

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

ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

«РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З ВСТАВКОЮ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

Виконав:

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

НЕЧИТАЙЛО Богдан Анатолійович

Керівник канд. техн. наук, доцент

ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« ____ » _____ 2023 р.

Допускається до захисту:

« ____ » _____ 2023 р.

Гарант освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
канд. техн. наук, доцент

Ігор ГАРАСИМЧУК

м. Кам'янець-Подільський, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Призначення вставок постійного струму	11
1.2 ВВППС – основні характеристики системи	12
1.3 Варіанти застосування ВВППС	13
1.4 Керування потужністю	15
1.5 Поведінка ВВППС в умовах виходу з ладу системи змінного струму	16
1.6 Вплив підключеної мережі змінного струму на ВПС	17
1.7 Споживання реактивної потужності	19
1.8 Висновки до розділу	21
2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Пріоритетні напрями діяльності магістрального електромережевого комплексу.....	22
2.2 Заходи щодо зниження комерційних втрат електроенергії	26
2.3 Перспективи передачі електроенергії за допомогою постійного струму .	28
2.4 Основні причини використання ППС в ОЕС України	30
2.5 Висновки до розділу	33
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	34
3.1 Вибір напруги ліній електропередач постійного струму	34
3.2 Вибір схеми вставки постійного струму.....	38
3.3 Перетворення й регулювання струму конверторами	39
3.4 Вибір тиристорів	42
3.5 Система захисту тиристорів від перенапруг та перевантажень	46
3.6 Система охолодження тиристорних модулів	48
3.7 Визначення кількості тиристорів у вентильних групах перетворювача	50
3.8 Висновки до розділу	52
4 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	53

4.1 Вибір раціонального січення проводів	53
4.2 Розрахунок споживання реактивної енергії перетворювачами	54
4.3 Усунення впливу вищих гармонік напруги й струму у схемі ВПС	58
4.4 Розрахунок фільтрокомпенсуючого пристрою	63
4.5 Активні фільтри	69
4.6 Висновки до розділу	72
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	73
5.1 Вибір трансформатора.....	73
5.2 Компенсація реактивної потужності	76
5.3 Вибір місця під'єднання компенсаційних пристроїв.....	79
5.4 Розрахунок потужності компенсаційних пристроїв	79
5.5 Зменшення струму несиметрії у вставках постійного струму.....	82
5.6 Струм к.з. на шинах високої напруги трансформаторів.....	84
5.7 Вибір обладнання.....	85
5.8 Висновки до розділу	90
6 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	91
6.1 Критерії економічної ефективності енергетичного виробництва	91
6.2 Визначення капітальних затрат	92
6.3 Вартість електроенергії	93
6.4 Розрахунок економічної ефективності.....	96
6.5 Висновки до розділу.....	97
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	98
7.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок	98
7.2 Захист персоналу від впливу електричних і електромагнітних полів	101
7.3 Захист персоналу підстанції від наведених напруг	104
7.4 Висновки до розділу.....	105
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	107

АНОТАЦІЯ

В дипломній роботі виконано дослідження можливих варіантів об'єднання несинхронних електроенергетичних систем та систем з різними стандартами регулювання частоти. Метою роботи є розробка лінії електропередачі з вставкою постійного струму для продажу електроенергії з України у Польщу і навпаки. Об'єкти, аналогічні спроектованому у даному проекті, можна впроваджувати і в інших електричних мережах, що дозволить значно зменшити розміри синхронних мереж змінного струму, запобігти або обмежити каскадні відключення, підвищити коефіцієнт корисної дії електромереж і надійність електроенергетичних систем.

ANNOTATION

In the thesis, a study of possible options for combining non-synchronous electric power systems and systems with different frequency regulation standards was performed. The purpose of the work is the development of a power transmission line with direct current insertion for the sale of electricity from Ukraine to Poland. Objects similar to the one designed in this project can be implemented in other electrical networks, which will significantly reduce the size of synchronous alternating current networks, prevent or limit cascading outages, increase the efficiency of power networks and the reliability of power systems.

РЕФЕРАТ

НЕЧИТАЙЛО Богдан Анатолійович. Розробка і дослідження лінії електропередачі з вставкою постійного струму. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Факультет енергетики та інформаційних технологій. Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2023.

В дипломній роботі виконано дослідження можливих варіантів об'єднання несинхронних електроенергетичних систем та систем з різними стандартами регулювання частоти.

Метою роботи є розробка лінії електропередачі з вставкою постійного струму для продажу електроенергії з України у Польщу.

Об'єкти, аналогічні спроектованому у даному проекті, можна впроваджувати і в інших електричних мережах, що дозволить значно зменшити розміри синхронних мереж змінного струму, запобігти або обмежити каскадні відключення, підвищити коефіцієнт корисної дії електромереж і надійність електроенергетичних систем.

Ключові слова: вставка постійного струму, високовольтна передача постійного струму, перетворювач, випрямляч, інвертор, компенсація реактивної потужності, біполярна схема, об'єднання несинхронних систем, фільтрокомпенсуючий пристрій, статичні тиристорні компенсатори, силові оптотиристори, металеве повернення, керування потоком потужності

ВСТУП

Актуальність теми. Створення потужних електричних систем обумовлено їх більшими техніко-економічними перевагами. Зі збільшенням їхньої потужності з'являється можливість спорудження більших електричних станцій з більш економічними агрегатами, підвищується надійність електропостачання споживачів, повніше й раціональніше використовується устаткування.

Формування електричних систем здійснюється за допомогою електричних мереж, які виконують функції передачі енергії й електропостачання споживачів. Перед електроенергетикою в найближчому майбутньому стоїть завдання всесвітнього розвитку, що буде малоефективним без міжсистемних об'єднань.

Сучасна енергетика характеризується наростаючою централізацією виробництва та розподілу електроенергії. В теперішній час основою міжсистемних енергетичних зв'язків України являються лінії напругою 500 кВ, а також лінії напругою 750 кВ. З ростом генеруючих потужностей, потоків потужності електропередачами і ускладненням енергосистем (ЕС) пред'являються нові вимоги до пристроїв і систем, що забезпечують підвищення меж переданих потужностей: підвищення статичної й динамічної стійкості ЕС, демпфірування коливань потужності, підтримка напруги в мережі, перерозподіл потоків потужності в електричних мережах.

У зв'язку з добудовою четвертого енергоблоку на Рівненській АЕС, у цій дипломній роботі розглядається проект лінії електропередачі (ЛЕП) Ковель-Хелм для продажу надлишків електроенергії з України у Польщу. На польській території завдяки даній ЛЕП будуть покращені умови електропостачання східного регіону, а для України збільшиться можливість видачі потужності Рівненської АЕС.

Мета і завдання досліджень. Метою даної дипломної роботи є розробка послідовності операцій для вибору вставки постійного струму класу напруги 220 кВ при проектуванні лінії електропередачі з її основними елементами.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі завдання:

- проведено аналіз існуючих типів систем високовольтних передач постійного струму з детальним розглядом недоліків та можливістю покращення їх роботи;
- здійснено вибір типу схеми вставки постійного струму та виконано опис її роботи;
- проведено розрахунок і вибір основних елементів підстанцій спроектованого об'єкту;
- розроблено функціональну та електричну принципову схеми вставки постійного струму;
- вибрано систему охолодження вентиляльних модулів та фільтрокомпенсуючих пристроїв;
- розроблено функціональну та електричну принципову схеми вставки постійного струму;
- проведено економічне обґрунтування розробки, розроблено заходи щодо охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Об'єкт дослідження – передача електричної енергії на постійному струмі класу напруги 220 кВ.

Предмет дослідження – перетворювальні підстанції з вставками постійного струму, їх функціональні та принципові схеми.

Методи дослідження. Використані методи досліджень, які базуються на діючих нормативних документах розрахунку та вибору схем вставок постійного струму, розрахунку систем захисту тиристорів від перенапруг та перевантажень, розрахунок споживання реактивної енергії перетворювачами та усунення впливу вищих гармонік напруги й струму у схемах ВПС, розрахунку фільтрокомпенсуючих пристроїв, правил улаштування електроустановок, зниження комерційних втрат електроенергії та ін.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що впровадження спроектованої вставки постійного струму дасть можливість продавати надлишки електроенергії у Польщу, частота електричних систем якої регулюється стандартом, відмінним від стандарту регулювання частоти ОЕС України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі приведені результати теоретичних досліджень та вирішена науково-технічна задача, що полягає в розробці проекту лінії електропередачі з вставкою постійного струму. На базі отриманих результатів та теоретичних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Найефективнішим варіантом для об'єднання ЄЕС України та Європи є побудова лінії електропередач з вставкою постійного струму для видачі потужності атомних електростанцій і продажу електроенергії у Європу.

2. Показано переваги, які отримає Україна від розвитку електропередач постійного струму.

3. В результаті роботи над дипломним проектом була спроектована вставка постійного струму розрахунковою потужністю 400 МВт.

4. Було проведено аналіз існуючих типів систем високовольтних передач постійного струму з детальним розглядом недоліків та можливістю покращення їх роботи.

5. Здійснено вибір типу схеми ВПС та опис її роботи.

6. Проведено розрахунок і вибір основних елементів підстанцій спроектованого об'єкту.

7. Розроблено функціональну та електричну принципову схеми ВПС.

8. Проведено економічне обґрунтування розробки, розроблено заходи щодо охорони праці та безпеки життєдіяльності.

9. Впровадження спроектованої вставки постійного струму дасть можливість продавати надлишки електроенергії у Польщу, частота електричних систем якої регулюється стандартом, відмінним від стандарту регулювання частоти ОЕС України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. A. Laughton, C.J. Warne Electrical Engineer's Reference Book. Sixteenth edition.-Elsevier Science, 2003.-1497 p.
2. Tony R. Kuphaldt, Lessons In Electric Circuits, Volume I DC, Fifth Edition last update August 23.-Elsevier Science, 2002.-543 p.
3. Кашкалов В.И., Половкин Б.И. Улучшение энергетических показателей управляемых выпрямителей.- К.:Техника, 1988.-361 с.
4. CIGRE, Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations having Low Short Circuit Capacities. Part I: AC/DC System Interaction Phenomena, CIGRE Technical Brochure 68, Paris A992.-94 p.
5. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей.-К.:Наукова думка, 1983.-276 с.
6. Исаев И.П., Иньков Ю.М. Вероятные методы расчёта полупроводниковых преобразователей.-М.: Энергоатомиздат, 1983.-237 с.
7. High-Voltage Direct Current Handbook, First Edition, Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1994.
8. Тиходеев Н.Н. Планирование развития энергетических систем. Передача энергии постоянным током.- М.: Энергоатомиздат, 1986.-301 с.
9. Энергетическая электроника: Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-153 с.
10. R.L. Hauth, P.J. Tatro, B.D. Railing, B.K. Johnson, J.R. Stewart and J.L. Fink, HVDC Power Transmission Technology Assessment Report ORNL/Sub/95-SR893/1, Oak Ridge National Laboratory, April 1997.-167 p.
11. Справочник по проектированию электрических сетей /Под ред. Ю.Г. Барыбина.-М.: Энергоатомиздат, 1991.-464 с.
12. Горфинкель Я.М. Укрупненные показатели сооружений линий электропередач. - М.: Энергия, 1974.-328 с.

13. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 464 с.
14. Вороб Ж.Б. Эксплуатация и ремонт электрофильтров - М.: Энергия, 1976. - 209 с.
15. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока - Л.: Энергия, 1973. - 303 с.
16. Тиходеев Н.Н. Передача электроэнергии.-Л.: ЭАИ, 1986.-248 с.
17. Могидин Ф.А. Сооружение ЛЭП.-М.: ВШ, 1987.-263 с.
18. Передача энергии постоянным током. Оборудование преобразовательных подстанций /СИГРЭ-74/.--М.: Энергия, 1977.-104 с.
19. Коновалова Л.Л. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Энергоиздат, 1989.-291 с.
20. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Высшая школа, 1990.-374 с.
21. Федоров А.А. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / Электрооборудование и автоматизация /.– М.: Энергоиздат, 1980.-647 с.
22. Федоров А.А. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / Промышленные электрические сети /.– М.: Энергоиздат, 1981.-542 с.
23. Справочник по электрооборудованию высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1981.-656 с.
24. Федишин Б.П. Економіка енергетики - Тернопіль:АСТОН, 2003.-160с.
25. Воронина А.А., Шибенко Н.Ф. Охрана труда в энергосистемах. - М.: Энергия, 1973.-382 с.
26. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности.-Л.:Энергоатомиздат, 1991.-429 с.
27. Бердій Я.І., Джигирей В.С.,Кидисюк А.І. Основи екологій та охорона навколишнього середовища. – Львів,1999.-238с.

28. Білявський Г.О., Падун М.Н., Фурдуй Р.С. Основи загальної екології. – К.:Либідь, 1995. – 368с.
29. Лапін В.М., Безпека життєдіяльності людини, - Львів: ЛБК НБУ; Київ: Знання, 2000.-188с
30. Постанова Кабінету Міністрів України від 30 березня №391 "Про затвердження "Положення про державну систему моніторингу довкілля"
31. Енергетична політика України №5 2005
32. Затянувшиеся реформы // Информ.-аналит. журнал «Вести в электроэнергетике», 2017. № 4.
33. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Розпорядження Кабінету Міністрів України 24 липня 2013 року N 1071.
34. План розвитку ОЕС України на 2017 – 2026 рр. – Проект. «Укренерго». Державне підприємство. Національна енергетична компанія. 2017 р.
35. Інтернет-портал Energo-Consultant.ru. URL: https://www.energo-konsultant.ru/sovets/elektrosnabgenie/yuridicheskim_licam/kak_sekonomit/Kak_p_redpriyatiu_s_elektrostanicie_snizit_zatrati_na_elektoenergiu/.
36. Ивакин В.Н., Сысоева Н.Г., Худяков В.В. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы. М.: Энерго- атомиздат, 1993.
37. Передачи и вставки постоянного тока высокого напряжения / Под ред. В.В. Худякова. М.: Энергоатомиздат, 1988.