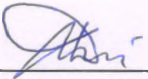


Довідка
про відсутність плагіату у випускній кваліфікаційній роботі

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

ДОВІДКА

За результатами перевірки випускної кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти Миколи Цимбрили на тему: Оптимізація роботи сонячних електричних станцій для компенсації реактивної потужності в системах тягового електропостачання в роботі не виявлено порушень академічної доброчесності.

Керівник ВКР _____  Дмитро Босий

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ Дмитро БОСИЙ

« _____ » _____ 20 ____ р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема: **Оптимізація роботи сонячних електричних станцій для компенсації реактивної потужності в системах тягового електропостачання**

Theme: **Solar power plants optimization for reactive power compensation in traction power supply systems**

Керівник дипломної роботи

доцент _____ Дмитро БОСИЙ

Нормоконтролер

доцент _____ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2026

_____ Микола ЦИМБРИЛА

Student

TSYMBRYLA Mykola

Дніпро – 2021

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

_____ Дмитро БОСИЙ

« 25 » січня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи ЕС2026 Цимбрили Миколи Богдановича

1 Тема дипломної роботи: **«Оптимізація роботи сонячних електричних станцій для компенсації реактивної потужності в системах тягового електропостачання»**

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 31ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: компенсація реактивної потужності на сонячній станції, дані генерованої електроенергії на сонячній станції.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): проблеми пов'язані з реактивною потужністю, методи компенсації реактивної потужності; аналіз сучасного обладнання сонячних електростанцій; дослідження перетікання реактивної електроенергії для оптимізації сонячних електростанцій.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	10.12	5
2.	ПРОБЛЕМИ ПОВ'ЯЗАНІ З РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ, МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	01.10	25
3.	АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	11.11	40
4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	01.12	20
5.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
6.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи _____

Дмитро БОСІЙ

Завдання прийняв до виконання _____

Микола ЦИМБРИЛА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 40 сторінок, складається з 3 розділів та містить 20 ілюстрацій, 7 таблиць, 10 використаних джерел.

Мета роботи – здійснити аналіз та доцільність використання сучасного устаткування сонячних електростанцій та дослідження компенсаторів реактивної потужності.

У роботі виконувалось дослідження тягової підстанції постійного струму, до якої приєднана сонячна станція, з аналізом перетікання реактивної електроенергії та оптимізацією параметрів інверторів сонячної станції для зниження цих перетікань. При вирішенні поставлених завдань було взято через систему АСКОЕ показники сонячної станції ТП-5, 2СШ 10 кВ, ком.№8, яка приєднана до тягової підстанції ЕЧЕ-22 Самбір.

Для вирішення завдання було обрано середовище Excel, а саме для побудови графіка прийому та генерації реактивної потужності та віддача активної потужності. Показано, що результатом дослідження було визначено мінімальне значення для досягнення зміни корегування інвертора.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ІНВЕРТОРА, КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ. МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	9
1.1 Поперечна компенсація.....	18
1.2 Повздовжня компенсація	19
1.3 Фільтр-компенсуючий пристрій.....	21
2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	24
2.1 Впровадження сучасних сонячних панелей.....	31
2.2 Впровадження сучасних інверторів на сонячних електростанціях.....	33
2.3 Впровадження сучасних сонячних акумуляторів.....	34
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	35
ВИСНОВОК.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		М. Цимбрила			Оптимізація сонячних систем та компенсація реактивної потужності в системах тягового електропостачання	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник		Д. Босий					5	
Н. Контр		В. Перцевий				УДУНТ, ІСЕ гр. ЕС 2026		

ВСТУП

Актуальність роботи. Тенденцією 21 століття являється розвиток енергетики та альтернативних джерел електроенергії. Сучасний розвиток інноваційних технологій підштовхує до залежності людської діяльності від безперебійного електропостачання. Через цей стрімкий розвиток в багатьох країнах світу виникла потреба в поширеному використанні розподіленої генерації – енергетичних установок невеликих потужностей щоб частково або повністю забезпечити власні потреби в електроенергії.

Оптимізація сонячних електростанцій – це економічно, екологічно вигідне рішення, яке дає змогу забезпечити себе повністю електроенергією та заощадити кошти зменшивши відсоток закупівлі державної електроенергії і зберегти екосистему нашої планети.

Знаючи, що Сонячна енергія – це практично невичерпне джерело електроенергії, сонячна електроенергія доступна в кожному кочотку нашої землі.

На даний час для виробітку електричної енергії й теплопостачання, величезним потоком витрачають органічні види палива. Нажаль в сучасному світі це використання пов'язане з виниканням великого спектру проблем, а саме: залежність від поставки поставок паливних ресурсів, великими експлуатаційними витратами на устаткування, стрімке зростання цін, забруднення екосистеми.

Причиною виникнення реактивної потужності, пов'язана з рівнем сучасного розвитку промисловості, а саме з величезною кількістю електричних машин в сучасних мережах. Проблема компенсації реактивної потужності займає важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Компенсація реактивної потужності завжди приділялась увага але з кожним роком питання компенсації реактивної потужності стає ще більш актуальним. Це пов'язано зі зростанням споживання електроенергії та ефективністю роботи енергосистеми в цілому.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Повна потужність має дві складові - активну потужність, яка безпосередньо виконує роботу та реактивну - потрібну для активації магнітних полів електричних машин. Реактивна потужність відбирається споживачем з мережі і знижує коефіцієнт потужності і ККД електроустановки. Чим нижче коефіцієнт потужності, тим вище буде індуктивний реактивний компонент по відношенню до активного компоненту і навпаки. Коли ФЕС(сонячні фотоелектричні станції) починає генерувати більшу енергію в мережу споживання реактивної потужності збільшується тому-що при проходженні більшого струму через трансформатор, зростає реактивна енергія спожита трансформатором.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Обрані дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт в Українському державному університеті науки і технологій.

Мета і завдання роботи. Аналіз та доцільність використання сучасного устаткування сонячних електростанцій. Метою є дослідження компенсаторів реактивної потужності.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист. Вперше проведене дослідження тягової підстанції постійного струму, до якої приєднана сонячна станція, з аналізом перетікання реактивної електроенергії та оптимізацією параметрів інверторів сонячної станції для зниження цих перетікань.

Практичне значення отриманих результатів. Набуті результати у ході дослідження дозволяють в подальшу оптимізацію сонячних систем та розширяють межі знать науковців та надають змогу дізнаються більше про ефективність компенсації реактивної потужності. Можливість розширення функціональної можливості інверторного обладнання сонячної станції для генерування необхідного рівня реактивної потужності. Дослідження можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці магістрів та бакалаврів на кафедрі «Інтелектуальні системи енергопостачання» Українського державного університету науки і технологій.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особистий внесок здобувача. Постановка мети та завдання дослідження, аналіз роботи компенсації на реальній тяговій підстанції. Здобувачем самостійно проведено збір даних, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих під час експериментальних досліджень результатів, формулювання висновків.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень були представлені здобувачем на 81 Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених, магістрантів та студентів «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ» 28 жовтня 2021 року.

Публікація.

Цимбрила М. Б. Оптимізація сонячних систем та компенсація реактивної потужності в системах тягового електропостачання / М. Б. Цимбрила // 81 Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, магістрантів та студентів «НАУКА І СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ» 28 жовтня 2021 р.- Дніпро. 2021, с. 22

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. ПРОБЛЕМИ, ПОВ'ЯЗАНІ З РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ.

МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

За роки незалежності України спостерігається велике зростання виробництв і розвиток інфраструктури міст. Відповідно з цим збільшується кількість і потужність електроприймачів, що застосовуються на виробництвах в основних і допоміжних циклах, а об'єкти інфраструктури використовують велику кількість освітлювальної апаратури для робочого освітлення, а саме: реклами підприємств і дизайну. У зв'язку з цим збільшенням збільшується споживана електрична потужність.

В залежності від експлуатуючого устаткування навантаження розділяється на активну і реактивну потужність. Зазвичай споживачі мають справу із змішаними активно-індуктивними навантаженнями. Тому, з електричної мережі відбувається споживання як, активної, так і реактивної енергії.

Реактивна енергія не пов'язана з виробітком корисної роботи, вона витрачається на створення електромагнітних полів в трансформаторах, електродвигунах, зварювальних трансформаторах, індукційних печах, освітлювальних приладах. Активна ж енергія перетворюється в корисну: теплову, механічну та інші енергії.

Робота трансформаторів, асинхронних двигунів та іншої електромагнітної апаратури змінного струму зумовлюється процесом безперервної зміни магнітного потоку, що виникає в них і поводитьсь таким чином, що можна йому приписати певного роду інерцію.

При зміні струму в колі трансформатора чи асинхронного двигуна тягових підстанцій, завжди виникає інерція магнітного потоку у чітко вираженій формі е. р. с. самоіндукції. Тому напруга генератора змінного струму повинна містити складову, яка в кожен момент проміжку часу компенсує протидію е. р. с. самоіндукції. Отже і миттєве значення потужності генератора завжди має таку складову, яка зумовлена інерцією магнітного потоку, тобто, протидію е. р. с. самоіндукції.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже величина реактивної потужності, яка споживається, напряду залежить від магнітної опорності споживачів електроенергії. Якщо великий магнітний опір шляху магнітного потоку, тоді більша реактивна потужність.

Мережа являється важливим джерелом реактивної потужності. Так як, окрім вироблення реактивної потужності генераторам, мережа має використовувати решту джерел або інші засоби компенсації, що в кінцевому результаті, принаймні, як багато споживачів в якості постачальника реактивної потужності.

Зміна реактивної потужності протягом одного періоду змінного струму. Протягом першої чверті кожного періоду, де струм збільшується від нуля до максимального значення, у результаті відповідно зростає подолання електро рушійної сили самоіндукції та магнітний потік. В магнітному полі відбувається накопичення енергії за рахунок реактивної потужності, що надходить з генератора в коло споживача.

Протягом другої чверті кожного періоду, магнітний потік та струм зменшуються від максимального значення до нуля.

Енергія магнітного поля аналогічно зменшується до нуля. Зменшення енергії магнітного поля зумовлене поверненням реактивної потужності з кола споживача в генератор за рахунок дії зворотно спрямованої електрорушійної сили самоіндукції. В результаті впливає, що реактивна потужність, йде на створення магнітного потоку в трансформаторах, асинхронних двигунах та інших електричних пристроях, чотири рази за кожен період змінює свій напрямок, а середнє значення цієї потужності за кожен півперіод: ціле число півперіодів дорівнює нулю. Процес обміну реактивної потужності між генератором і колом споживача здійснюється в формі коливального процесу.

Знаючи теоретичні основи електротехніки відомо, що наявність в колі реактивних опорів зумовлює зміщення синусоїди струму відносно синусоїди напруги (див. формулу 1.1).

В результаті синусоїда миттєвої потужності має місця, які розташовані нижче осі абсцис, що вказує про зміну напрямку миттєвої потужності на цих ділянках.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середнє за період значення миттєвої потужності називається активною потужністю

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (1.1)$$

де T – період синусоїдної миттєвої потужності, рівний половині періоду синусоїд струму і напруги [1].

Проблематичні наслідки передачі в мережу реактивної потужності загальновідомі. Основною проблемою є – передача в мережу реактивної потужності, що викликає величезні питомі втрати, чим передача активної. Пояснюється це тим, що реактивні опори мереж високого навантаження перевищують активні, тому передача реактивної потужності призводить до більш значного зниження напруги в мережі.

Використання великої кількості електричних мереж стає з кожним роком все більш складним процесом, завдяки збільшенню їх розміру. Наявність довгих з'єднувальних ліній та застосування новітніх технологій.

Дані фактори вимагають від операторів мереж працювати з більшою стабільністю та безпекою. В швидко розвиваючих країнах в яких високі темпи зростання споживання, аналогічно збільшує ймовірність виникнення аварії.

Необхідно стежити за такими параметрами, реактивною потужністю та рівнем напруги, так як напруга має бути в діапазоні допустимих значень в будь якій точці мережі незалежно від робочих ситуацій. Напруга може локально впасти нижче граничного рівня, при великому споживанні електроенергії перетоки потужності через мережі є важливим фактором, що викликає падіння напруги в лінії.

Залежність реактивної потужності навантаження від напруги, зазвичай називають регулюючим ефектом реактивної потужності навантаження по напрузі.

Цей термін можна розтлумачити наступним чином. В будь-якому вузлі енергетичної системи порушується баланс спожитої реактивної потужності і

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

генеруючої в сторону переважання споживаної, тому напруга у вузлі стане знижуватись.

Але з зниженням напруги, звичайно, якщо напруга залишиться наближеною до номінального значення, буде зменшуватись і споживана реактивна потужність, зменшуючи небаланс та зупиняючи зниження напруги. Простими словами, споживачі електричних мереж шляхом зміни реактивного навантаження, хочуть стабілізувати напругу в вузлі. Таке ж явище спостерігається при підвищенні напруги, яке викликане переважанням реактивної потужності.

Перетікання реактивної потужності на більш великі відстані має певний ряд недоліків, а саме значний спад напруги, значні втрати в лінії та меншу здатність передавати активну потужність. Реактивна потужність може кардинально відіграти роль в динамічних аспектах, а саме: зміни навантаження, перепади напруги.

Передача електричної енергії з використанням змінного струму почалася в кінці 19 століття, замінивши існуючі невеликі локальні системи постійного струму. З розширенням локальних систем електропостачання і міжміської передачі виникли різні проблеми з контролем напруги і стабільності, в першу чергу пов'язані з дисбалансом реактивної потужності в системах. Для управління напругами стаціонарної системи в основному використовувалася комутована компенсація реактивної потужності (шунтові конденсатори і шунтові реактори). Динамічний метод був заснований на обертових машинах, наприклад, синхронних компенсаторах.

У середині 60-х років 20-го століття з'явилися перші статичні компенсуючі пристрої реактивної потужності, тобто реактори, керовані струмом постійного струму (ртутні удари) і пристрої, керовані тиристорами (конденсатори з тиристорним управлінням, реактори з тиристорним управлінням). Низький час відгуку, низькі втрати та нижчі вимоги до технічного обслуговування усунули багато обмежень, властивих обертовим машинам та пристроям з контролем постійного струму [2].

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка експлуатаційних втрат призводить до збільшення використання статичних реактивних конденсаторних установок, що складаються з комбінацій гілок конденсатора і реакторів, керованих тиристором.

Ці шунтові пристрої разом з серійними конденсаторами, керованими тиристором, лягли в основу гнучких систем передачі змінного струму (FACTS). Факти дозволяють більш ефективно використовувати системи передачі завдяки покращеному динамічному управлінню напругою системи з одного боку і більш високій пропускну здатності з іншого. Статичні реактивні конденсаторні системи загальною ємністю понад 100 000 МВА в даний час встановлені в системах передачі змінного струму.

Пристрої FACTS стали використовувати нові силові електронні пристрої (GTO, IGCT, IGBT), які дозволяють використовувати перетворювачі струму і напруги для забезпечення високошвидкісної компенсації реактивної потужності.

Виходячи з подальшого розвитку систем управління, вдосконалення напівпровідникових пристроїв і нових технологій перетворювачів напруги, компенсація реактивної потужності в даний час є ключовим фактором для надійної передачі енергії змінного струму. Наведено огляд положень про системи передачі від початку першого ДТМС до поточної ситуації. Він також порівнює ранні рішення і сучасні пристрої, забезпечує основні фактори і етапи вдосконалення установок, а також обговорює переваги сучасних пристроїв.

Генерація електричної енергії та її споживачі, як правило, не близькі один до одного. Великі міста і великі промислові регіони часто отримують електроенергію з джерел, які знаходяться на великій відстані. Компоненти системи і навантаження включають реактивні джерела живлення (конденсатори та індуктори), які впливають на профіль напруги мережі і стабільність системи. Лінії електропередачі високовольних систем (735 кВ) можуть мати до 200 Mvar ємнісної потужності довжиною 100 км. Кабельні з'єднання можуть виробляти ще більшу реактивну потужність. Великі вантажі, що містять дугові електричні печі або потужні приводи, можуть мати до 100 Mvar індуктивної реактивної потужності. Без адекватної компенсації реактивної потужності довгі

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лінії електропередачі можуть відчувати критичні умови роботи системи через сильні коливання напруги і проблеми зі стабільністю. Ці проблеми можна вирішити паралельними і послідовними схемами компенсації.

Активна і реактивна потужність.

На практиці, однак, чисто резистивні навантаження не є типовими, і зазвичай також є індуктивний компонент. Це стосується всіх пристроїв, які споживають електроенергію, принцип роботи яких заснований на використанні магнітного поля, наприклад, електродвигунів, дроселів, трансформаторів. Також реактивний струм необхідний для перемикання процесів в перетворювачах потужності. Струм, що використовується для створення і зміни магнітного поля, не розсіюється, а циркулює туди-сюди як реактивний струм між генератором і споживачем.

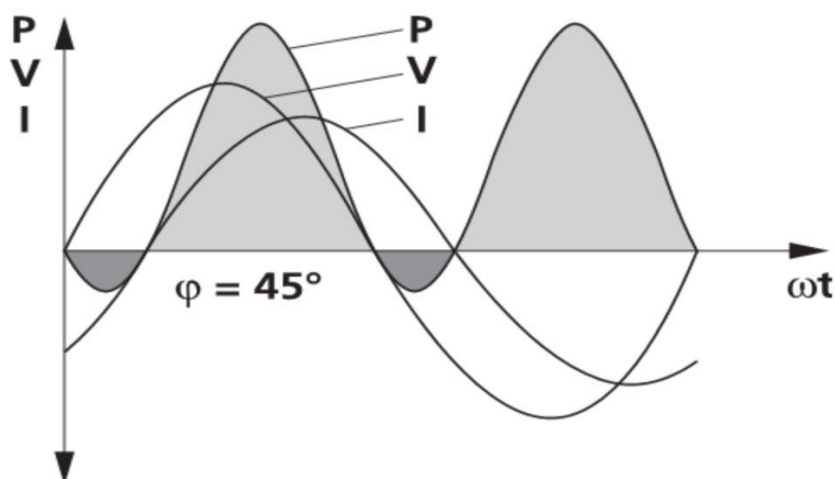


Рисунок 1 - Графік при резистивно-індуктивному навантаженні ($\varphi = 45^\circ$)

Як показано на малюнку, криві напруги і струму вже не проходять через нуль в одній точці, а відбувається фазовий зсув. При індуктивному навантаженні струм відстає від напруги, а при ємнісному навантаженні струм випереджає напругу. При розрахунку миттєвих значень потужності за формулою (1.2). Від'ємні значення тепер отримуються, якщо один з множників від'ємний. В цьому прикладі зсув фаз $\varphi = 45^\circ$. Це відповідає індуктивному $\cos\varphi = 0,707$. Як бачите, частина кривої потужності знаходиться в негативній області.

Активна потужність в даному випадку визначається за формулою

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (1.2)$$

Реактивна потужність.

Чисто індуктивна реактивна потужність споживається двигунами і трансформаторами, що працюють без навантаження (якщо нехтувати втратами міді, заліза і, якщо такі є, втрат тертя). Можна вважати, що конденсатори потужності ENERGIA RTR мають чисто ємнісну реактивну потужність, так як мають дуже низькі втрати (менше 0,05%).

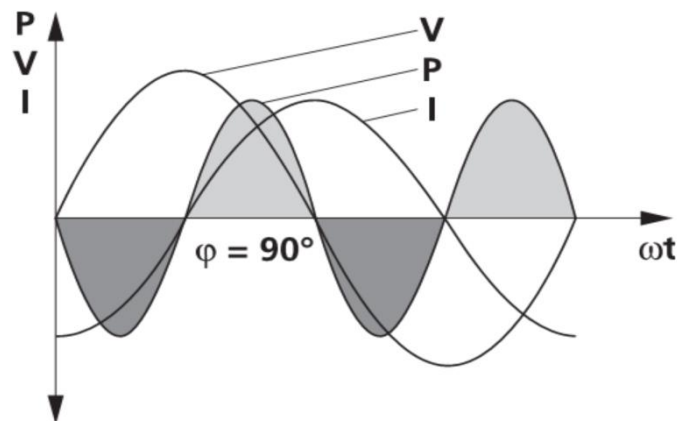


Рисунок 1.2 – Графік при чистому реактивному навантаженні ($\varphi = 90^\circ$)

Якщо напруга і струм мають фазовий зсув 90° , одна половина кривої потужності знаходиться в позитивній області, а інша половина знаходиться в негативній області.

Активна потужність дорівнює нулю, так як позитивні і негативні регіони балансують один з одним.

Реактивна потужність визначається (1.3) як потужність, яка циркулює між генератором і навантаженням на частоті напруги живлення для забезпечення підйому і падіння магнітного поля.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (1.3)$$

Реактивний струм, що циркулює між генератором енергопостачальної

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

компанії і споживачем, перетворюється в теплову енергію в системі розподілу електроенергії, тобто створюється додаткове навантаження на генератори, трансформатори, кабелі і розподільчий пристрій.

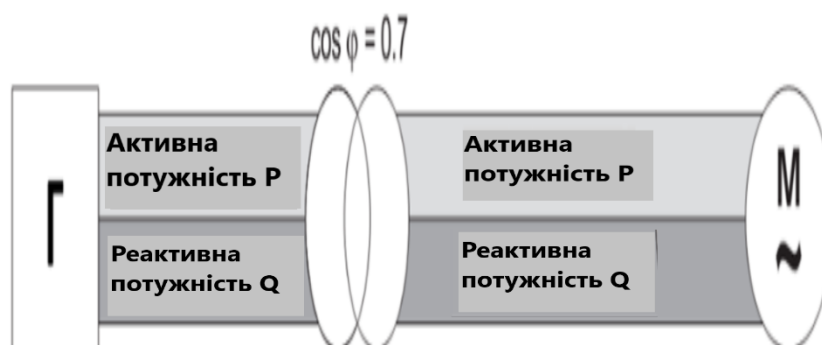
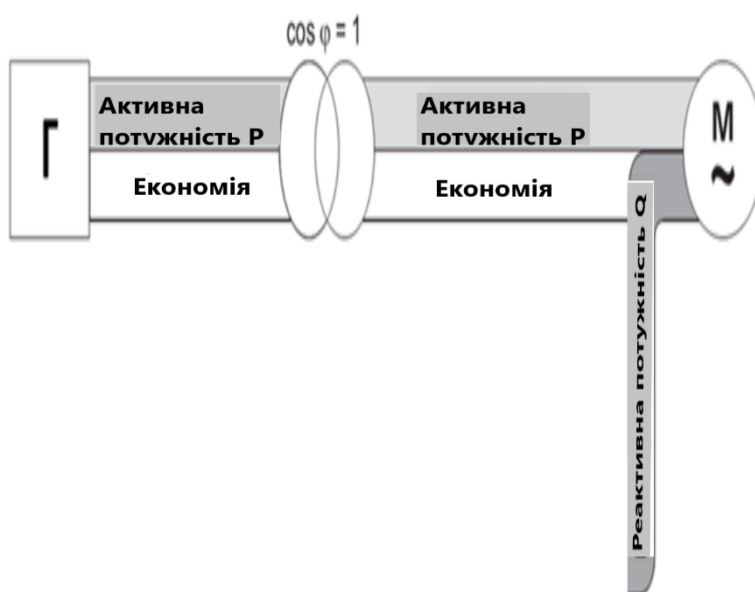


Рисунок 1.3 - Активна та реактивна потужність в системі розподілу електроенергії без компенсації реактивної потужності.



Компенсація реактивної потужності

Рисунок 1.4 - Активна і реактивна потужність в системі розподілу електроенергії з компенсацією реактивної потужності.

Величезна кількість споживачів електроенергії постійно завантажує мережу реактивною складовою споживаної потужності, і це навантаження постійно збільшується. Впровадження реактивних пристроїв компенсації потужності може підвищити надійність мереж електропостачання і збільшити

потужність енергосистеми [3].

Серед ряду переваг від використання пристроїв компенсації реактивної потужності можна виділити п'ять основних:

- економія електроенергії.

Впровадження реактивних пристроїв компенсації потужності дає значний економічний ефект. Зниження рівня енергоспоживання може становити до 40-50% від загального обсягу. При таких обсягах термін окупності енергокомпенсаційних систем складе не більше одного року.

- Збільшений термін служби обладнання.

Компенсаційні інструменти збільшують термін служби силових трансформаторів, так як їх використання знижує навантаження на обладнання. Використання компенсаційних блоків також знижує навантаження на лінії електропередач і підігрів проводів, що дозволяє використовувати менші провідники

- Економія витрат на установку мереж електропостачання.

На етапі проектування і будівництва новобудов установка системи компенсації реактивної потужності може істотно заощадити на облаштуванні розподільної енергомережі.

- Підвищення якості енергопостачання.

Використання засобів компенсації реактивної потужності дає можливість придушити мережеві перешкоди, уникнути глибокого просідання напруги і мінімізувати асиметрію фаз. Крім того, компенсаційні системи в пасивних фільтрах знижують рівень більш високих гармонік.

- Без штрафних санкцій.

Пристрій компенсації реактивної потужності уникає штрафів від постачальника електроенергії за погіршення показників коефіцієнта потужності.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.1 Поперечна компенсація

В даний час використовуються комутовані конденсаторні агрегати для компенсації поперечної реактивної потужності і постійно керовані конденсаторні агрегати.

Потужність ліній електропередач або кабельної мережі частково компенсується паралельним шунтом реакторів, підключених до лінії, індуктивні навантаження компенсуються шунтними конденсаторами. Лінійні реактори постійно підключаються до ліній електропередач, щоб забезпечити постійну компенсацію в широкому діапазоні експлуатації. Шунтові конденсатори зазвичай діляться на етапи для компенсації проміжних навантажень. Постійний контроль реактивної потужності раніше був можливий тільки шляхом регулювання збудження генераторів або спеціальних синхронних конденсаторних установок.

Прилад, який увімкнений в середню точку лінії і може поглинати та повертати реактивну потужність, надає сталість напруги в цій точці. Транспортний кут зменшується в два рази і може бути збільшена передаюча потужність. Метод полягає в підключенні до лінії ємності і паралельно їй – регульованого пристрою. Який може компенсувати надлишкову реактивну потужність для підтримки постійного значення напруги в точці з'єднання, яке зображено на рис. 1.5.

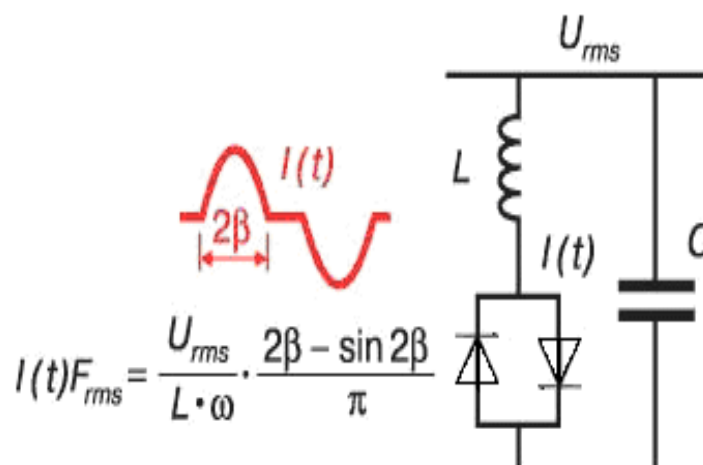


Рисунок 1.5 – Схема пристрою поперечної компенсації в лінії

Умовні позначення :

$I(t)U_{rms}$ – діюче значення струму,

L – індуктивність реактора.

C – ємність конденсаторної батареї,

U_{rms} – діюче значення напруги,

β - кут пропускання струму.

$$Q_C = U_{rms}^2 C \omega,$$

$$Q_L = U_{rms} I F_{rms},$$

$$Q_{svc} = Q_C - Q_L,$$

де Q_L - потужність реактора,

Q_C - потужність конденсаторної батареї,

Q_{svc} - потужність статистичного тиристорного компенсатора.

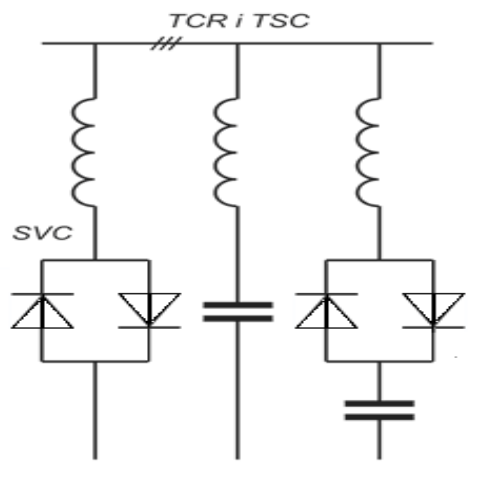
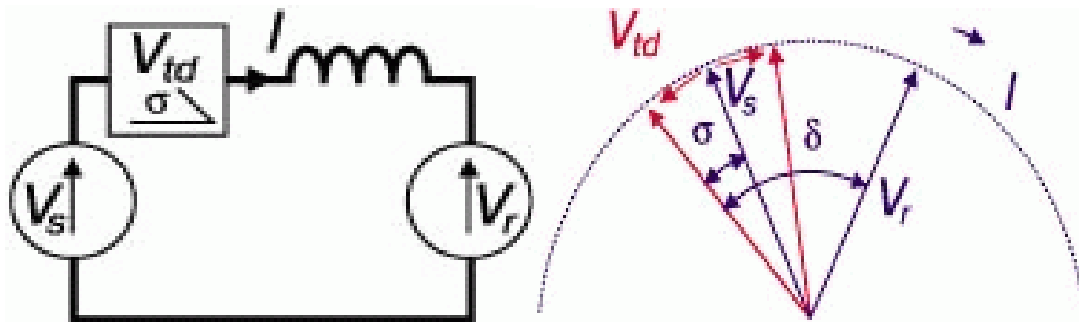
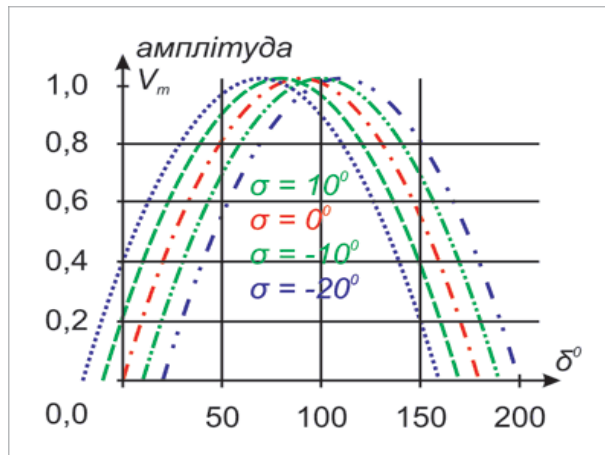


Рисунок 1.6 – Схема пристрою статистичної компенсації реактивної потужності

Індуктивність змінюватиметься через використання тиристорів. Дані системи називаються SVC «Static Var Compensator» - система статистичної компенсації реактивної потужності. Статистичний контактор, що управляє силою струму в реакторі – генерує в мережах гармоніки.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19



V_R - напруга джерела

V_S напруга джерела

Рисунок 1.7 – Залежність потужності від кута δ

Це основна причина, для експлуатування ємностей в системі фільтрів. Існують ще причини пов'язані з структурою мережі, зазвичай, через виникнення паралельного резонансу через присутність ємностей в установці SVC.

В яку входить коло керування реактором TCR і коло ступінчастого при'єднання елементів конденсаторної батареї TSC (конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням).

Наприклад, мережеві SVC, переважно, оснащені достатньою динамікою для того, щоб зупинити виникнення під-синхронних коливань. В період коли в мережі відсутнє навантаження, через розподілену ємність лінії відбувається зростання напруги, для його обмеження потрібно поглинати реактивну потужність.

Ось чому установки SVC часто використовують в проектуванні з урахуванням необхідності працювати й як поглинальні пристрої.

Проблемою є те, що є значний брак коштів і неможливо встановити значну фіксовану ємність. Додатково потребує встановлення модуля TCR, результатом є експлуатування декількох конденсаторних батарей.

TSC можуть підключатись або з'єднуватись окремо. Наприклад TCR значно меншої потужності має функцію «верньєра», що забезпечує постійне керування реактивною потужністю.

1.2 Повздовжня компенсація

Високовольтні лінії характерні індуктивним опором, але чим вищий спад напруги, тим вищий транспортний кут. Величина індуктивного опору має компенсуватися послідовно ввімкнутою ємністю, потрібно використовувати декілька конструктивних рішень.

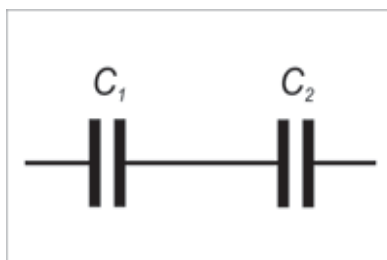


Рисунок 1.8 – Конденсатор постійної ємності

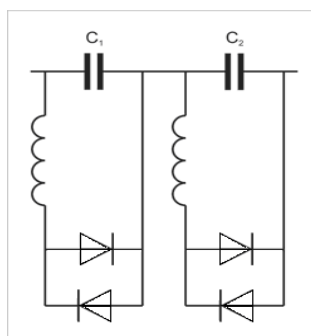


Рисунок 1.9 – Конденсаторна батарея з тиристором керування

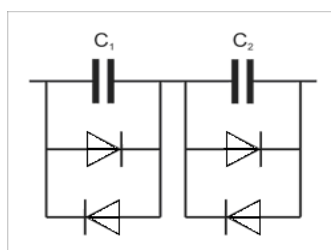


Рисунок 1.10 – Конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

В конденсаторі постійної ємності (рис.1.8) ступінь компенсації постійний, можемо збільшувати передаючу по лінії потужність, до того моменту поки не буде досягнуто обмеження по тепловиділенню. Дані системи не можуть зменшити виникнення під-синхронних коливань генераторів електростанцій. Навпаки при даному способі компенсації можуть виникати умови, які сприятливі для їхнього виникнення. Розглядаючи конденсаторну батарею з тиристорним керуванням (рис. 1.9) ступінь компенсації регулюється в будь-яких межах. Можемо керувати стабільністю передачі та зменшити виникнення підсинхронного коливання. Працює тиристор в режимі підлаштуванні фази.

Даний модуль TCSC (Thyristor controlled Series Capacitor) – конденсаторна батарея з тиристорним керування – в експлуатуванні є дроселем змінної індуктивності або конденсатором змінної ємності. Але перемикання з режиму ємності в режим індуктивності або назад – неможливо, необхідне проміжне відключення через резонансі явища. Розглядаючи конденсаторні батареї з тиристорним переключенням (рис. 1.10) компенсаційний ступінь змінюється східчасто.

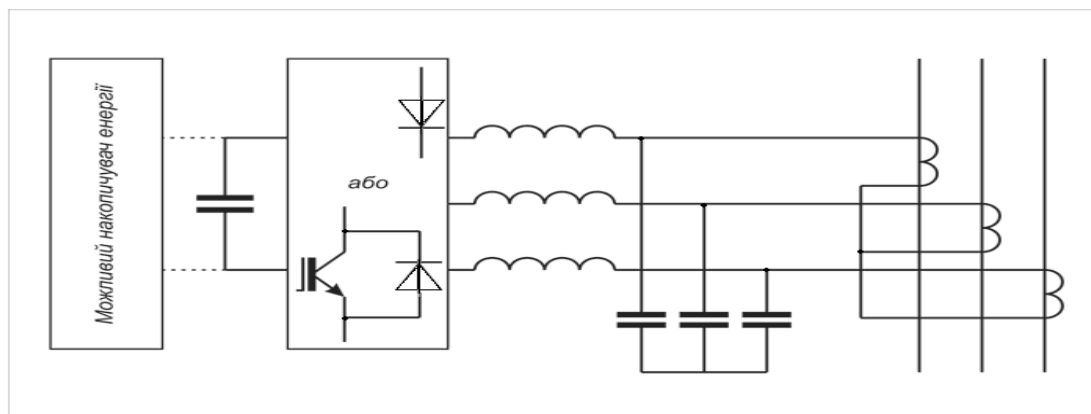


Рисунок 1.11 – Схема повздовжньої компенсації

1.2 Фільтр-компенсуючий пристрій

Фільтр-компенсуючий пристрій - забирає всі зворотні негативні впливи від споживачів на тягову мережу . До яких впливів належить:

- спотворення кривої напруги під впливом вищих гармонійних складових струму;

- споживання реактивної енергії;

02.15.2026.РД.2021-ПЗ

Арк.

22

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- зниження та коливання напруги;
- несиметрія навантаження.

тому, більш доцільним є обмеження всіх цих негативних явищ за допомогою лише одного пристрою.

Фільтр-компенсуючий пристрій створений на декомпенсації реактивного струму ємнісного характеру, що виникає в конденсаторах. Конденсатори встановлені в фільтрах вищих гармонік (рис. 8). Це отримується шляхом підбору та розрахунком необхідної величини індуктивності.

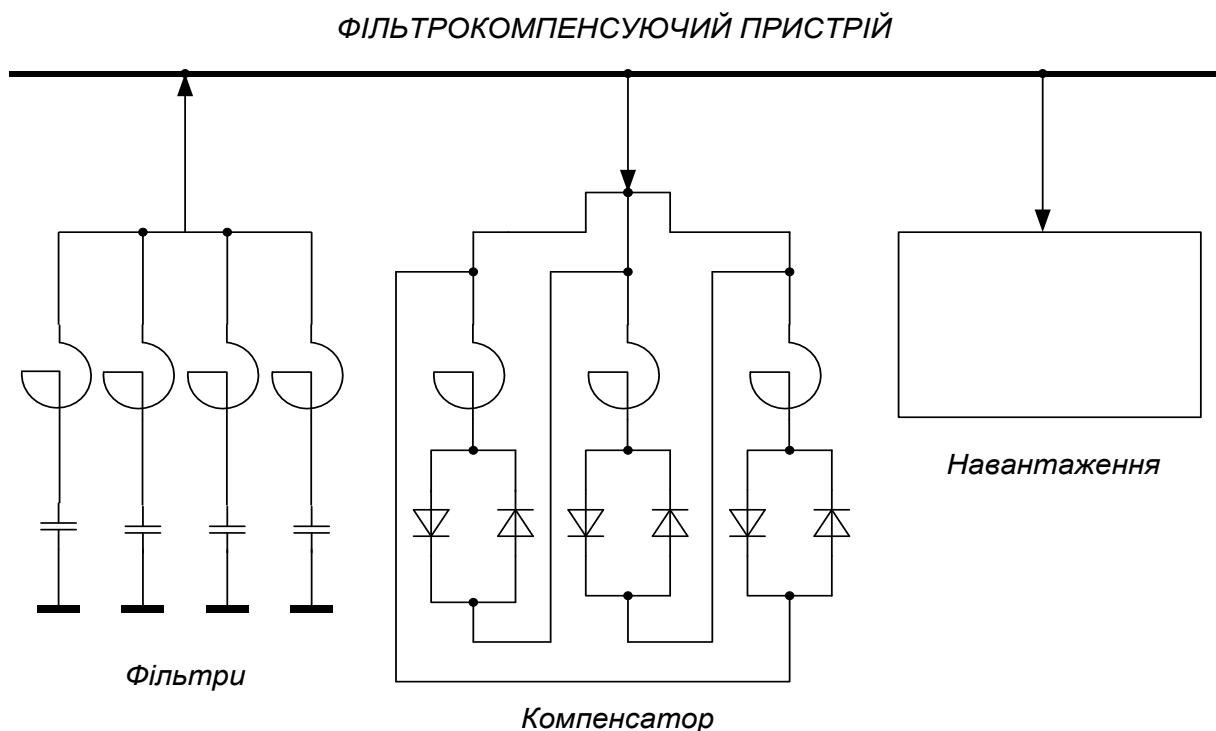


Рисунок 1.12 - Фільтр-компенсуючий пристрій

Звертаючи увагу на рисунок 12 фільтри, що створюються комбінацією конденсатора і фільтраційного дроселя (реактора), використовуються в якості резонансних ланцюгів, що фільтрують непотрібні вищі гармонічні частоти та одночасно пропускають в мережу постійний ємнісний струм. Цей пристрій прийшов на заміну синхронним компенсаторам, що перестали задовольняти потреби через власну повільну дію.

Це забезпечує:

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- декомпенсація ємнісної реактивної потужності навантаження і фільтр-компенсуючий пристрій, для того щоб зменшити генерацію електроустаткуванням споживача енергію ємнісного характеру в мережу;
- поступове й швидке управління реактивною потужністю;
- компенсацію індуктивної реактивної потужності електричних приладів за рахунок використання статичних конденсаторів для збільшення $\cos\varphi$ до нормативного значення;
- фільтрацію вищих гармонійних складових напруги та струму;
- можливість управління кожною фазою окремо при потребі ліквідувати несиметрію в мережі[4].

Компенсація реактивної потужності відбувається на основі додання зворотніх реактивних струмів, тому що реактивний струм змінює свою величину і характер під час роботи навантаження. Необхідно змінювати величину і характер струму компенсаційного пристрою. Велика кількість електроприладів має реактивну потужність індуктивного характеру. Зазвичай застосовують наступні методи зміни величини компенсуючого реактивного струму: поступове під'єднання і від'єднання конденсаторів та постійне підключення конденсаторів. В випадку надлишка реактивного струму ємнісного характеру його декомпенсація керованою індуктивністю, яка при'єднана до цих конденсаторів.

Фільтрація вищих гармонійних складових струму відбувається за рахунок резонансних кіл (фільтрів), що складаються з конденсаторів та реакторів.

Тому для струму кожної окремої гармоніки фільтр створює коротке замикання і поглинає їх в точці підключення фільтра. Переважно підключається кілька гармонійних фільтрів, через те що фільтрація необхідна не для окремої гармоніки, а для всього широкого спектра.

Декомпенсуючий пристрій складається з тиристорного перетворювача, трансформатора та декомпенсуючого дроселя. Відомо, що силова частина тиристорного перетворювача зроблено одним або декількома комплектами

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворювачів типу (СОМРАСТ). СОМРАСТ - це універсальна модульна система, що служить для збирання керованих випрямлячів високої напруги та перетворювачів частоти.

Дроселі фільтра, що використовуються в Фільтр-компенсуючих пристроях, створені як повітряні. Дроселі з магнітним колом в даному устаткуванні не використовуються. Через те що з більш великими втратами і залежністю індуктивності від величини струму.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Для заохочення споживачів до використання нетрадиційних джерел електроенергії в Україні було введено «зелений» тариф – це спеціальний тариф, за рахунок якого закуповується електрична енергія, яку виробили на об'єктах електроенергетики де використовують ВДЕ: сонячна, геотермальна енергія, вітрова, енергія хвиль та припливів, енергія біомаси та інші джерела. Сам «зелений тариф» встановлюється на рівні роздрібного тарифу для споживачів другого класу напруги, який помножений на певний коефіцієнт «зеленого» тарифу в залежності від виду джерела енергії та потужності.

Сонячна електростанція – це інженерна споруда, що призначена для перетворення сонячної радіації в електричну енергію. Для цього використовують різноманітні перетворення сонячної радіації. Від яких залежить сама конструкція сонячної електростанції.

Автори Гаєвський А. Ю., Голентус І.Є. розглядають застосування ФЕС та розглядають покращення напруги в даній статті [5].

Пристуність фотоелектричних станцій (ФЕС), підключених до мережі, в зв'язку з нерегулярним характером генерації і обмеженої пропускної здатності мережей середньої напруги, створює ряд серйозних проблем, серед яких:

- Нестабільність напруги на підстанціях, виконуючі функцію центрів живлення і на підстанціях вузлів навантажень;
- Збільшення втрат в лініях за рахунок збільшених струмів і додаткової потужності вищих гармонік;
- Зміни напрямку потоків потужності в частоті, можливі зворотні потоки в час інтенсивної сонячної радіації і малого споживання електроенергії.

Навіть якщо рівень потужності в лінії буде залишатись в встановлених номінальних межах, напруга в вузлах навантаження завдяки генерації ФЕС може збільшитись вище межі допустимих значень.

Прикладом зміни напруги в радіальній розподільчій мережі в випадку присутності додаткової генерації в одному з вузлів без обладнання компенсації

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реактивної потужності показаний на рис. 13 . З рисунка видно, що інжекція в мережі додаткової потужності від ФЕС може призвести до зворотнього потоку потужності на участку «ФЕС – живляча підстанція» і до збільшення напруги вище допустимого. Відомим заходом по обмеженню росту напруги є компенсація реактивної потужності в вузлі генерації. По скільки флуктація генеруючої потужності може виникати на часових інтервалах від хвилин до секунд., необхідне обладнання динамічної компенсації реактивної потужності. Для динамічної нормалізації і стабілізації напруги використовують сучасні управляємі індуктивно-ємнісні компенсуючі пристрої FACTS. Але вони потребують додаткових суттєвих затрат.

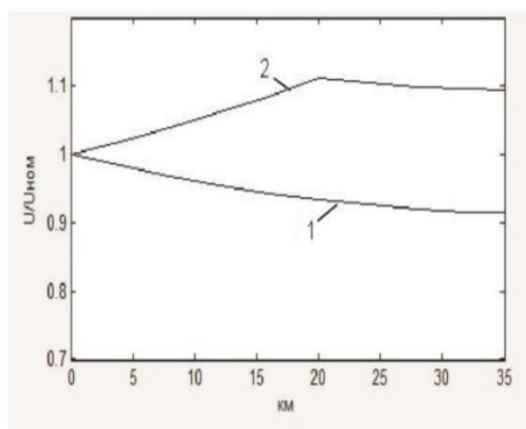


Рисунок 2.1 – Зміна напруги в радіальній розподільчій мережі з присутньою додатковою генерацією в одному з вузлів без обладнання компенсації реактивної потужності [6]

Профіль напруги в радіальній мережі, який живиться від підстанції 10,5 кВ. Одинакові навантаження $P = 80$ кВт, $Q = 16$ кВар розположені з інтервалом 4 км на лінії з віддаленим супротивом одної фази $r_0 = 0.625$, $x_0 = 0.31$ Ом/км:

- одинакові навантаження в всіх вузлах;
- замість навантаження в точці 20 км підключений генератор 4 МВт.

Інвертори потужність 10 кВт зазвичай мають трьохфазне підключення до мережі і можуть працювати в всіх чотирьох квадрантах площини PQ вони

можуть інжектувати і поглинати реактивну потужність в режимі видачі активної потужності в мережу. Це досягається за допомогою схеми управління, основних на широтно-імпульсній модуляції і забезпечують часову синхронізацію трьох гілок інвертора і необхідний фазовий зсув відносно напруги мережі.

В умовах управління реактивною потужністю інвертора напруги на навантаженні (при нормальних навантажувальних умовах) може вирости і перевищувати $U_{ном}$ при інжекції реактивної потужності.

І навпаки, перевищення напруги над номінальною можна зменшити шляхом поглинання реактивної потужності. Цей вплив інвертора особливо вагомо в мережах середньої напруги з високим відношенням R/X .

В даній роботі проаналізовано вплив компенсації реактивної потужності інвертором на напругу в навантажувальних вузлах. Основні особливості такої роботи інвертора в мережі можна описати за допомогою еквівалентної трьохвузлової схеми рис. 14, навантажувальний вузол L , і генератор G , моделюючий ФЕС.

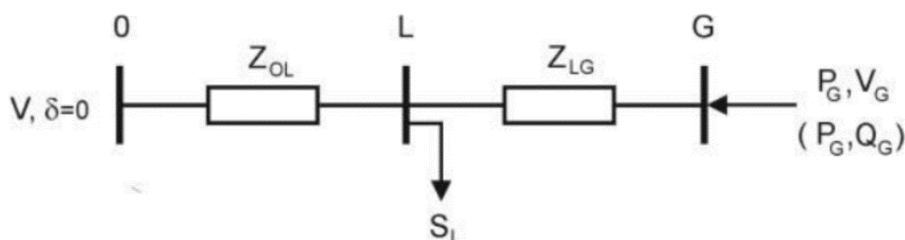


Рисунок 2.2 - Трьохвузлова еквівалентна схема, описуюча принцип стабілізації напруги на навантаженні L з допомогою компенсації реактивної потужності інверторами ФЕС

Живлячий (балансуючий) вузол представлений (V, δ) з заднім модулем напруги V і фазою δ . Вузол навантаження може отримати енергію також і від ФЕС, якщо напруга в точці підключення станції більша напруги на навантаженні. ФЕС розміщена на деяких відстанях від вузла L і моделюється (P, V) – генератором. Цей генератор видає в мережу певну потужність з

задньою напругою V_G причому стабілізація напруги забезпечує шляхом регулювання реактивної потужності інвертора.

Задача полягає в пошуку комплексу напруги U_L в вузлі L (1.3) в широкому діапазон зміни потужності навантаження S_L . В прийнятій схемі розрахунку активна P_L і реактивна Q_L складові навантажувальної потужності змінюються пропорційно (підхід Continius Power Flow):

$$P_L = P_{L0}(1+K_p\lambda), Q_L = Q_{L0}(1+K_Q\lambda), S_L = P_L + jQ_L \quad (1.3)$$

де P_{L0}, Q_{L0} – початкові значення навантаження;

λ – змінний параметр, який змінюється в інтервалі від 0 до 1;

K_p, K_Q – постійний коефіцієнт, який задає лінійну траєкторію на площині PQ.

Аналітична оцінка і вирахоування, дозволили отримати кількісні відношення між характеристиками генератора ФЕС, використовуючи потужність і напругу на навантаженні. Поведінка генератора G описувалась моделлю PV-PQ переходу. Згідно якій при не великому навантаженні інвертора за рахунок генерації реактивної складової Q підтримує задану напругу V_G . По мірі росту споживання, коли можливості інвертора по генерації Q закінчуються, (P, V) – генератор переводиться в режим (P, Q) – генерація з фіксованим максимальним значенням Q_{max}

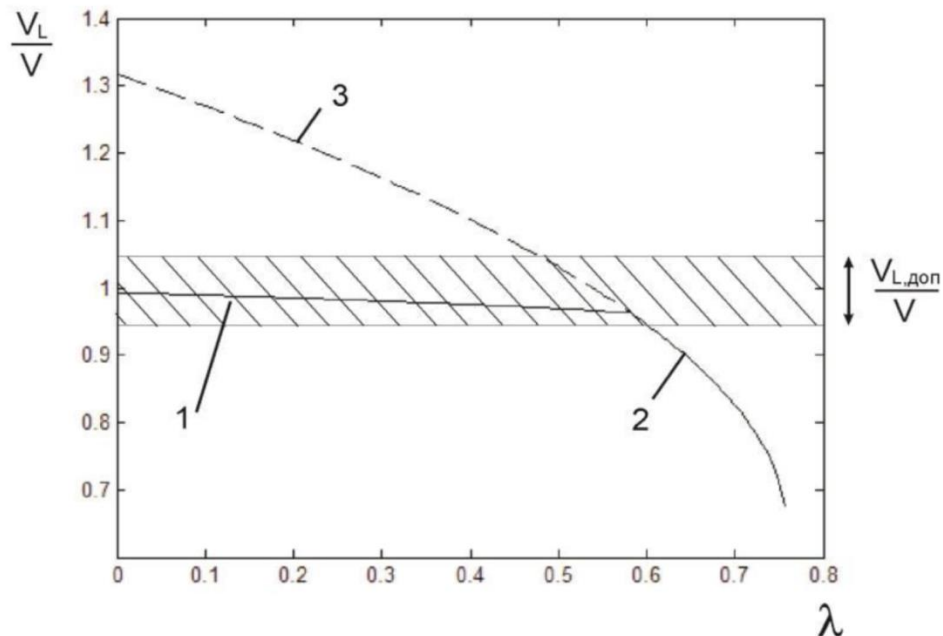
Зміна модуля напруги на навантаженні V_L в залежності від λ показано на рис. 15 суцільної кривої. Злом на кривій відповідає точці PV-PQ переходу (максимально досягаемому коефіцієнту потужності інвертора). Штрихована крива описує випадок без компенсації реактивної потужності інвертором. З графіка видно, що інвертора з функцією компенсації дозволяє в даному прикладі утримувати стабільним напругу в дальньому вузлі при нарузці до 14,5 МВт при активній потужності, інжектуючої в мережу, 15 МВт.

Утримання напруги в допустимих межах і мінімалізації відстані, по яким передається реактивна потужність, повинна бути основним критерієм при

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунку оптимальної реактивної потужності, яку генерує одна або декілька ФЕС, підключені до мережі.

Ця задача оптимізації може бути вирішена шляхом моделювання потоків потужності в конкретній мережі і побудові схем управління інверторами, які повинні мінімізувати втрати і забезпечити стабільну роботу мережі.



1 – управляюча генерація реактивної потужності (PV- генератор);

2,3 – генерація при фіксованому $Q = Q_{max}$ (PQ- генератор)

Рисунок 2.3 - Графік зміни модуля напруги в навантажувальному вузлі (в одиницях $V = 10,5$ кВ живлячого вузла) в залежності від потужності навантаження

Лінії прокладені проводами АС50, довжина 0L 8 км, вітки LG 1 км. Напруга в точці підключення ФЕС рівне $1,06V = 11,13$ кВ, інжектуєма активна потужність $P_G = 15$ МВт, максимальний $\cos\varphi = 0,92$. Параметри змінної нагрзуки $P_0 = 6,6$ МВт, $Q_0 = 2,64$ МВар

Сонячна електростанція буває двох типів:

1) Фотоелектричні (перетворюють сонячну енергію в електроенергію за рахунок фотоелектричного модулю).

2) Термодинамічні (перетворюють сонячну енергію в теплову, а вже згодом в електричну, сама потужність термодинамічних сонячних електростанцій більш вища, чим потужність фотоелектричних станцій).

Стрімкий розвиток сонячних електростанцій в світі інтенсивно стимулює розвиток ринку новітнього устаткування для сонячних електростанцій. На сьогоднішній день більш-великий попит має Китай, у зв'язку з тим що китайські фотоелектричні панелі мають значно дешевшу собівартість в порівнянні з системами виробництва США та країнами Європи [7].

Хорошу конкуренцію Китаю складає Японія, оцінна вартість устаткування залишається на тому ж рівні, що і США та Європейськими виробниками.

До основних провідних виробників сонячних модулів, що вже зарекомендували своє виробництво якістю, логістикою по всьому світу, за даними 2021р. слід відмітити саме таких виробників сонячних модулів: Jinko Solar, LONGi Solar, JA Solar, Canadian Solar, Risen Energy, Risen Energy, Trina Solar та інші менш конкурентні виробники продукції.

Перше провідне місце за кількістю поставок сонячного устаткування займає китайська компанія Jinko Solar з відзнакою 7,0-7,1 ГВт.

Якщо розглядати вітчизняних виробників сонячних модулів у світовому рейтингу, нажаль конкуренто-неможливі. Вітчизняні представники також представлені на ринках України достатньою кількістю продукції, найбільш відомими з виробників є: Kvazar м. Київ, Kness, м. Вінниця, Prolog Semicor м. Київ.

Сонячна електростанція складається з наступних елементів:

- Фотоелектричні панелі – завдання яких перетворювати сонячну енергію в електричну, детальну інформацію найпоширеніших представлено в таблиці 1.
- Контролер – призначений для керування фотоелектричною системою, що не допускає перевантаження системи чи зворотнього струму в вечірній час.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Інвертор – пристрій, що призначений для перетворення постійного струму від сонячних панелей в змінний, який необхідний для живлення електроприладів. Детально найпоширеніші інвертори представлені в таблиці 2.
- Електричний лічильник - пристрій , який слугує для фіксації кількості електроенергії, яка подається в загальну мережу, новітні лічильники оснащені АСКОЕ (автоматизованою системою комерційного обліку електроенергії).
- Акумулятор – пристрій призначений для накопичення електроенергії, яка генерується сонячними модулями. Детальні акумулятори представлені в таблиці 3.

На рис. 2.4 представлена схема сонячної електростанції, яка показує принцип взаємодії всіх елементів станції та основний принцип роботи самої електростанції [8].

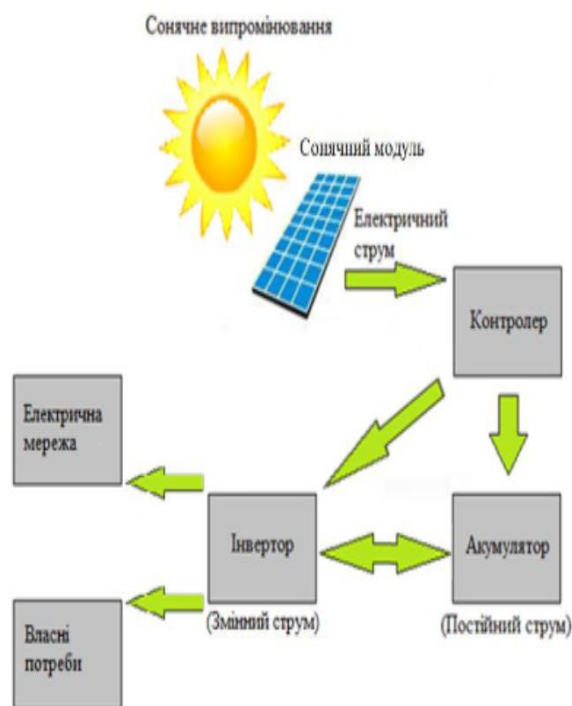


Рисунок 2.4 – Схема сонячної електростанції.

2.1 Впровадження сучасних сонячних панелей

Детальна інформація про найпоширеніші панелі сонячних електростанцій наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика сонячних панелей

Виробник	Країна	Характеристики		Вартість,дол
1.JA Solar 535 Вт	Китай	Тип панелі	Монокристал	203.3
		Номінальна потужність	535 Вт	
		Напруга при макс. Потужності	41,47 В	
		Струм при макс. навантаженні	12,9 А	
		Струм короткого замикання	13,79 49,45 В	
		Напруга холостого ходу	49,45 В	
		Розмір панелі	2279x1134x35	
2. Longi Solar LR6-72HPH-550M	Китай	Тип панелі	Монокристал	210.0
		Номінальна потужність	550 Вт	
		Напруга при макс. Потужності	41,95 В	
		Струм при макс. навантаженні	13,12 А	
		Струм короткого замикання	13,98 А	
		Напруга холостого ходу	49,8 В	
		Розмір панелі	2256x1138x35 мм	

Продовження таблиці 2.1.

Виробник	Країна	Характеристики		Вартість,дол
3. Trina Solar Vertex-TSM- DEG19C.20 210M110 535W	Китай	Тип панелі	Монокристал	204,0
		Номінальна потужність	535 Вт.	
		Напруга при макс. Потужності	31,2В	
		Струм при макс. навантаженні	17,6 А	
		Струм короткого замикання	18,24 А	
		Напруга холостого ходу	37,5 В	
		Розмір панелі	2384x1096x35	
4. KV7- 200/12M	Україна	Тип панелі	Чистий кремній	196,0
		Номінальна потужність	200 Вт	
		Напруга при макс. Потужності	37,2 В	
		Струм при макс. навантаженні	5,4 А	
		Струм короткого замикання	5,65 А	
		Напруга холостого ходу	45,4	
		Розмір панелі	1652x992x40	

Для вирішення завдання по компенсації реактивної потужності впроваджують сучасні інвертори. Сучасні інвертори мають коефіцієнт потужності 1. Вони генерують тільки активну складову потужності. Але, при роботі сонячної електричної станції споживання реактивної складової завжди присутнє. Це пов'язано з тим, що інвертори вмикаються в високовольтну мережу через трансформатори. Сучасний Інвертор KSTAR GSL 500 має в собі запас регулювання реактивної потужності. Додатково інвертор може регулювати реактивну потужність за допомогою свого коефіцієнта потужності [9].

2.2 Впровадження сучасних сонячних інверторів

Детальна інформація про найпоширеніші інвертора для сонячних електростанцій наведено в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Характеристики інверторів

Виробник	Країна	Характеристики		Вартість, дол
1. Growatt 10000 HY	Китай	Макс. потужність сонячної електрос-танції, що підключається	25000 Вт.	2160,0
		Діапазон напруги відстеження точки макс. потужності	200...1000 В	
		Максимальна ефективність	98,7%	
		Ступінь захисту	IP65	
		Кількість фаз в мережі	3	
2. Altek ACRUX- 20K-DM	Китай	Макс. потужність сонячної електрос-танції, що підключається	22000 Вт	1674,0
		Діапазон напруги відстеження точки макс. потужності	480-800 В	
		Максимальна ефективність	99,5%	
		Ступінь захисту	IP65	
		Кількість фаз в мережі	3	
3. Solis 3P20K-4G-DC 20кВт	Китай	Макс. потужність сонячної електрос-танції, що підключається	24000	2008,0

Продовження таблиці 2.2.

Виробник	Країна	Характеристики		Вартість,дол
3. Solis 3P20K-4G-DC 20кВт	Китай	Діапазон напруги відстеження точки макс. потужності	200-1000 Вт	2008,0
		Максимальна ефективність	98,7%	
		Ступінь захисту	IP65	
		Кількість фаз в мережі	3	

2.3 Впровадження сучасних сонячних акумуляторів

Детальна інформація про найпоширеніші акумулятори для сонячних електростанцій наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристики акумуляторів

Виробник	Країна	Характеристики		Вартість,дол
1. Santakups FCG 12-200	Китай	Номинальна напруга	12 В	383,0
		Номинальна ємність (10 годинний розряд)	200 А*год	
		Тип АКБ	GEL	
2. Ventura GPL 12-200	Китай	Номинальна напруга	12	476,0
		Номинальна ємність (10 годинний розряд)	200 А*год	
		Тип АКБ	AGM	
3. Pulsar HTL12-200	Китай	Номинальна напруга	12	502,0
		Номинальна ємність (10 годинний розряд)	200 А*год	
		Тип АКБ	AGM	
4. ALVA AW12-200	Китай	Номинальна напруга	12	398,0
		Номинальна ємність (10 годинний розряд)	200 А*год	
		Тип АКБ	AGM	

З ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТІКАННЯ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Дослідження проводиться за методом визначення компенсуючих пристроїв нерегульованого типу на підставі наявного профілю навантаження. Даний метод полягає в пошуку оптимальної потужності нерегульованого компенсуючого пристрою Q_K , який відповідає мінімуму відповідної оплати за послуги з перетікання реактивної електроенергії(1.4).. Виходячи з методу оплати за перетікання реактивної потужності за даним методом, складемо функцію [10].

$$\Pi = (WQ_{\text{сп}} + 3 \times WQ_{\text{ген}}) [1 + 1,3(\text{tg}\varphi - 0,25)^2 D T] \quad (1.4)$$

де $WQ_{\text{сп}}$ – величина спожитої реактивної потужності за розрахунковий період, квар×год;

$WQ_{\text{ген}}$ – величина генерованої реактивної потужності за розрахунковий період з мережі в мережу енергопостачальної компанії, квар×год;

$\text{Tg}\varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності;

D – економічний еквівалент реактивної потужності кВт/квар;

T – тариф на активну електроенергію, грн./кВт×год

Розрахунок відповідної оплати за послуги з перетікання реактивної електроенергії буде проведений за 4 пори року.

Розрахунок за період зими (січень) Самбірської сонячної Станції ТП-5 2СШ 10 кВ, ком№8.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані реактивної потужності Q за місяць січень 2021

дата 01.01.21 - 31.01.21	Реактивна прийом січень	Реактивна відпуск січень
1	0,528	0,27
2	0,618	0,198
3	Січ.00	0,012
4	0,738	0
5	0,738	0
6	0,624	0,162
7	0,786	0,024
8	0,666	0,018
9	0,72	0,06
10	0,654	0,036

Продовження таблиці 3.1.

11	0,738	0
12	0,546	0,588
13	0,774	0
14	0,918	0
15	0,888	0
16	0,93	0
17	0,966	0
18	0,966	0
19	1,08	0
20	0,792	0,006
21	0,588	0,324
22	0,636	0,042
23	00.Січ	0
24	0,684	0,126
25	1,092	0
26	0,84	0,018
27	0,69	0,018
28	0,666	0,15
29	0,642	0,36
30	0,708	0,078
31	0.612	0,264
кВт за місяць	23.196	2,754

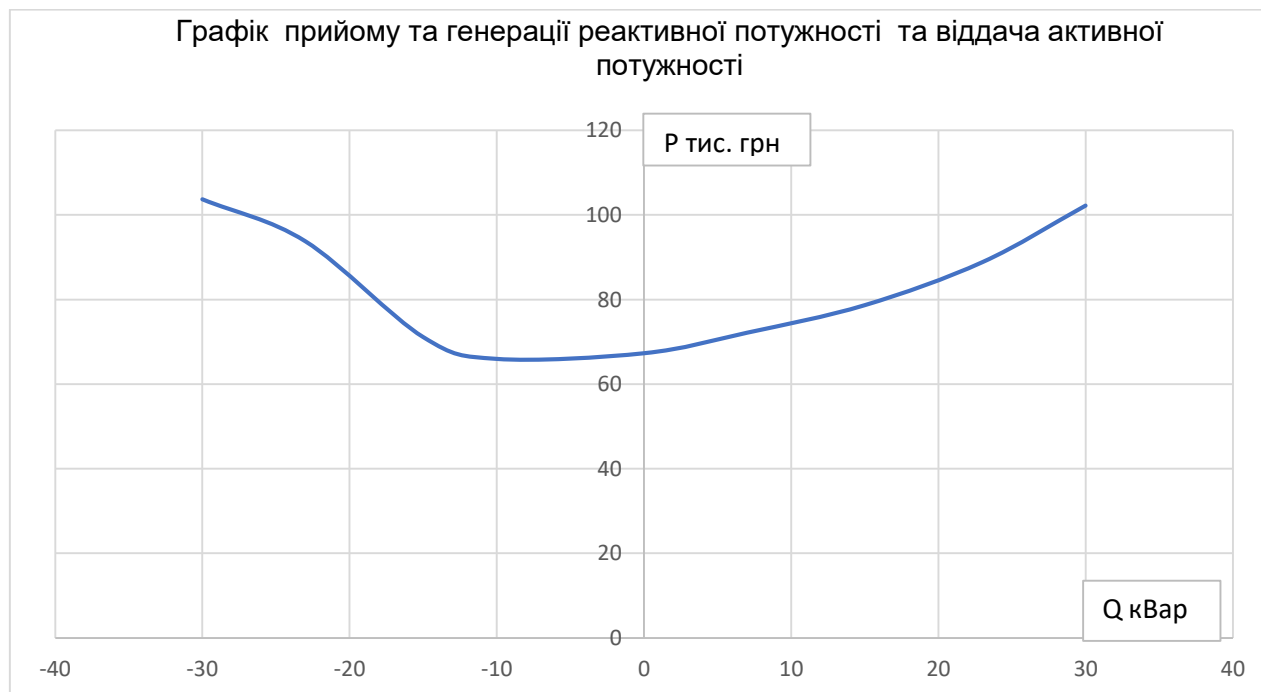


Рисунок 3.1 - Прийом та генерація реактивної потужності та віддача активної потужності

$$\Pi = (23,196 + 3 \times 2,754) [1 + 1,3(0,2 - 0,25)^2] 0,78 \times 3,73 = 91,47 \text{ тис./грн.}$$

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Розрахунок за період весни (квітень) Самбірської сонячної Станції ТП-5 2СШ 10 кВ, ком.№8.

Таблиця 3.2 - Вихідні дані Реактивної потужності Q за місяць квітень

дата 01.04.21 - 30.04.21	Реактивна прийом квітень	Реактивна відпуск квітень
1	0.564	0.2160
2	0.606	0.606
3	0.510	0.690
4	0.546	0.324
5	0.450	1.536
6	0.714	0.012
7	0.498	0.852
8	0.462	0.576
9	0.432	1.482
10	0.420	0.492
11	0.450	0.150
12	0.456	1.152
13	0.750	0
14	0.738	0.006
15	0.636	0.018
16	0.624	0.006
17	0.528	0.108
18	0.492	0.270
19	0.666	0
20	0.492	0.840
21	0.450	0.924
22	0.600	0.324
23	0.444	0.690
24	0.444	0.420
25	0.438	0.078
26	0.404	0.990
27	0.408	1.008
28	0.396	1.494
29	0.468	0.168
30	0.522	0.060
кВт за місяць	15.6120	15.4920

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Графік прийому та генерації реактивної потужності та віддача активної потужності

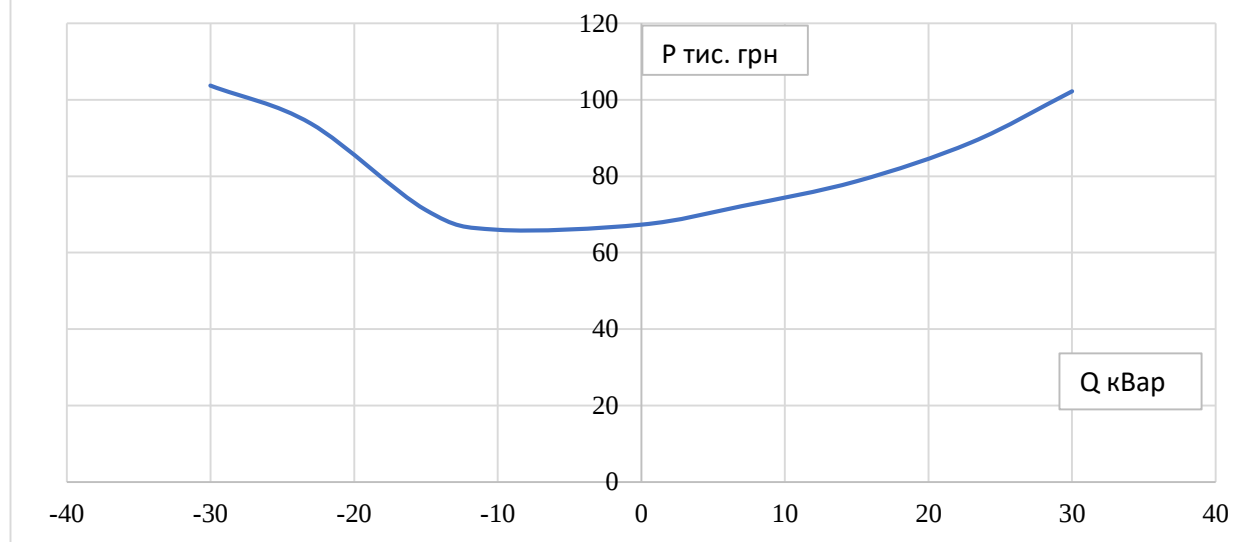


Рисунок 3.2 - Прийом та генерація реактивної потужності та віддача активної потужності

$$П = (23,196 + 3 \times 2,754) [1 + 1,3(0,00028 - 0,25)^2] 0,78 \times 3,23 = 170,1 \text{ тис. / грн.}$$

Розрахунок за період літа (липень) Самбірської сонячної Станції ТП-5 2СШ 10 кВ, ком.№8

Таблиця 3.3 - Вихідні дані реактивної потужності Q за місяць липень 2021

дата 01.07.21 - 31.07.21	Реактивна прийом липень	Реактивна відпуск липень
1	0.414	0.408
2	0.912	0.390
3	0.1	0.678
4	0.066	0.486
5	0.996	0.378
6	1.452	0.348
7	1.494	0.342
8	1.500	0.360
9	1.248	0.348
10	0.666	0.372
11	1.008	0.378
12	1.032	0.354
13	1.302	0.336
14	1.200	0.354
15	0.846	0.570
16	1.056	0.372
17	1.428	0.354
18	0.918	0.408
19	0.096	0.552
20	0	0.594
21	0.228	0.498

Продовження таблиці 3.3.

22	0.588	0.402
23	0.534	0.396
24	1.260	0.378
25	1.170	0.402
26	0.804	0.414
27	1.056	0.462
28	1.182	0.408
29	0.5220	0.390
30	1.410	0.384
31	0.690	0.438
кВт за місяць	27.078	12.954



Рисунок 3.3 - Прийом та генерація реактивної потужності та віддача активної потужності

$$П = (23,196 + 3 \times 2,754) [1 + 1,3(0,2 - 0,25)^2] 0,78 \times 3,46 = 189,64 \text{ тис. /грн.}$$

Розрахунок за період осені (жовтень) Самбірської сонячної Станції ТП-5 2СШ 10 кВ, ком.№8.

Таблиця 3.4 - Вихідні дані Реактивної потужності Q за місяць жовтень

дата 01.07.21 - 31.07.21	Реактивна прийом жовтень Q ⁺	Реактивна відпуск жовтень Q ⁻
1	0,738	0
2	0,48	0,69
3	0,444	1,098
4	0,468	0,93
5	0,462	0,378
6	0,492	0,732
7	0,456	1,044
8	0,462	1,02
9	0,468	0,924
10	0,462	0,984
11	0,576	0,234
12	0,642	0,078
13	0,714	0
14	0,498	0,354
15	0,468	0,954
16	0,69	0,006
17	0,534	0,39
18	0,654	0,006
19	0,552	0,282
20	0,552	0,342
21	0,606	0,354
22	0,522	0,222
23	0,54	0,66
24	0,594	0,048
25	0,492	0,912
26	0,504	0,744
27	0,534	0,57
28	0,498	0,732
29	0,504	0,774
30	0,504	0,726
31	0,534	0,204
кВт за місяць	16.644	16.392



Рисунок 3.4 - Прийом та генерація реактивної потужності та віддача активної потужності

$$\Pi = (23,196 + 3 \times 2,754) [1 + 1,3(0,2 - 0,25)^2] 0,78 \times 5,32 = 295,09 \text{ тис./грн.}$$

Розглянувши за 4 пори роки графіки, можна визначити мінімальне $Q_{\text{ген}}$, оскільки кожного розглянутого місяця вони змінюються і в якості результуючого приймаємо середня значення з оптимальним кожного місяця.

В свою чергу, спожита $WQ_{\text{сп}}$ та генерована $WQ_{\text{ген}}$ реактивні потужності можуть бути визначені, як площі кривої добового споживання реактивної потужності з врахуванням встановленої потужності KQ в певні відрізки часу, а саме:

$$WQ_{\text{сп}} = \int_{t_0}^{t_1} (Q(t) - Q_k) dt + \int_{t_2}^{t_3} (Q(t) - Q_k) dt + \dots \quad (1.5)$$

$$WQ_{\text{ген}} = \int_{t_1}^{t_2} (Q_k - Q(t)) dt \quad (1.6)$$

В результаті розрахунку плати за перетікання Π при різних значеннях потужності компенсуючого пристрою Q_k отримаємо залежність $\Pi = f(Q_k)$, матиме мінімум.

Результати розрахунку оптимальної потужності компенсуючого пристрої на прикладі Самбірської сонячної Станції ТП-5 2СШ 10 кВ, ком №8 Львівської залізниці. Для спрощення розрахунків, адекватності співставлення і порівняння

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результатів між собою та можливості подальшого використання розрахунки виконані для вартості електричної енергії за окремі періоди року (липень) $T = 3,46$ грн/ кВт год та економічного еквівалента реактивної потужності $D = 0,78$ кВт/квар. При необхідності уточнення внаслідок зміни вартості електроенергії чи перерахунку коефіцієнта D розраховані вартісні показники слід домножити на потрібний тариф чи коефіцієнт.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Підсумовуючи фактор використання великої кількості електричних мереж - стає з кожним роком все більш складним процесом, завдяки збільшенню їх розміру.

Компенсація реактивної потужності з контролем силової електроніки покращує системи передачі і тепер є визнаним засобом компенсації реактивної потужності серед інших пристроїв. Широкий спектр технологій фактів забезпечує надійні рішення для більшості існуючих і нових вимог до передачі електроенергії. Поєднання динамічних і звичайних комутованих компенсаційних пристроїв часто призводить до економічно ефективних рішень для стаціонарної роботи і перехідних процесів в електричній системі. FACTS на основі перетворювачів напруги будуть використовуватися більш широко, особливо в діапазоні малих і середніх потужностей.

На сьогоднішній день Стрімкий розвиток сонячних електростанцій в світі інтенсивно стимулює розвиток ринку новітнього устаткування для сонячних електростанцій. Більш-великий попит має Китай, у зв'язку з тим що китайські фотоелектричні панелі мають значно дешевшу собівартість в порівнянні з системами виробництва США та країнами Європи.

По результатам дослідження перетікання реактивної електроенергії для оптимізації сонячних станцій за декілька місяців, а саме (січень, квітень, липень, жовтень) було взято дані з АСКОВ тягової підстанції Самбір ЕЧЕ-22 до якої підключена сонячна станція ТП-5 2СШ 10 кВ, ком№8. Результатом дослідження було визначено мінімальне значення 29,808 Q кВар для досягнення зміни корегування інвертора

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов Б. А., Зайцев Г. 3 Компенсация-реактивной мощности – Л. Энергия 1976, 101 с.
2. Веников В. А, Жуков Л. А, Карташов И. И., Рыжов Ю. П. Статистические источники реактивной мощности в электрических сетях –М.: Энергия, 1975 , 136 с.
3. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 184с. Бітюков С. Д., Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г. Підвищення ефективності виробництва та використання енергетичних ресурсів // Українські залізниці. 2014. № 8 (14). 72-75 с.
4. Электротехнические проблемы создания преобразовательных установок для солнечных и ветровых электростанций / Бородулин М. Ю., Кадомский Д.Е. // Электрические станции. –1997. — № 3. – 53-57 с.
5. Меркурьев Г. В., Шаргин Ю. М. Устойчивость энергосистем – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. 300 с.
6. Chin-Wen Lui, Chen-Sung Chang, Joe-Air Jiang et al. IEEE Trans. On Circuits and Systems, Vol. 52, No. 3, p625-630 (2005)
7. Суржик Т. В, Рєзцов В. Ф., Кудря С. О. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ" 69-72, 136 с.
8. Лежнюк П. Д., Бартецький А. А, Бартецька І. А. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій для забезпечення балансової стійкості енергосистеми 116-117 с.
9. Про ринок електроенергії: закон України від 13.04.2017 р. №2019-VIII. [URL://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2019-19](http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/2019-19).
10. Босий, Д. О. Методика розрахунку оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності тягових підстанцій постійного струму / Д. О. Босий // Гірничо-електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ, – 2014. – № 93. – С. 33–37.

					02.15.2026.РД.2021-ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		