

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

ГАВРИЛЮК ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.311

**РОЗРОБКА ПРОЕКТУ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
З ВСТАВКОЮ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат

дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Тернопіль

2019

Роботу виконано на кафедрі електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Керівник роботи: кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії
Оробчук Богдан Ярославович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Рецензент: кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри фізики
Сіткар Оксана Андріївна,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Захист відбудеться 23 грудня 2019 р. о 09⁰⁰ годині на засіданні екзаменаційної комісії № 39 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Микулинецька, 46, навчальний корпус № 7, ауд. 310

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

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. Крім цього, перед електроенергетикою різних країн світу, у тому числі й України, з'явився ряд нових проблем. Найбільш важливими з них є:

1) ріст вартості спорудження нових ліній електропередачі через жорсткість екологічних вимог при їхньому спорудженні, необхідності вести будівництво у вже освоєних і заселених регіонах зі сформованою інфраструктурою й комунікаціями;

2) труднощі з відводом землі під траси ліній електропередачі через зменшення землеробських угідь і побоювання шкідливих екологічних наслідків;

3) необхідність у збільшенні пропускної здатності системоутворюючих зв'язків, що обмежуються за умовами стійкості (техніко-економічні порівняння, проведені в різних країнах показують, що в ряді випадків вигідніше підвищити пропускну здатність існуючих ліній, ніж будувати нові);

4) ріст втрат у системах і зниження ефективності використання потужних ліній електропередачі, пов'язані з тим, що в процесі формування замкнутої електричної мережі з паралельною роботою ліній різної номінальної напруги часто виявляється, що лінії більш низької напруги перевантажуються, а більше високої – не довантажуються, тому що розподіл потоків відбувається обернено пропорційно повному опору ліній.

У теперішній час можливість українських електростанцій використовується приблизно на 60%. В Україні електроенергії виробляється більше, ніж споживається. Як відомо, цей енергетичний ресурс не можливо відкласти про запас, його необхідно споживати, коли він виробляється. Щоб підвищити загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) електромереж необхідно, щоб спожита електроенергія по обсягах наближалась до виробленої.

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.

Оскільки синхронна робота об'єднаних енергосистем України та Європи неможлива через відмінності стандартів регулювання, то ЛЕП повинна бути з вставкою постійного струму (ВПС), через яку можна здійснити зв'язок асинхронних енергосистем.

Мета і завдання досліджень.

Метою 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 вентильних 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'єктом дослідження - передача електричної енергії на постійному струмі класу напруги 220 кВ.

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

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано спрощений підхід до транспортування наявних в країні надлишкових невикористаних енергоресурсів;

- запропоновано принцип об'єднання вітчизняної енергосистеми на змінному струмі з великими зарубіжними енергосистемами з відмінностями в системах регулювання частоти і потужності, інших системах автоматики, відмінностями в системах оперативного управління і нормативній базі та ін.;

- запропоновано підхід збільшення відстаней, що утрудняють створення синхронних зв'язків з енергосистемами країн, розташованих на захід від кордонів з Україною.

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.

Апробація.

Основні положення роботи і її результати доповідалися на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій», присвяченій 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця (20 червня 2019 р., м. Тернопіль)

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 8 розділів, висновків, переліку посилань (55 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 116 сторінок, 13 таблиць, 29 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи: стан розробки наукової проблеми й актуальність, мету і завдання роботи, об'єкт та предмет дослідження, описану наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів.

У **першому розділі «Аналітична частина»** розглянуто призначення вставок постійного струму, основні характеристики системи на базі таких вставок, виконано аналіз варіантів застосування ВВПС, керування потужністю, та поведінки ВВПС в умовах виходу з ладу системи змінного струму. Розглянуто вплив підключеної мережі змінного струму на ВПС і споживання реактивної потужності.

Потенційні переваги електричної енергії постійного повністю визнані і щоб покращити ефективність систем електропередач, почали проведення дослідницьких робіт у Європі та США.

Особливо ця проблема актуальна сьогодні для забезпечення експорту електроенергії з України в Західну Європу, коли частота нашої мережі нижча, ніж європейської.

При використанні високовольтних ліній постійного струму електрична енергія береться з мережі змінного струму, перетворюється в постійний струм станцією перетворення, передається кабелем або повітряною лінією, перетворюється знову в змінний струм іншою станцією перетворення й подається в прийомну мережу змінного струму. Оскільки процес перетворення повністю контролюється, передана енергія не залежить від імпедансу або зсуву фаз, як у випадку змінного струму.

У цей час в експлуатації перебувають системи ВВПС *Light*[®] потужністю до 350 МВт, а системи потужністю до 550 МВт перебувають у стадії розробки. З'єднання між станціями перетворення виконуються безмасляними кабелями з екструдованою ізоляцією (наземним або підводним прокладанням) довжиною до

180 км. З'єднання ВВППС *Light*[®] можна реалізувати також у вигляді двонаправленої системи (рис. 1).

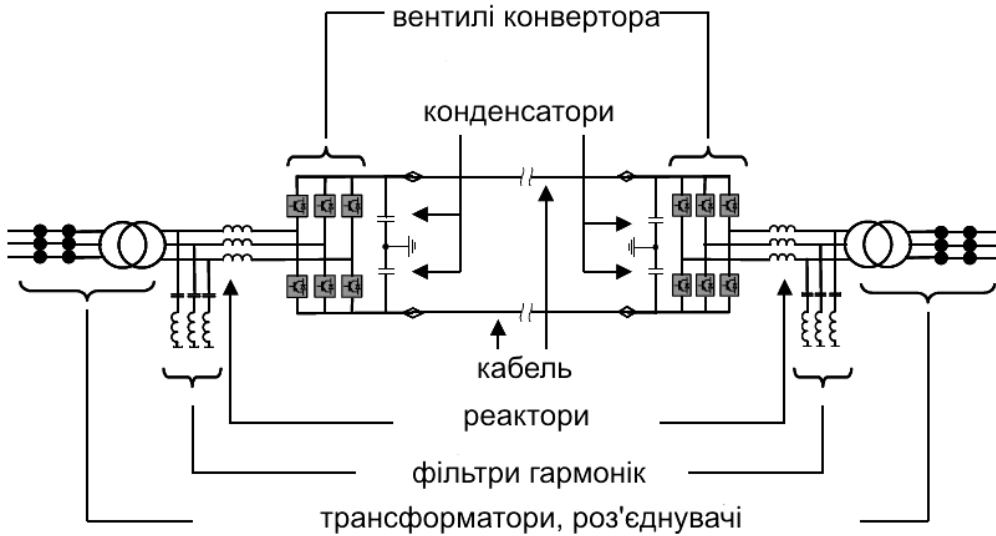


Рисунок 1 - Спрощена схема типової ВВППС *Light*[®]

Проектувальники енергосистем і власники електричних мереж повинні враховувати можливості ВВППС при плануванні інвестицій у застарілі системи електропередач. Крім стабільності при використанні дуже довгих ліній і підводних кабелів та здатності управляти потоком енергії, ВВППС обіцяє додаткові вигоди: менші строки будівництва, менші втрати електроенергії в ЛЕП, можливість постачати електроенергію несинхронізованим мережам та об'єднуватись з ними. Обмеження розмірів синхронних мереж змінного струму й об'єднання їх через лінії ВВППС дає економічну вигоду, і підвищення надійності ЕЕС, що дозволяє запобігти або обмежити каскадні відключення.

Тому найефективнішим варіантом для об'єднання ЄС України та Європи є побудова лінії електропередач з вставкою постійного струму для видачі потужності Рівненської АЕС і продажу електроенергії у Польщу.

У другому розділі «Науково-дослідна частина» виконано дослідження пріоритетних напрямів діяльності магістрального електромережевого комплексу, досліджено заходи щодо зниження комерційних втрат електроенергії, проаналізовано перспективи передачі електроенергії за допомогою постійного струму, обгрунтовано основні причини використання ППС в ОЕС України.

В сучасній вітчизняній енергетиці існує такий окремий напрямок діяльності, як зведення об'єктів розподіленої генерації, який може зіграти позитивну роль в ОЕС України щодо синхронізації та інтеграції зазначених об'єктів з єдиної загальноукраїнської електричної мережі, що, в свою чергу допоможе вирішити і перелічені нижче проблеми:

- відпадає необхідність зводити, в тому числі і за рахунок коштів бюджету, надлишкові генеруючі потужності, які є необхідною складовою електромережної інфраструктури;
- уможливорює більш гнучко розподіляти навантаження в електромережах;

- вирішує питання компенсування деякої частки мережевих втрат;
- в ізольованих енергорайонах стає можливим більш ефективно вирішувати питання енергопостачання.

Передача електроенергії за допомогою постійного струму є більш перспективним способом, оскільки система передачі постійного струму працює більш стійко, зменшуються втрати в ЛЕП, виключається необхідність в синхронізації роботи електростанцій. При цьому не потрібна заміна основного обладнання діючих електростанцій і трансформаторних підстанцій.

У електропередачах постійного струму (ППС) відсутні багато чинників, які властиві електропередачам змінного струму, зокрема обмеження пропускної здатності. Гранична потужність, що передається лініями електропередач постійного струму, більша, ніж у аналогічних ЛЕП змінного струму. Обмеженість застосування ППС пов'язана в основному з технічними труднощами створення ефективних недорогих пристроїв для перетворення змінного струму в постійний (на початку лінії) і постійного струму в змінний (в кінці лінії).

Узагальнюючи, можна зазначити, що в сучасному світі розвиток електропередач постійного струму є таким же неминучим, як і розвиток відновлюваних джерел енергії. Тому активізувати ці роботи потрібно і в Україні.

У третьому розділі «Технологічна частина» виконано вибір напруги ліній електропередач постійного струму, вибір схеми вставки постійного струму, розглянуто питання перетворення й регулювання струму конверторами, запропоновано систему захисту тиристорів від перенапруг та перевантажень та систему охолодження тиристорних модулів, визначено кількості тиристорів у вентильних групах перетворювача.

Економічне зіставлення ліній електропередачі постійного і змінного струму істотно простіше, якщо воно стосується ліній, призначених в основному для виконання транспортно-енергетичних функцій. При раціональному виборі напруги, економія коштів досягнута в лінійній частині ліній електропередач постійного струму (ЛЕППС), перекидає додаткові й досить значні витрати на спорудження перетворювальних підстанцій.

Оскільки основною метою дипломної роботи є розробка ВПС для передачі електроенергії іншому споживачеві, то цілком достатньо буде побудувати класичну високовольтну передачу постійного струму (ВВПС), яка у порівнянні з ВВПС Light® є значно дешевшою і її технічні характеристики цілком достатні для надійної і безперебійної роботи та ефективного контролю за обсягами перетікання потоку електроенергії. З двох самих поширених варіантів схем ВВПС - монополярного і біполярного - ми вибрали біполярну схему, яка володіє рядом суттєвих переваг. Оскільки схема планується для передачі 400 МВт, то потужність кожного з перетворювачів повинна бути 200 МВт.

Проведені розрахунки показали, що перетворювач буде складатися з двох послідовно з'єднаних шестифазних мостів, на кожному з яких є одна катодна і анодна групи. Тому кількість тиристорів обираємо кратною 4, а у схемі одного перетворювача використовуємо 40 послідовно з'єднаних тиристорів, в одній групі – 20.

У четвертому розділі «Проектно-конструкторська частина» виконано вибір раціонального січення проводів, проведено розрахунок споживання реактивної енергії перетворювачами, розглянуто шляхи усунення впливу вищих гармонік напруги й струму у схемі ВПС, розраховано фільтрокомпенсуючий пристрій та активні фільтри.

Одна з особливостей ліній електропередач постійного струму полягає в тому, що змінні струми перетворювальних мостів мають характерну трапецевидну форму. Це є причиною виникнення вищих гармонік. Проникнення вищих гармонік струму у відправну й приймальну енергосистеми негативно позначається на її роботі: виникають додаткові втрати енергії в мережах, знижується навантажувальна здатність генераторів, синхронних компенсаторів, конденсаторних батарей, погіршується якість напруги і т.д.

Для відгородження або обмеження гармонік застосовують паралельні фільтри з підбраною смугою пропускання, а також послідовно у лінію включають реактор, основна мета якого – зменшити (згладити) струми пульсацій. Після реакторів, паралельно до полюсів, під'єднують фільтри постійного струму (ФПС), які являють собою конденсатори, ввімкнені на землю. Конденсатори пропускають лише змінну складову. Вони є зазвичай значно менші й дешевші, ніж фільтри на стороні змінного струму. Сучасні фільтри постійного струму – активні. Їх встановлюють наприкінці лінії постійного струму. У цих фільтрах пасивну частину знижують до мінімальної, а сучасна силова електротехніка використовується, щоб виміряти, інвертувати й вислати у мережу протидіючу гармоніку.

Проведені розрахунки фільтрокомпенсуючого пристрою показали, що розраховані фільтри зменшують одинадцятую та тринадцятую гармоніки практично до значення нормованого відповідно до технічних стандартів. Для усунення решти гармонік, які є набагато менші за потужністю, запропоновано використати активні фільтри змінного струму та активні фільтри постійного струму.

У п'ятому розділі «Спеціальна частина» виконано вибір трансформатора, розраховано компенсацію реактивної потужності та виконано вибір місця під'єднання компенсаційних пристроїв, проведено розрахунок потужності компенсаційних пристроїв, запропоновано заходи щодо зменшення струму несиметрії у вставках постійного струму, розраховано струм к.з. на шинах високої напруги трансформаторів.

Оскільки потужність однієї підстанції становить 232 МВА, то для покриття навантаження у 1-му варіанті необхідно два трансформатора по 120 МВА кожен. У 2-му варіанті необхідно встановити три трансформатора по 80 МВА.

При біполярному виконанні схеми, яка складається з двох підстанцій на випрямній та інвертуючій стороні, з врахуванням запасного трансформатора нам необхідно замовити дванадцять трифазних двообмоткових трансформаторів потужністю 120 МВА кожен при першому варіанті, або чотирнадцять однофазних триобмоткових трансформаторів потужністю 80 МВА кожен при другому варіанті. У такому випадку другий варіант значно дешевший, простіший при транспортуванні і встановленні та надійніший у експлуатації.

Для штучної компенсації реактивної потужності використовують статичні конденсатори й синхронні компенсатори (синхронні двигуни полегшеної конструкції без навантаження на валу). Перевагу віддають статичним конденсаторам. Необхідність компенсації реактивної потужності диктується створенням умов стійкості й можливості регулювання напруги в енергосистемі.

Для зменшення струму несиметрії заземляють точку з'єднання перетворювачів (рис. 2, а), або створюють металічний контакт (рис. 2, б), об'єднавши точки обох станцій проводом. Цей провід називають "металевим поверненням", його підвішують на основних опорах ЛЕП, переважно посередині між полюсами.

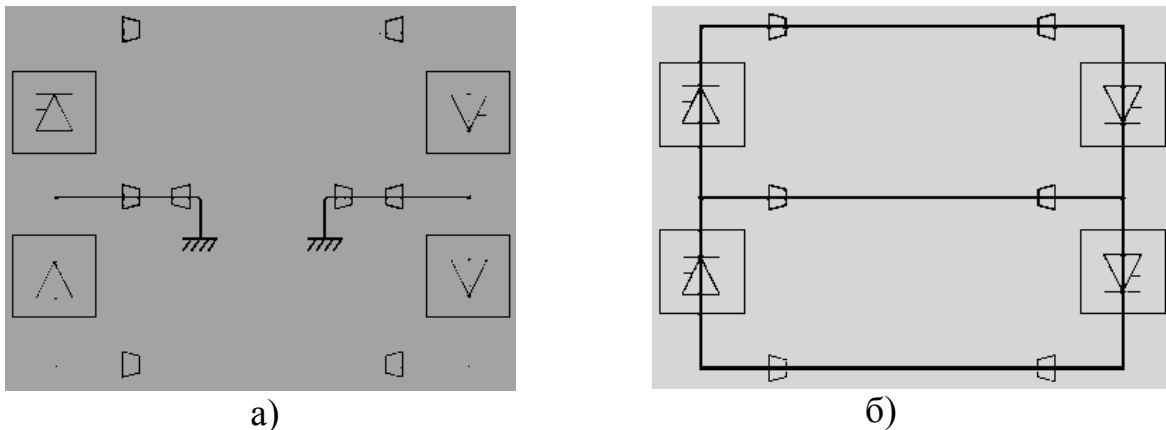


Рисунок 2 - Виконання схеми ВПС з заземленою точкою з'єднання вентильних перетворювачів а) і "металевим поверненням" б)

Побудова "металевого повернення" є дорожчою, ніж встановлення заземлюючих електродів, але проведені дослідження показують, що у схемах з металічним контактом точки з'єднання перетворювачів є такі переваги:

- виключення протікання через землю струму несиметрії полюсів;
- зниження магнітного поля від повітряної лінії постійного струму;
- зниження величини напруженості електричного поля й іонних струмів під проводами ПЛ, а також зниження величини індукції МП під проводами ПЛ у несиметричних режимах роботи ПЛ;
- можливість використання додаткового проводу для передачі електроенергії під час обриву одного з полюсів, або виходу з ладу однієї підстанції перетворювача;
- виключення електрокорозії підземних споруд і необхідності побудови дорогих робочих заземлювачів.

У шостому розділі «Обґрунтування економічної ефективності» розглянуто критерії економічної ефективності енергетичного виробництва, проведено визначення капітальних затрат, виконано розрахунок вартості електроенергії та розрахунок економічної ефективності.

У сьомому розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» розроблено заходи безпеки при обслуговуванні електроустановок, запропоновано захист персоналу від впливу електричних і електромагнітних полів та захист персоналу підстанції від наведених напруг.

У восьмому розділі «Екологія» розглянуто питання актуальності охорони навколишнього середовища, вплив на людину електромагнітного забруднення довкілля, а також вплив магнітного поля повітряних ліній постійного струму високої і надвисокої напруги на навколишнє середовище.

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.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гаврилюк І.М. Аналіз переваг високовольтних ліній електропередач постійного струму. Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф., присвяченій 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця (Тернопіль, 20 червня 2019 р.) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – С. 329-331.

АНОТАЦІЯ

Гаврилюк І.М. Розробка проекту лінії електропередачі з вставкою постійного струму, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕМ-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2019.

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 «Ковель – Хелм» 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.

ANNOTATION

Havryliuk I. Power line project development with direct current insert. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Chair of Electrical Engineering, group EEM-61. – Ternopil: TNTU, 2019.

In the diploma paper deals with the possibility of combining non-synchronous power systems and systems with different frequency control standards.

The purpose of the work is to develop a Kovel-Helm transmission line with a DC insert for the sale of electricity from Ukraine to Poland.

Objects similar to those projected in this project can be implemented in other power grids, which will significantly reduce the size of AC synchronous networks, prevent or limit cascade outages, increase the efficiency of grids and the reliability of power systems.

Key words: DC insertion, high-voltage DC transmission, converter, rectifier, inverter, reactive power compensation, bipolar circuit, integration of non-synchronous systems, filter compensating device, static thyristor compensator, power optocouplers, metal return, power flow control.