 50~100 Гц пов'язано з послідовним конденсатором. Він рухається до LHP зі збільшенням рівня послідовної компенсації. 8~20 Гц режим $\lambda_{8,9}$ пов'язаний зі струмом мережі та PLL. Він рухається до RHP зі збільшенням рівня послідовної компенсації.

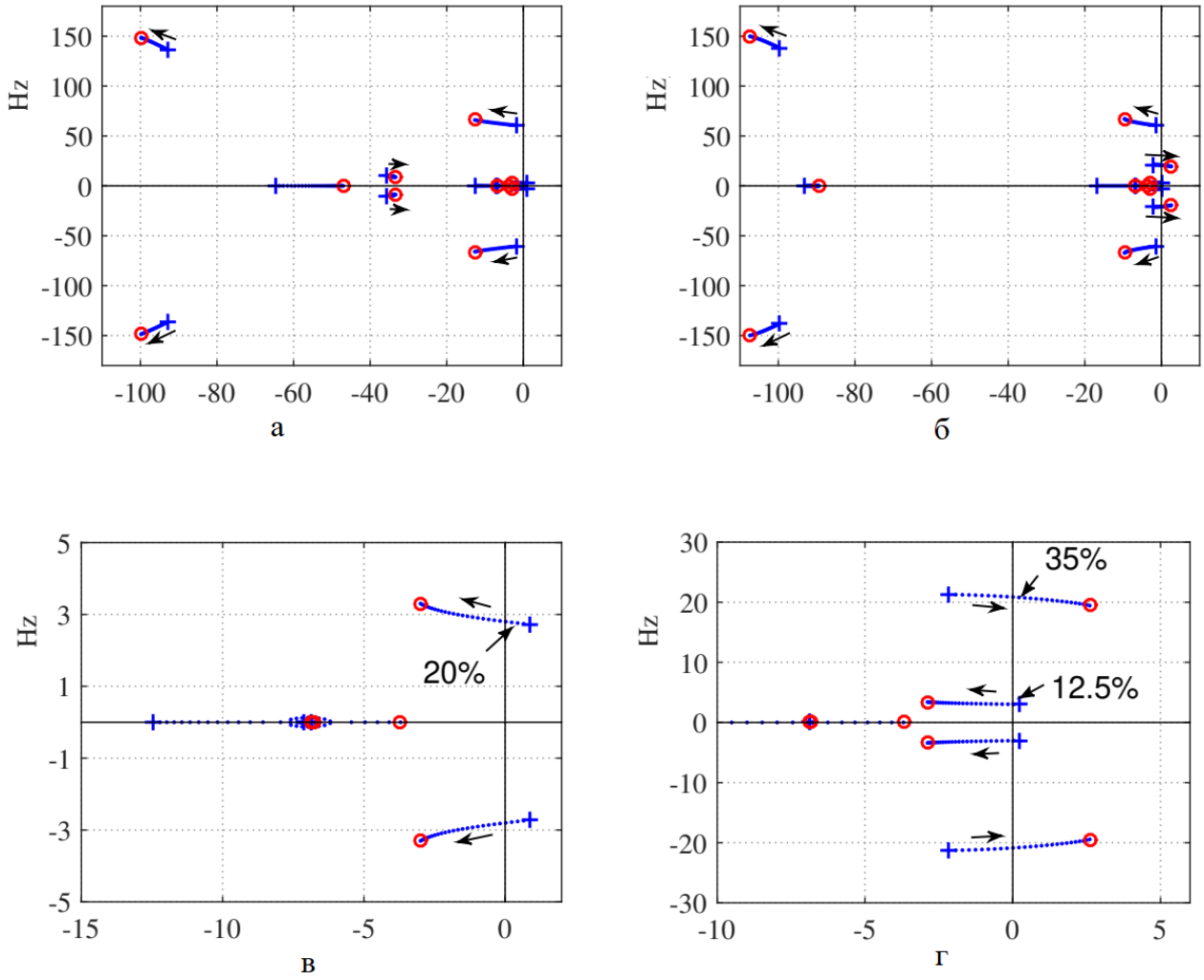


Рисунок 2.11 - Параметри власних значень для моделі 2, де мережевий перетворювач знаходиться у V_{dc} режим контролю.

Низькочастотний (2~5 Гц) режим $\lambda_{11,12}$ пов'язаний із динамікою конденсатора кола постійного струму, зовнішнім контуром керування.

Він рухається до LHP зі збільшенням рівня послідовної компенсації.

Коли застосовується PLL 1, низькочастотний режим є домінуючим. Коли застосовується PLL 2, 8~20 Гц є домінуючим режимом. Крім того, підвищення рівня послідовної компенсації створює ризик для стабільності у випадку з PLL 2. Іншими словами, PLL з високою смугою пропускання може створювати проблему коливальної стабільності для вітрової мережі типу 4 з послідовною компенсацією.

Результати моделювання у часовій області на основі моделі 2 представлені на рис. 2.12. Паралельний кола RL вимикається за t = 1 с, що

залишає систему типу 4 радіально підключеною до послідовної компенсованої лінії (послідовна компенсація становить 35%) з керуванням напругою кола постійного струму. Результати моделювання на рис. 2.12 а показують, що система є стабільною для PLL 1. Однак для PLL 2, як показано на рис. 2.12 б, система нестабільна.

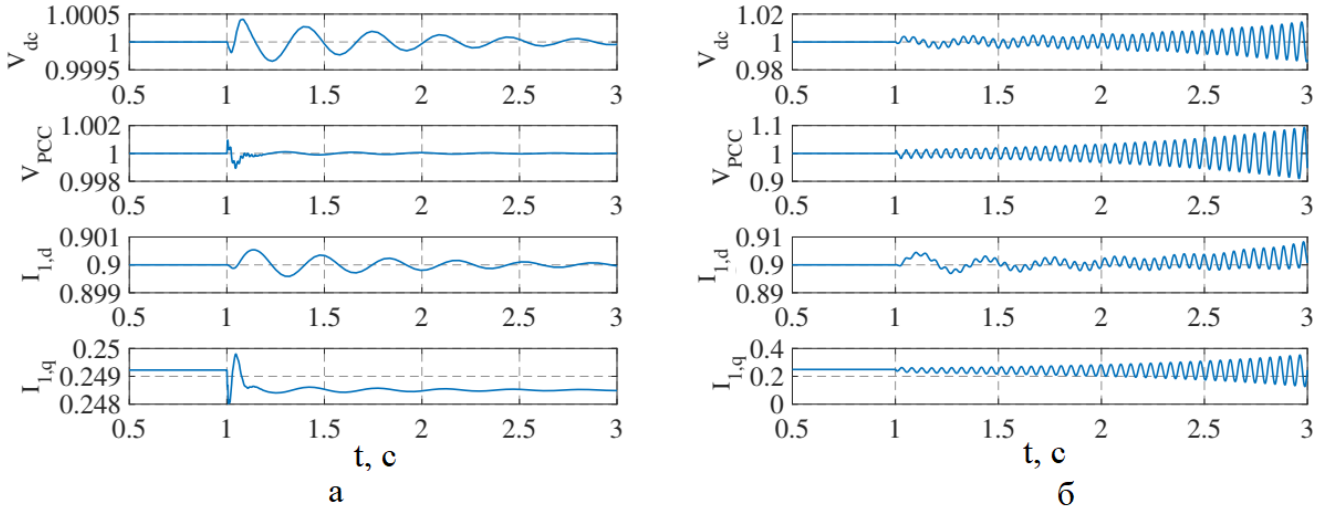


Рисунок 2.12 - Динамічні реакції моделі 2 після події відключення лінії через 1 секунду.

2.4.1 Перевірка тестового стенда на електромагнітні перехідні процеси

Результати динамічної перевірки ЕПП на основі випробувального стенду 2 показано на рис. 2.13. На рис. 2.13 а використовується PLL 1, а на рис. 2.13б — PLL 2. При t = 2 с некомпенсована лінія відключається. Коливання 3 Гц спостерігаються для системи з PLL 1. Підвищення рівня послідовної компенсації від 20% до 30% робить систему стабільною. З іншого боку, якщо використовується PLL 2, виникають коливання 20 Гц. Підвищення рівня послідовної компенсації з 30% до 35% робить систему нестабільною.

Динамічні показники підтверджують результати аналізу власних значень, показані на рис. 2.11. Тобто зі збільшенням рівня компенсації режим низьких частот зміщується вліво, а режим 8~20 Гц переміщається вправо. PLL має великий вплив на режим при 8~20 Гц і стабільність системи. Висока смуга частот PLL призводить до домінуючого режиму 20 Гц.

2.5 Аналіз стабільності на основі імпедансу

У літературі моделі імпедансу в частотній області або вимірюються за допомогою методу гармонічної інжекції (наприклад, [12]), або отримують шляхом проведення лінеаризації на кожному етапі для кожного рівняння (наприклад, [11]). Як альтернатива, спочатку виводиться модель простору станів у часовій області малого сигналу з лінеаризацією, що проводиться на кожному етапі для кожного рівняння. Коли напруга на клемі пристрою розглядається як вхід, а струм, що надходить у пристрій, як вихід, допуск пристрою можна знайти як функцію передачі в частотній області. Цей підхід був прийнятий у [6-12] для пошуку моделей пропускної здатності або імпедансу.

Лінеаризація здійснюється в один крок за допомогою чисельного збурення.

Підхід до отримання адмітансів вітряних електросистем (ВЕС) з аналітичної моделі проілюстровано на рис. 2.14. Вхід до вітрової електростанції з шини загального з'єднання PCC є бажаним. Щоб знайти пропускну здатність, інтеграційна система побудована так, щоб шина PCC була безпосередньо підключена до джерела напруги мережі. На основі цього припущення будується аналітична модель системи в dq-координатах. Використовуючи числові збурення (наприклад, команду Matlab linmod), можна знайти лінеалізовану модель. Знайдено лінеаризовану модель входу/виходу з напругою по осі dq як входом і струмом по осі dq як виходом. Це подання входу/виходу дійсно є моделлю пропуску вітрової електростанції. Лінійна модель є матрицею адмітансу 2 × 2 наступним чином.

$$\begin{bmatrix} i_{s,d}(s) \\ i_{s,q}(s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{dd}(s) & Y_{dq}(s) \\ Y_{qd}(s) & Y_{qq}(s) \end{bmatrix}}_{Y_{\mathrm{vsc},dq}} \begin{bmatrix} v_{s,d}(s) \\ v_{s,q}(s) \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

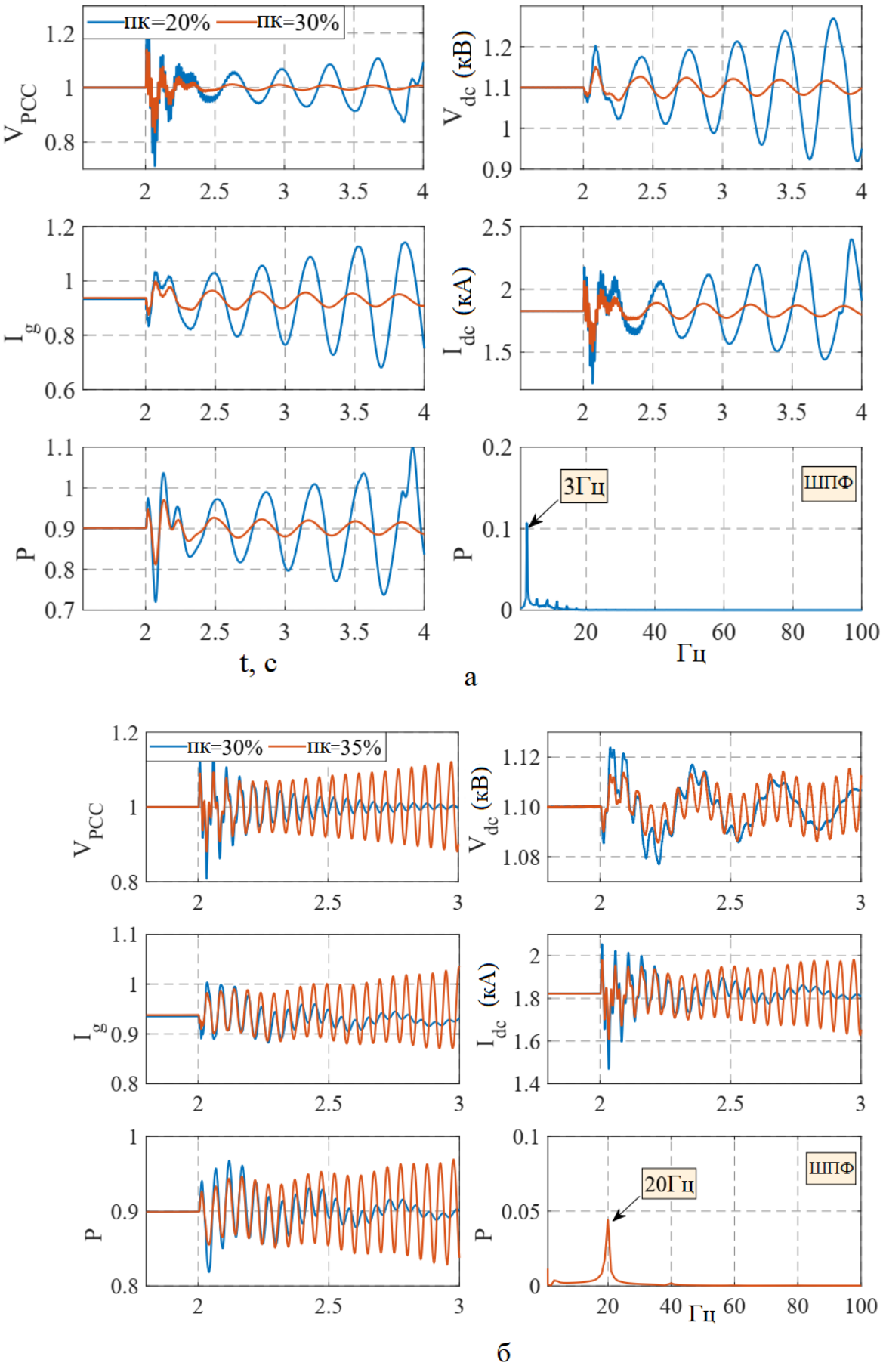


Рисунок 2.13 - Динамічні показники двох різних рівнів компенсації під V_{dc} керування в MATLAB/Simscape.

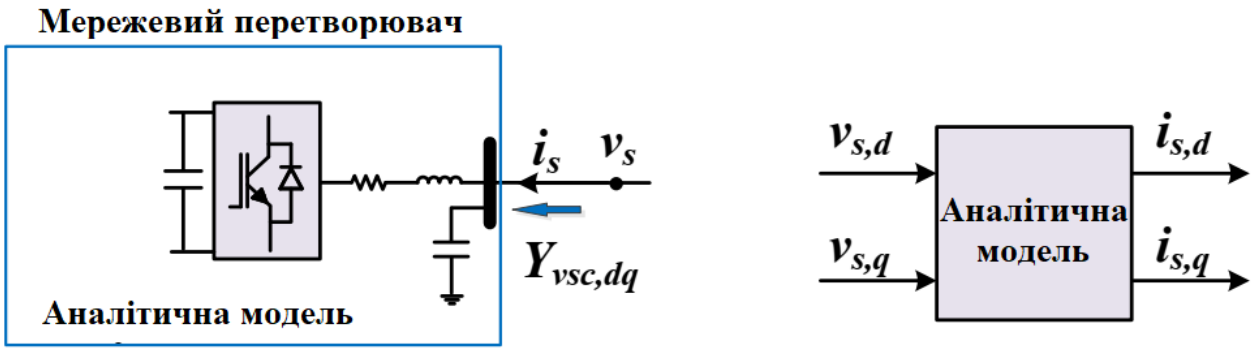


Рисунок 2.14 - Підхід до знаходження імпедансу / адмітансу

Для лінії передачі з послідовною компенсацією модель імпедансу в dq-області виражається як [8]:

$$Z_{L,dq} = \begin{bmatrix} R + Ls + \frac{s}{C(s^2+\omega_0^2)} & -L\omega_0 + \frac{\omega_0}{C(s^2+\omega_0^2)} \\ L\omega_0 - \frac{\omega_0}{C(s^2+\omega_0^2)} & R + Ls + \frac{s}{C(s^2+\omega_0^2)} \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

Аналіз стабільності на основі імпедансу виконується для аналітичної моделі 2 (вітряна електростанція МП у режимі керування напругою кола постійного струму). Стабільність системи з кількома входами та багатьма виходами можна оцінити за допомогою узагальненого критерію Найквіста, який широко використовується в аналізі стабільності. Коефіцієнт підсилення системи визначається в (2.21). Система буде нестійкою, коли характерні параметри двох власних значень петлевого посилення (λ_1 і λ_2) точку (-1, 0) за годинниковою стрілкою на діаграмі Найквіста. Нестабільність також відображається на графіках Боде як величина, що перевищує 0 дБ, коли фазовий зсув відбувається для двох власних значень.

$$L = Y_{\text{vsc},dq} \times Z_{L,dq} \tag{2.21}$$

На рис. 2.15 представлено стабільний випадок (випадок 1: послідовна компенсація = 25% для верхнього рядка на рис. 2.15 а та рис. 2.15 б) та нестабільний випадок (випадок 2: послідовна компенсація = 40% для нижнього ряду на рис. 2.15 в та рис. 2.15 г) для моделі 2 з високою пропускною здатністю фазового автопідлаштування частоти (PLL 2). Для випадку 1, рис. 2.15 а графік Боде показує, що фазовий зсув відбувається при 22,58 Гц. Величина власного

значення на 22,58 Гц менше 1. Отже, система є стабільною. Діаграма Найквіста на рис. 3.15 б вказує, що контур не оточує (-1,0). Тому система стабільна. Для випадку 2 графік Боде на рис. 2.15в показує, що фазовий зсув відбувається при 21,5 Гц. Відповідна величина власного значення більша за 1. Отже, система є нестійкою. Нестабільність також підтверджується діаграмою Найквіста на рис. 3.15 г, де (-1,0) обведено за годинниковою стрілкою.

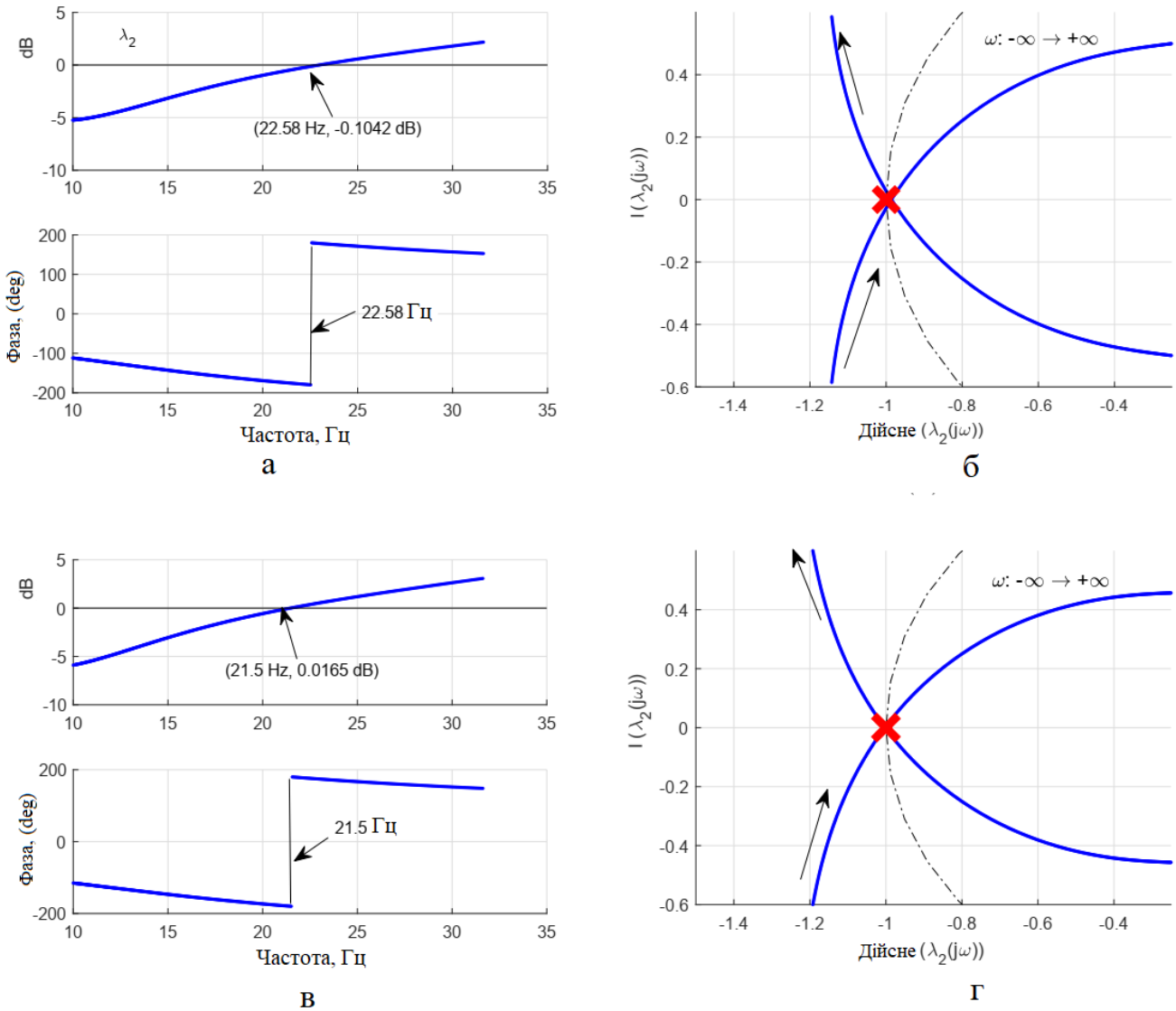


Рисунок 2.15 - Аналіз стабільності на основі імпедансу для аналітичної моделі 2 із застосованою системою фазового автопідлаштування частоти з високою смугою пропускання.

Результати аналізу підтверджують, що послідовна компенсація використовується для зменшення електричної відстані для систем інтеграції ВЕС типу 4, може виникнути нестабільність.

2.6 Висновки до розділу

Аналіз стабільності малого сигналу вітрової мережі типу 4 у послідовно компенсованій мережі проводиться на основі аналітичних моделей простору станів і моделей імпедансу. За умов слабкої мережі підвищення рівня послідовної компенсації може викликати проблеми коливальної стабільності через взаємодію режиму, пов’язаного з перетворювачем джерела напруги (ПН) у слабкій мережі (називається «режим слабкої мережі»), і режиму, пов’язаного з резонансом мережі LC . Потужність мережі та параметри керування мережевим перетворювачем вітру типу 4, включаючи параметри фазового автопідстроювання частоти (PLL), відіграють велику роль у домінантному режимі та стабільності. Представлений аналіз базується на двох аналітичних моделях, побудованих у dq-системі координат із включеною динамікою мережі та керуванням мережевим перетворювачем. Аналітичні результати перевіряються на двох випробувальних стендах електромагнітних перехідних процесів з повною динамікою, включаючи динаміку мережі, механічну динаміку вітряної турбіни, а також усі етапи керування перетворювачем.

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Трифазний гібридний підвищувальний перетворювач для інверторних генераторів

У цьому розділі представлено одноступінчастий гібридний підвищувальний перетворювач (ГПП) для правильного регулювання вихідного струму постійного та змінного струму, зберігаючи при цьому стабільність замкнутого циклу. Підключена до мережі система живлення на основі постійного струму показана на рис. 3.1(а). Інверторний генератор (ІГ), можна розглядати як один вхід постійного струму. Підвищувальний перетворювач постійного струму використовується для живлення навантажень постійного струму, а підключений до мережі перетворювач джерела напруги (ПН) підключається каскадом до підвищувального перетворювача постійного струму для живлення навантажень змінного струму. Окремий перетворювач з окремим контролером потрібен для досягнення перетворення DC/DC і DC/AC. Це збільшує втрати потужності, ускладнює систему та знижує надійність. Отже, необхідно реалізувати ГПП з меншою кількістю перемикачів для живлення навантажень постійного та змінного струму одночасно, як показано на рис. 5.1(б) Архітектура на основі ГПП скорочує непотрібні процеси перетворення DC/DC і DC/AC порівняно зі звичайною архітектурою на основі перетворювача.

Для демонстрації робочої поведінки розроблено детальне моделювання ГПП у замкнутому регулюванні. Представлено методику векторного керування та гібридної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Ефективність ГПП досліджується на тестовому стенді електромагнітних перехідних процесів (ЕПП), розробленому в MATLAB/Simscape. Виявлено, що ГПП здатний підтримувати плавну передачу потужності між виходами змінного та постійного струму, правильно регулюючи напругу шини постійного струму, зберігаючи при цьому стабільність замкнутого циклу.

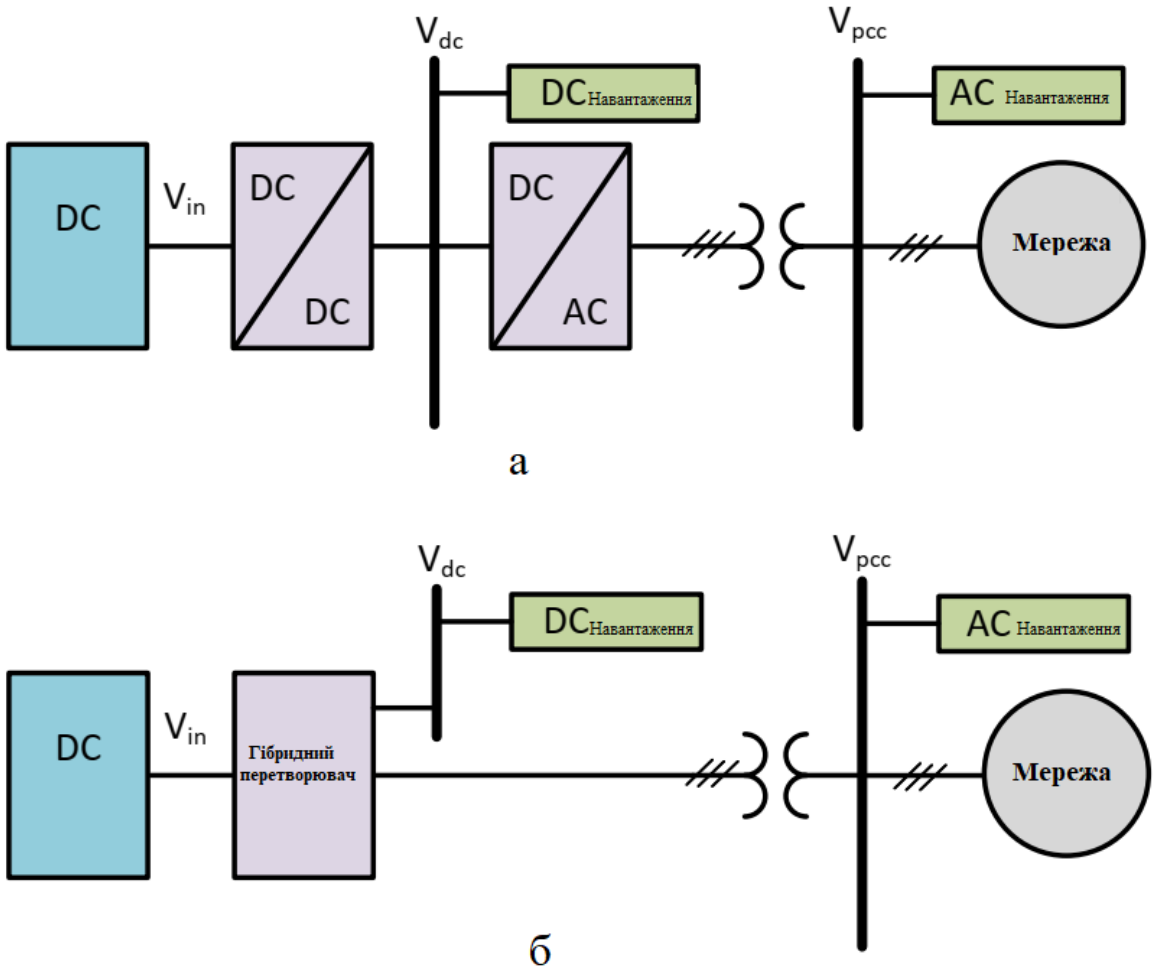


Рисунок 3.1 - Типова схема підключеної до мережі системи на основі постійного струму: а – звичайна архітектура на основі перетворювача, б – архітектура на основі ГПП.

3.2 Робота гібридного підвищувального перетворювача підключеного до мережі

Варіант схеми досліджуваної системи показана на рис. 3.2, де джерело постійного струму підключено до електромережі та навантажень постійного струму через однокаскадний трифазний ГПП. Слід зазначити, що джерело постійного струму можна легко розширити до більшості існуючих ІГ, таких як сонячні фотоелектричні системи, що працюють у режимі відстеження точки максимальної потужності (MPPT), щоб забезпечити максимальну вихідну потужність. Символи V_{in}, V_{dc} і V_{PCC} представляють вхідну напругу постійного струму, вихідну напругу постійного струму та напругу точки загального

з’єднання (PCC) відповідно. Сторона постійного струму включає один діод і один конденсатор (C_{dc}), щоб забезпечити вихід постійного струму на іншому рівні напруги. Сторона змінного струму підключена до електромережі через фільтр RLC (R_f, L_f, C_f), два підвищувальних трансформатора і лінія електропередачі (R_g, L_g), щоб отримати синусоїдальний вихід змінного струму.

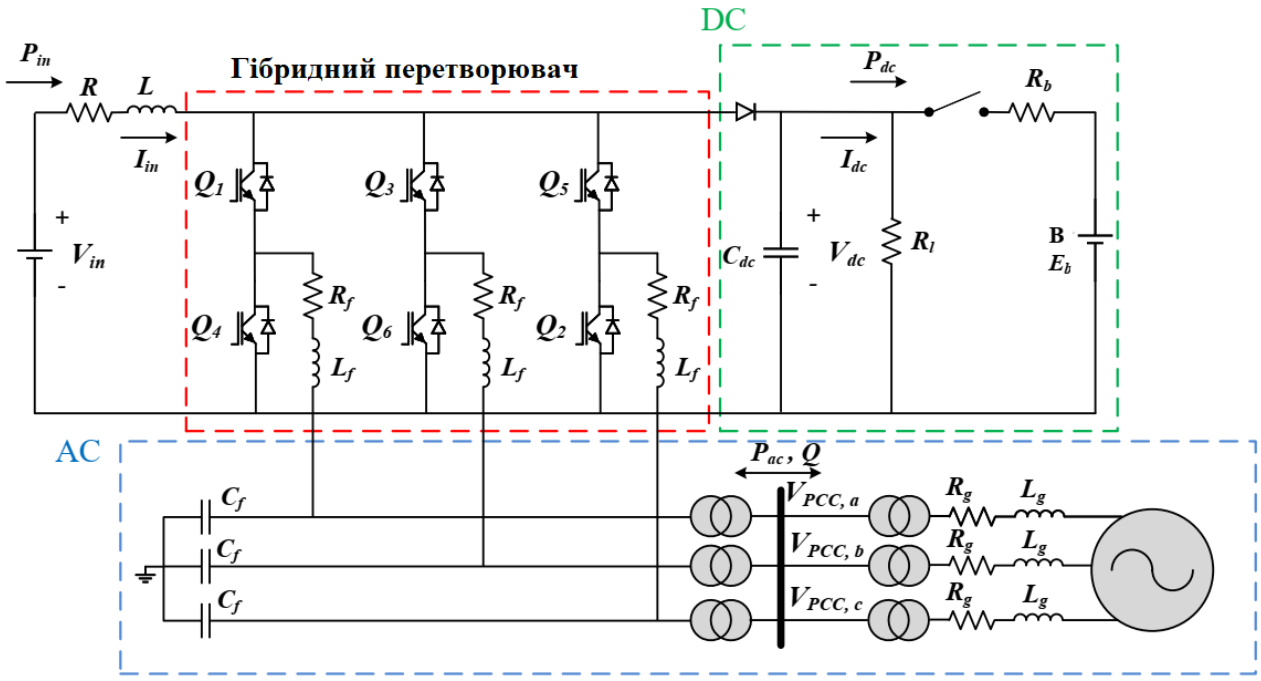


Рисунок 3.2 – Трифазна схема гібридного підвищувального перетворювача.

У порівнянні з окремими перетворювачами для досягнення перетворення DC/DC і DC/AC, один ГПП виконує обидві операції одночасно. Один вхід постійного струму забезпечує вихід постійного та змінного струму через трифазні мостові мережеві комутатори (Q_1– Q_6), де перемикачі живлення можуть використовувати IGBT або MOSFET з антипаралельними діодами. Три режими роботи ГПП на основі станів перемикання показані на рис. 3.3 і описані нижче.

На рис. 3.3 (а) показано напрямок потужності (блакитна лінія) у досліджуваній системі для наскрізного режиму. У цьому режимі пробій відбувається шляхом увімкнення обох перемикачів будь-якої однієї, двох або всіх окремих ніг (або Q_1Q_4, Q_3Q_6 або Q_5Q_2) в той самий час. У цій роботі всі ноги

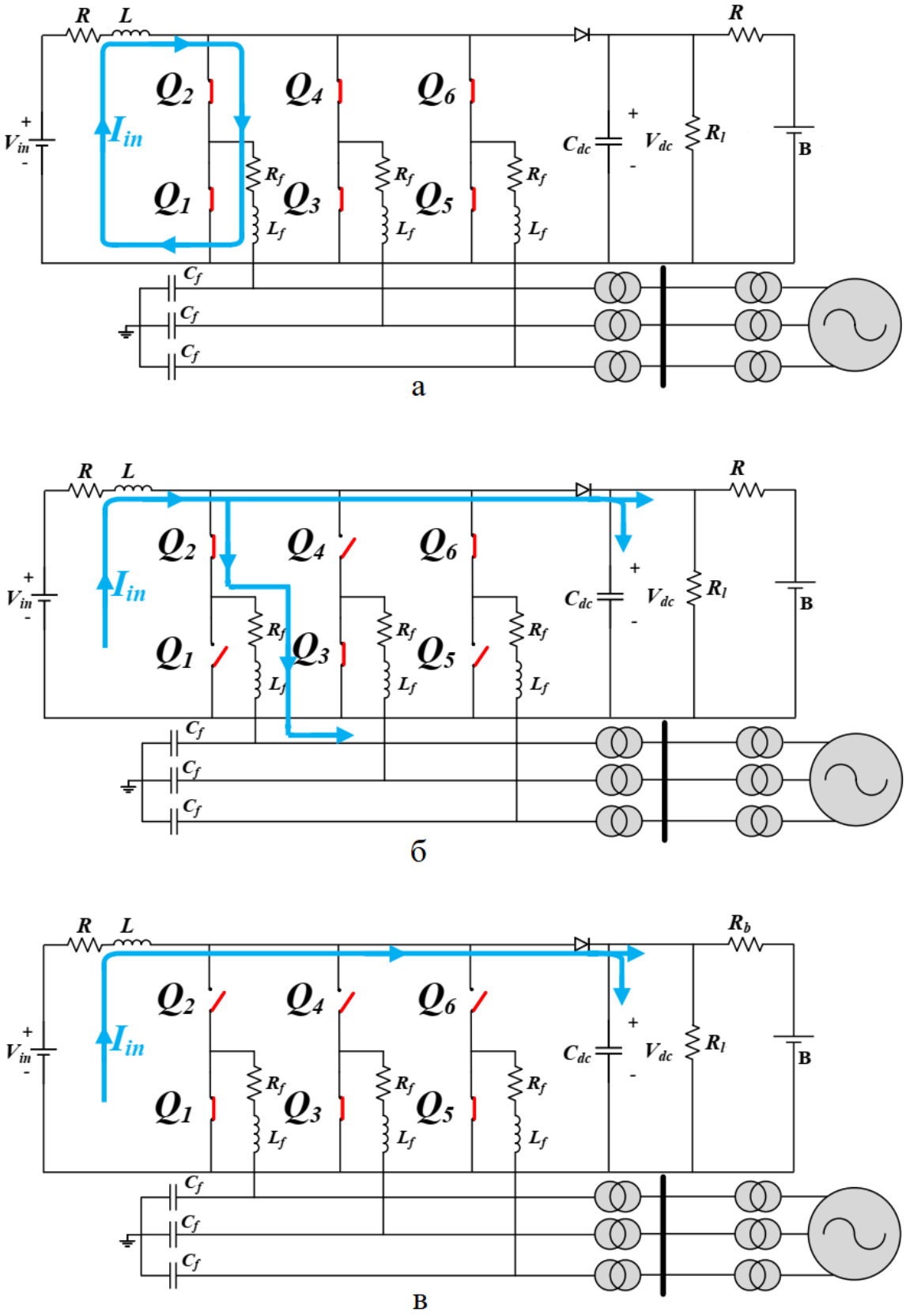


Рисунок 3.3 - Три режими роботи трифазного гібридний підвищувальний перетворювач: (а) Режим короткого замикання, (б) Режим електроживлення, (в) Нульовий режим.

увімкнуто, щоб досягти пробою. Діод на стороні постійного струму має зворотне зміщення, і струм циркулює в мережевих перемикачах мосту. Тобто вихід постійного та змінного струму дорівнює нулю. Крім того, L заряджається, щоб забезпечити вищу вихідну напругу постійного струму, ніж вхідна напруга постійного струму. Тривалість режиму пробою визначається як робочий цикл (D_{st}).

Режим електроживлення реалізується стробуванням будь-яких двох верхніх або нижніх перемикачів і протилежного перемикача в іншій нозі. У цьому випадку Q_1, Q_5і Q_6 увімкнено. У цьому режимі діод на стороні постійного струму проводить, а струм частково тече на сторону змінного струму. Напрямок потужності показано на рис. 3.3(б), де вхід постійного струму одночасно живить і постійний, і змінний струм.

Нульовий режим активується, коли всі верхні або нижні перемикачі включені. Q_2, Q_4 і Q_6 . Як показано на рис. 3.3(c), вхідна потужність постійного струму на стороні dc але не надходить на сторону змінного струму ac.

Подібно до звичайного підвищувального перетворювача, робочий цикл (D_{st})) регулює вихід постійного струму. Вихідна напруга постійного струму (V_{dc}) можна виразити через вхідну напругу dc та робочий цикл таким чином:

$$V_{dc} = \frac{V_{in}}{1 - D_{st}} \tag{3.1}$$

Індекс модуляції (M_i) використовується для регулювання вихідної потужності змінного струму, подібної до вихідної потужності звичайного ПН. Середньоквадратичне значення міжлінійної вихідної напруги змінного струму (V_{ac}) можна отримати в термінах вхідної напруги постійного струму, робочого циклу та індексу модуляції наступним чином:

Щоб досягти безперервної роботи ГПП, має бути виконано обмеження на робочий цикл та індекс модуляції.

$$V_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} M_i \frac{V_{in}}{1 - D_{st}} \tag{3.2}$$

Для досягнення безперервної роботи ГПП необхідно задовольнити обмеження на робочий цикл та індекс модуляції

$$M_i + D_{st} \leq 1 \tag{3.3}$$

Максимальна вихідна напруга змінного струму може бути отримана як $\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{in}$ за умови рівності (3.3).

3.3 Моделювання системи керування гібридним підвищувальним перетворювачем

Гібридний підвищувальний перетворювач призначений для керування реактивною потужністю Q на PCC та вихідною напругою постійного струму V_{dc} для регулювання вихідного струму змінного та постійного струму відповідно. На рис. 3.4 показано загальну замкнуту схему керування гібридним підвищувальним перетворювачем, яка включає зовнішні Q і V_{dc} контури керування зворотнім зв'язком, внутрішній струм (i_d, i_q) контур керування, фазовий автопідстроювач частоти (PLL) та широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Зовнішній і внутрішній контролери використовують пропорційно-інтегральні (ПІ) контролери та моделюються в системі відліку перетворювача, яка обертається синхронно з напругою PCC. Вихідна напруга змінного струму ГПП (v_d, v_q) генеруються з поточних замовлень i^*_d і i^*_q розв’язаним внутрішнім контуром керування струмом. Значення опорного струму (i^*_d, i^*_q) визначаються зовнішнім V_{dc} і Q контурів зворотного зв'язку керування відповідно. За винятком того, що внутрішній контур керування струмом такий самий, як у розділі 2, інші деталі моделювання описані нижче.

3.3.1 Зовнішній контур керування

Моделювання зовнішнього контуру керування ГПП аналогічне моделюванню в розділі 2. Різниця полягає в тому, що вихідна потужність

перетворювача включає в себе потужність змінного та постійного струму в цьому дослідженні.

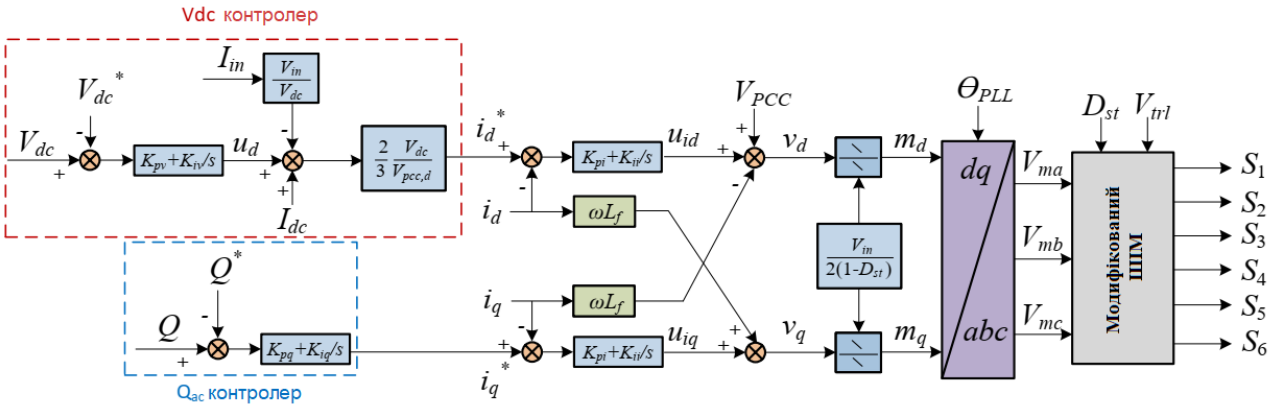


Рисунок 2.4 - Структура керування із замкнутим контуром для трифазного гібридного підвищувального перетворювача.

Енергію в конденсаторі можна записати у вигляді

$$\frac{C_{\mathrm{dc}}}{2}\frac{dV_{\mathrm{dc}}^2}{dt} = P_{\mathrm{in}} - P_{\mathrm{ac}} - P_{\mathrm{dc}} \tag{3.4}$$

де P_{in}, P_{ac} і P_{dc} є активною потужністю на вході постійного струму, на виході змінного струму та на виході постійного струму відповідно. Активна та реактивна потужності, що надходять в електромережу, виражаються як

$$\begin{cases} P_{\mathrm{ac}} &= \frac{3}{2}(v_{\mathrm{pcc,d}} i_{\mathrm{d}} + v_{\mathrm{pcc,q}} i_{\mathrm{q}}) \\ Q_{\mathrm{ac}} &= \frac{3}{2}(v_{\mathrm{pcc,q}} i_{\mathrm{d}} - v_{\mathrm{pcc,d}} i_{\mathrm{q}}) \end{cases} \tag{3.5}$$

За допомогою фазового автопідлаштування частоти, потужності можна спростити $P = \frac{3}{2} V_{\mathrm{pcc}} i_{\mathrm{d}}$ і $Q = -\frac{3}{2} V_{\mathrm{pcc}} i_{\mathrm{q}}$. В результаті (3.4) можна сформулювати наступним чином:

$$\frac{C_{\mathrm{dc}}}{2}\frac{dV_{\mathrm{dc}}^2}{dt} = V_{\mathrm{in}} I_{\mathrm{in}} - \frac{3}{2} V_{\mathrm{pcc}} i_{\mathrm{d}} - V_{\mathrm{dc}} I_{\mathrm{dc}} \tag{3.6}$$

Спрощення наведеного вище рівняння призводить до

$$C_{\mathrm{dc}}\frac{dV_{\mathrm{dc}}}{dt} = \underbrace{\frac{V_{\mathrm{in}}}{V_{\mathrm{dc}}}I_{\mathrm{in}} - \frac{3}{2}\frac{V_{\mathrm{pcc}}}{V_{\mathrm{dc}}}i_{\mathrm{d}} - I_{\mathrm{dc}}}_{u_{\mathrm{d}}} \tag{3.7}$$

Виявлено, що вихідна напруга постійного струму може регулюватися струмом i_d по осі d. ПІ-регулятор керує різницею між V_{dc}^*і V_{dc} біля нуля. На основі u_d який є виходом ПІ-регулятора, поточне посилання i^*_d можна отримати як

$$i_d^* = -\frac{2}{3}\frac{V_{\mathrm{dc}}}{V_{\mathrm{pcc}}}(u_d - \frac{V_{\mathrm{in}}}{V_{\mathrm{dc}}}I_{\mathrm{in}} + I_{\mathrm{dc}}). \tag{3.8}$$

Подібним чином зовнішній контур регулювання реактивної потужності використовує той самий критерій, що й для контуру регулювання вихідної напруги постійного струму. Обмін реактивною потужністю між мережею та ГПП контролюється струмом i_q по осі q.

3.3.2 Методологія керування гібридним ШІМ

Як обговорювалося вище, ГПП досягає перетворення DC/DC і DC/AC за допомогою трьох режимів роботи. Схема перемикання за режимами роботи наведена на рис. 3.5. Несучий трикутний сигнал (V_{trl}) порівнюється з сигналом постійного струму $\pm V_{st}$ і величини фази напруги (v_{ma}, v_{mb}, v_{mc}) для генерування керуючих імпульсів ($S_1 - S_6$) для регулювання виходу постійного та змінного струму відповідно. На рис. 3.6 показана стратегія керування ШІМ для отримання необхідної схеми перемикання.

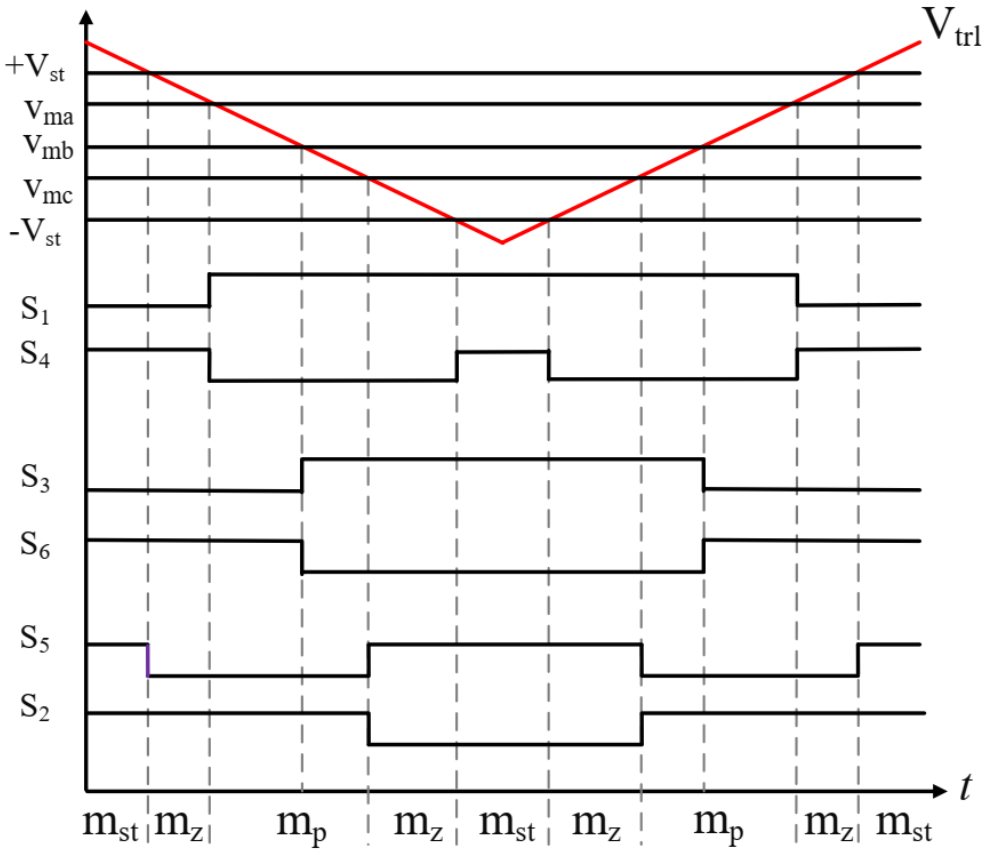


Рисунок 3.5 - Імпульси керування для перемикачів (S_1– S_6) і робочі форми сигналу несучого V_{trl}, фазні напруги V_m, і сигнал постійного струму V_{st} для трифазного гібридного підвищувального перетворювача.

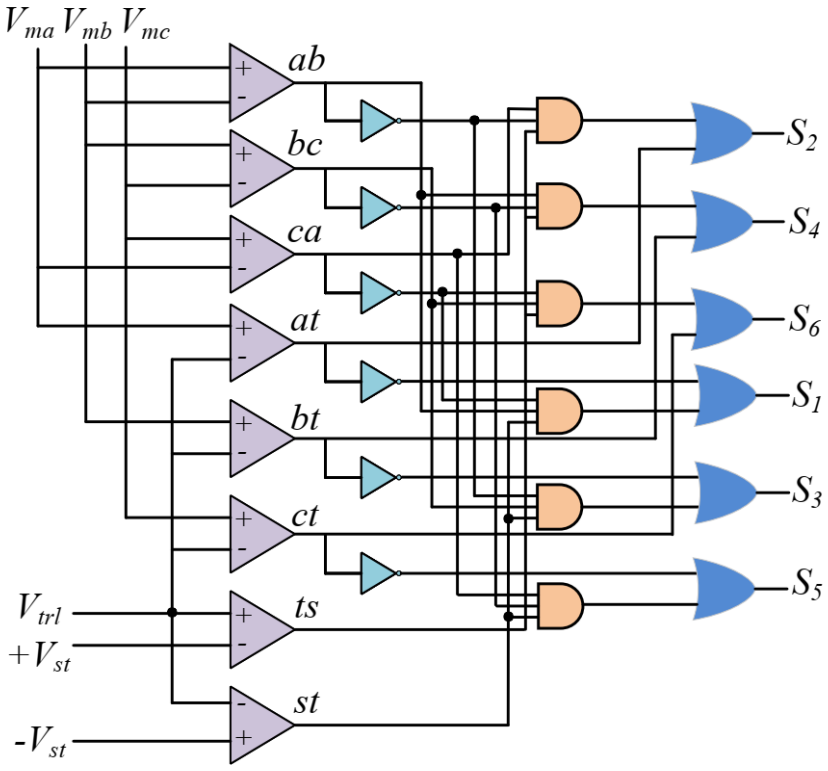


Рисунок 3.6 - ШІМ-стратегія керування для трифазного гібридного підвищувального перетворювача.

3.4 Результати моделювання трифазного гібридного підвищувального перетворювача

ГПП може працювати як випрямляч або інвертор на основі обміну електроенергією між джерелом постійного струму, навантаженням постійного струму та електромережею. Енергетична мережа в цьому випадку нагадує сховище енергії з необмеженою ємністю для збалансування пропозиції та попиту. Джерело постійного струму може живити сторону постійного струму та електромережу, або співпрацювати з електромережею для живлення навантаження постійного струму. У цьому дослідженні останній буде використовуватися для перевірки продуктивності двонаправленого ГПП. У цьому випадку джерела постійного струму недостатньо для забезпечення навантаження постійного струму. Енергетична мережа буде діяти як вторинне джерело електроенергії для постійного забезпечення дефіциту електроенергії.

Система дослідження, як показано на рис. 3.2, створена в середовищі MATLAB/Simscape. Джерело постійного струму забезпечує електричний струм постійного струму, який потім проходить через ГПП, щоб отримати вихід постійного струму на іншому рівні напруги. У той же час електроенергія з мережі змінного струму випрямляється в електроенергію постійного струму, щоб забезпечити дефіцит електроенергії на стороні постійного струму. Вхідна напруга постійного струму завжди підтримується на рівні 220 В

Вихідна напруга постійного струму та реактивна потужність на PCC контролюються відповідно до попередньо визначених еталонних порядків300 В і 0 відповідно.

На рис. 3.7 показані динамічні характеристики системи трифазного ГПП в умовах замкнутого циклу.

Вихідна напруга постійного струму (V_{dc}), реактивна потужність на PCC (Q), робочий цикл (D_{st}), індекс модуляції (M_i), потужніст (P) і вихідна напруга змінного струму ($V_{аб}$) нанесені. Опір навантаження постійного струму є фіксованим на 10 Ом, а літій-іонний акумулятор буде підключено до системи через 2 секунди для емуляції підвищеного проникнення навантажень

постійного струму. Події описані наступним чином: Крок зміни опорної напруги. Через 1 секунду вихідна напруга постійного струму V_{dc}^* кроком до 350 В. Помічено, що V_{dc} належним чином стежити за V_{dc}^*. Тим часом D_{st} збільшується до 0,43 і M_i зменшиться до 0,54. Це задовольняє відношення (3.3) для досягнення безперервної роботи ГПП. Крім того, величина V_{ab} збільшується при зміні D_{st} більше, ніж у M_i. Це узгоджується з принципом рівняння (3.2), тобто вихідна напруга змінного струму залежить як від D_{st} і M_i. Крім того, витягується потужність від мережі для живлення навантаження постійного струму. Це підтверджує двонаправлену функцію трифазного ГПП.

Через 1,5 секунди вихідна реактивна потужність змінного струму Q^* ступінчасто змінюється від 0 до 10 кВар. Q коректно відстежує своє опорне значення, а напруга V_{dc} залишається лише на рівні 350 В. Це показує, що ГПП може контролювати виходу напругу постійного струму та реактивної потужності на PCC незалежно. Тим часом D_{st} залишається статичним, але M_i збільшується, що призводить до невеликого збільшення величини V_{ab}.

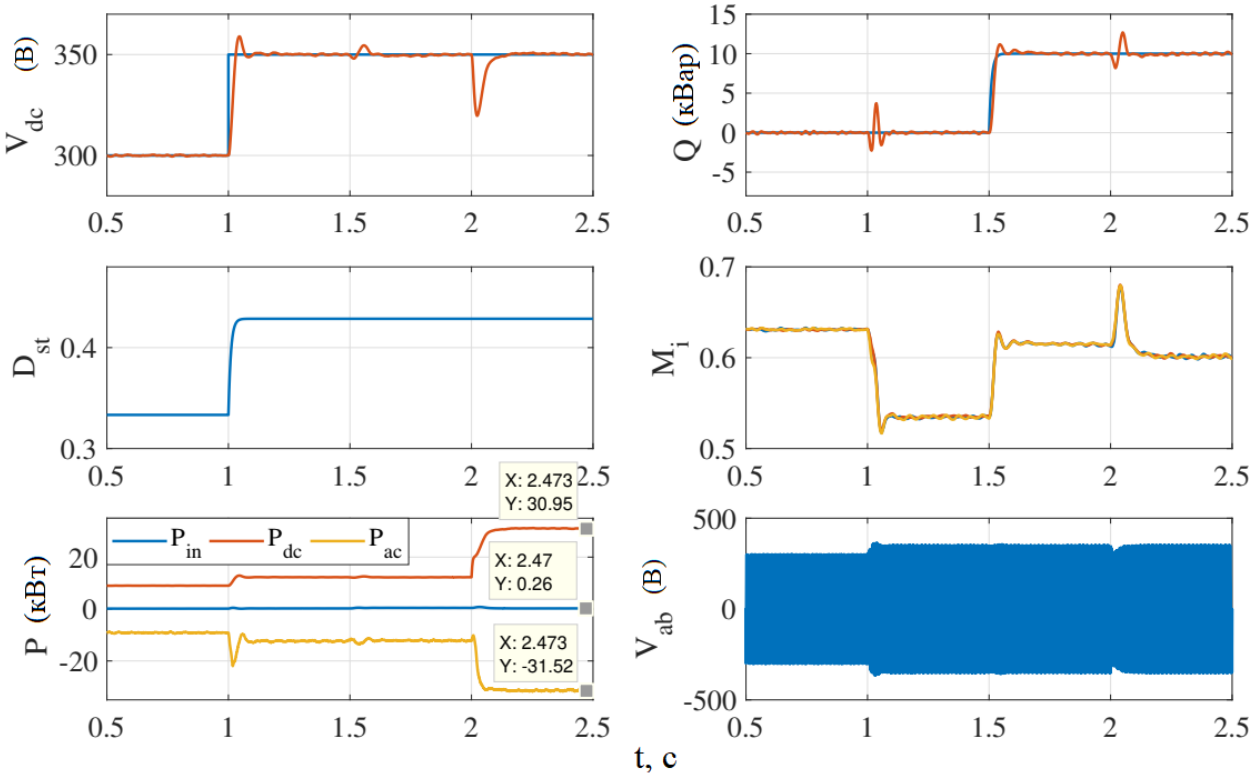


Рисунок 3.7 - Динамічна характеристика трифазного ГПП.

Через 2 секунди літій-іонний акумулятор підключається до системи. Вихідна потужність постійного струму збільшується (P_{dc}= 30,95 кВт). Після короткого перехідного процесу мережа змінного струму передає більше енергії (P_{ac}= 31,52 кВт) із вхідною потужністю постійного струму (P_{in}= 0,26 кВт). При цьому зазначається, що V_{dc} і Q швидко повертаються до контрольного значення. Поведінка батареї показана на рис. 3.8, що вказує на стабільну та безперервну зарядку. Ці результати підтверджують, що ГПП може забезпечити плавний перехід, коли навантаження постійного струму має збурення.

Поведінка трифазного ГПП, розглянута в Розділі 3, підтверджена результатами моделювання у часовій області, тобто трифазний ГПП здатний регулювати вихід постійного та змінного струму, зберігаючи стабільність замкнутого циклу.

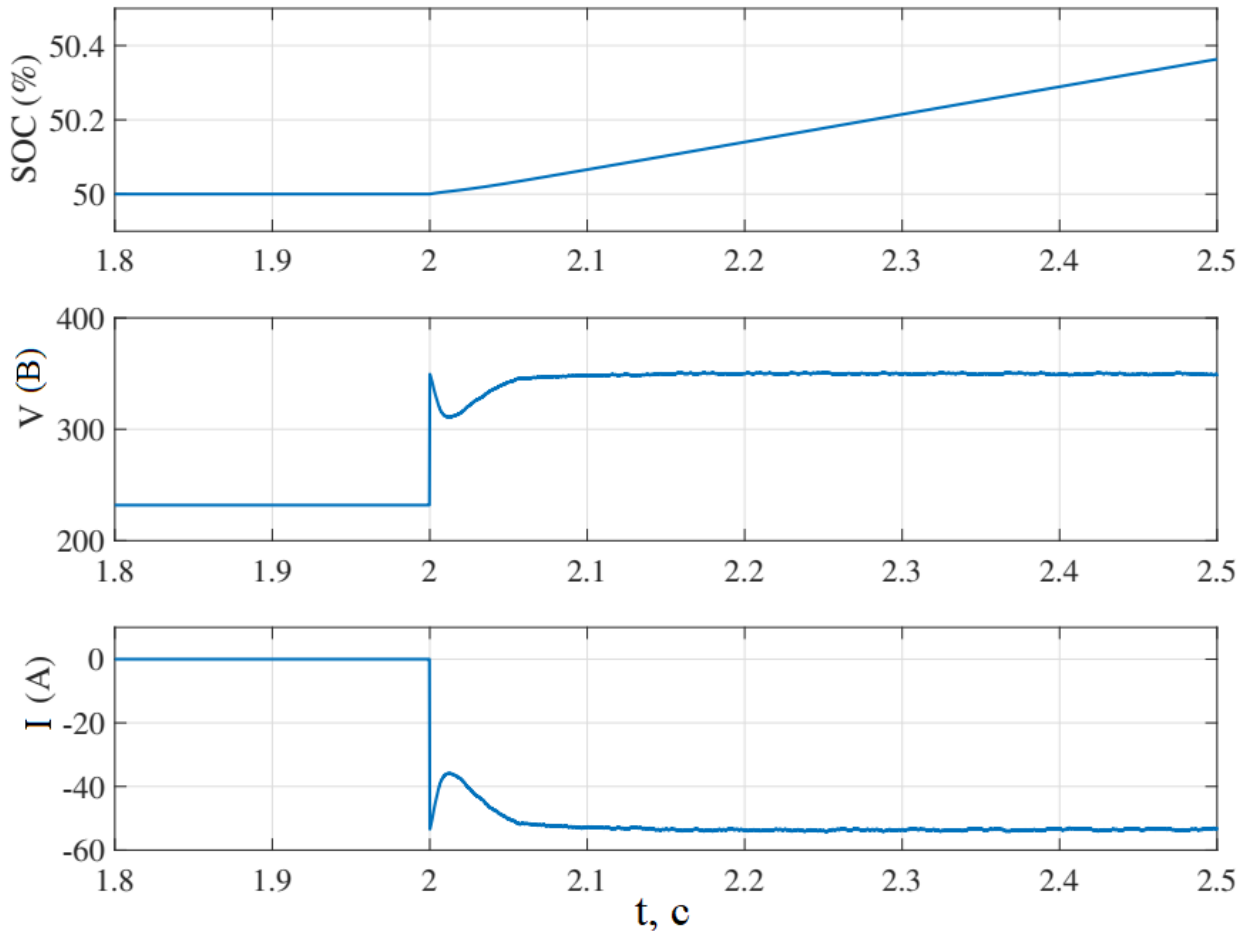


Рисунок 3.8 - Поведінка батареї під час заряджання.

3.5 Висновки до роздлу

У цьому розділі розглядається ефективність і надійність гібридного підвищувального перетворювача з одночасним виходом змінного і постійного струму, коли подається один вхід постійного струму. Для демонстрації робочої поведінки розроблено детальне моделювання перетворювача в замкнутому циклі. Результати комп’ютерного моделювання підтверджують, що трифазний гібридний підвищувальний перетворювач здатний правильно регулювати вихід постійного та змінного струму, а також вихідну напругу постійного струму та реактивну потужність на шині загального з’єднання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

4.1.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок

При досліджені систем живлення електроустановки трансформаторних підстанцій оглядаються без зняття з них напруги, на віддалі від струмоведучих частин. Дефекти виявляються візуально – оглядом і на слух. Право одноособового огляду електроустановки має черговий із кваліфікаційною групою не нижче III або адміністративно-технічний працівник, що має V групу в установках напругою вище 1000 *В* и IV групу в електроустановках напругою нижче 1000 *В*.

При оглядах діючих електроустановок не можна проходити за огородження, знімати їх і входити в камери розподільних пристроїв, що не мають бар'єрів. При необхідності дозволяється працівникові з кваліфікаційною групою не нижче IV увійти за огородження, але за умови, що струмоведучі частини недоступні, тобто нижні фланці ізоляторів знаходяться від сталі на відстані більше 2 *м*, а необгороджені струмоведучі частини - на відстані більше 2,75 *м* при напрузі 35 *кВ* і 3,5 *м* при напрузі 110 *кВ*.

При менших відстанях входити за огородження можна тільки в присутності другої особи, що має кваліфікаційну групу не нижче III, і за умови, що струмоведучі частини знаходяться на відстані зазначеному в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі відстані від місця проведення робіт до струмоведучих частин у залежності від їх напруги

Номінальна напруга електроустановки, *кВ*	Допустима відстань, *м*
до 15	0,7
від 15 до 35	1,0
від 35 до 110	1,5
154	2
220	2,5
330	3,5
400 і 500	4,5

Вимкнення і зміни в електричних схемах РЕМ здійснюються тільки за розпорядженням або з відома чергового персоналу, у керуванні або підпорядкуванні якого знаходиться устаткування. При пожежах, нещасних випадках або при стихійних лихах негайно потрібно вимикати електроустаткування без узгодження, з послідуючим записом у оперативному журналі.

Розпорядження вважається виконаним після того, як черговий повідомить особисто або телефоном черговому диспетчерові енергосистеми мереженого району, черговому інженерові, тобто особі, що дала розпорядження. Керуватися показами приладів та повідомленнями осіб не оперативного персоналу про виконання розпорядження не можна.

Особа, що віддає розпорядження про переключення, обов'язково перевіряє послідовність операцій за оперативною схемою. Черговий, який отримав розпорядження, зобов'язаний повторити його і записати в оперативний журнал.

За оперативною схемою або макетові цей черговий намічає порядок операції. Якщо переключення виконують дві особи, то перша особа є старшою, роз’ясняє другій (виконавцю) завдання і послідовність його виконання.

В електроустановках напругою вище 1000 *В*, не обладнаних повністю блокованими від неправильних операцій роз'єднувачів, складні переключення проводяться за бланками. В бланку переключень виконується запис усіх операцій про увімкнення і вимкнення електрообладнання точно у тій послідовності, у якій ці операції повинні виконуватись.

Прості переключення на одному електричному приєднанні і переключення в електроустановках повністю обладнаних блокуванням роз'єднувачів від неправильної операції, можуть виконуватися без бланків.

Бкола переключень заповнює і підписує черговий який є безпосереднім виконавцем. Старший черговий контролюючий виконання операцій, перевіряє бланк і також його підписує. Старший черговий зачитує зміст операції виконавець повторює прочитане і приступає до виконання. Старший контролює дії виконавця і відразу відзначає в бланку виконання операції. При сумніві в

правильності операцій робота припиняється до вияснення правильного порядку переключень. Якщо черговий робить переключення одноосібно, то він зачитує послідовність операцій вказаних у бланку телефоном старшому черговому який віддав розпорядження. Цей черговий є контролюючою особою.

Дозвіл на переключення виконавець зобов'язаний одержати телефоном безпосередньо перед їх виконанням. Приєднання вмикають або вимикають з допомогою вимикачів.

Якщо роз’єднувач має ручний привід, то операції з ним виконують в діелектричних рукавицях з ізольованою основою. Вимикати і вмикати потрібно швидко, рішуче і до упора. Увімкнення і вимкнення роз’єднувачів виконується, як правило без навантаження. Роз’єднувачами допускається розмикати струми замикання на землю і зарядні струми повітряних і кабельних ліній не вище наведених в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Залежність струму замикання на землю і зарядного струму від напруги

Напруга, *кВ*	Струм замикання на землю, *А*	Зарядний струм на фазу, *А*
3 – 6 10 – 20 35	7,5 3,0 1,5	2,5 1,0 0,5

Дозволяється вимикати навантажувальний струм лінії до I≤15 *А* при напрузі U≤10 *кВ*.

Роз'єднувачі необхідно вмикати ривком. Якщо при цьому виникає дуга, то ножі необхідно довести до кінця. У протилежному випадку зворотний хід ножа викличе виникнення дуги й нещасний випадок. Вимикати роз'єднувачі треба, навпаки, повільно, особливо в початковий момент. Якщо з'явиться дуга при відході ножів від губок, то роз'єднувач необхідно увімкнути назад.

Роз'єднувачі відключають (включають) у діелектричних рукавицях. Роз'єднувачі з пофазним керуванням і з вертикальним розташуванням – у

діелектричних рукавицях, з використанням ізолюючих штанг і стоячи на ізолюючій підставці. Старшим може бути черговий, що має не меншу ніж IV кваліфікаційну групу. Прості перемикання на одному електричному приєднанні дозволяється виконувати оперативному персоналу, що має не нижче ніж IV кваліфікаційну групу, одноосібно.

Перевіряти відсутність напруги, накладати й знімати переносні заземлення дозволяється не менш ніж двом виконавцям.

В установках напругою до 1000 *В* апаратуру перемикає один працівник, що має III кваліфікаційну групу, якщо він черговий, IV кваліфікаційну групу, якщо він не є черговим.

Персонал, що виконує перемикання, повинен твердо знати, що у випадку зникнення напруги воно може бути подане знову без попередження як в умовах нормальної експлуатації, так і при аваріях.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Захист електротехнічних систем та електронної апаратури від пошкоджень, які викликані електромагнітним імпульсом ядерного вибуху

Створення напівпровідникових приладів, а потім і інтегральних схем, особливо пристроїв цифрової техніки на їх основі, і широке впровадження засобів в радіоелектронну військову апаратуру примусили військових фахівців з іншого оцінити загрозу ЕМІ. З 1970 року питання захисту зброї і військової техніки від ЕМІ сталі розглядатися міністерством оборони США як що мають вищу пріоритетність.

Механізм генерації ЕМІ полягає в наступному. При ядерному вибуху виникають гамма і рентгенівське випромінювання і утвориться потік нейтронів. Гамма-випромінювання, взаємодіючи з молекулами атмосферних газів, вибиває з них так звані комптонівські електрони. Якщо вибух здійснюється на висоті 20-40 км., То ці електрони захоплюються магнітним полем Землі і, обертаючись відносно силових ліній цього поля створюють струми, що генерують ЕМІ. При цьому поля ЕМІ когерентно підсумовуються у напрямі до земної поверхні,

тобто магнітне поле Землі виконує роль, подібну фазованою антеною грат. В результаті цього різко збільшується напруженість поля, а отже, і амплітуда ЕМІ в районах південніше і на північ від епіцентру вибуху. Тривалість даного процесу з моменту вибуху від 1 - 3 до 100 *нс*.

На наступній стадії, що триває приблизно від 1 *мкс* до 1 з, ЕМІ створюється комптонівськими електронами, вибитими з молекул багато разів відображеним гамма-випромінюванням і за рахунок непружного зіткнення цих електронів з потоком що випускаються при вибуху нейтронів. Інтенсивність ЕМІ при цьому виявляється приблизно на три порядки нижче, ніж на першій стадії.

На кінцевій стадії, що займає період часу після вибуху від 1 з до декількох хвилин, ЕМІ генерується магнітогідродинамічним ефектом, породжуваним збуреннями магнітного поля Землі струмопровідних вогняною кулею вибуху. Інтенсивність ЕМІ на цій стадії вельми мала і становить декілька десятків вольт на кілометр.

Найбільшу небезпеку для радіоелектронних засобів представляє перша стадія генерування ЕМІ, на якій відповідно до закону електромагнітної індукції через надзвичайно швидкого наростання амплітуди імпульсу (максимум досягається на 3 - 5 *нс* після вибуху) наведеної напруга може досягати десятків кіловольт на метр на рівні земної поверхні, плавно знижуючись в міру віддалення від епіцентру вибуху.

Амплітуда напруги, що наводяться ЕМІ в провідниках, пропорційна довжині провідника, що перебуває в його полі, і залежить від його орієнтації щодо вектора напруженості електричного поля.

Так, напруженість поля ЕМІ в високовольтних лініях електропередачі може досягати 50 *кВ/м*, що призведе до появи в них струмів силою до 12 *тис.А*.

ЕМІ генеруються і при інших видах ядерних вибухів - повітряному і наземному. Теоретично встановлено, що в цих випадках його інтенсивність залежить від ступеня асиметричності просторових параметрів вибуху. Тому повітряний вибух з точки зору генерації ЕМІ найменш ефективний. ЕМІ

наземного вибуху буде мати високу інтенсивність, проте вона швидко зменшується в міру віддалення від епіцентру.

Ідеальною захистом від ЕМВ стало б повне укриття приміщення, в якому розміщена радіоелектронна апаратура, металевий екран.

Разом з тим ясно, що практично забезпечити такий захист у ряді випадків неможливо, тому що для роботи апаратури часто потрібно забезпечити її електричну зв'язок із зовнішніми пристроями. Тому використовуються менш надійні засоби захисту, такі, як струмопровідні мережі або плівкові покриття для вікон, стільникові металеві конструкції для повітрозабірників і вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, які розміщуються по периметру дверей і люків.

Більш складною технічною проблемою вважається захист від проникнення ЕМІ в апаратуру через різні кабельні вводи. Радикальним вирішенням цієї проблеми міг би стати перехід від електричних мереж зв'язку до практично не схильним до дії ЕМІ волоконно-оптичних. Однак заміна напівпровідникових приладів у всьому спектрі виконуваних ними функцій електронно-оптичними пристроями можливо тільки у віддаленому майбутньому. Тому в даний час засобів захисту кабельних вводів найбільш широко використовуються фільтри, в тому числі волоконні, а також іскрові розрядники, металлоокисні варистори і високошвидкісні зенеревські діоди.

Найбільш раціональним підходом до проектування засобів захисту від ЕМІ кабельних вводів є створення таких роз'ємів, в конструкції яких передбачені спеціальні заходи, що забезпечують формування елементів фільтрів і встановлення вбудованих зенеревських діодів. Подібне рішення сприяє отриманню дуже малих значень ємності та індуктивності, що необхідно для забезпечення захисту від імпульсів, які мають незначну тривалість і, отже, потужну високочастотну складову. Використання роз'ємів подібної конструкції дозволить вирішити проблему обмеженою масо-габаритних характеристик пристрою захисту.

Складність вирішення завдання захисту від ЕМІ і висока вартість розроблених для цих цілей коштів і методів змушують піти на перших парах по

шляху їх вибіркового застосування в особливо важливих системах зброї і військової техніки. Першими цілеспрямованими роботами в цьому напрямку були програми захисту від ЕМІ стратегічної зброї. Такий самий шлях обраний і для захисту мають велику протяжність систем керування та зв'язку. Проте основним методом вирішення даної проблеми зарубіжні фахівці вважають створений так званих розподілених мереж зв'язку (типу "Гвен"), перші елементи яких вже розгорнуто на континентальній частині США.

Сучасний стан проблеми ЕМІ можна оцінити таким чином. Досить добре досліджені теоретично і підтверджено експериментально механізми генерації ЕМІ і параметри його вражаючої дії. Розроблено стандарти захищеності апаратури і відомі ефективні засоби захисту. Однак для досягнення достатньої впевненості в надійності захисту систем і засобів від ЕМІ необхідно провести випробування за допомогою імітатора. Що стосується повномасштабних випробувань систем зв'язку та керування, то це завдання навряд чи буде вирішена в доступному для огляду майбутньому.

Потужний ЕМІ можна створити не тільки в результаті ядерного вибуху.

Сучасні досягнення в області неядерних генераторів ЕМІ дозволяють зробити їх достатньо компактними для використання з звичайними і високоточними засобами доставки.

В даний час у деяких західних країнах ведуться роботи по генерації імпульсів електромагнітного випромінювання магнітодинамічними пристроями, а також високовольтними розрядами. Тому питання захищеності від впливу ЕМІ будуть залишатися в центрі уваги фахівців при будь-якому результаті переговорів про ядерне роззброєння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

З проведених досліджень можна зробити наступні висновок. Представлено моделювання та аналіз інверторних генераторів в мережах з послідовною компенсацією в умовах слабкої мережі. За умов слабкої мережі підвищення рівня послідовної компенсації може викликати проблеми коливальної стабільності через взаємодію режиму, пов'язаного з перетворювачем джерела напруги у слабкій мережі, і режиму, пов'язаного з резонансом мережі LC .

Представлено структуру моделювання з можливістю аналізу власних значень, аналізу факторів потужності і аналізу стабільності в частотній області на основі імпедансу. Основним внеском є глибоке виявлення потенційних проблем стабільності в мережах з послідовною компенсацією з високим проникненням вітрової енергії. Результати аналізу показують, що нестабільність спричинена взаємодією режиму резонансу LC, пов'язаного з рівнем послідовної компенсації, і режиму слабкої мережі, пов'язаного з параметрами керування перетворювачем джерела напруги, включаючи смугу пропускання фазового автопідстроювання частоти. Вища пропускна здатність фазового автопідстроювання частоти призводить до втрати стабільності режиму слабкої мережі.

Представлено одноступеневий гібридний підвищувальний перетворювач для одночасного живлення навантаження постійного та змінного струму в інверторних генераторах, підключених до мережі. Метою запропонованого гібридного підвищувального перетворювача є скорочення процесу перетворення до мінімуму для досягнення більш ефективної архітектури системи живлення на основі постійного струму порівняно зі звичайною структурою, яка включає перетворення DC/DC та DC/AC. Представлено критичні аспекти роботи гібридного підвищувального перетворювача, включаючи стратегію керування мережею та методологію гібридної широтно-імпульсної модуляції. Підтверджено, що гібридний підвищувальний перетворювач має здатність підтримувати плавний потік потужності між

виходами змінного та постійного струму, правильно регулюючи напругу шини постійного струму, зберігаючи при цьому стабільність замкнутого циклу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] S.-H. Huang, J. Schmall, J. Conto, J. Adams, Y. Zhang, and C. Carter, "Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: Ercot experience," in Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. IEEE, 2012, pp. 1–7.

[2] Андрійчук, В. А.; Філюк, Я. О. Акумулюючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок. Технічна електродинаміка, 2017.

[3] L. Fan, Z. Miao, and M. Zhang, "Subcycle overvoltage dynamics in solar pvs," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1847–1858, 2021.

[4] M. Zhang, Z. Miao, and L. Fan, "Reduced-order analytical model of grid-connected solar photovoltaic system for low-frequency oscillation analysis," IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021.

[5] ANDRIYCHUK, V. A.; FILYUK, Y. O. Система автономного живлення зовнішнього освітлення. Lighting Engineering & Power Engineering, 2017, 1: 17-22.

[6] J. Sun, "Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3075–3078, 2011.

[7] L. Fan, "Modeling type-4 wind in weak grids," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 10, no. 2, pp. 853–864, April 2019.

[8] J. Sun, Z. Bing, and K. J. Karimi, "Input impedance modeling of multipulse rectifiers by harmonic linearization," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 12, pp. 2812–2820, 2009.

[9] A. Alzahrani, "A hybrid dc–dc quadrupler boost converter for photovoltaic panels integration into a dc distribution system," Electronics, vol. 9, no. 11, p. 1965, 2020.

[10] O. Ray and S. Mishra, "Integrated hybrid output converter as power router for renewablebased nanogrids," in IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2015, pp. 001 645–001 650.

[11] L. M. Fern´andez, F. Jurado, and J. R. Saenz, “Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines,” Renewable energy, vol. 33, no. 1, pp. 129–140, 2008.

[12] N. P. Strachan and D. Jovcic, “Stability of a variable-speed permanent magnet wind generator with weak ac grids,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2779–2788, 2010.

[13] K. M. Alawasa, Y. A.-R. I. Mohamed, and W. Xu, “Modeling, analysis, and suppression of the impact of full-scale wind-power converters on subsynchronous damping,” IEEE Systems Journal, vol. 7, no. 4, pp. 700–712, 2013.

[14] Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с. Отримано з https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196.

[15] Навчальний посібник «ТЕХНОЕКОЛОГІЯ ТА ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА. ЧАСТИНА «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. Отримано з http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424