

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА
ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-
2

спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Олександр КОТЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Ганна МОСІЄНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та
прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Олександр КОТЮК

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації, характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. Основні принципи енергетичної політики України, для забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору з урахуванням національних інтересів. Цільова модель енергетичного балансу України 2020–2050 рр. (визначення цільових значень). Розробка стратегії енергетичного переходу України до енергонезалежності. Контроль напруги та частоти збалансованої/незбалансованої системи розподілу за допомогою системи SMES за наявності енергії вітру. Висновки. Список посилань

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 12 » _____ 10 _____ 2024 ____ р.**Керівник**

_____ Ганна МОСІЄНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

_____ Олександр КОТЮК
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

_____ (підпис)

Олександр КОТЮК
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

Юлія ОЛІЙНИК

РЕФЕРАТ

Магістерська робота виконана на 67 стор., містить 11 таблиці, 19 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 53 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

Глобальний розвиток систем постійного струму високої напруги (HVDC) у таких галузях, як відновлювані джерела енергії, взаємозв'язок асинхронних мереж або передача електроенергії на великі відстані, є безперечно важливим.

Незважаючи на те, що модульний багаторівневий перетворювач із напівмостовими осередками широко використовується, він чутливий до замикань постійного струму між полюсами, а час реакції захисту є критичним. Надійність і доступність мають першочергове значення: автоматичні вимикачі повинні мінімізувати наслідки будь-якої несправності перетворювача, одночасно забезпечуючи швидкий перезапуск.

Це дослідження зосереджене на аспектах моделювання для аналізу поведінки станцій HVDC під час міжполюсних замикань постійного струму з використанням автоматичних вимикачів змінного або постійного струму з різними параметрами. Запропонована модель може представляти основні проблеми, з якими стикаються комірки перетворювача під час несправностей постійного струму, такі як напівпровідникові надструми та перенапруги, дозволяючи правильну конструкцію осередків.

Ключові слова: МІСЦЕ НЕСПРАВНОСТІ, АВАРІЙНІ РЕЖИМИ, ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, ІНДИКАЦІЯ ПРОХОДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ, ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЙ, НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

ABSTRACT

The master's work is published on 67 pages, there are 11 tables, 19 figures that characterize the results of the research, there are 53 literary references.

The object of investigation is the operating modes of electrical lines.

The subject of investigation is electrical lines.

Meta robots – ADVANCED INFLECTION OF EMERGENCY MODES OF ROBOTS ON THE ENERGY SAFETY OF ELECTRICAL INTERRUPTIONS.

Stage of advancement: design institutes.

Economical effectiveness and significance of the robot: this robot has a high significance on a theoretical and practical level.

The global development of high voltage continuous current (HVDC) systems in areas such as the renewal of energy sources, the interconnection of asynchronous connections, and the transmission of electricity over large distances is extremely important.

It doesn't matter to those that the modular bagatorium transformer from napjmostovym sintered is widely vikorist, it is sensitive to the closure of a steady stream between the poles, and the hour of reaction of the zakhist is critical. Reliability and availability are paramount: automatic circuit breakers are responsible for minimizing the effects of any malfunction of the device, immediately ensuring a smooth restart.

This research focuses on aspects of modeling to analyze the behavior of HVDC stations during interpolar short-circuits of a stationary flow with the vicoristans of automatic circuit breakers of a changeable or stationary flow with different parameters. The proposed model can present the main problems with which the transformer valves are subject to faults in the permanent flow, such as conductor overflows and overvoltages, allowing for the correct design of the cores.

Keywords: FAILURE POINT, EMERGENCY MODES, ENERGY SAFETY, PASSING FAILURE INDICATION, ELECTRICAL FAILURES, PERMANENT STREAM, DEVELOPMENTAL JERELLA ENERGY, NON-TRADITIONAL DZHEREL ENERGY

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ, ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ З УРАХУВАННЯМ НАЦІОНАЛЬНИХ ІНТЕРЕСІВ	11
1.1. Цільова модель енергетичного балансу України 2020–2050 рр. (визначення цільових значень)	11
1.2. Розробка стратегії енергетичного переходу України до енергонезалежності	21
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	25
РОЗДІЛ 2. КОНТРОЛЬ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ ЗБАЛАНСОВАНОЇ/НЕСБАЛАНСОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ SMES ЗА НАЯВНОСТІ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ	27
2.1. Презентація системи моделювання	27
2.2. Визначення несправності	30
2.3. Стратегія захисту від аварійних режимів	30
2.3.1. Поведінка системи під час несправної роботи	31
2.3.2. Виявлення несправностей	32
2.4. Моделі для HVDC Link з MMC під час нормальної роботи	33
2.4.1. Конвертер	33
2.4.2. Стратегія контролю за процесами	35
2.5. Моделі для HVDC Link з MMC під час несправної роботи	39
2.5.1. Кабелі HVDC	39
2.5.1.1. Моделювання за допомогою pi-Sections	39
2.5.1.2. Моделювання за допомогою теорії біжучої хвилі	40
2.6. Моделювання конвертеру пристрою	40

2.7. Автоматичні вимикачі високої напруги (СВ)	42
2.7.1. Зауваження щодо автоматичних вимикачів постійного струму	42 46
2.7.2. Автоматичні вимикачі змінного струму	46
2.7.3. Результати моделювання	46
2.7.4. Виявлення несправностей	46
2.8. Порівняння між автоматичними вимикачами змінного струму та автоматичними вимикачами постійного струму	48 48
2.8.1. Осцилограми	48
2.8.2. Інтеграли імпульсних струмів	50
2.8.3. Поведінка автоматичного вимикача постійного струму (DCCB)	52
2.8.4. Перенапруги під час несправної роботи	54
2.8.5. Вплив внутрішнього часу комутації струму DCCB	55
2.8.5.1. Поведінка автоматичного вимикача постійного струму	55
2.8.5.2. Інтеграли імпульсних струмів	57
2.8.5.3. Перенапруги конденсаторів елемента	57
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	59
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	60
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

BIGT – тиристори із ізольованим затвором

BGCT – двомодові комутовані тиристори

CSC – перетворювач джерела струму

HVDC – постійний струм високої напруги

LCC – лінійно-комутовані перетворювачі

MMC – модульні багаторівневі перетворювачі

MMK – модульний багаторівневий перетворювач

TSO – оператор систем передачі електроенергії

VSC – перетворювач напруга-джерело

ЕМ – електричні мережі

ПС – підстанція

ВСТУП

Постійний струм високої напруги (HVDC) отримав значний розвиток за останні п'ятдесят років. Після ртутно-дугових клапанів, впровадження тиристора в 1972 році для проекту Eel River підтвердило потенціал твердотільних клапанів [11]. Сьогодні потужність, що перевищує 5 ГВт, передається через лінійно-комутовані перетворювачі (LCC) на відстані більше 2000 км [12]. За останні десять років модульний багаторівневий перетворювач (MMC), заснований на технології перетворювача напруги-джерела (VSC), став популярним для таких застосувань, що призвело до зниження витрат, меншого сліду та можливості «запуску з електричного струму». Ці функції особливо актуальні для застосувань відновлюваної енергії: наприклад, у Німеччині підключення до мережі віддалених морських вітряних електростанцій базується на цій топології.

LCC мають відносно високий лінійний імпеданс, оскільки вони належать до сімейства перетворювачів джерела струму (CSC), тому у випадку несправності постійного струму зростання струму досить повільне, щоб забезпечити захист за допомогою автоматичних вимикачів змінного струму [13]., які зазвичай працюють протягом 70 мс [14, 15]. Це обмеження струму відсутнє, коли MMC використовує напівмостові осередки [16], тому несправність постійного струму стає критичною проблемою. Модульний багаторівневий перетворювач не має центрального конденсатора шини постійного струму, але індуктори плеча сприяють обмеженню струму замикання [17]. Коли виникає збій постійного струму, перетворювач перетворюється на неконтрольований діод-випрямляч, вимагаючи, щоб компоненти витримували високі напруги та напруги струму, і мета цієї роботи полягає в дослідженні методів моделювання для правильного розміру перетворювача та вибору найбільш прийняттого захисту. . Базуючись на PLECS, модель спрямована на прогнозування потенційних проблем під час міжполюсних замикань постійного струму, враховуючи динаміку різних підсистем.

Глобальний розвиток систем постійного струму високої напруги (HVDC) у таких галузях, як відновлювані джерела енергії, взаємозв'язок асинхронних мереж або передача електроенергії на великі відстані, є безперечно важливим. Незважаючи на те, що модульний багаторівневий перетворювач із напівмостовими осередками широко використовується, він чутливий до замикань постійного струму між полюсами, а час реакції захисту є критичним. Надійність і доступність мають першочергове значення: автоматичні вимикачі повинні мінімізувати наслідки будь-якої несправності перетворювача, одночасно забезпечуючи швидкий перезапуск. Це дослідження зосереджене на аспектах моделювання для аналізу поведінки станцій HVDC під час міжполюсних замикань постійного струму з використанням автоматичних вимикачів змінного або постійного струму з різними параметрами. Запропонована модель може представляти основні проблеми, з якими стикаються комірки перетворювача під час несправностей постійного струму, такі як напівпровідникові надструми та перенапруги, дозволяючи правильну конструкцію осередків.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АВАРИЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

Об'єкт дослідження – аварійні режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ, ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ З УРАХУВАННЯМ НАЦІОНАЛЬНИХ ІНТЕРЕСІВ

1.1. Цільова модель енергетичного балансу України 2020–2050 рр. (визначення цільових значень)

Перехід до низьковуглецевого розвитку, що є частиною глобальних Цілей сталого розвитку (ЦСР) до 2030 року, має величезне стратегічне значення для України. Проголошений на саміті ООН у 2015 році та підтриманий Україною, цей перехід став однією з основних національних цілей країни. Його реалізація вимагає структурних змін в енергетичному секторі та формування нових відносин між ключовими учасниками енергетичних процесів: споживачами, виробниками, постачальниками та державою.

Ключовими аспектами цього переходу є:

1. Енергетичний перехід — суттєві структурні зміни в енергетичних системах, які включають модернізацію енергетичних балансів, зміну попиту та пропозиції енергії, а також коригування цінових механізмів на енергетичних ринках. Ці зміни зумовлюються глобальними трендами, такими як розвиток чистої енергетики та посилення вимог до екологічної стійкості.

2. Нова енергетична політика — необхідність реформування національної енергетичної політики для того, щоб забезпечити ефективний перехід до нової енергетичної моделі. Це включає розробку інструментів для забезпечення енергетичної безпеки країни, стимулювання розвитку відновлювальних джерел енергії та інтеграцію до європейських енергетичних мереж.

3. Запит суспільства — прагнення до доступної та чистої енергії, зменшення впливу на навколишнє середовище та боротьба зі змінами клімату. Українське суспільство прагне до сталого розвитку, що забезпечує рівність і благополуччя для всіх, відповідаючи національним інтересам.

Ці зміни потребують не лише впровадження нових технологій та підходів, але й перерозподілу ролей на енергетичних ринках, що дозволяє Україні стати частиною глобальних ініціатив у боротьбі з кліматичними змінами та досягненні сталого розвитку. Тому важливою задачею є створення відповідної інституційної структури, розробка стратегічних планів і залучення міжнародних інвестицій у розвиток низьковуглецевої енергетики.

Для реалізації національних інтересів України в сфері енергетичної безпеки, дійсно, важливо забезпечити кілька ключових напрямів:

1. Забезпечення потреб споживачів в енергії за економічно доступними (ціни та тарифи) та екологічно стійкими умовами (мінімізація викидів та забруднення). Це має включати ефективні механізми ціноутворення та покращення екологічних стандартів для енергетичних компаній.

2. Сталий розвиток та стійкість функціонування енергетичного сектору — важливо забезпечити надійність енергопостачання як в умовах нормального функціонування системи, так і в кризових ситуаціях, що передбачають збої в постачанні чи зміни на глобальному енергетичному ринку.

3. Конку rentність та відкритість енергетичних ринків — необхідно створити рівні умови для всіх учасників ринку, що дозволить знизити монополізацію, покращити якість послуг та забезпечити стабільне функціонування ринку.

4. Енергоефективність національної економіки — зменшення енергетичних витрат на виробництво товарів та послуг шляхом модернізації інфраструктури, запровадження енергоефективних технологій та підтримки інвестицій у ці напрямки.

5. Державний суверенітет у сфері енергетики — забезпечення контролю держави над критично важливими енергетичними об'єктами та інфраструктурою, що гарантує національну безпеку в умовах геополітичних викликів.

6. Диверсифікація джерел енергоресурсів та енергетичних технологій — стратегічно важливо зменшити залежність від одного джерела енергії чи

технології, зокрема шляхом розвитку відновлювальних джерел енергії, що дозволить забезпечити більш стабільне та незалежне енергопостачання.

Зміна національної політики повинна зосереджуватися на наступних ключових аспектах:

1. Переорієнтація від зупинки старіння енергетичних систем до розвитку конкурентних та гнучких низьковуглецевих енергетичних технологій. Це включає інвестиції в новітні технології, такі як відновлювальні джерела енергії, і підвищення гнучкості енергосистеми, що дозволяє адаптуватися до змінних умов попиту та постачання.

2. Заміна патерналістської підтримки на активне сприяння енергоефективній свідомості громадян. Це передбачає заохочення населення до ефективного використання енергії через освітні кампанії, субсидії для енергоефективних технологій та підтримку відповідального ставлення до споживання енергії.

Отже, мета державної політики — створити енергоефективну, екологічно чисту та конкурентоспроможну енергетичну систему, яка забезпечить енергетичну безпеку, сприятиме сталому розвитку економіки та відповідає національним інтересам України в умовах глобальних змін.

Основні принципи енергетичної політики України мають бути спрямовані на створення стійкої та ефективної енергетичної системи, яка відповідає національним інтересам, сприяє сталому розвитку та враховує екологічні та економічні вимоги. Ось основні принципи, які формують основу такої політики:

1. Пріоритет інтересів громадян — енергетична політика повинна забезпечувати доступність енергії для всіх категорій споживачів, зокрема для вразливих груп, при цьому забезпечуючи гідний рівень життя і захист інтересів населення.

2. Баланс інтересів бізнесу та держави — енергетичний сектор повинен забезпечувати не тільки національну енергетичну безпеку, а й

створювати умови для розвитку приватного бізнесу, інвестицій та інновацій, не забуваючи при цьому про соціальну відповідальність.

3. Баланс інтересів виробників і споживачів — необхідно знайти компроміс між економічними інтересами енергетичних компаній і потребами споживачів щодо доступних цін на енергію та високої якості послуг.

4. Розвиток власної ресурсної та технологічної бази — зменшення залежності від імпорتنих енергоносіїв через розвиток власних відновлюваних ресурсів та технологій є критично важливим для енергетичної незалежності.

5. Раціональне використання ресурсів — ефективне використання наявних ресурсів і максимізація віддачі від енергетичних технологій, зокрема через впровадження новітніх та високоефективних технологій енергетичного перетворення.

6. Відсутність надмірної залежності від будь-якого джерела, маршруту чи постачальника ресурсів і технологій — необхідно уникати ситуацій, коли енергетична система країни залежить від одного джерела чи маршруту, що може створювати ризики для національної безпеки. Це вимагає диверсифікації джерел енергії та маршрутів постачання.

7. Екологічна прийнятність та економічна ефективність — енергетична політика повинна поєднувати економічні вигоди з екологічними стандартами, зокрема через зменшення викидів CO₂ та інших забруднювачів, використання відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності.

Орієнтири на шляху до досягнення цих принципів включають:

- Висококонкурентні ринки — створення умов для розвитку конкурентного середовища на енергетичних ринках, що дозволяє знизити ціни та підвищити ефективність.
- Розподілені генеруючі потужності з переважною часткою відновлюваних джерел енергії, що дозволяє знизити залежність від централізованих джерел та зменшити вуглецеві викиди.

- Інтелектуальна інфраструктура — розвиток сучасних технологій для управління енергетичними системами, зокрема через використання "розумних мереж" та інтелектуальних лічильників для точнішого вимірювання споживання.

- Управління споживанням енергії з боку споживачів — заохочення до енергоефективного споживання через інноваційні рішення та підтримку свідомого ставлення до енергетичних ресурсів серед громадян.

Загалом, енергетична політика повинна бути гнучкою та адаптованою до нових викликів, з урахуванням як національних, так і глобальних тенденцій у енергетичному секторі.

Основні принципи енергетичної політики України мають забезпечити сталий розвиток енергетичного сектору з урахуванням національних інтересів, потреб громадян та захисту навколишнього середовища. Ось розгорнутий опис основних принципів, які становлять основу цієї політики:

1. Пріоритет інтересів громадян — енергетична політика повинна забезпечувати доступність енергії для всіх громадян, у тому числі вразливих груп населення. Важливо забезпечити економічно прийнятні ціни та високу якість послуг для споживачів.

2. Баланс інтересів бізнесу та держави — необхідно створювати умови для розвитку бізнесу в енергетичному секторі, забезпечуючи при цьому контроль та регулювання з боку держави для забезпечення енергетичної безпеки, стабільності ринку і справедливих умов для всіх учасників.

3. Баланс інтересів виробників і споживачів — важливо знайти компроміс між потребами споживачів у доступній енергії та інтересами виробників щодо фінансової стійкості і розвитку. Це забезпечить конкурентоспроможність ринку та справедливі ціни на енергію.

4. Розвиток власної ресурсної та технологічної бази — ключовим елементом є зниження залежності від імпортних енергоносіїв і технологій, а також стимулювання розвитку відновлюваних джерел енергії та інноваційних енергетичних технологій.

5. Раціональне використання ресурсів та впровадження ефективних технологій — необхідно запроваджувати технології з високими коефіцієнтами енергоефективності та раціонально використовувати енергетичні ресурси, щоб забезпечити їх сталий розвиток та знизити витрати на енергію.

6. Відсутність надмірної залежності від будь-якого джерела чи постачальника — стратегічно важливо уникати великої залежності від одного джерела чи постачальника енергії. Диверсифікація джерел та маршрутів постачання забезпечить стабільність і безпеку енергетичної системи.

7. Екологічна прийнятність та економічна ефективність — важливо поєднувати економічну вигоду з екологічними вимогами, зокрема через впровадження чистих енергетичних технологій, зменшення викидів парникових газів та використання відновлюваних джерел енергії.

Орієнтири на шляху до реалізації цих принципів включають:

- Висококонкурентні ринки, де встановлюються справедливі та прозорі правила гри для всіх учасників.
- Розподілені генеруючі потужності, що базуються на відновлюваних джерелах енергії, що дозволяє знизити вуглецеві викиди та забезпечити більш ефективне і гнучке постачання енергії.
- Інтелектуальна інфраструктура, що дозволяє оптимізувати енергетичні потоки, знижувати втрати та забезпечувати інтеграцію відновлюваних джерел енергії в енергетичну мережу.
- Управління споживанням енергії з боку споживачів, що включає мотивацію до енергоефективного споживання та впровадження технологій, які дозволяють більш точно управляти енергоспоживанням.

Ці принципи і орієнтири забезпечують шлях до стабільної та конкурентоспроможної енергетичної системи, яка відповідає національним інтересам України і підтримує глобальні цілі сталого розвитку.

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) у 2019 році представило Світовий енергетичний прогноз, який містить три ключових сценарії розвитку глобальних енергетичних ринків:

1. Сценарій поточної політики:

- У цьому сценарії уряди не запроваджують змін у чинній політиці. Ситуація на енергетичних ринках розвивається в межах існуючих політичних та економічних умов без нових ініціатив або реформ.

- Це забезпечує прогнозоване зростання попиту на енергію, але без значних змін у структурі енергетичних джерел чи урахування кліматичних цілей.

2. Сценарій констатованих політик:

- Цей сценарій, раніше відомий як сценарій нової політики, враховує лише політичні ініціативи, які вже були оголошені урядами. Він передбачає, що попит на енергію зростатиме на 1% щорічно до 2040 року.

- У цьому сценарії перевага надається низьковуглецевим джерелам енергії, зокрема сонячній фотоелектриці, яка забезпечує дві третини приросту енергоспоживання, а природний газ покриває ще третину.

- Попит на нафту та вугілля зменшується, водночас збільшується використання технологій для акумулювання енергії. Зростання викидів сповільнюється, але не досягається рівня, що відповідає цілям сталого розвитку.

3. Сценарій стійкого розвитку:

- Цей сценарій орієнтований на досягнення цілей сталого розвитку в енергетичному секторі, зокрема на Ціль 7 (доступ до енергії), Ціль 3 (очищення повітря) та Ціль 13 (реагування на зміну клімату).

- Основною метою є обмежити підвищення глобальних температур до 1,5°C у XXI столітті (відповідно до Паризької угоди).

- У цьому сценарії зростає роль атомної енергетики, частка вугілля значно знижується, а газові потужності залишаються важливим елементом гнучкості енергетичних систем, зокрема за допомогою технологій захоплення, використання та зберігання вуглецю (CCUS).

- Цей сценарій передбачає масштабні трансформації в усіх секторах енергетики, включаючи виробництво та споживання енергії.

Ці три сценарії відображають різні підходи до вирішення глобальних енергетичних та екологічних проблем, із різним рівнем амбіцій та змін у політиках, спрямованих на досягнення сталого розвитку.

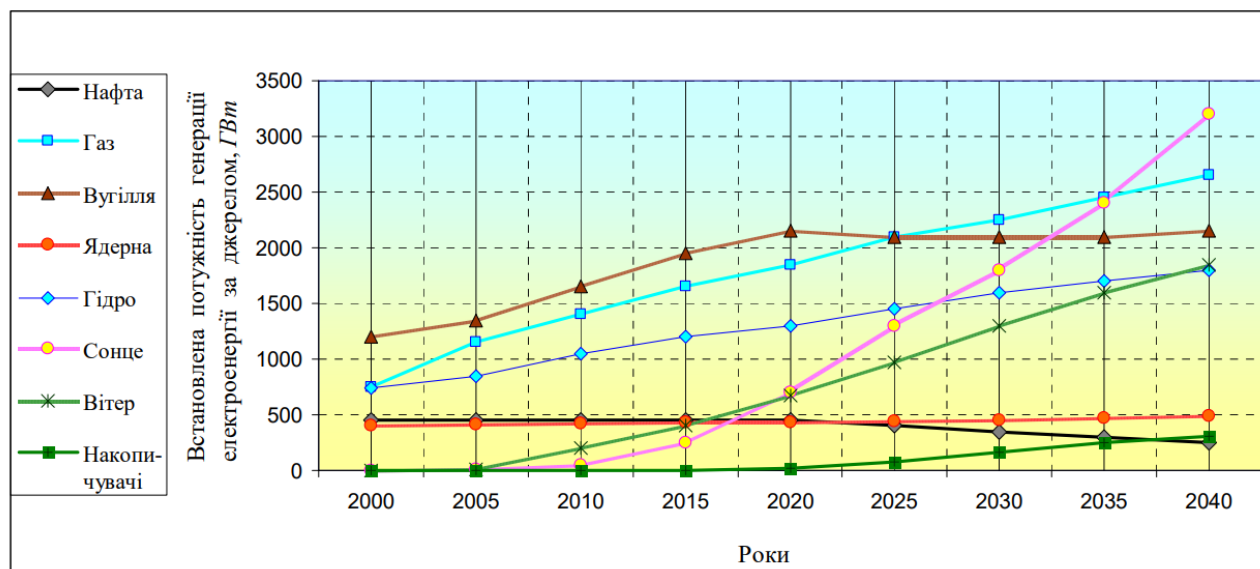


Рисунок 1.1 – Сценарій констатованих політик за прогнозом МЕА

Сценарії констатованих політик та стійкого розвитку мають спільні риси завдяки широкому використанню інновацій у галузі енергетики. Ось основні спільні риси, що вказують на розвиток більш стійких і ефективних енергетичних систем:

1. Електрична енергія як основний енергоносіє:
 - В обох сценаріях електрична енергія стає ключовим енергоносієм, на якому базується енергетична та екологічна безпека. Вона буде використовуватись не тільки для забезпечення промисловості та побутових потреб, але й для транспорту та інших секторів, що сприяє скороченню викидів вуглецю.
2. Енергоефективність та підвищена ефективність використання матеріалів:
 - В обох сценаріях передбачається зростання енергоефективності та раціональне використання ресурсів. Це включає використання більш

ефективних технологій і матеріалів для зменшення енергоспоживання та оптимізації виробничих процесів.

3. Жорсткі вимоги щодо викидів:

- Обидва сценарії передбачають поступове підвищення цін на CO₂, що стане економічним стимулом для зменшення викидів парникових газів.
- Сценарій стійкого розвитку передбачає найбільш суттєве підвищення ціни на CO₂ до 100–140 дол. США за тону.
- Для промислових об'єктів, що використовують тверде паливо, передбачаються більш жорсткі норми викидів SO₂ та NO, а також обмеження на вміст сірки в нафтопродуктах (наприклад, для важкого мазуту до 1% та для бензину та дизелю – до 10 мг/кг).

Такі зміни ставлять за мету не тільки поліпшити екологічні показники, але й забезпечити довгострокову стійкість енергетичних систем.

Згідно з дослідженням Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), основними факторами для досягнення сталого розвитку в енергетиці є електрифікація та енергоефективність. У 2050 році частка електричної енергії в енергетичному балансі має зрости до 50% порівняно з 20% у 2020 році. Це дозволить значно зменшити викиди парникових газів і досягти Цілей сталого розвитку (ЦСР) у галузі клімату.

У сценарії стійкого розвитку Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) поряд із розвитком відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) розглядається розширення атомних потужностей. Це відповідає політиці США, де Стратегія забезпечення національної безпеки акцентує на важливості ядерної енергетики для національної безпеки. Американська стратегія підкреслює, що ядерна енергетика є ключовим компонентом для забезпечення стійкості критичної інфраструктури, незважаючи на те, що частка атомної енергетики в США складає лише 20% від загального виробництва електроенергії.

Таким чином, як для США, так і для інших країн, атомна енергетика може відігравати важливу роль у забезпеченні енергетичної безпеки та стійкості енергосистем в умовах енергетичного переходу.

Україна дійсно має значний потенціал для розвитку як традиційних, так і відновлювальних джерел енергії, що може сприяти не лише забезпеченню енергетичної безпеки, а й стимулюванню інноваційного розвитку економіки. Це важливо для досягнення як національних, так і глобальних цілей у боротьбі зі зміною клімату.

Потенціал України в енергетиці:

1. Традиційні енергоресурси:

- Україна володіє значними запасами нафти, газу, вугілля та урану, що дозволяє країні підтримувати енергетичну безпеку та зменшувати залежність від імпортованих енергоносіїв. Традиційні джерела енергії можуть ще довго бути важливими елементами енергетичної політики.

2. Відновлювальна енергетика:

- Україна має величезний потенціал для розвитку відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячна, вітрова, біоенергетика та гідроенергія. Це дозволяє зменшити викиди парникових газів та забезпечити сталий розвиток країни, сприяючи енергетичній незалежності та стабільності енергосистеми.

Проблеми конкуренції між технологіями:

Однак, як ви зазначили, нині існує проблема спотвореної конкуренції між різними енергетичними технологіями в Україні. Лобісти певних галузей, впливаючи на державну політику, отримують преференції для технологій, що не завжди є оптимальними з економічної чи екологічної точки зору. Це може призводити до:

- Витратних технологій з низьким коефіцієнтом перетворення енергії, що збільшує витрати на енергоресурси для споживачів.
- Негативного впливу на енергосистему та довкілля, що суперечить цілям сталого розвитку.

Зокрема, застосування недосконалих або застарілих технологій може уповільнити процеси переходу до більш чистих та ефективних енергетичних рішень, таких як відновлювані джерела енергії.

Потреба в реформуванні політики:

Для реалізації потенціалу країни в енергетиці важливо провести реформування, яке включатиме:

1. Забезпечення прозорості і справедливої конкуренції на енергетичних ринках, щоб усі технології мали рівні умови для розвитку.
2. Заохочення інновацій у сфері енергетики, особливо для розвитку ВДЕ, ефективного використання енергетичних ресурсів та зниження викидів.
3. Впровадження політик та регуляцій, які сприятимуть інтеграції чистих технологій у національну енергетичну систему, включаючи механізми фінансування, зниження ризиків для інвесторів та адаптацію енергосистеми до нових реалій.

Таким чином, важливим є створення таких умов, коли конкуренція між джерелами енергії буде чесною, а вибір технологій — базуватиметься на їхній ефективності та сталості.

1.2. Розробка стратегії енергетичного переходу України до енергонезалежності

Підготовка оптимального цільового енергетичного балансу для України на період до 2050 року повинна враховувати кілька ключових аспектів, що визначають майбутнє енергетичної системи країни. Ось основні напрямки, які слід врахувати:

1. Електроенергія як основний енергоносіє
 - Планується, що електроенергія стане основним енергоносієм в енергобалансі України, з часткою не менше ніж 70%. Для цього необхідно забезпечити розвиток основних відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячна, вітрова та біоенергетика, а також ядерної та гідроенергетики.

- Для досягнення цілей до 2050 року потрібно забезпечити введення в експлуатацію не менше 6 ГВт потужностей АЕС (щоб замінити виведені з експлуатації енергоблоки) та 1,5 ГВт потужностей ГЕС.

2. Водні ресурси та розвиток гідроенергетики

- Враховуючи обмеженість водних ресурсів великих річок (Дніпро, Дністер) та очікувані зміни клімату, які зменшать доступність води для сільського господарства, можливості для розвитку класичних ГЕС обмежуються.

- Для розвитку гідроенергетики необхідно зосередитися на гідроакumuлюючих потужностях, які можуть забезпечити маневрування в енергетичній системі та оптимізувати роботу енергомереж в умовах змінної генерації від ВДЕ.

3. Децентралізована енергетика

- Мала гідроенергетика, біоенергетика, малі сонячні електростанції (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС) повинні стати основою для забезпечення місцевих енергетичних потреб. Це дозволить значно зменшити залежність від централізованих джерел енергії та сприятиме розвитку децентралізованої розподіленої електрогенерації.

- Така модель розподіленої енергетики підвищить стійкість Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, даючи змогу зменшити вразливість до зовнішніх впливів, таких як перебої в постачанні енергоносіїв або збої в централізованих електричних мережах.

Ці аспекти необхідно враховувати при розробці стратегії енергетичного переходу, щоб забезпечити сталий розвиток енергетичної системи України, зниження викидів парникових газів і досягнення цілей сталого розвитку.

У підготовці оптимального енергетичного балансу для України на період 2020–2050 рр. варто враховувати кілька важливих умов і напрямків для забезпечення сталого розвитку енергетичної системи. Ось основні пункти, які треба врахувати:

4. Умови подальшої роботи ТЕС та ТЕЦ

- Поетапне підвищення плати за CO₂: Від 2021 року та до 2050 року передбачено поетапне підвищення ціни на викиди CO₂, з доведенням до рівня середньоєвропейського.

- Оснащення ТЕС та ТЕЦ системами CCUS: Усі теплові електростанції та теплові електричні центри повинні бути оснащені системами захоплення, утилізації та зберігання вуглецю (CCUS), щоб зменшити викиди парникових газів.

5. Покриття потреб ОЕС України в регулюючих потужностях

- За оцінкою потреб у регулюючих потужностях, ОЕС України повинна покривати їх за рахунок:

1. ГЕС та ГАЕС – для маневрування та регулювання балансу електричної енергії.

2. Газових ТЕС зі швидким стартом і великою кількістю пусків/зупинок (особливо газопоршневих станцій).

3. Акумулюючих потужностей – для стабільної роботи енергосистеми.

6. Розвиток ВДЕ з негарантованою потужністю

- Паралельне введення маневрових потужностей: Разом із введенням великих сонячних та вітрових електростанцій необхідно ввести достатні обсяги маневрових та акумулюючих потужностей для забезпечення стабільної роботи ОЕС України.

- Фінансування "зелених" тарифів: Важливо вирішити проблему фінансового забезпечення для виконання зобов'язань держави щодо викупу електроенергії, виробленої з відновлювальних джерел, за "зеленим" тарифом.

7. Роль водню в енергетичному балансі

- Водень може стати важливим елементом енергетичного балансу України, особливо за умови наявності дешевої електроенергії з ВДЕ. Водень дозволить:

- Підвищити гнучкість та стійкість ОЕС України.

○ Покращити ядерну безпеку, якщо водень вироблятиметься за допомогою ядерної енергії, що дозволить забезпечити маневрування ядерними потужностями, не впливаючи на стабільність ядерної реакції.

○ Компенсувати стохастичний характер генерації від СЕС та ВЕС, забезпечуючи постійну доступність енергії.

8. Перехід до водню та електрики в транспортному секторі

• До 2040 року водень та електрика повинні стати домінуючими енергоносіями для транспорту, що допоможе скоротити залежність від викопних палив і сприятиме декарбонізації.

Ці заходи формують основні напрямки розвитку енергетичної системи України, зокрема, щодо переходу на відновлювальні джерела енергії, зниження викидів, забезпечення енергетичної безпеки та стимулювання інновацій в енергетичному секторі.

Таблиця 1.1 – Цільовий енергетичний баланс України на 2020–2050 рр.

Рік/ ресурс, частка у балансі, %	Нафта та нафтопродукти	Природний газ	Вугілля	Ядерна	Гідро	Сонце (+вітер)	Вітер	Біо- та інші ВДЕ	Водень	Накопичувачі енергії
2000*	8,96	46,52	28,8	15,02	0,72	0,0004		0,2		
2005*	10,16	46,56	26,45	16,65	0,77	0,0023		0,19		
2010*	9,96	41,74	28,91	19,38	0,94	0,0030		1,12		
2015*	11,71	28,92	30,35	25,05	0,51	0,1487		2,33		
2018*	14,47	27,53	29,61	23,82	0,96	0,2113		3,43		
2020	14,54	26	29	24	1	0,65	0,7	4	0,01	0,1
2025	12,2	26	28	24	1	2	2	4,5	0,1	0,2
2030	10	25	25	24	1	4	4	5	1	1
2035	8	25	22	22	1	6	6	6	2	2
2040	6	25	20	18	1	8	8	7	4	3
2045	5	22	17	17	1	10	9	8	6	5
2050	5	20	12	17	1	12	10	8	9	6

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Оптимальний цільовий енергетичний баланс для України має бути комплексним, не обмежуючись лише аспектами енергетичної безпеки. Він повинен також враховувати загальні питання національної безпеки, що включає в себе розвиток економіки, зменшення соціальних нерівностей та забезпечення добробуту для всіх громадян. Тому для досягнення цих цілей необхідно створити людиноцентричну систему безпеки, яка орієнтується на соціальні, економічні та екологічні аспекти розвитку держави.

Основні компоненти цієї стратегії:

1. Соціально-економічний розвиток: Енергетичний баланс має сприяти розвитку національної економіки та створенню нових робочих місць, підвищуючи якість життя громадян через енергоефективні технології та відновлювальні джерела енергії.
2. Скорочення нерівності: Розвиток децентралізованої енергетики, такої як малі сонячні та вітрові електростанції, може сприяти забезпеченню енергетичних потреб на місцевому рівні, зменшуючи нерівність між різними регіонами та соціальними групами.
3. Добробут для споживачів: Система енергетичного балансу повинна гарантувати доступ до дешевої та чистої енергії для всіх верств населення, зокрема через стимулювання розвитку ВДЕ (відновлювальних джерел енергії) і зниження витрат на енергію.
4. Екологічна безпека: Паралельно з економічними та соціальними аспектами важливо орієнтуватися на збереження довкілля, підтримуючи зменшення викидів парникових газів та перехід до енергетичних технологій, що не шкодять природним ресурсам.
5. Підвищення енергетичної незалежності: Забезпечення енергетичної безпеки країни через використання внутрішніх енергоресурсів і диверсифікацію джерел енергії зменшує залежність від зовнішніх постачальників і підвищує національну безпеку.

Таким чином, оптимальний енергетичний баланс України має не лише сприяти енергетичній безпеці, але й бути основою для розвитку економіки та забезпечення стійкого соціального розвитку.

РОЗДІЛ 2. КОНТРОЛЬ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ ЗБАЛАНСОВАНОЇ/НЕСБАЛАНСОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ SMES ЗА НАЯВНОСТІ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

2.1. Презентація системи моделювання

Було вибрано симетричну монопольну лінію HVDC, показану на рисунку 2.1, конфігурація, яка зазвичай використовується для офшорних вітряних парків. Загальна напруга ланцюга постійного струму вдвічі перевищує напругу полюс-земля, що дозволяє зменшити струм ланцюга постійного струму для нижчої номінальної напруги кабелів. CIGRE, Рада з великих електричних систем, працює над високовольтним обладнанням і морськими системами. За допомогою робочих груп, які зазвичай складаються з людей з різних операторів систем передачі (TSO), він розробляє рекомендації щодо тестування та проектування таких систем, а також розробив загальну систему тестування мережі постійного струму [18]. Кожна мережа з'єднана з перетворювачем через дельта-зірковий трансформатор або двокутний трансформатор, відстань передачі постійного струму дорівнює 200 км. Оскільки симетрична монопольна конфігурація не має природного зв'язку із землею, необхідно використовувати зіркоподібний реактор [19, 20].

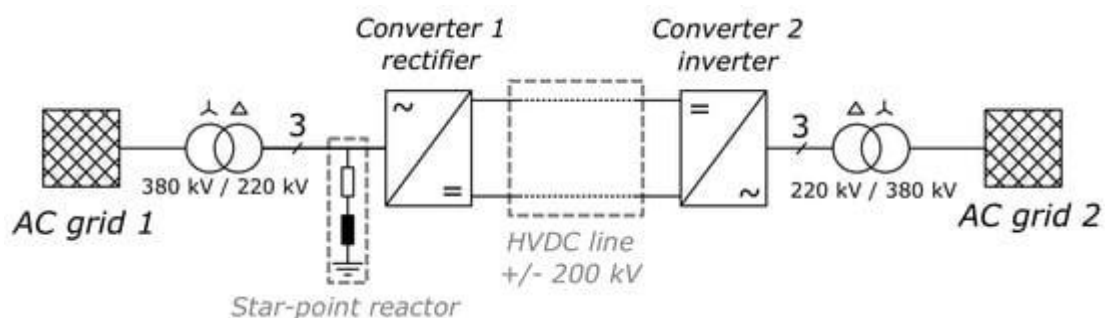


Рисунок 2.1. – Огляд симетричної монопольної високовольтної лінії постійного струму (HVDC); Перетворювач 1 працює як випрямляч, а перетворювач 2 працює як інвертор

Модульний багаторівневий перетворювач (ММК) представлений на рисунку 2.2 а. Кластер складається з N клітинок, як показано на рисунку 2.2b . Кластер поводить ся як кероване джерело напруги, тоді як індуктори плеча дозволяють регулювати струми плеча. Перемикачі T_1, T_2, D_1 і D_2 є загальними та «ідеальними»: вони поведуть ся як двоквADRANTні пристрої, де антипаралельна асоціація T_1 і D_1 (або T_2 і D_2) дозволяє струму текти в будь-якому напрямку, залежно від T_1 . Ідеальні форми сигналів представлені на рисунку 2.3 і показують, що струми плеча містять як компонент постійного струму, так і компонент частоти сітки. Між верхнім і нижнім плечами компонент змінного струму зсувається на 180° . Щоб отримати двонаправлений потік потужності, комірки повинні забезпечувати або оборотність струму, або оборотність напруги, і фактично оборотність струму вибирається для отримання менших середньоквадратичних струмів і легшої інжекції реактивної потужності [21]. Використовуються напівмостові комірки з загальними пристроями вимикання, як показано на рисунку 2.2 б.

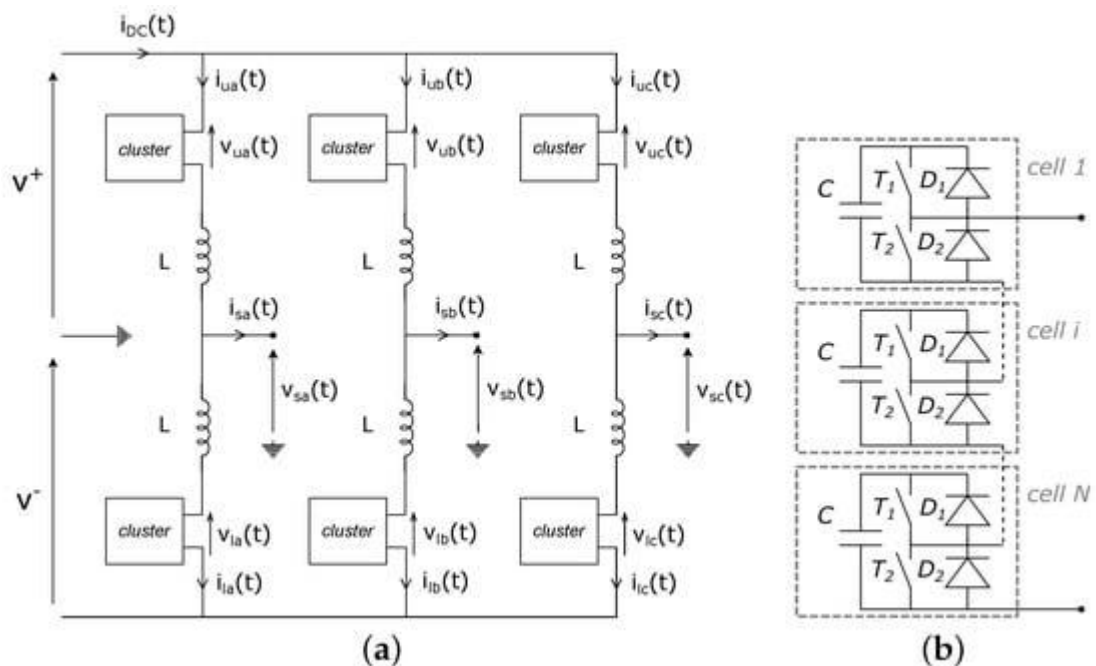


Рисунок 2.2. – Огляд модульного багаторівневого конвертера. а) Модульний багаторівневий перетворювач. б) Кластер з напівмостовими клітинами

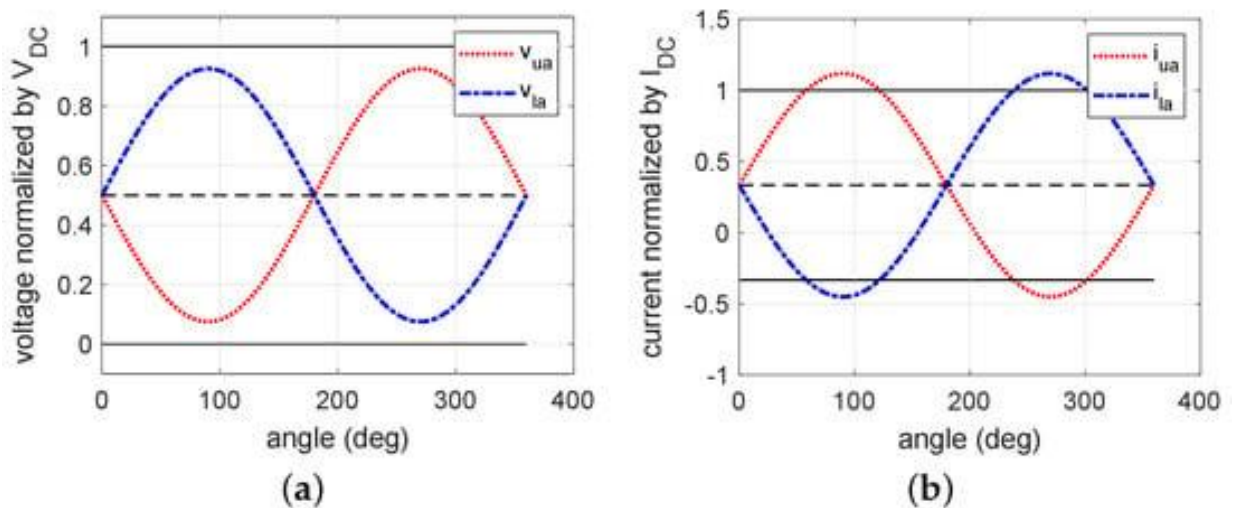


Рисунок 2.3. – Плечі напруги та плечі струмів ММС з напівмостовими елементами. (a) Напруги. (b) Струму

Перевагами модульного багаторівневого перетворювача є низький di/dt , оскільки струми плеча є синусоїдальними, низький dv/dt через велику кількість рівнів і високий ступінь модульності. Ця функція все більше й більше цінується в силовій електроніці, оскільки вона знижує витрати та забезпечує спрощення обслуговування. Структура ММС також підходить для широкого діапазону потужностей. У сфері HVDC кількість комірок N зазвичай становить кілька сотень: загальний коефіцієнт гармонійних спотворень настільки низький, що фільтри більше не потрібні [22]. Основні характеристики перетворювача зведені в таблицю 2.1. Активна потужність 800 МВт є типовою згідно з останніми проектами HVDC-ММС [12]. Еквівалентний опір клітини R_{cel} являє собою втрати потужності однієї комірки, головним чином через втрати провідності напівпровідників. Загальний опір на руку становить NR_{cel} .

Таблиця 2.1. – Електричні характеристики лінії ПСВН

Ім'я	символ	Значення
Активна потужність	П	800 МВт
Напруга шини постійного струму	$V_{DC, nom}$	$\pm 200\text{kV}$
Руха індуктора	Л	29 мГн
Ємність елемента	С	10 мФ
Кількість комірок	Н	200
Еквівалентний опір клітини	R_{cell}	1,361 мΩ

2.2. Визначення несправності

Несправність між полюсами постійного струму визначається як коротке замикання між позитивним і негативним полюсами перетворювача. У стаціонарному стані, якщо нічого не робити для переривання потоку електроенергії, струми замикання можуть сягати від п'яти до десяти номінальних значень [18]. Такі ситуації можуть призвести до руйнування багатьох компонентів перетворювача, що вимагатиме тривалих зупинок. Таким чином, цей вид несправності є критичним і потребує належного лікування. Тут замикання постійного струму між полюсами представлено послідовним з'єднанням резистора та котушки індуктивності; який необхідний для отримання узгоджених форм сигналу від програмного забезпечення моделювання.

2.3. Стратегія захисту від аварійних режимів

Реакція ММС на замикання між полюсами постійного струму залежить від топології комірок. Внутрішня можливість проходження несправності

постійного струму досягається, коли перетворювач здатний запобігти передачі енергії від змінного струму до сторони постійного струму. Це вимагає розв'язки між мережевими напругами змінного струму та напругою ланцюга постійного струму, чого немає у напівмостових елементах [23]. Лише повні мостові комірки та гібридні структури, що використовують різні типи комірок в одному кластері, можуть забезпечувати можливість проходження через пошкодження постійного струму. Ця функція, хоча й суттєва для додатків HVDC, несе важливу вартість, оскільки призводить до збільшення кількості пристроїв, отже, вищої вартості та нижчої ефективності [24, 25]. Отже, ММС на основі напівмостових осередків повинні покладатися на додатковий захист від замикань постійного струму між полюсами.

2.3.1. Поведінка системи під час несправної роботи

Слід розрізняти багато кроків, коли виникає несправність [26, 27]:

1. Поширення несправності, в першу чергу зачіпає найближчі елементи;
2. Виявлення несправності, логічний контролер вирішує зі списку умов, чи сталася несправність постійного струму чи ні;

3. Блокування керованих пристроїв; Біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) втрачають насиченість, якщо їхні струми у відкритому стані перевищують їхні номінальні значення, що швидко призводить до їх руйнування, якщо їх вчасно не вимкнути [28]. У випадку з інтегрованими тиристорами з комутацією затвора (IGCT) проблеми подібні: вони можуть бути вимкнені за межами безпечної робочої зони, оскільки струми плеча швидко зростають. Після блокування керованих пристроїв перетворювач поводить себе як діод-випрямляч [20, 23].

4. Час відключення, починається, як тільки виявлено несправність. Цей час залежить від використовуваної технології розбивання.

5. Усунення несправностей, несправні системи ізольовані від решти мережі, а залишкова енергія розсіюється. Відповідна тривалість сильно залежить від конфігурації мережі, яка включає кабелі та трансформатори змінного струму.

2.3.2. Виявлення несправностей

Дві проблеми особливо важливі для виявлення несправностей [29, 30]:

- Швидкість, тому що повільність – це замкнуте коло: чим повільніші захисти, тим вищі напруги струму та напруги; це означає, що швидкий захист призводить до менших струмів замикання, що дозволяє, наприклад, нижчі номінальні значення;
- Надійність, виявлення несправностей не повинні давати «помилкових спрацьовувань» під час нормальної роботи або коли виникають збої, але все ще не пропускати жодних справжніх несправностей, для яких розроблено захист.

Для досягнення задовільного компромісу між швидкістю та надійністю реалізовано наступний принцип:

1. Захист від зниженої напруги на ланці постійного струму [30, 31], занадто велике падіння напруги вважається через коротке замикання. Навіть якщо метод часто згадується в літературі, чисельні значення систематично не пропонуються 50% номінальної напруги ланцюга постійного струму $V_{DC, nom}$, помрозглядається як релевантний та обмежувальний поріг [32];

2. Захист від надструму в плечах [33], як уже згадувалося, контрольовані пристрої вимикаються, щоб уникнути їх руйнування, якщо струми плеча занадто високі. У випадку інтегрованих коמוтованих затвором тиристорів (IGCT) максимальний струм встановлено на 75% максимального регульованого струму відключення, оскільки це значення не повинно бути перевищено [34]. Для біполярних транзисторів з ізольованим затвором, як правило, було б обрано вище значення 90% пікового прямого струму [35];

3. Захист від надструму для ланки постійного струму [30, 36], порогове значення 150% максимального номінального струму ланцюга постійного струму [37].

Швидші та надійніші методи існують, наприклад, на основі теорії біжучої хвилі або систем зв'язку між перетворювачами [30, 31, 38]. Системи зв'язку теоретично можуть бути дуже ефективними, оскільки дані про виявлення несправності можуть передаватися на інші перетворювачі лінії HVDC до того, як несправність пошириться. Затримка 100 мкс застосовується до всіх програмних засобів захисту між елементами керування та силовими напівпровідниками, щоб урахувати внутрішні джерела затримки в системі.

2.4. Моделі для HVDC Link з MMC під час нормальної роботи

2.4.1. Конвертер

Згідно з таблицею 2.1, перетворювач містить майже 5000 дискретних пристроїв. Імітаційна модель, що реалізує всі пристрої, матиме важливий час обчислення, оскільки кількість кроків буде більшою, оскільки система простору станів більша. Багато посилань [21, 39] пролили світло на цінність використання усередненої моделі для усунення цього недоліку. Принцип полягає у великій кількості комірок у HVDC-MMC, оскільки вплив перемикачів не видно на формах хвилі; застосовні гіпотези підсумовані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. – Припущення, що розглядаються для моделювання кластера модульного багаторівневого перетворювача (ММС)

Ім'я	символ	Значення
Активна потужність	П	800 МВт
Напруга шини постійного струму	$V_{DC, nom}$	$\pm 200\text{kV}$
Рука індуктора	Л	29 мГн
Ємність елемента	С	10 мФ
Кількість комірок	Н	200
Еквівалентний опір клітини	R_{cell}	1,361 мΩ

Вимикачі живлення вважаються «ідеальними», оскільки зміна їхнього стану відбувається миттєво, без втрат. Конденсатор комірки вважається ідеальним, його модель може бути складнішою для конкретних потреб (наприклад, саморозряд або старіння). Перехід від цієї моделі до усередненої моделі вимагає низьких гармонійних спотворень через метод модуляції: ця умова повністю виконується, оскільки поза певною кількістю комірок на кластер вимоги до фільтрів усуваються [39]. Таким чином, послідовну асоціацію комірок можна замінити однією коміркою, щоб отримати усереднену модель кластера, що містить:

- Еквівалентний конденсатор;
- Джерело напруги, кероване миттєвим шпаруватістю;
- Джерело струму, кероване миттєвим шпаруватістю.

Це спрощення показано на рисунку 2.4b. α це миттєвий робочий цикл, що забезпечується внутрішніми контурами керування. Слід зазначити, що вихідні сигнали більше не залежать ні від стратегії модуляції, ні від методу балансування комірки; їхнім впливом знехтовано, як детально показано в таблиці 2.3. З іншого боку, динаміка перетворювача залишається точно змодельованою, оскільки внутрішні контури керування та керування напругою та потужністю все ще реалізовані. Рисунок 2.4 с — це точно така ж модель, як

представлена на рисунку 2.2. б, але джерело напруги та джерело струму були розділені, і це представлення збереглося.

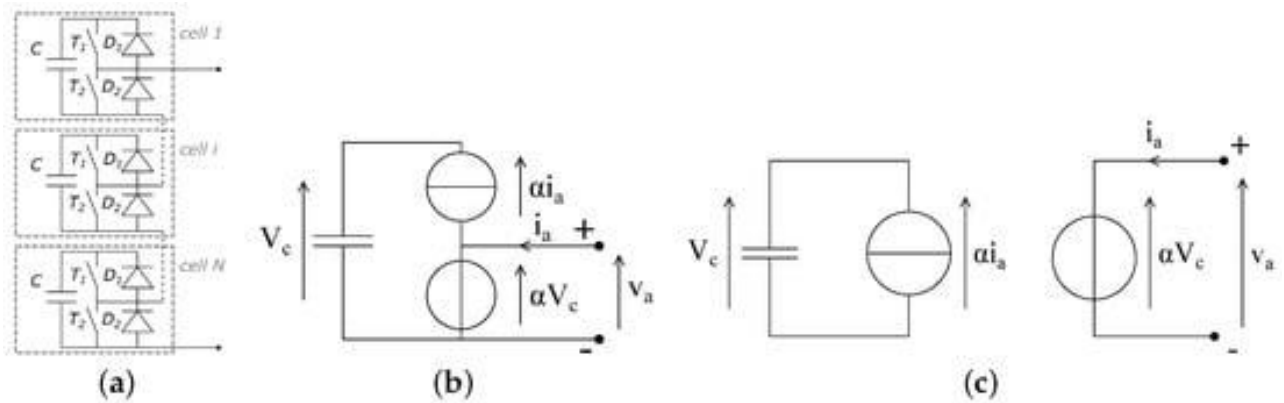


Рисунок 2.4. – Моделі для імітації ММС у нормальній роботі. (а) Справжній кластер. (б) Усереднена модель кластера. (с) Усереднена модель кластера, розділеного на дві частини

Таблиця 2.3. – Порівняння моделі з дискретними пристроями та усередненої моделі

Моделювання...	Модель з дискретними пристроями— Рисунок 4 а	Усереднена модель Рисунок 4 б,с
...напівпровідник	-	-
перехідні процеси перемикання	немає	немає
...стратегія модуляції	так	немає
...баланс клітин	так	немає
...втрати напівпровідника	так	немає
...внутрішні контури керування	так	так
...регулювання напруги та потужності	так	так

2.4.2. Стратегія контролю за процесами

Щоб полегшити реалізацію стратегії керування, наступне перетворення застосовано до напруги плеча та струму плеча:

$$\begin{aligned}
v_{sum,i}(t) &= \frac{v_u(t) + v_l(t)}{2}, i \in \{a, b, c\} \\
v_{diff,i}(t) &= \frac{-v_u(t) + v_l(t)}{2}, i \in \{a, b, c\} \\
i_{sum,i}(t) &= \frac{i_u(t) + i_l(t)}{2}, i \in \{a, b, c\} \\
i_{diff,i}(t) &= \frac{i_u(t) - i_l(t)}{2}, i \in \{a, b, c\}
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Рівняння (2.1) дозволяє спростити рівняння ММС, що призводить до еквівалентної схеми на рисунку 2.5 для компонентів «різниці», де $i \in \{a; b; c\}$ позначає фазу. Варто зазначити, що падіння напруги через індуктори та напівпровідники є незначним порівняно з напругою індуктора та напругою мережі.

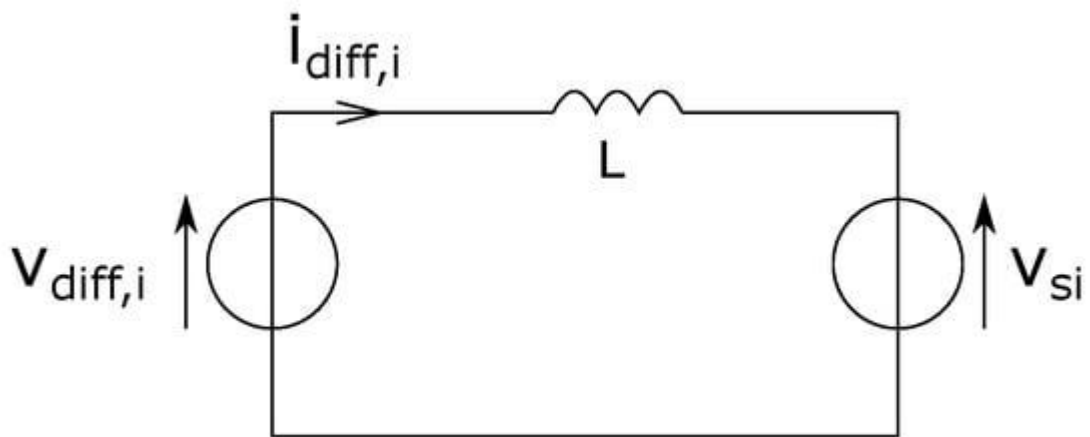


Рисунок 2.5. – Еквівалентна схема для компонентів «diff», $i \in \{a; b; c\}$.

Перетворення dq0 актуальне для керування трифазним ММС, оскільки напруга на плечі та струм на плечі містять компоненти як нульової, так і прямої послідовності. Для рисунка 2.5 отримано наступні рівняння:

$$\begin{cases} L \frac{di_{diff,d}}{dt}(t) = L\omega_0 i_{diff,q}(t) + v_{diff,d}(t) - v_{sd}(t) \\ L \frac{di_{diff,q}}{dt}(t) = -L\omega_0 i_{diff,d}(t) + v_{diff,q}(t) - v_{sq}(t) \end{cases} \tag{2.2}$$

$v_s d(t)$ і $v_s q(t)$ є (d, q) складових напруг мережі ($v_s a(t)$, $v_s b(t)$, $v_s c(t)$) як визначено на рисунку 2.2 а. Еквівалентні схеми рівняння (2.2) показані на

рисунку 2.6. Можна спостерігати, що перетворення призводить до пов'язаних зв'язків між осями d і q .

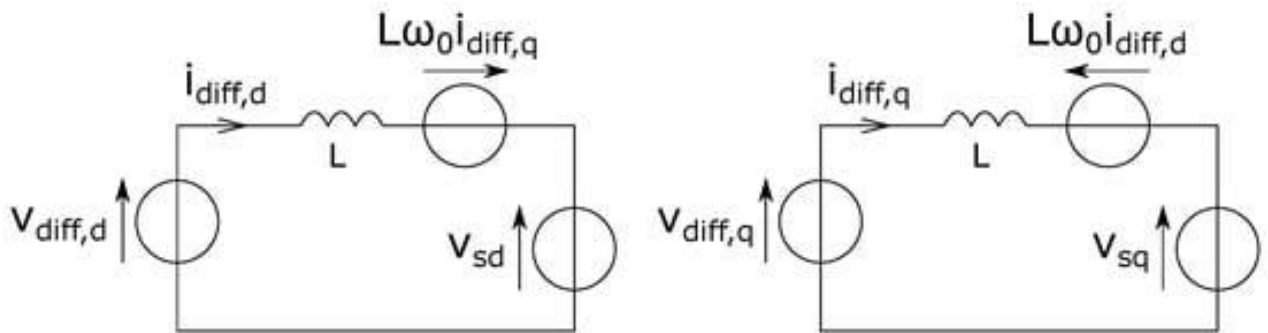


Рисунок 2.6. – Еквівалентні схеми перетворювача в площині dq для керування вихідним струмом

Таким чином, отриманий регулятор вихідного струму, показаний на рисунку 2.7, включає умови розв'язки для компенсації існуючих зв'язків.

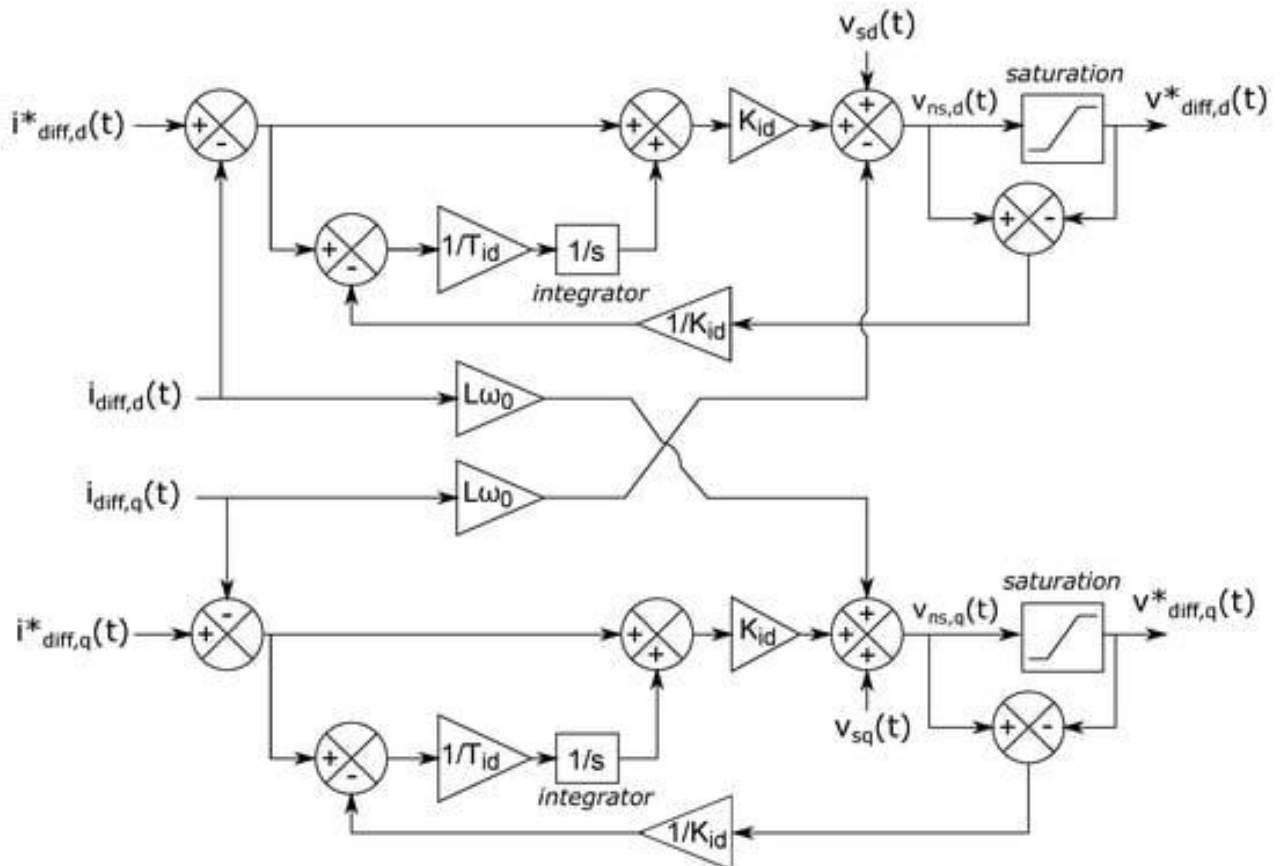


Рисунок 2.7. – Структурна схема регулятора вихідного струму

Для PI-регулятора пропускна здатність становить $2\pi \cdot 30$ рад/с є достатньо високим, щоб забезпечити задовільний динамічний відгук. Реалізовано захист від замотування, якщо напруга $v_{ns}, d(t)$, (або $v_{ns}, q(t)$) досягає заданої межі, опорної вихідної напруги $v_{diff}, d(t)$ (або $v_{diff}, q(t)$) насичує. Тоді різниця між межею $v_{ns}, d(t)$, (або $v_{ns}, q(t)$) використовується для обмеження інтеграції. Робочі цикли розраховуються шляхом ділення опорних напруг, використовуючи таку формулу:

$$\alpha_{u,abc}(t) = \frac{v_{u,abc}^*(t)}{V_{DC}} \text{ and } \alpha_{l,abc}(t) = \frac{v_{l,abc}^*(t)}{V_{DC}} \quad (2.3)$$

«Пряме керування напругою» (DVC), ця стратегія забезпечує асимптотичну стабільність плеча енергії [40, 41], однак вводячи циркуляційні струми в перетворювачі, оскільки загальна напруга конденсатора має пульсації на обох частотах мережі. f_0 і вдвічі більше частоти сітки. Таким чином, реалізовано контролер придушення циркулюючого струму (CCSC) [42], як показано на рисунку 2.8. Оскільки гармоніка другого порядку є найбільш важливою, лише ця гармоніка пригнічується. Перша небажана гармоніка з'являється на частоті сітки в чотири рази, але її вплив ледве помітний з точки зору спотворення. Підхід, запропонований на рисунку 2.8, вказує на те, що контролер вихідного струму та CCSC роз'єднані, оскільки контролер вихідного струму працює вздовж компонентів «diff» у площині dq0, тоді як CCSC забезпечує «суму» компонентів у площині dq0.

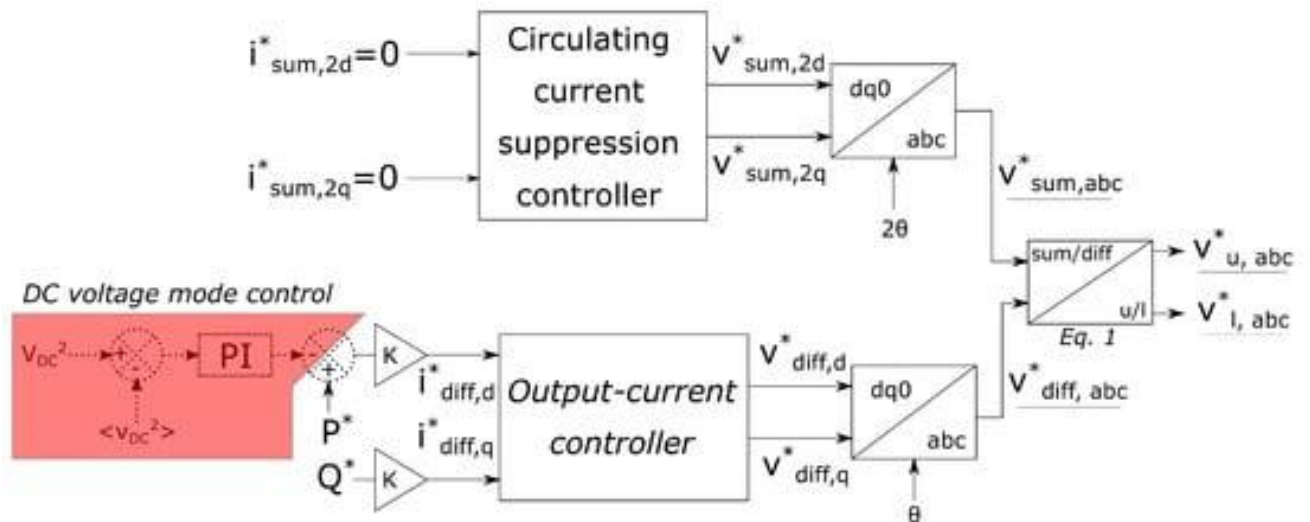


Рисунок 2.8. – Спрощена блок-схема загальної системи управління

Як показано на рисунку 2.1, два перетворювачі з'єднані через ланцюг постійного струму. У такому з'єднанні загальна стратегія керування полягає в тому, щоб один перетворювач керував передачею потужності, а інший керував напругою шини постійного струму [19], використовуючи «керування режимом напруги постійного струму».

2.5. Моделі для HVDC Link з MMC під час несправної роботи

2.5.1. Кабелі HVDC

2.5.1.1. Моделювання за допомогою pi-Sections

Пі-секції [43] є основним способом моделювання кабелів постійного струму. Було показано, що співвідношення між кількістю пі-секцій і похибкою моделювання лінії залежить від резонансної частоти лінії [44]. Він представляє обмеження, пов'язані з рі-розділами, які присвячені моделюванню низькочастотних явищ. Ці обмеження були підтверджені, і більш точна модель, FD- π була запропонована модель [43]. Порівняння з реальним імпедансом кабелю з екструдованого зшитого поліетилену (XLPE) HVDC показує, що

резонанси затухають, тоді як подання за допомогою пі-зрізів призводить до різких коливань резонансних частот. Моделювання з використанням пі-секції характеризується високочастотними пульсаціями, які не є реалістичними через дискретні резонансні частоти моделі.

2.5.1.2. Моделювання за допомогою теорії біжучої хвилі

Теорія біжучої хвилі полягає в локальних рівняннях замість дискретних пасивних компонентів. Це більш точне представлення вибрано в PLECS, щоб уникнути недоліків рі-розрізів. Відповідна реалізація в програмному забезпеченні моделювання PLECS базується на [45].

Характеристики ± 200 кВ кабелю наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. – Макроскопічні характеристики а ± 200 кВ кабель постійного струму [18].

Ім'я	символ	Значення
Опір на км	r_{cable}	11 м. вул Ω /км
Індуктивність на км	l_{cable}	2,615 мГн/км
Ємність між полюсом і землею на км	c_{cable}	0,2185 мкФ/км
Провідність на км	g_{cable}	0,055 мкСм/км

2.6. Моделювання конвертеру пристрою

Після блокування контрольованих пристроїв ММС має конфігурацію, показану на рисунку 2.9. Це показує, що конденсатори не можуть розряджатися, що є помітною особливістю ММС: немає розряду енергії в ланці постійного струму через пасивні компоненти перетворювача. З іншого боку,

конденсатори можуть заряджатися протягом короткого часу, і це може призвести до значних перенапруг через великі струми під час несправностей.

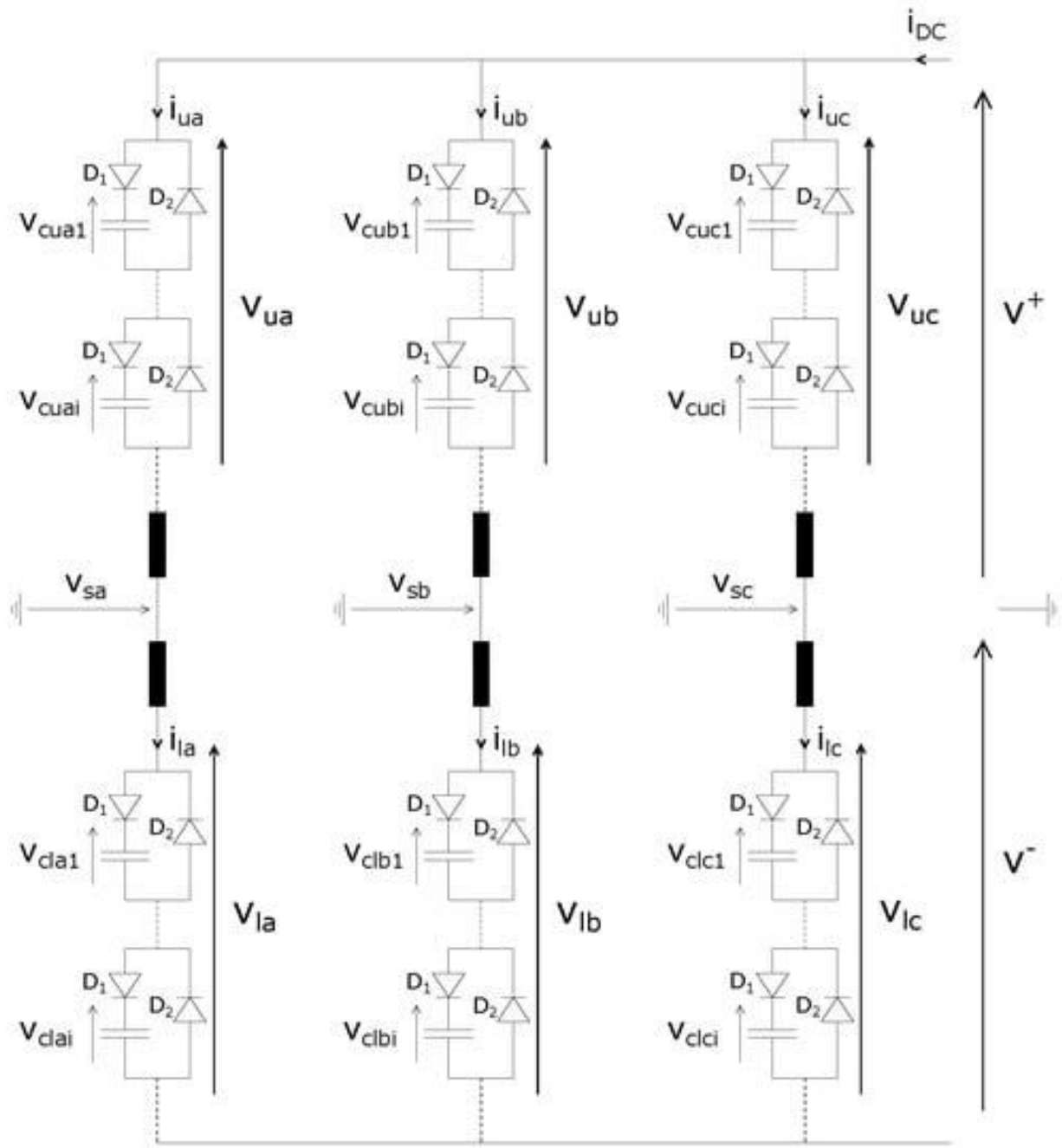


Рисунок 2.9. – ГМК з напівмостовими осередками після блокування контрольованих пристроїв

Попередня усереднена модель, придатна для нормальної роботи, після блокування контрольованих пристроїв більше не діє. Базуючись на рисунку 2.9, модель після виявлення несправності представлена на рисунку 2.10 а. Якщо плече-струм є позитивним, тільки верхні діоди клітин проводять і всі

конденсатори клітини заряджені, тоді як якщо плече-струм є негативним, тільки нижні діоди проводять, а верхні діоди блокуються. Спостерігається деяка подібність між цією моделлю та усередненою моделлю кластера під час нормальної роботи, і тоді їх можна об'єднати, щоб отримати єдину модель, придатну незалежно від режиму роботи. Остаточна модель представлена на рисунку 2.10b. СЕ дорівнює 1 під час нормальної роботи, тобто перемикач замкнутий, щоб отримати схему на рисунку 2.4 с. Коли контрольовані пристрої розмикаються, СЕ дорівнює 0, тобто вимикач розмикається. Крім того, вирази струму конденсатора і сім'ї напруга v' залежать від режиму роботи:

$$\begin{cases} \text{якщо } C E = 1 \text{ (перемикач закрито) , } v' = \alpha V_c \text{ і } i_c = \alpha i' \\ \text{якщо } C E = 0 \text{ (перемикач відкрито) , } v' = V_c \text{ і } i_c = i' \end{cases} \quad (2.4)$$

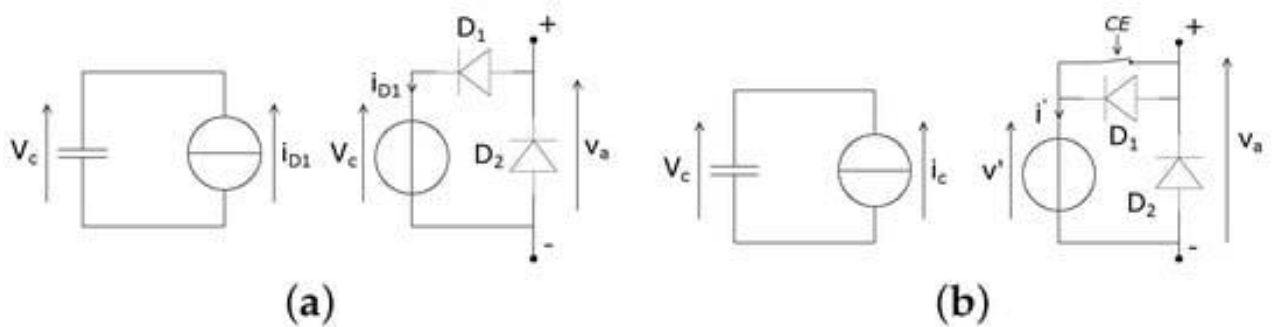


Рисунок 2.10. – Усереднені моделі для моделювання ММС при несправній роботі. (а) Усереднена модель кластера під час несправної роботи; всі контрольовані пристрої заблоковані. (б) Усереднена модель для нормальної та несправної роботи; перемикач закритий під час нормальної роботи та розімкнений під час несправної роботи

2.7. Автоматичні вимикачі високої напруги (СВ)

2.7.1. Зауваження щодо автоматичних вимикачів постійного струму

Постійний струм не має переходу через нуль, тому автоматичний вимикач постійного струму повинен витримувати високі перенапруги під час відключення повного струму замикання [15], і він повинен швидко розмикатися, щоб обмежити очікуваний струм замикання [46], а також

генерувати незначні втрати, коли ЗАЧИНЕНО. Існують різні сімейства автоматичних вимикачів постійного струму; гібридні автоматичні вимикачі та автоматичні вимикачі з інжекцією активного струму демонструють відмінні характеристики з часом розмикання менше 10 мс і струмом відключення близько 15 кА [47]. Вибрано автоматичний вимикач постійного струму, представлений на рисунку 11, він містить шлях основного струму, шлях комутації та шлях поглинання енергії (металооксидні варистори), який розсіює значну кількість магнітної енергії системи та обмежує перехідну напругу переривання (TIV). Обмежувач струму пошкодження додається для обмеження максимальної похідної струму (di/dt) перед вимиканням і гарантує, що автоматичний вимикач постійного струму залишається в межах номінального струму. Для цього дослідження припускається максимальна швидкість наростання 6 кА/мс [36] для струму ланки постійного струму. Виходячи з цього критерію, слід враховувати плечі індуктивності найближчого перетворювача. Циркуляційна складова плечеструмів має індуктивність $2L$, тому загальна індуктивність, яку видно з ланки постійного струму, дорівнює $23L$. Таким чином, обмежувач струму пошкодження повинен мати таке значення:

$$2 \cdot L_{FCL} = \frac{V_{DC}}{\left(\frac{di_{DC}}{dt}\right)_{MAX}} - \frac{2}{3}L \approx 45 \text{ мН}, \text{ з } \begin{cases} V_{DC} = \pm 200 \text{ кВ} \\ \left(\frac{di_{DC}}{dt}\right)_{MAX} = 6 \text{ кА / мс} \\ L = 29 \text{ мГн} \end{cases} \quad (2.5)$$

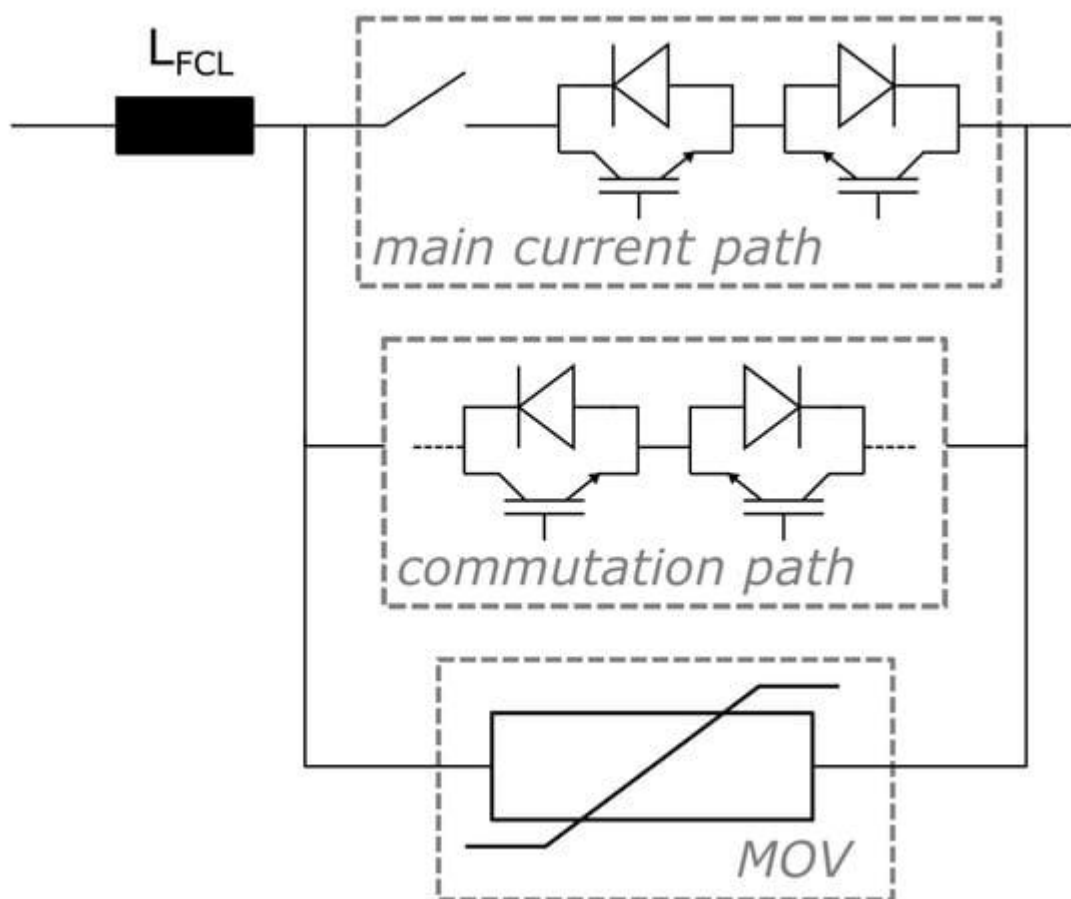


Рисунок 2.11. – Вибір типового гібридного автоматичного вимикача постійного струму

Таке значення виглядає розумним відповідно до літератури, яка надає широкий вибір обмежувачів струму пошкодження з різними критеріями [36, 48, 49].

Під час нормальної роботи струм проходить через основний шлях струму. Цей основний шлях струму, як правило, складається з механічного вимикача з низькими втратами та силового електронного вимикача. При виявленні несправності розмикається силовий електронний вимикач, який відводить струм в комутаційний тракт; тоді механічний перемикач розмикається, щоб захистити силовий електронний перемикач від наступної перехідної напруги переривання. Відкриття шляху комутації генерує перехідну напругу переривання, яка запускає провідність металооксидних варисторів. Відведення струму від основного шляху до шляху комутації та розмикання шляху

комутації моделюються чистою затримкою, оскільки це внутрішня робота автоматичного вимикача. Затримка в 3 мс [29] вважається прийнятною для представлення часу вимикання автоматичного вимикача постійного струму. Металооксидні варистори (MOV) можна моделювати за допомогою послідовної асоціації джерел постійної напруги та нелінійного резистора, отримуючи таким чином логарифмічне наближення характеристик v_i MOV. У цьому дослідженні вони визначаються номінальним струмом розряду 12 кА при рівні захисту від імпульсу блискавки 600 кВ.

Таблиця 2.5. підсумовує числові значення, збережені для пасивних елементів. Згідно з рисунком 2.12, використовуються чотири автоматичні вимикачі постійного струму, але щоб уникнути перешкод у формах сигналу, спрацьовування автоматичних вимикачів постійного струму на позитивних полюсах двох перетворювачів затримується на 7 мс для моделювання.

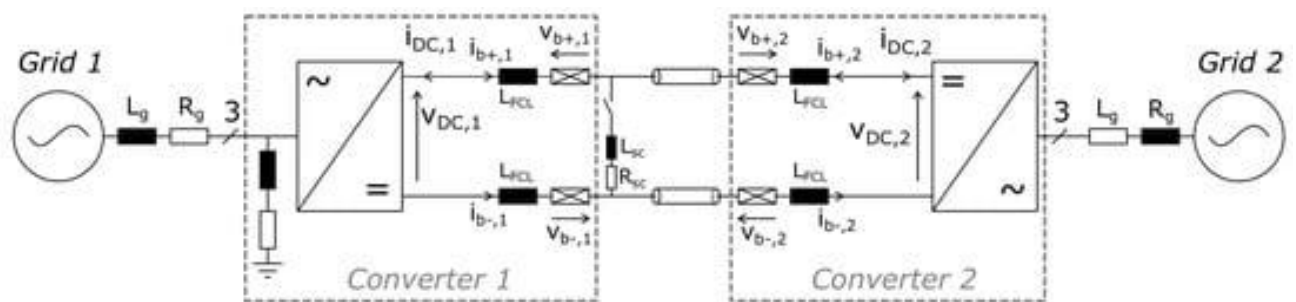


Рисунок 2.12. – Детальна модель лінії HVDC з автоматичними вимикачами постійного струму та позначеннями

Таблиця 2.5. – Числові дані для пасивних елементів лінії ПСВН

Ім'я	символ	Значення
Індуктивність розсіювання трансформатора	L_g	35 мГн
Послідовний опір трансформатора	R_g	0,363 Ω
Міжфазна напруга мережі	U_g	220 кВ
Стійкість до короткого замикання	R_{sc}	1 м Ω
Індуктивність короткого замикання	L_{sc}	100 нГн
Обмежувач струму пошкодження	L_{FCL}	22.5 мГн

2.7.2. Автоматичні вимикачі змінного струму

Автоматичний вимикач змінного струму моделюється простіше: його час відгуку дуже великий порівняно з динамікою його вимкнення. Крім того, він відкривається, коли струм перетинає нуль. Таким чином, TRIAC, керований затримкою сигналу, є точним представленням. Затримка в три періоди сітки, тобто $60 \text{ мс при } f_0 = 50 \text{ Гц}$, передбачається.

2.7.3. Результати моделювання

Система запускається при номінальній напрузі ланцюга постійного струму V_C , nom , 400 кВ. Активна потужність встановлена на 800 МВт, реактивна потужність не вводиться. На $t_0 = 4t_0 = 4\text{s}$, коли досягається стабільний режим роботи, позитивний і негативний полюси перетворювача 1, який працює як випрямляч, замикаються накоротко, як показано на рисунку 2.12. Слід зазначити, що це критичний випадок дослідження для перетворювача 1: струм ланки постійного струму вже тече в напрямку короткого замикання, що збільшує максимальний струм пошкодження.

2.7.4. Виявлення несправностей

Таблиця 2.6. підсумовує захист, який спрацьовує після замикання постійного струму між полюсами за допомогою автоматичних вимикачів змінного струму. Виявляється, що виявлення зниженої напруги є дуже ефективним, оскільки коротке замикання відбувається в точці, де вимірюється напруга ланцюга постійного струму. Це призводить до загальної тривалості виявлення 100 мкс. Ця тривалість, хоча й оптимістична, суттєво не впливає на загальну поведінку лінії HVDC: час розмикання автоматичних вимикачів

змінного струму значно перевищує тривалість виявлення. Перетворювач 2 виявляє несправність пізніше, після $\Delta t = 3,48\text{PC}$. Це відповідає часу, протягом якого коротке замикання поширюється на кабелі постійного струму, знаючи, що перетворювач 2 відокремлений від перетворювача 1 на відстань 200 км.

Таблиця 2.6. – Метод захисту, який спрацьовує для кожного перетворювача з автоматичними вимикачами змінного струму

конвертер	Характер захисту	Тривалість	Загальна тривалість із внутрішніми затримками
1 (випрямляч)	знижена напруга	0 с	100 мкс
2 (інвертор)	знижена напруга	3.38PC	3.48PC

Таблиця 2.7 надає ту саму інформацію для автоматичних вимикачів постійного струму. Перетворювач 1 виявляє перевищення струму в ланці постійного струму перед зниженням напруги. Однак перетворювач 2 виявляє пониженої напругу одночасно, як і у випадку автоматичних вимикачів змінного струму.

Таблиця 2.7. – Метод захисту, який спрацьовує для кожного перетворювача з автоматичними вимикачами постійного струму

конвертер	Характер захисту	Тривалість	Загальна тривалість із внутрішніми затримками
1 (випрямляч)	перевантаження по струму (ланка постійного струму)	172 мкс	272 мкс
2 (інвертор)	знижена напруга	3.38PC	3.48PC

2.8. Порівняння між автоматичними вимикачами змінного струму та автоматичними вимикачами постійного струму

2.8.1. Осцилограми

Рисунок 2.13 а показує, що швидкий час розмикання вимикачів постійного струму значно зменшує обмеження на систему: піковий струм ланки постійного струму становить менше 10 кА для вимикачів постійного струму, тоді як він перевищує 20 кА для кола змінного струму -брекери. Крім того, тривалість обмеження несправності набагато більша з автоматичними вимикачами змінного струму; На рисунку 2.13 б показано, що для розмикання трьох автоматичних вимикачів змінного струму перетворювача 1 потрібно приблизно 70 мс. Навіть після розмикання автоматичних вимикачів змінного струму несправність все ще не усунена, оскільки коротке замикання створило індуктивний замкнутий контур що забезпечує циркуляцію рукавних струмів. Це пояснює, чому ненульовий струм ланки постійного струму залишається навіть після розмикання автоматичних вимикачів змінного струму на рисунку 2.13 а. Постійна часу цього явища:

$$\tau = \frac{L}{NR_{cell}} = 106 \text{ PC} , \text{ з } \begin{cases} N = 200 \\ R_{cell} = 1,36 \text{ м}\Omega \\ L = 29 \text{ мГн} \end{cases} \quad (2.6)$$

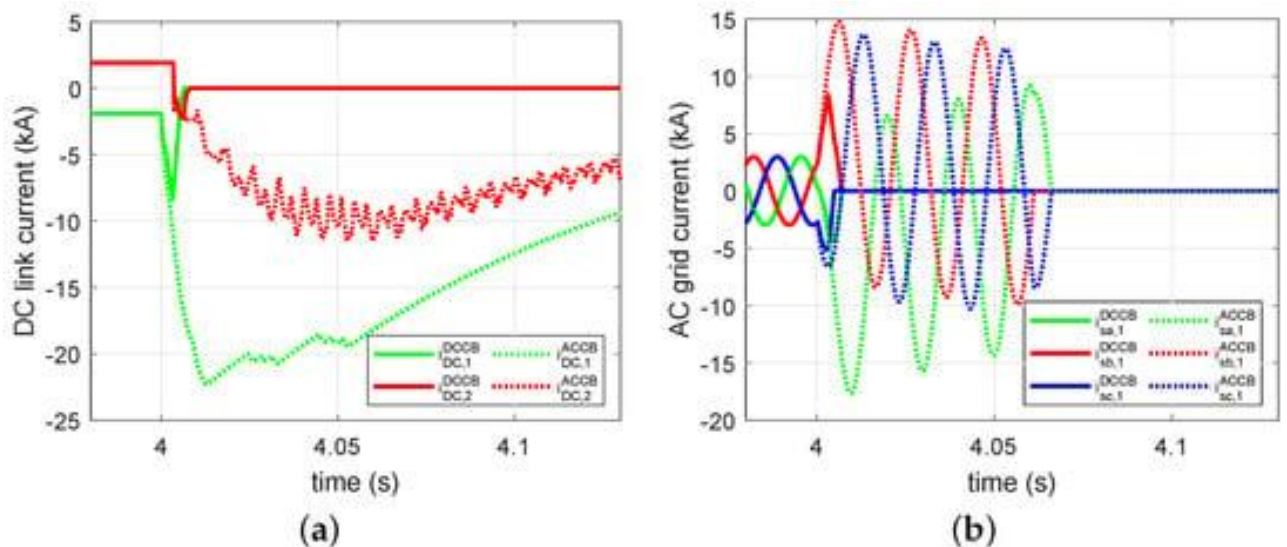


Рисунок 2.13. Струм ланцюга постійного струму та струм мережі змінного струму під час замикання постійного струму між полюсами з автоматичними вимикачами змінного струму (пунктирні лінії) та автоматичними вимикачами постійного струму (суцільні лінії). (a) Струм ланцюга постійного струму – масштабування – зелений для перетворювача 1, червоний для перетворювача 2, суцільна лінія для автоматів постійного струму та пунктирна лінія для автоматів змінного струму. (b) Змінні струми мережі i_s , $i(t)$, $i \in \{a; b; c\}$, зелений для фази a, червоний для фази b і синій для фази c, суцільна лінія для автоматів постійного струму та пунктирна лінія для автоматів змінного струму

Цей етап є критичним через його тривалість, що є ще одним недоліком автоматичних вимикачів змінного струму: на відміну від перетворювача, оснащеного автоматичними вимикачами постійного струму, усунення несправності займає кілька сотень мілісекунд. Струми плеча повільно зменшуються, як показано на рисунку 2.14, і енергія розсіюється через опори котушок індуктивності та діоди. На рисунку 2.13 а також показано, що положення короткого замикання значно впливає на струми пошкодження: струм ланки постійного струму випрямляча (перетворювача 1) швидко зростає, тоді як струм ланки постійного струму інвертора (перетворювача 2) має меншу швидкість -підйом. Це пов'язано з імпедансом кабелю постійного струму, який

послаблює та затримує наслідки короткого замикання, оскільки перетворювач 2 знаходиться на відстані $D = 200$ км від короткого замикання.

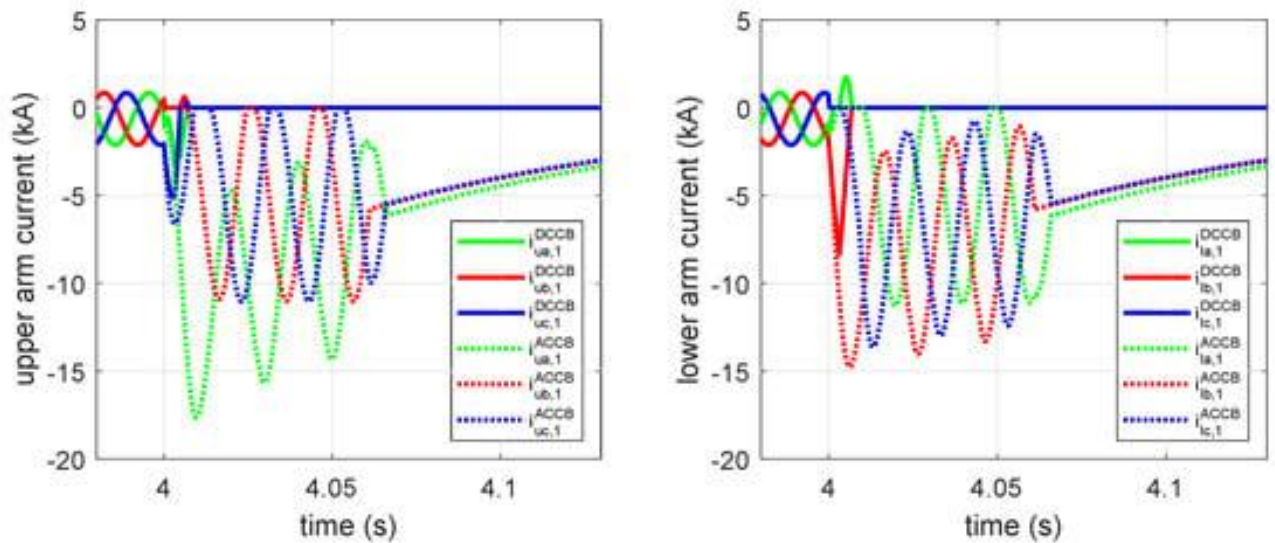


Рисунок 2.14. – Струми верхнього та нижнього плеча під час замикання постійного струму між полюсами з автоматичними вимикачами змінного струму (пунктирні лінії) та автоматичними вимикачами постійного струму (суцільні лінії); зелений для фази a, червоний для фази b і синій для фази c

2.8.2. Інтеграли імпульсних струмів

На рисунку 2.14 можна розрахувати інтеграли імпульсного струму діодів у кожному кластері за такою формулою:

$$I^2t = \int_{t=4s}^{+\infty} (i_{Diode}(t))^2 dt \quad (2.7)$$

Як пояснюється в розділі 2.3.1, перетворювач має тенденцію поводитися як діод-випрямляч після замикання постійного струму між полюсами. Як показано на рисунку 2.9, тоді як діоди $D1$ заблоковані, діоди $D2$ залучені до несправності, що робить здатність до імпульсного струму важливою проблемою для цих діодів.

Таблиця 2.8. показує інтеграли імпульсного струму для діодів $D2$ в різних плечах перетворювача 1 з автоматичними вимикачами змінного струму; максимум $8,60 \text{ M A}^2 \cdot \text{s}$. Це значення можна порівняти з деякими потужними діодами, запропонованими різними виробниками, представленими в таблиці 9. Виявляється, що окремі діоди прес-пакета мають вищі інтеграли імпульсного струму; гібридні корпуси IGBT або IEGT не витримують необхідних інтегралів імпульсного струму. Він пояснює деякі технологічні рішення, зроблені виробниками:

Таблиця 2.8. – Інтеграл імпульсного струму ($\text{M A}^2 \cdot \text{s}$) для $D2$ в перетворювач 1 з автоматичними вимикачами змінного струму.

Фаза	a	b	в
плечі	8.60	4.36	4.15
опустити руки	4.88	6.47	5.42

Таблиця 2.9. – Інтеграл імпульсного струму ($\text{M A}^2 \cdot \text{s}$) для типового 4.5 прилади кВ.

Виробник	пристрій	технології	$I^2 t \text{ (MA}^2 \cdot \text{s)}$
ABB	5SNA 2000K450300	прес-пак IGBT + діод	5.12
ABB	5SDF 20L4520	один прес-пак діод	10.1
Infineon	D1961SH45T	один прес-пак діод	8.0
Infineon	D4600U45X172	один прес-пак діод	32,0
Toshiba	ST1500GXH24	прес-пак IEGT + діод	0,5

- Для шунтування діодів Siemens використовує тиристор прес-пака $D2$ при несправній роботі [50];
- RXPE розглядає використання прес-пакетних діодів, щоб витримати інтеграл імпульсного струму [51];

- АББ має подібні міркування, елементи на основі IGCT мають повний режим відмови короткого замикання (SCFM), що дозволяє видалити перемикач байпаса, щоб використовувати один байпасний тиристор для розрядки конденсатора елемента [52, 53].

Висновок інший для автоматичних вимикачів постійного струму, як показано в таблиці 2.10, інтеграли імпульсного струму набагато менші через різке скорочення часу переривання замикання. Серед переліку пристроїв у таблиці 2.9 усі сумісні з прикладом. Тому інвестиції в автоматичний вимикач постійного струму зменшуються видаленням обхідного тиристора. Це також дозволяє використовувати пристрої з інтегрованими діодами, з меншими інтегралами імпульсного струму, наприклад, 5SNA 2000K450300 ABB або ST1500GXH24 Toshiba згідно з таблицею 2.9.

Таблиця 2.10. – Інтеграл імпульсного струму ($MA^2 \cdot s$) для D2 у випрямлячі з автоматичними вимикачами постійного струму

Фаза	a	b	в
плечі	0,026	<0,001	0,075
опустити руки	<0,001	0,18	<0,001

2.8.3. Поведінка автоматичного вимикача постійного струму (DCCB)

На рисунку 2.15 показано напруги та струми двох перших автоматичних вимикачів постійного струму, які розмикаються: перший розташований на негативному полюсі перетворювача 1, другий розташований на негативному полюсі перетворювача 2. На початку струм ланки постійного струму перетворювача 1 швидко зростає зі швидкістю, яка в основному визначається обмежувачами струму пошкодження $LFCL$. Перший автоматичний вимикач постійного струму обмежує несправність після $\Delta t = 3,27$ мс і розриває струм

8,34 кА. Цей час є сумою затримки виявлення, 271 с, і внутрішнього часу комутації струму вимикачів постійного струму, прийнятого рівним 3 мс. Він індукує перехідну напругу переривання, визначену характеристиками MOV, і підвищується до трохи менше 600 кВ, тобто 150% напруги ланцюга постійного струму VDC_{nom} . З цього моменту струм ланки постійного струму зменшується за абсолютною величиною і досягає нуля протягом 3.2 мс, що відповідає середньому нахилу струму 2,6 кА/мс. Через тривалість виявлення та час комутації внутрішнього струму автоматичного вимикача постійного струму другий автоматичний вимикач постійного струму нейтралізує несправність після $\Delta t = 6,48$ РС. Це відбувається після інверсії знака струму ланцюга постійного струму, спричиненого коротким замиканням на іншому кінці лінії постійного струму. Пов'язаний TIV менший, а час придушення струму замикання коротший, оскільки автоматичний вимикач розмикається при 2,21 кА, що набагато нижче, ніж у першого автоматичного вимикача постійного струму. Таким чином, швидка робота автоматичного вимикача постійного струму в перетворювачі 1 зменшила струми замикання, які спостерігаються в перетворювачі 2.

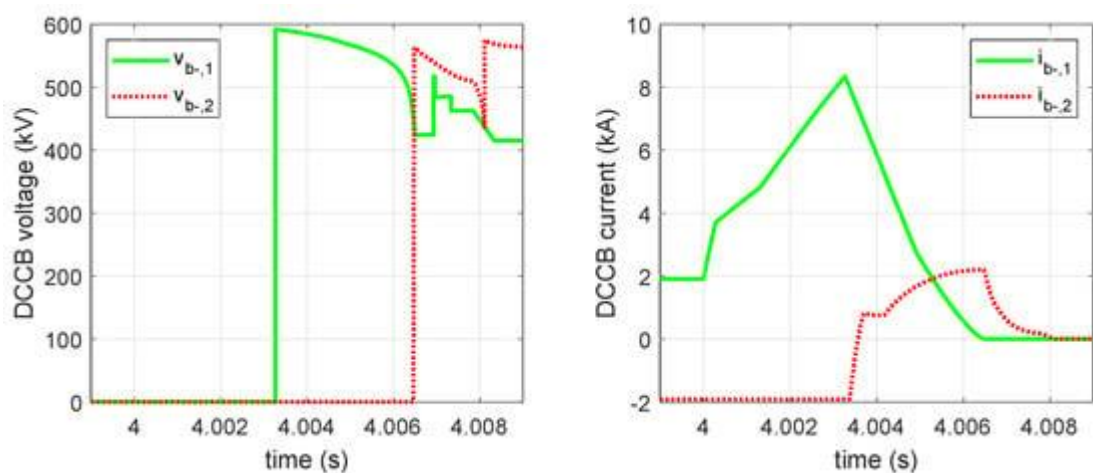


Рисунок 2.15. Напруга та струм нижніх вимикачів постійного струму під час замикання постійного струму між полюсами

2.8.4. Перенапруги під час несправної роботи

На рисунку 2.16 показано напруги конденсатора перетворювача 1 під час замикання постійного струму між полюсами з автоматичними вимикачами постійного струму. Ці конденсатори представляють конденсатори усередненої моделі кластера: вони представляють суму напруг конденсаторів усіх комірок для даного кластера.

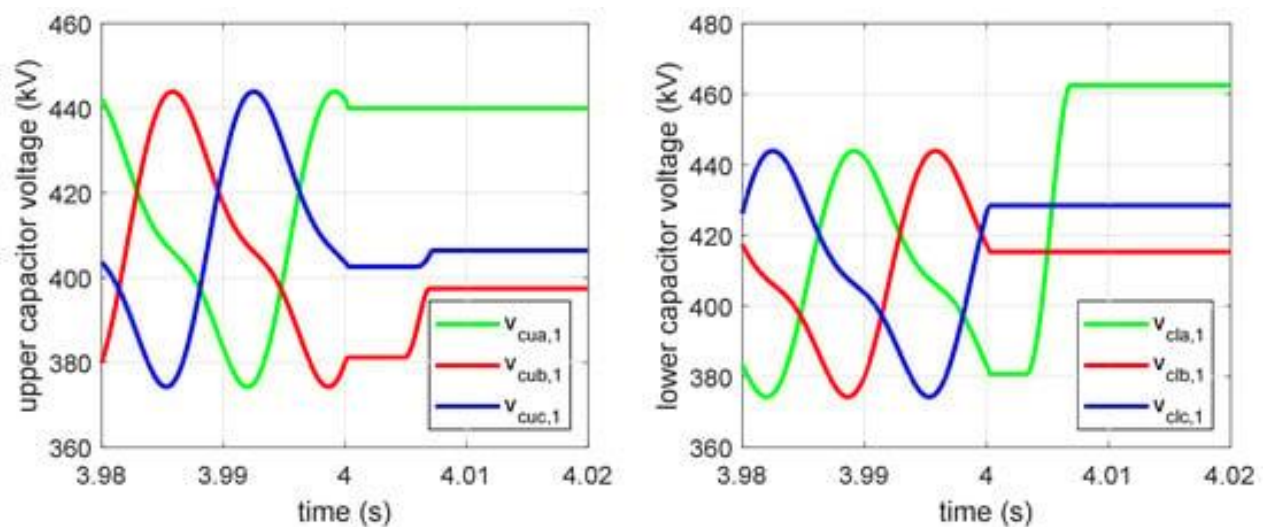


Рисунок 2.16. – Напруга конденсаторів під час замикання постійного струму між полюсами з автоматичними вимикачами постійного струму v_{ci} , $i(t)/v_{cl}$, $i(t)$, $i \in \{a; b; c\}$, зелений для фази а, червоний для фази b і синій для фази c

Деякі з цих конденсаторів заряджаються протягом часу придушення струму замикання вимикачів постійного струму; це явище обумовлено:

- Введення високої напруги між землею та негативним полюсом автоматичним вимикачем постійного струму. Ця напруга перевищує номінальну напругу ланцюга постійного струму і не розподіляється між двома полюсами. Нижня напруга плеча занадто низька, тоді як напруга мережі фази а є найвищою. Отже, в нижньому плечі фази а повинен протікати позитивний плече струму. Цей струм видно в правій частині рисунка 14 зеленим кольором.

- Зменшення напруги між позитивним полюсом і землею, верхня напруга плеча занадто низька, ніж діоди $D1$ не може мати зворотне зміщення, що індукуює позитивні плечі-струми.

Це явище припиняється в кінці часу придушення струму замикання, оскільки циркуляція струмів плеча більше неможлива. Для цього прикладу досягається максимальна напруга конденсатора 116 % від його номінальної вартості. Перезарядження конденсаторів плеча небезпечно, оскільки може пошкодити конденсатори, а також напівпровідники. З іншого боку, максимальні напруги конденсаторів залежать від характеристик MOV та інших параметрів: опору лінії змінного струму та характеристик обмежувачів струму пошкодження, наприклад. Заземлення системи, реалізоване за допомогою зіркоподібного реактора для симетричних монопольних конфігурацій, також впливає на зарядку конденсаторів.

2.8.5. Вплив внутрішнього часу комутації струму DCCB

2.8.5.1. Поведінка автоматичного вимикача постійного струму

Час комутації внутрішнього струму (ICCT) є ключовим параметром автоматичного вимикача постійного струму: чим він швидший, тим менший струм пошкодження. Як видно на рисунку 2.17, максимальний струм замикання збільшується разом із часом комутації внутрішнього струму для перетворювача 1: зростання струму є приблизно постійним між блокуванням вимикаючих пристроїв і обмеженням струму замикання. Тенденція інша для перетворювача 2, максимальний струм пошкодження майже постійний. У таблиці 2.11. наведено основні фактори, що визначають роботу автоматичного вимикача постійного струму для різних часів комутації внутрішнього струму. Це показує, що перехідна напруга переривання залишається в прийнятному діапазоні, незважаючи на значну зміну максимального струму пошкодження для перетворювача 1 через нелінійність електричної характеристики MOV. Крім

того, різниця між часом придушення струму пошкодження та часом комутації внутрішнього струму збільшується для перетворювача 1, оскільки для даного di/dt вищий струм пошкодження потребує більше часу, щоб досягти нуля.

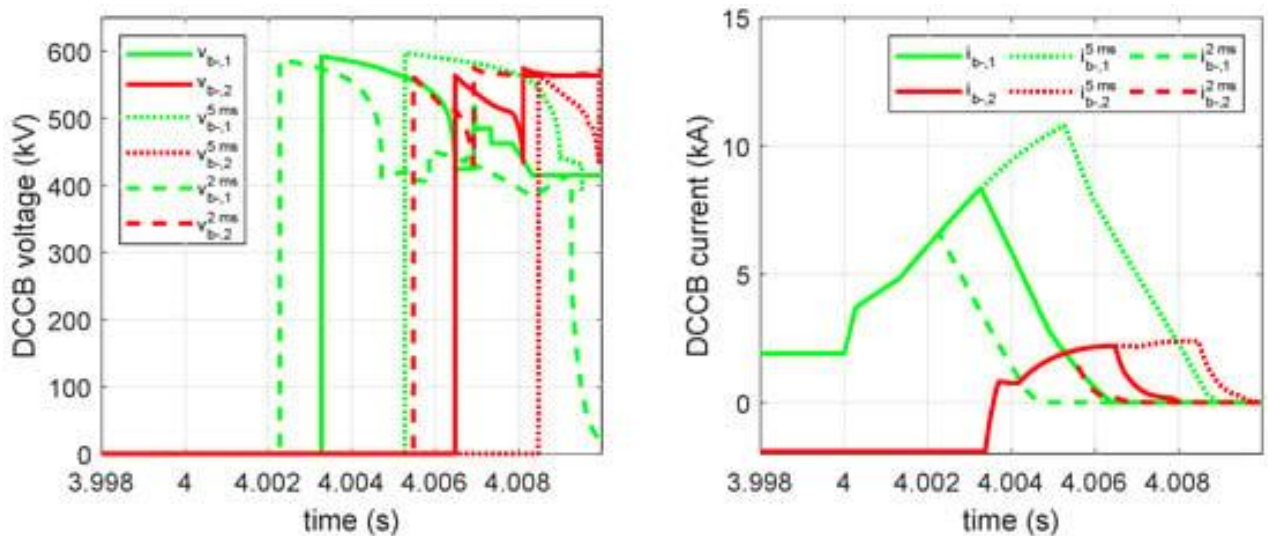


Рисунок 2.17. – Струм і напруга для автоматичних вимикачів постійного струму негативних полюсів перетворювача 1 (зелений) і перетворювача 2 (червоний) з різним часом комутації внутрішнього струму Δt_{ICCT} , пунктирна лінія для $\Delta t_{ICCT}=2$ мс, суцільна лінія для $\Delta t_{ICCT}=3$ мс і пунктирна лінія для $\Delta t_{ICCT}=5$ мс

Таблиця 2.11. – Електричні характеристики роботи вимикачів при різних часах комутації внутрішнього струму (ЧВСТ)

конвертер	Δt_{ICCT}	2 мс	3 мс	5 мс
1	Максимальний струм пошкодження	6.60кА	8.34кА	10.8кА
1	Час придушення струму пошкодження	4.70PC	6.45PC	8,99PC
1	Перехідна напруга переривання	587 кВ	592 кВ	598 кВ
2	Максимальний струм пошкодження	2.01кА	2.21кА	2.39кА
2	Час придушення струму пошкодження	6.86PC	8.08PC	9,89PC
2	Перехідна напруга переривання	561 кВ	563 кВ	565 кВ

2.8.5.2. Інтегралі імпульсних струмів

Таблиця 2.12 вказує на те, що на інтегралі імпульсного струму значно впливає час комутації внутрішнього струму: максимальний інтеграл імпульсного струму помножено на 2.3 для конвертера 1 і по 2.1 для конвертера 2, для ІССТ, що збільшується з 3 мс до 5 мс. З іншого боку, максимальний інтеграл імпульсного струму поділено на 1.9 для конвертера 1 і по 2.1 для конвертера 2, для ІССТ, що зменшується з 3 мс до 2 мс. Як і очікувалося, скорочення внутрішнього часу комутації струму автоматичного вимикача постійного струму має подвійний позитивний вплив на інтеграл імпульсного струму. Таким чином, цей параметр є чутливим і його слід належним чином оцінювати та керувати ним.

Таблиця 2.12. – Інтеграл імпульсного струму ($M A^2 \cdot s$) для $D2$ з автоматичними вимикачами постійного струму для різного часу комутації внутрішнього струму (ІССТ)

Δt_{ICST}	2 мс	3 мс	5 мс
Перетворювач 1	0,093	0,18	0,43
Перетворювач 2	0,0046	0,0095	0,02

2.5.5.3. Перенапруги конденсаторів елемента

Перенапруги конденсаторів можуть бути проблематичними, особливо в деяких випадках призводять до вищих значень, ніж ті, що спостерігалися раніше. На рисунку 2.18 видно, що максимальна перенапруга, здається, утримується, але модифікація ІССТ змінює конденсатори, заряджені чи ні: з ІССТ 5 мс конденсатор верхнього плеча фази с сильно заряджений, тоді як він був майже постійним з меншими ІССТ.

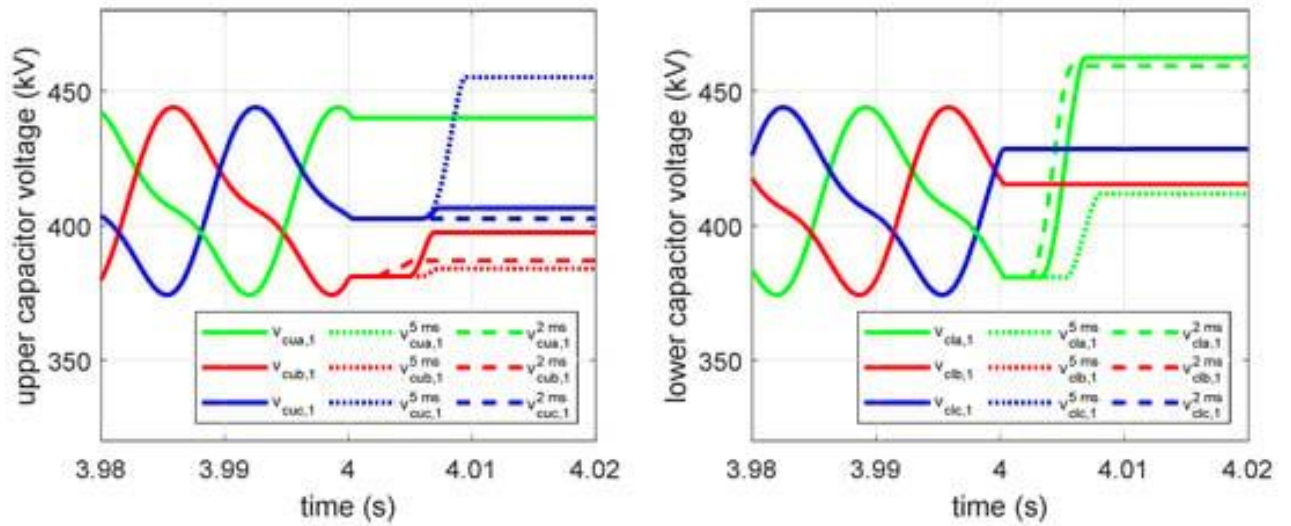


Рисунок 2.18. – Напруги конденсатора з різним часом комутації внутрішнього струму Δt_{ICCT} , пунктирна лінія для $\Delta t_{ICCT} = 2$ мс, суцільна лінія для $\Delta t_{ICCT} = 3$ мс і пунктирна лінія для $\Delta t_{ICCT} = 5$ мс

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Запропонована імітаційна модель пропонує багато аналізів поведінки лінії HVDC за умов замикання постійного струму між полюсами. Працюючи під програмним забезпеченням для моделювання PLECS, він пропонує прийнятний час обчислення приблизно 10 хвилин на моделювання за допомогою настільного комп'ютера. Між тим, він включає високочастотну характеристику перетворювачів і кабелів постійного струму з простою реалізацією, що дозволяє досліджувати несправності всієї системи. Для належного порівняння різних випадків дослідження було реалізовано стратегію виявлення.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Перше порівняння між автоматичними вимикачами змінного струму та автоматичними вимикачами постійного струму показало, що використання автоматичних вимикачів постійного струму передбачає менші конструктивні обмеження для діодів ММС. Інтеграли імпульсних струмів, які є важливим фактором конструкції, були точно розраховані. Використання прес-пакетних діодів у перетворювальних комірках є обов'язковим при використанні автоматичних вимикачів змінного струму в таких лініях HVDC. З іншого боку, швидке придушення струму замикання, створене автоматичними вимикачами постійного струму, дозволяє використовувати пристрої з меншими інтегралами імпульсного струму. Маючи вищу щільність потужності, модулі з IGBT/IEGT та інтегрованими діодами, пристроями зворотної провідності, двомодовими транзисторами з ізолюваним затвором (BIGT) або двомодовими комутованими тиристорами (BGCT) можуть мати багато функцій, наприклад вищу економічну ефективність або ще більш висока надійність. Тим не менш, обмеження несправностей за допомогою автоматичних вимикачів постійного струму все ще призводить до заряду конденсаторів елемента вище 1 о.е., що також слід враховувати при проектуванні перетворювача.

Вплив характеристик автоматичного вимикача постійного струму було вивчено, можна зробити висновок, що правильне керування часом комутації внутрішнього струму має першочергове значення, оскільки воно безпосередньо визначає максимальний струм пошкодження. З точки зору зв'язку HVDC, ця робота показала, що запропонований загальний автоматичний вимикач є достатньо ефективним, щоб обмежити вплив несправності постійного струму на інші перетворювальні станції: такі висновки є важливими, коли йдеться про проектування багатоканальних кінцевих з'єднань HVDC, де найкращим рішенням було б ізолювати несправне з'єднання або несправну перетворювальну станцію від справних.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Tiku, D. Dc power transmission: Mercury-arc to thyristor HVdc valves [History]. *IEEE Power Energy Mag.* 2014, 12, 76–96. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. Oni, O.E.; Davidson, I.E.; Mbangula, K.N.I. A Review of LCC-HVDC and VSC-HVDC Technologies and Applications. In Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 7–10 June 2016; pp. 1–7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
13. Flourentzou, N.; Agelidis, V.G.; Demetriades, G.D. VSC-based HVDC power transmission systems: An overview. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009, 24, 592–602. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Sano, K.; Takasaki, M. A Surgeless Solid-State DC Circuit Breaker for Voltage-Source-Converter-Based HVDC Systems. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014, 50, 2690–2699. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
15. Jovcic, D.; Wu, B. Fast fault current interruption on high-power DC networks. In Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 25–29 July 2010; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Candelaria, J.; Park, J.D. VSC-HVDC system protection: A review of current methods. In Proceedings of the 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, AZ, USA, 20–23 March 2011; pp. 1–7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Marquardt, R. Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-bus-applications. In Proceedings of the 2010 International Power Electronics Conference—ECCE Asia (IPEC), Sapporo, Japan, 21–24 June 2010; pp. 502–507. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

18. International Council for Large Electricity Networks; Study Committee B4. *Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid*; Technical Report December; CIGRE: Aalborg, Denmark, 2014. [[Google Scholar](#)]
19. Sharifabadi, K.; Harnefors, L.; Nee, H.P.; Norrga, S.; Teodorescu, R. *Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems*; Wiley-IEEE Press: Chichester, UK, 2016. [[Google Scholar](#)]
20. Denetière, S.; Nguefeu, S.; Saad, H.; Mahseredjian, J. *Modeling of Modular Multilevel Converters for the France-Spain Link*; Technical Report; INELFE Project: Vancouver, BC, Canada, 2013. [[Google Scholar](#)]
21. Serbia, N. Modular Multilevel Converters for HVDC Power Stations. Ph.D. Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse—INPT, Toulouse, France, 2014. [[Google Scholar](#)]
22. Labra Francos, P.; Sanz Verdugo, S.; Fernández Álvarez, H.; Guyomarch, S.; Loncle, J. INELFE—Europe’s first integrated onshore HVDC interconnection. In Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 22–26 July 2012; pp. 1–8. [[Google Scholar](#)]
23. Nami, A.; Liang, J.; Dijkhuizen, F.; Lundberg, P. Analysis of modular multilevel converters with DC short circuit fault blocking capability in bipolar HVDC transmission systems. In Proceedings of the 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015, Geneva, Switzerland, 8–10 September 2015; pp. 1–10. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Nami, A.; Liang, J.; Dijkhuizen, F.; Demetriades, G.D. Modular multilevel converters for HVDC applications: Review on converter cells and functionalities. *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, 18–36. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
25. Wang, Y.; Marquardt, R. Future HVDC-Grids employing Modular Multilevel Converters and Hybrid DC-Breakers. In Proceedings of the 15th European

- Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2–6 September 2013; pp. 1–8. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
26. Callavik, M.; Blomberg, A.; Häfner, J.; Jacobson, B. *The Hybrid HVDC Breaker An Innovation Breakthrough Enabling Reliable HVDC Grids*; Technical Report; ABB Grid Systems: Stockholm, Sweden, 2012. [[Google Scholar](#)]
 27. Ruffing, P.; Brantl, C.; Petino, C.; Schnettler, A. Fault current control methods for multi-terminal DC systems based on fault blocking converters. *J. Eng.* 2018, 2018, 871–875. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 28. Billmann, M.; Gambach, H. Explosion proof housings for IGBT module based high power inverters in HVDC transmission application. In Proceedings of the PCIM 2009, Nuremberg, Germany, 12–14 May 2009; pp. 352–357. [[Google Scholar](#)]
 29. Leterme, W.; Hertem, D.V.; Wang, J.; Berggren, B.; Linden, K.; Pan, J.; Nuqui, R.; Koch, M.; Krüger, M.; Tenbohlen, S.; et al. Classification of Fault Clearing Strategies for HVDC Grids. In Proceedings of the Cigré International Symposium—Across Borders—HVDC Systems and Market Integration, Lund, Sweden, 27–28 May 2015; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 30. Jahn, I.; Johannesson, N.; Norrga, S. Survey of methods for selective DC fault detection in MTDC grids. *IET Conf. Publ.* 2017, 2017, 1–7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
 31. Kunlun, H.; Zexiang, C.; Yang, L. Study on protective performance of HVDC transmission line protection with different types of line fault. In Proceedings of the 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2011), Weihai, China, 6–9 July 2011; pp. 358–361. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 32. Ruffing, P.; Brantl, C.; Stumpe, M.; Schnettler, A. A Novel DC Fault Blocking Concept for Full-Bridge Based MMC Systems with Uninterrupted Reactive Power Supply to the AC Grid. In Proceedings of the CIGRE 2018, Paris, France, 26–31 August 2018. [[Google Scholar](#)]

33. Beddard, A.J. Factors Affecting the Reliability of VSC-HVDC for the Connection of Offshore Windfarms. Ph.D. Thesis, University of Manchester, Manchester, UK, 2014. [[Google Scholar](#)]
34. Zeng, H.; Chen, X.; Chen, Y.; Pan, X.; Zhang, S.; Chen, F.; Zeng, W. IGCT Self-Protection Strategy for IGCT Converters. In Proceedings of the 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019—ECCE Asia), Busan, Korea, 27–30 May 2019; pp. 793–798. [[Google Scholar](#)]
35. Brantl, C.; Ruffing, P.; Tünnerhoff, P.; Puffer, R. Impact of the HVDC system configuration on DC line protection. In Proceedings of the Symposium Aalborg, Aalborg, Denmark, 27–28 August 2019; CIGRE: Aalborg, Denmark, 2019. [[Google Scholar](#)]
36. Leterme, W.; Beerten, J.; Van Hertem, D. Nonunit protection of HVDC grids with inductive DC cable termination. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2016, *31*, 820–828. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
37. Wang, M.; Leterme, W.; Beerten, J.; Van Hertem, D. Using fault current limiting mode of a hybrid DC breaker. *J. Eng.* 2018, *2018*, 818–823. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Naidoo, D.; Ijumba, N.M. HVDC line protection for the proposed future HVDC systems. In Proceedings of the 2004 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2004, Singapore, 21–24 November 2004; Volume 2, pp. 1327–1332. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Peralta, J.; Saad, H.; Denetière, S.; Mahseredjian, J.; Nguefeu, S. Detailed and Averaged Models for a 401-Level MMC–HVDC System. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2012, *27*, 1501–1508. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Harnefors, L.; Antonopoulos, A.; Norrga, S.; Angquist, L.; Nee, H.P. Dynamic Analysis of Modular Multilevel Converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, *60*, 2526–2537. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Huang, W.H.; Huang, Y.; Li, M.; Gong, W.M. Stability analysis of Modular Multilevel Converter using Nearest Level Modulation. In Proceedings of the

- IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Florence, Italy, 23–26 October 2016; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Tu, Q.; Xu, Z.; Xu, L. Reduced Switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2011, 26, 2009–2017. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 43. D’Arco, S.; Suul, J.A.; Beerten, J. Analysis of accuracy versus model order for frequency-dependent Pi-model of HVDC cables. In Proceedings of the 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2016, Trondheim, Norway, 27–30 June 2016; pp. 1–8. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 44. Suarez, D.; Julian, A. Study and modeling of electrical interactions between machines and fixed 25kV/50Hz electric traction installations. Ph.D. Thesis, National Polytechnic Institute of Toulouse, Toulouse, France, 2014. [[Google Scholar](#)]
 45. Dommel, H.W. Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1969, PAS- 88, 388–399. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 46. Meyer, J.M.; Rufer, A. A DC Hybrid Circuit Breaker with Ultra-Fast Contact Opening and Integrated Gate-Commutated Thyristors (IGCTs). *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006, 21, 646–651. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 47. Wang, M.; Abedrabbo, M.; Leterme, W.; Van Hertem, D.; Spallarossa, C.; Oukaili, S.; Grammatikos, I.; Kuroda, K. A Review on AC and DC Protection Equipment and Technologies: Towards Multivendor Solution. In Proceedings of the CIGRE Winnipeg 2017 Colloquium, Winnipeg, MB, Canada, 30 September–6 October 2017; pp. 1–11. [[Google Scholar](#)]
 48. Augustin, T.; Jahn, I.; Norrga, S.; Nee, H.P. Transient behaviour of VSC-HVDC links with DC breakers under faults. In Proceedings of the 19th European Conference on IEEE Power Electronics and Applications (EPE’17 ECCE Europe), Warsaw, Poland, 11–14 September 2017; pp. P.1–P.10. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

49. Bucher, M.K.; Franck, C.M. Contribution of fault current sources in multiterminal HVDC cable networks. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2013, 28, 1796–1803. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
50. Gemmell, B.; Dorn, J.; Retzmann, D.; Soerangr, D. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission. In Proceedings of the 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 21–24 April 2008; pp. 1–16. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Bordignon, P.; Zhang, H.; Shi, W.; Serbia, N.; Coffetti, A. HV submodule technology based on press pack IGBT for largest scale VSC-HVDC application. *IET Conf. Publ.* 2016, 2016. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
52. Dijkhuizen, F.; Norrga, S. Fault tolerant operation of power converter with cascaded cells. *EPE J. (Eur. Power Electron. Drives J.)* 2013, 23, 21–26. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
53. Weiss, D.; Vasiladiotis, M.; Bănceanu, C.; Drack, N.; Ødegård, B.; Grondona, A. IGCT-based modular multilevel converter for an AC-AC railway power supply. In Proceedings of the PCIM Europe 2017—International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 16–18 May 2017. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]