

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Анатолій Марченко
«13» _____ червня _____ 2023р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Управління, захист та
автоматизація енергосистем»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
на тему: «Підвищення ефективності статичних компенсаторів
реактивної потужності в розподільних електричних мережах»**

Виконав:
студент IV курсу, групи ЕК-91
Кисіль Дмитро Петрович

Керівник:
Доцент, к.т.н.
Нестерко Артем Борисович

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій Марченко

«13» _____ червня _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кисілю Дмитру Петровичу

1. Тема проєкту «**Підвищення ефективності статичних компенсаторів реактивної потужності в розподільних електричних мережах**», керівник проєкту Нестерко Артем Борисович, Доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «25» травня 2023р. №1969-с
2. Термін подання студентом проєкту «13» червня 2023р
3. Вихідні дані до проєкту
4. Зміст пояснювальної записки
 1. Огляд і аналіз методів компенсації реактивної потужності
 2. Регулювання статичних компенсаторів в системах
 3. Оцінка ефекту використання компенсатора статком
 4. Дослідження впливу статичних компенсаторів на систему

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

Плакат 1: Основні засади компенсації реактивної потужності в розподільчих системах

Плакат 2: Моделювання досліджуваної системи з синхронним генератором

Плакат 3: Аналіз графіків схем при збуренні в механічному моменті (T_m)

Плакат 4: Аналіз графіків схем при зміні опорної напруги в системах (U_{ref})

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Огляд і аналіз методів компенсації реактивної потужності	09.02-23.02 2023	
	Регулювання статичних компенсаторів в системах	23.02-17.03 2023	
	Оцінка ефекту використання компенсатора статком	17.03 -05.05 2023	
	Дослідження впливу статичних компенсаторів на систему	05.05-06.06 2023	
	Розробка плакатів	06.06-13.06 2023	

Студент Кисіль Дмитро Петрович

Керівник Нестерко Артем Борисович

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість Листів	Примітка
1	A4	141.ЕК9108.007.ДБ	Завдання на дипломний проєкт	1	
2	A4	141.ЕК9108.007.ДБ	Пояснювальна записка		
3	A1	141.ЕК9108.007.ТК1	Основні засади компенсації реактивної потужності в розподільчих системах	1	
4	A1	141.ЕК9108.007.ТК2	Моделювання досліджуваної системи з синхронним генератором	1	
5	A1	141.ЕК9108.007.ТК3	Аналіз графіків схем при збуренні в механічному моменті (T_m)	1	
6	A1	141.ЕК9108.007.ТК4	Аналіз графіків схем при зміні опорної напруги в системах (U_{ref})	1	

					141.ЕК9108.007.ДБ		
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Кисіль Д.П.				Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Нестерко А.Б.					3	1
Реценз.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-91		
Н. Контр.	Настенко Д.В.						
Утвердив	Марченко А.А.						
					Відомість дипломного проєкту		

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: “Підвищення ефективності статичних компенсаторів реактивної
потужності в розподільних електричних мережах”

Київ – 2023 року

РЕФЕРАТ

Дипломний проект був виконаний на 57 аркушах та містить 32 рисунків, 4 таблиць, 4 листи графічної частини та 15 літературних посилань.

Актуальність теми - Види регулювання та установки реактивної потужності.

Мета дослідження. - Об'єкт дослідження система синхронної машини з компенсатором

Результат роботи - Проаналізовано використання компенсаторів в електричних системах. Моделювання статичного компенсатора реактивної потужності в системах

Ключові слова: - КОМПЕНСАТОР, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ABSTRACT

The diploma project was executed on 57 sheets and contains 32 figures, 4 tables, 4 sheets of the graphic part, and 15 literature references.

The relevance of the topic - Types of regulation and settings of reactive power.

The purpose of the study. - The object of the study is a synchronous machine system with a compensator.

The result of the work - The use of compensators in electrical systems was analyzed. Modeling of a static reactive power compensator in systems.

Keywords: - COMPENSATOR, REACTIVE POWER.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	13
1.1 Збиток через перетікання реактивної потужності в розподільчих схемах	13
1.2 Способи компенсації реактивної потужності в розподільчих системах.....	14
1.3 Застосування шунтуючих реакторів в розподільчих системах.....	18
1.4 Статичний тиристорний компенсатор та СТАТКОМ.....	20
Висновки	21
2 РЕГУЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ В СИСТЕМАХ	23
2.1 Регулювання реактивної потужності та компенсація напруги в СТАТКОМ за допомогою тиристорного керування	23
2.2 Моделювання і аналіз ємнісних властивостей системи з пристроєм керування СТАТКОМ	26
2.3 Трифазна компенсація небалансованого навантаження: методи та математичні моделі.....	30
Висновки	31
3 ОЦІНКА ЕФЕКТУ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСАТОРА СТАТКОМ.....	33
3.1 Моделювання лінеризованої системи синхронного двигуна	33
3.2 Побудова схеми в Matlab з використанням Статичного компенсатора.....	38
3.3 Налаштування моделі Статичного компенсатора в Matlab.....	39
3.4 Висновки.....	41
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ НА СИСТЕМУ	43
4.1 Аналіз впливу збурень механічного моменту на систему з пристроєм керування STATCOM.....	43
4.2 Зміна опорної напруги в системах з статичним компенсатором (Uref).....	50
Висновки	58

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		7

–

ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	60

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		8

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД - Асинхронний двигун;

АД - Асинхронний генератор;

КП - Керуючий пристрій;

КРП - Компенсація реактивної потужності;

КТР - Керований тиристорами реактор;

ПО - Перетворювач оточення;

РП - Розподільчий пристрій;

СГ - Синхронний генератор;

СК - Статичний компенсатор;

СТАТКОМ - Компенсатор реактивної потужності;

FACTS - Flexible AC Transmission System (гнучка система передачі змінного струму).

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		9

ВСТУП

На сучасному етапі електрична система складається з численних взаємозв'язків між компаніями-постачальниками послуг, які прагнуть підвищити безпеку в експлуатації мережі та оптимізувати витрати, відповідаючи на прискорені зміни на електричному ринку. Нові структури вимагають гнучкої системи для майбутніх змін, які традиційні мережі важко можуть задовольнити, що призводить до ряду проблем, таких як перевантаження, коливання потужності та недостатнє використання потенціалу передачі та інші.

Зростаючі електромеханічні коливання можуть спричинити проблеми, які прямо впливають на електричну систему, викликаючи такі наслідки: втрата динамічної стабільності, дія систем захисту, збільшення ймовірності відключення навантаження, погіршення якості обслуговування, зменшення надійності системи; і в деяких випадках, викликати крах системи.

Історично багато уваги приділялося генераційним станціям, обладнанню для передачі та розподілу, але представлення навантажень отримало менше уваги і залишається областю великої невизначеності. Багато досліджень показали, що представлення навантаження може мати значний вплив на результати аналізу. [12]

У рамках цього проекту буде вивчена динаміка системи під впливом різних збурень, коли до неї підключено СТАТКОМ, враховуючи критерії налаштування її амортизатора коливань. З урахуванням вищезазначеного будуть лінеаризовані рівняння вихідної системи для отримання констант лінеаризації, які будуть враховані під час симуляції. результати будуть показані за допомогою симуляцій в MATLAB

Метою цього дослідження буде проведення динамічного аналізу системи, виходячи з її моделі простору станів для налаштування параметрів контролера СТАТКОМ за допомогою методів класичного контролю. Це буде впроваджено в програмне забезпечення Matlab таким чином, що спростить

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

обчислення для визначення оптимальних значень констант K_r та K_i відповідно до методу призначення полюсів. Також буде симульована система з СТАТКОМ і без при різних збуреннях і впливі типів навантаження.

Пропонується аналіз коливань в системі синхронної і поведінка компенсатора коливань СТАТКОМ при підключенні різних типів навантаження до системи. Для представлення навантажень використовується "модель експоненціального навантаження", яка пов'язує потужність, напругу і параметри p_r та p_q , згідно з якими розрізняють три моделі: постійний струм, потужність та імпеданс. Вплив параметрів навантаження впливає на активну та реактивну потужність вибраної робочої точки і включається в код редактора Matlab для перерахунку констант від K_1 до K_6 , після чого буде проведено аналіз результатів і формулювання відповідних висновків.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Збиток через перетікання реактивної потужності в розподільчих схемах

Забезпечення балансу реактивної потужності з метою підтримки необхідних рівнів напруги на контрольних пунктах, шинах електростанцій, підстанціях та споживачах, а також регулювання напруги в необхідних межах є одним із найважливіших завдань для забезпечення надійної та безпечної роботи Розподільчої системи неперервного та економічного електропостачання споживачів з припустимими показниками якості електроенергії.

Компенсація реактивної потужності є найважливішою і найефективнішою складовою для стабільної роботи системи і країни в цілому, на окремих ділянках електричних мереж, в енергорайонах та вузлах. Компенсація залучає значну увагу по всьому світу, особливо в електроенергетичних компаніях розвинутих промислових країн. Як показують енергетичні обстеження, рівень компенсації реактивної потужності вітчизняній енергетиці значно нижчий, ніж у промислово розвинутих країнах. Більше того, наявні можливості для узгодженого регулювання реактивної потужності та рівнів напруги, що існують у електричних мережах, електростанціях та споживачах, використовуються недостатньо.

Багато розвинутих промислових країн, враховуючи відносно високу економічну та енергетичну ефективність компенсації реактивної потужності, приділяють їй значну увагу.

					141.ЕК9108.007.ДБ		
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Кисіль Д.П.				Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Нестерко А.Б.					13	9
Реценз.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-91		
Н. Контр.	Настенко Д.В.						
Утвердив	Марченко А.А.						

Варто зазначити, що за кордоном особлива увага приділяється не тільки встановленню достатньої кількості компенсуючих та регулюючих пристроїв, але й автоматизації систем регулювання напруги та керування потоками реактивної потужності.

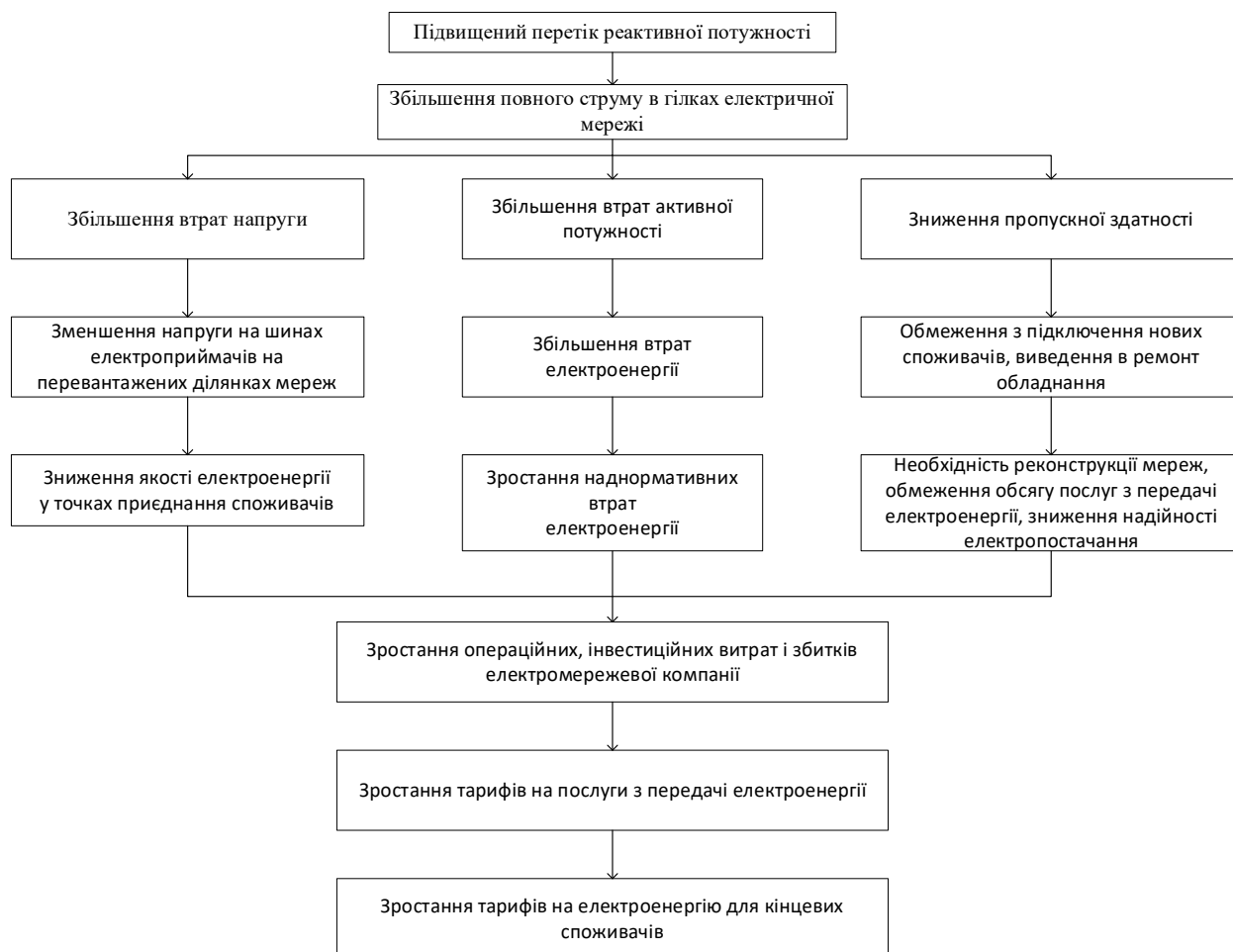


Рисунок 1.1 – Схема впливу підвищеного перетоку реактивної потужності на розподільчу систему

Звідси видно, що проблема компенсації реактивної потужності в системах електропостачання має велике значення і є актуальною пріоритетною задачею.

1.2 Способи компенсації реактивної потужності в розподільчих системах

Виробництво електроенергії виконується в рамках Єдиної енергосистеми, а також автономними електростанціями, що використовують енергію вітру, сонця, води, хімічну енергію перетворення попутного газу,

–
нафти та інших вуглеводнів. Якість електроенергії, що виробляється, повинна відповідати ДСТУ, де допустиме значення відхилення не більше $\pm 1\%$ від номінального значення напруги; допустиме значення відхилення частоти не більше $\pm 0,5\%$ від номінального значення частоти.

Відхилення параметрів від нормативних величин пов'язане з порушенням режимів, що встановилися, або балансів активної та реактивної потужностей. Наслідком порушення балансу генерованої та споживаної активних потужностей є зміна частоти. Наслідком порушення балансу генерованої та споживаної реактивної потужностей є зміна напруги. Наприклад, для асинхронних двигунів (АД) зниження напруги на 15% від номінального значення зменшує електромагнітний момент на 75% , а зниження частоти на 5% знижує реактивний опір та збільшує струм статора, що призводить до додаткового нагрівання АД.

Компенсуючі пристрої контролери FACTS (Flexible AC Transmission System), які базуються на швидкодіючих пристроях потужності, є швидшими за традиційні механічні контролери. У цих системах використовуються статичні компенсатори реактивної потужності. Прилади FACTS не потребують груп конденсаторів або реакторів для вироблення або поглинання реактивної потужності в компенсації ліній передачі. Багато застосувань було розроблено для покращення стабільності електроенергетичних систем за допомогою використання та розвитку приладів FACTS у системах передачі електроенергії. Такі прилади можуть бути використані для підвищення стабільності системи та контролю потоку потужності. Основні переваги цих приладів полягають у їх гнучкості та керованості. Вони в основному впроваджуються для підвищення стабільності напруги, регулювання напруги в електроенергетичних мережах та покращення стабільності електроенергетичних систем. Це може бути здійснене шляхом керування фазовим кутом та рівнем напруги

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		14

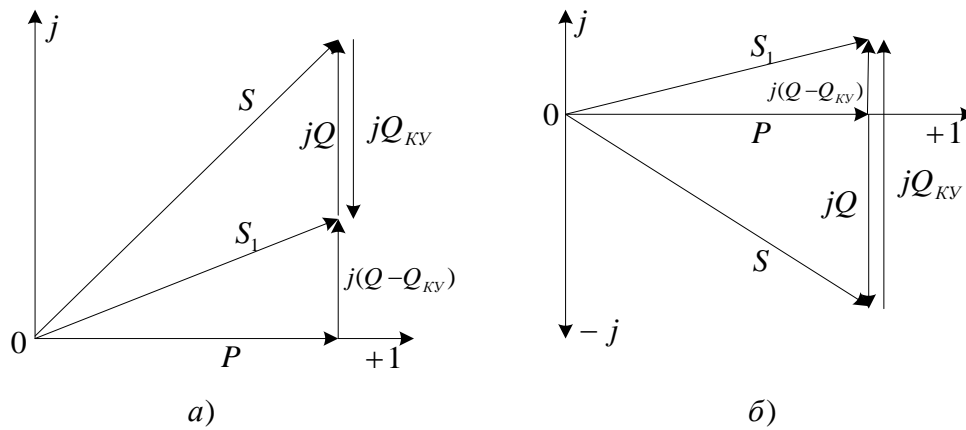


Рисунок 1.2 – Компенсація дефіциту (а) та надлишку (б) реактивної потужності у вузлі мережі

Один із приладів FACTS Статичні компенсатори реактивної потужності (СКРП) складаються з реакторів та конденсаторів, які переважно контролюються тиристорами. Ці системи забезпечують швидку реакцію на регулювання напруги та стабілізацію в електричних системах.

Конденсатори виробляють реактивну потужність, а котушки поглинають реактивну потужність, коли підключаються до системи змінного струму. Вони використовуються разом з механічними перемикачами для керування реактивною потужністю. В останні роки спостерігаються покращення у компенсації реактивної потужності завдяки розвитку високопотужних напівпровідникових пристроїв, таких як тиристори. Системи, що складаються з використання напівпровідників, називаються статичними реактивними генераторами.

Тиристори керовані статичними реактивними генераторами, які використовуються сьогодні, отримують змінний шунтуючий комплексний опір шляхом включення та відключення конденсаторів і/або реакторів до мережі. Вихідні сигнали генератора можуть змінюватись від ємнісного до індуктивного за допомогою відповідних технік перемикування.

У електроенергетичних системах СКРП, як правило, використовуються для регулювання напруги та компенсації навантаження. Основна мета полягає в

зменшенні потреби у реактивній потужності та стабілізації активної потужності, яку поглинають від джерела змінного струму.

СКРП також використовується для регулювання напруги системи в передачі електроенергії. Якщо навантаження є ємнісним, що призводить до підвищення потужності системи, використовуються реактори керовані тиристорами для поглинання реактивної потужності від системи та зниження напруги системи. Якщо навантаження є індуктивним тиристри вмикають конденсаторні батареї, що призводить до збільшення напруги системи. СКРП мають швидку реакцію і надійність порівняно з механічними компенсаційними техніками з перемикачами або синхронними конденсаторами. Однак вони є дорогими системами, ніж ці два типи. СКРП можна класифікувати наступним чином:

- Статичний тиристорний компенсатор
- Керовані шунтуючі реактори

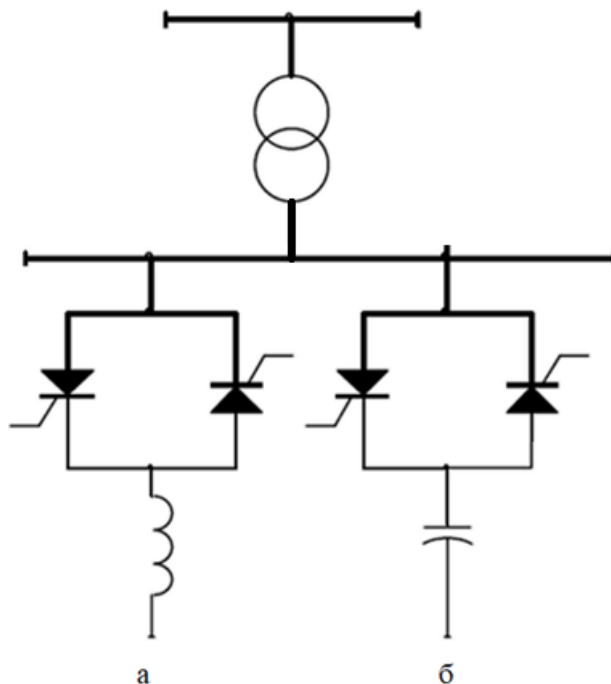


Рисунок 1.3 – Принципова схема а) тиристорного керованого реактору
б) Статичного тиристорного компенсатору

1.3 Застосування шунтуючих реакторів в розподільчих системах

Шунтуючі реактори (ШР) використовуються для регулювання напруги і компенсації реактивної потужності у ЛЕП та для зниження напруги.

Потужність та кількість ШР визначаються потужністю лінії, яку потрібно компенсувати. ШР використовується у режимах низької потужності, що передається по лініях або у холостому ході цих ліній.

При збільшенні активної потужності та навантаження на лінії, потужність, що виробляється, більше споживається індуктивним опором лінії, тому потреба в ШР зменшується.

Надмірне споживання реактивної потужності може призводити до зниження напруги в точці підключення реактора нижче необхідного рівня на даному об'єкті в режимах, що в свою чергу призводить до зниження пропускної здатності лінії, а також до зниження межі статичної стійкості електропередачі. Ці недоліки установки шунтуючого реактора можна усунути за допомогою використання Керованого ШР (КШР), який автоматично адаптується до необхідного рівня напруги на об'єкті.

Варто відзначити, що КШР особливо ефективний при установці на довгих лініях електропередачі, режимами роботи яких обумовлені реверсивними потоками активної потужності та різким графіком навантаження. Крім того, вельми суттєво, що оптимальне регулювання рівнів напруги за допомогою КШР значно знижує втрати при передачі електричної енергії.

КШР є трансформаторним пристроєм (рис. 1.4), що також виконує функції напівпровідникового ключового пристрою, що досягається за рахунок роботи магнітної системи реактора в області глибокого насичення.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

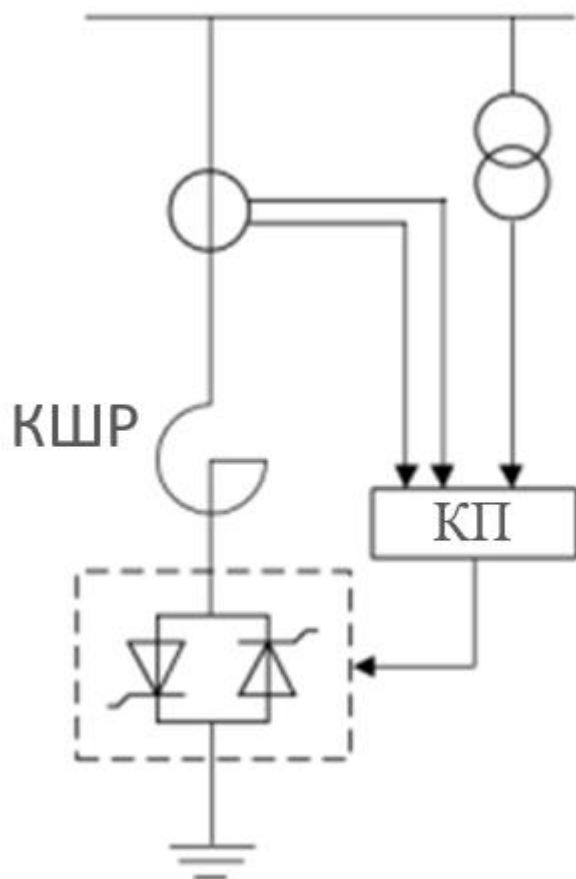


Рисунок 1.4 – Структурна Схема КШР

КШР поділяються на два типи: КШРТ - Керується шунтуючим реактором трансформаторного типу і УШРПІ - управляється шунтуючим реактором з підмагнічуванням магнітної системи.

Можливість прямого підключення до ліній електропередачі без додаткових проміжних трансформаторів, широкий діапазон регулювання потужності, зменшення втрат в лінії є його основними перевагами.

Керування шунтуючим реактором дозволяє усунути добові і сезонні коливання напруги в електричній мережі, оптимізувати і автоматизувати режими роботи електричної мережі, збільшити пропускну здатність лінії електропередачі та забезпечити надійне автоматичне керування рівнями напруги при перетоках потужності, близьких до меж статичної стійкості, зменшити втрати на корону.

1.4 Статичний тиристорний компенсатор та СТАТКОМ

Альтернативою керованому шунтуючому реактору є статичні тиристорні компенсатори, які також регулюють напругу, але підключаються лише через підвищуючий трансформатор.

Статичний тиристорний компенсатор забезпечує регулювання напруги та виконує розвантаження мережевих трансформаторів та живильних ліній електропередачі від реактивної потужності, тим самим зменшуючи ефективний струм і активні втрати. Все це дозволяє збільшити передавання активної потужності без встановлення нового обладнання. Крім того, СТАТКОМ дозволяє підвищити стійкість та пропускну здатність лінії до 1-2 МВт на 1 МВАр встановленої потужності СТАТКОМ, стабілізувати напругу на шинах підстанції та знизити внутрішні перенапруги.

Основна конфігурація СТАТКОМ включає конденсаторні батареї, компенсуючі фільтри, що постійно підключені до шин або комутуються вимикачами і є джерелами реактивної потужності включені паралельно і в трикутник керованих тиристорами реакторів - тиристорно-реакторну групу завдяки якій здійснюється плавне регулювання реактивної потужності. СТАТКОМ (рис. 1.5) побудовано на базі керованого інвертора напруги, що дозволяє широко регулювати вихідний струм, змінюючи не тільки його величину і фазу, але й форму. У цьому випадку можуть використовуватися різноманітні схеми інверторів і їх комбінації, але основними є три топології. Вибір певного варіанта повинен бути обґрунтований розрахунковою потужністю, напругою підключення та необхідними функціями.

СТАТКОМ має мінімальний час відгуку приблизно 30 мс. Час реакції СТАТКОМ складає менше 5 мс, що забезпечує плавну динамічну компенсацію реактивної потужності. Це дозволяє більш ефективно згладжувати коливання напруги.

Відмінність між СТАТКОМ та статичним тиристорним компенсатором полягає в тому, що СТАТКОМ забезпечує роботу при максимальних параметрах обладнання. Вихідний струм може тимчасово перевищувати

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		19

нормальне значення. Величина та тривалість перевантаження залежить від теплової стійкості використовуваних ключів. Рівень перевантаження може становити від 120 до 180%.

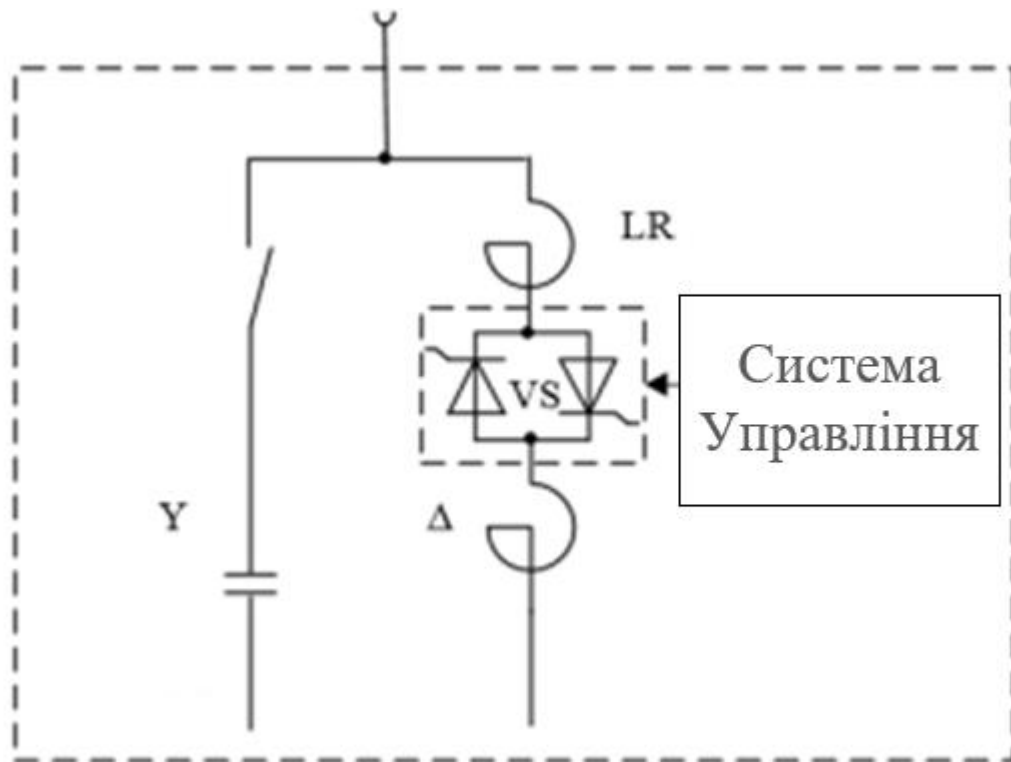


Рисунок 1.5 – Структурна схема СТАТКОМ

Висновки

В рамках даного розділу було проведено вивчення і аналіз основних методів компенсації реактивної потужності в розподільчих схемах. Встановлено, що перетікання реактивної потужності в розподільчих схемах може призводити до значних збитків, в тому числі і фінансових, що вимагає від енергетичних компаній пошуку ефективних рішень для цієї проблеми. Було розглянуто різні способи компенсації реактивної потужності в розподільчих системах. Серед основних методів виділено застосування шунтуючих реакторів та використання статичного тиристорного компенсатора (СТАТКОМ).

Шунтуючі реактори дозволяють контролювати реактивну потужність в мережі, надаючи можливість керувати напругою і зменшувати перетікання

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

реактивної потужності. Проте їх застосування обмежується деякими технічними умовами та може не бути ефективним у всіх ситуаціях.

Статичний тиристорний компенсатор, або СТАТКОМ, представляє собою більш прогресивний і гнучкий метод компенсації реактивної потужності. Його використання дозволяє оперативно реагувати на зміни в режимах роботи електроенергетичних систем і забезпечує високу ефективність компенсації.

Зробивши огляд і аналіз, можна висловити припущення, що в майбутньому використання СТАТКОМ стане більш поширеним за методи компенсації, засновані на застосуванні шунтуючих реакторів, внаслідок своєї гнучкості, ефективності та можливості адаптації до змінюваних умов роботи розподільчих систем.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		21

2 РЕГУЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ В СИСТЕМАХ

2.1 Регулювання реактивної потужності та компенсація напруги в СТАТКОМ за допомогою тиристорного керування

Як було розглянуто СТАТКОМ має за мету генерувати або поглинати реактивну потужність залежно від електричного параметра, який зазвичай полягає в компенсації напруги на шині. СТАТКОМ надає контроль і гнучкість у електричних системах як у стаціонарному, так і в перехідному режимах. Еквівалентна ємність СТАТКОМ, яку бачить система, може контролюватися за допомогою спрацювання тиристорів на відповідному боці змінної індуктивності СТАТКОМ, яка паралельно з конденсаторами C_0 генеруватиме (поглинатиме) потрібну реактивну потужність для досягнення компенсації, у цьому випадку це відповідає реактору, керованому тиристорами

Змінна реактивної провідності реактора з тиристорним керуванням РТК є основним параметром, на якому ґрунтується робота СТАТКОМ. Основними елементами КТР є реактор, підключений послідовно з парою тиристорів, розташованих у двох напрямках, що показано на рисунку 2.1.

					141.ЕК9108.007			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Кисіль Д.П.			Регулювання статичних компенсаторів в системах	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Нестерко А.Б.					23	1
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. Контр.		Настенко Д.В.				ФЕА, гр. ЕК-91		
Утвердив		Марченко А.А.						

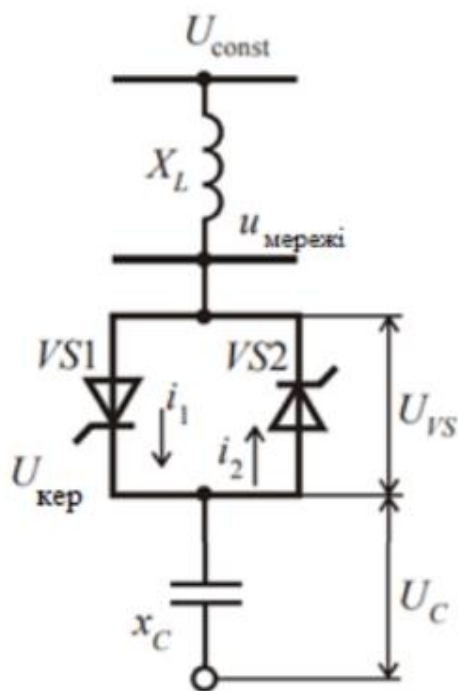


Рисунок 2.1 – Принципова схема однієї фази тиристорного вимикача для комутації конденсаторних батарей

Як показано на рисунку, кожен тиристор пропускає кожен половину періоду залежно від кута спрацювання, який вимірюється від нульового перетину напруги. Тоді КТР переходить до повного проведення, коли кут спрацювання становить 90° .

Важливі рівняння, які слід враховувати, мають наступний вигляд:

$$\beta = 2(\pi - \alpha) \quad (2.1)$$

Миттєвий струм у КТР визначається так:

$$i = \begin{cases} (\sqrt{2} \cdot U_{rms})/X_L \cdot \cos \alpha - \cos \omega t & \alpha < \omega t < (\alpha + \beta) \\ 0 & (\alpha + \beta) < \omega t < (\alpha + \pi) \end{cases} \quad (2.2)$$

Де U_{rms} - прикладена напруга до КТР, а $X_L = \omega L$ - Це реактивний опір реактора на основну частоту. Основна складова струму, проводячи аналіз Фур'є, задається наступною рівністю:

$$I_1 = \frac{U_{rms}}{X_L} C \cdot \frac{\beta - \sin \beta}{\pi} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) можна виразити так:

$$I_1 = B_L \cdot U_{rms}(\beta) \quad (2.4)$$

Де $B_L(\beta)$ - реактивна провідність на основній частоті, змінна, яку контролює кут проведення згідно з наступним законом керування:

$$B_L(\beta) = \frac{\beta - \sin \beta}{\pi X_L} \quad (2.5)$$

Залежно від β , закон керування відображений на рисунку 2.3 у відношенні до одиниці (за базою $\beta=180^\circ$). Таким чином, максимальне значення змінної реактивної провідності буде $1/X_L$, отримане при $\beta=180^\circ$, коли струм через реактор максимальний. Мінімальне значення - це нуль, досягається при $\beta=0^\circ$ ($\alpha=180^\circ$). Цей принцип керування відомий як фазовий контроль.

Значення фіксованої ємності СТАТКОМ має бути розраховане таким чином, щоб вона здатна компенсувати максимальне падіння напруги в середині і це станеться, коли буде максимальний ступінь навантаження . Спочатку слід враховувати рівняння 2.7:

$$C_0 = i^{АкС} = \frac{4 \cdot \left[1 - \cos \frac{\phi_{\max}}{2} \right]}{\omega^2 \cdot L} \quad (2.7)$$

Еквівалентна індуктивність реактора, керованого тиристорами КТР, буде:

$$L_{\text{екв}} \alpha = \frac{\pi \cdot L_0}{2 \cdot (\pi - \alpha) - \sin 2(\pi - \alpha)} \quad (2.8)$$

Оскільки теоретичний інтервал спрацювання тиристорів ϵ ;

$$\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$$

Вибирається резонансний кут роботи α_0 , близький до $\pi/2$, що зменшує амплітуду впроваджених до мережі гармонік. Тоді обирається резонансний кут роботи 100° .

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

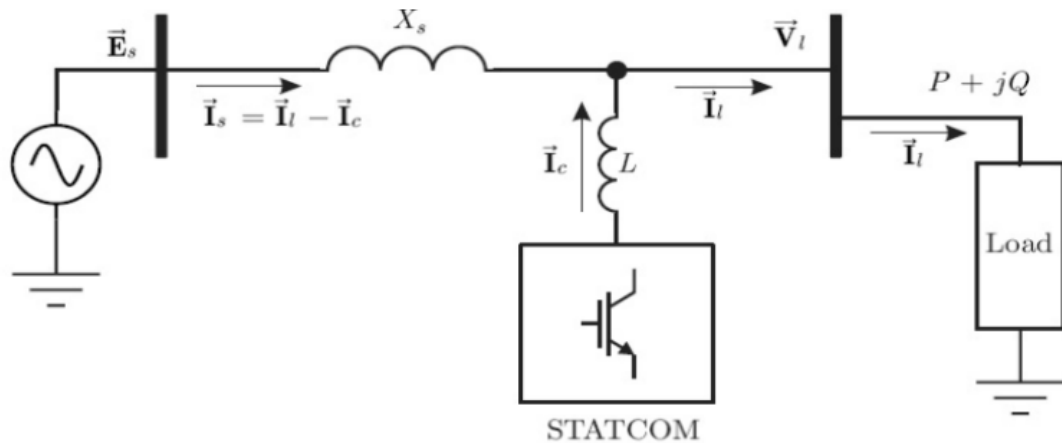


Рисунок 2.2- Базова структура статичного компенсатора реактивної потужності (СТАТКОМ).

Потім, оцінюючи це значення у рівнянні 2.8, маємо:

$$L_{\text{екв}}(\alpha_0) = 1,282 \cdot L_0 \quad (2.9)$$

Таким чином, для резонансної роботи СТАТКОМ, частота якої визначається:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{екв}}(\alpha_0) \cdot C_0}} \quad (2.10)$$

Таким чином, нарешті отримуємо:

$$L_0 = \frac{0.78}{\omega^2 \cdot C_0} \quad (2.11)$$

Таким чином, визначаються параметри, необхідні для компенсації системи СТАТКОМ, враховуючи попередньо визначену індуктивність L лінії передачі та максимальний ступінь навантаження системи.

2.2 Моделювання і аналіз ємнісних властивостей системи з пристроєм керування СТАТКОМ

Рівняння 2.12 встановлює зв'язок між ступенем навантаження системи $\phi_{\text{оп}}$ для заданої робочої точки та необхідною ємністю для досягнення компенсації, вказаною таким чином:

$$C_{\text{ек.оп}} \phi = \frac{4 \cdot \rho - \cos\left(\frac{\phi_{\text{оп}}}{2}\right)}{\omega^2 \cdot L} \quad (2.12)$$

Оскільки функція СТАТКОМ полягає в тому, щоб забезпечити на середині ту саму ємність, але змінюючи кут спрацювання тиристорів, маємо:

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

$$C_{\text{конд}}(\alpha) = C_{\text{ек.оп}}(\phi) \quad (2.13)$$

Де еквівалентна ємність СТАТКОМ:

$$C_{\text{конд}}\alpha = \frac{X_L\alpha - X_{C0}}{X_L\alpha \cdot X_{C0}\omega} \quad (2.14)$$

Де Індуктивний опір реактора, керованого тиристорами, є:

$$x_L(\alpha) = \omega \cdot L_{\text{екв}}\alpha \quad (2.15)$$

А реактанса ємності конденсатора СТАТКОМ буде:

$$x_{C0} = \frac{1}{\omega \cdot C_0} \quad (2.16)$$

Тепер, підставляючи рівняння 2.15 і 2.16 в 2.14, отримуємо:

$$C_{\text{конд}}(\alpha) = C_0 - \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{\text{екв}}(\alpha)} \quad (2.17)$$

Нарешті, деякі джерела літератури виконують певне "нормалізування" рівняння, яке дорівнює:

$$\vec{C}(\alpha) = C_0 - C_{\text{конд}}(\alpha) \cdot \omega^2 \cdot L_0 = \frac{2 \cdot (\pi - \alpha) - \sin 2 \cdot (\pi - \alpha)}{\pi} \quad (2.18)$$

У рівнянні 2.18 коефіцієнти з лівого боку рівності є відомими, оскільки як C_0 так і L_0 є складовими, отриманими попередньо, а $C_{\text{конд}}(\alpha)$ отримується залежно від ступеня навантаження у рівняннях 2.12 і 2.13. і залишається лише права частина виразу в залежності від альфа.

Крім того, можна отримати кут альфа шляхом застосування числових або графічних методів, як показано на рисунку 2.5, який пов'язує відповідну еквівалентну ємність з альфа.

Досліджуваний СК складається з реактора керованого тиристорами (РКТ) і фіксованої батареї конденсаторів, як показано на рисунку 3.6. Конденсаторна батарея - це лише частина ємнісної реактивної потужності, необхідної в системі. Інша частина ємнісної реактивної потужності складається з пасивних фільтрів. Фільтри розміщуються паралельно батареї конденсаторів і налаштовані на вищі гармоніки. Третю гармоніку можна зменшити, якщо КТР з'єднати в трикутник. Інші гармоніки послаблюються переважно за допомогою фільтрів 5-ї та 7-ї гармонік.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

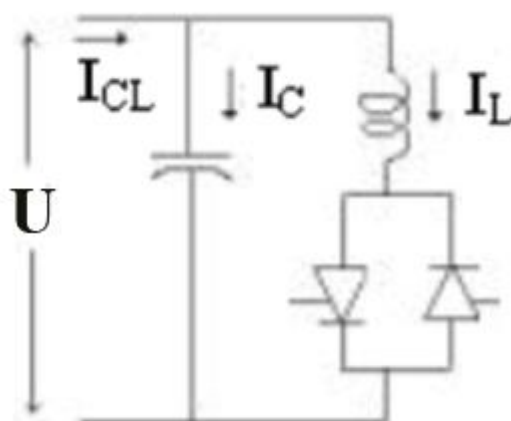


Рисунок 2.3 – Основне підключення реактора, керованого тиристорами, паралельно з батареї конденсаторів.

Батареї конденсаторів і реактор, керований тиристорами, фактично є реактивною потужністю, керованою кутом спрацювання КТР та максимальною ємністю Конденсатора.

Максимальне значення реактивної потужності конденсатора досягається, коли кут спрацювання тиристорів має значення 180° . Це значення зменшується, коли струм у реакторі зростає, тобто коли кут спрацювання зменшується. Коли реактивна потужність СТАТКОМ дорівнює нулю, реактивна потужність конденсатора і реактора стають рівними. У розглянутому випадку реактивна потужність конденсатора менша за максимальну реактивну потужність, яку може постачати Максимальна генерація реактивної потужності залежить від доступного конденсатора та змінної реактивної прийнятності [2], як показано на рисунках 2.8 і 2.9, що є характеристикою $U(I)$.

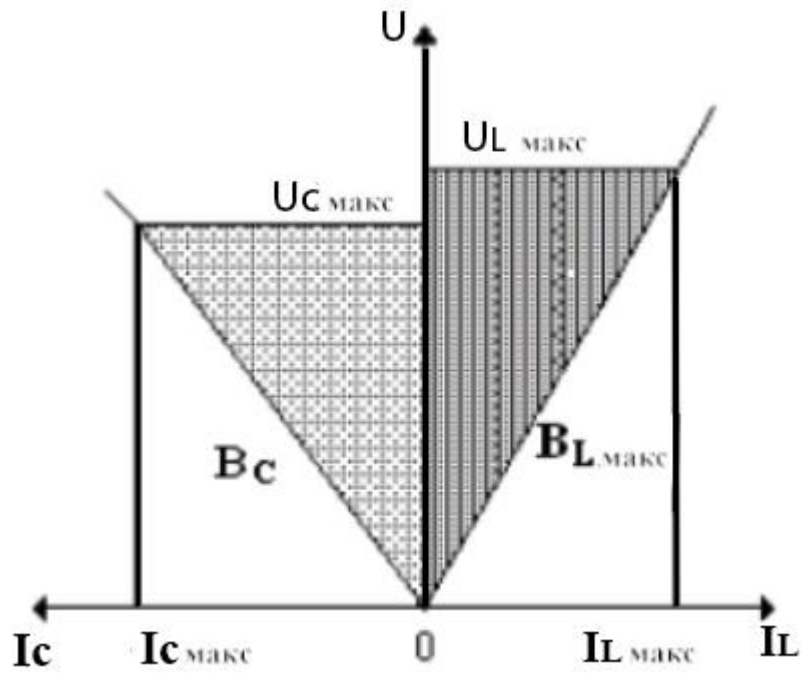


Рисунок 2.4 – Характеристика роботи $U(I)$ конденсаторів та реактора, керованого тиристорами.

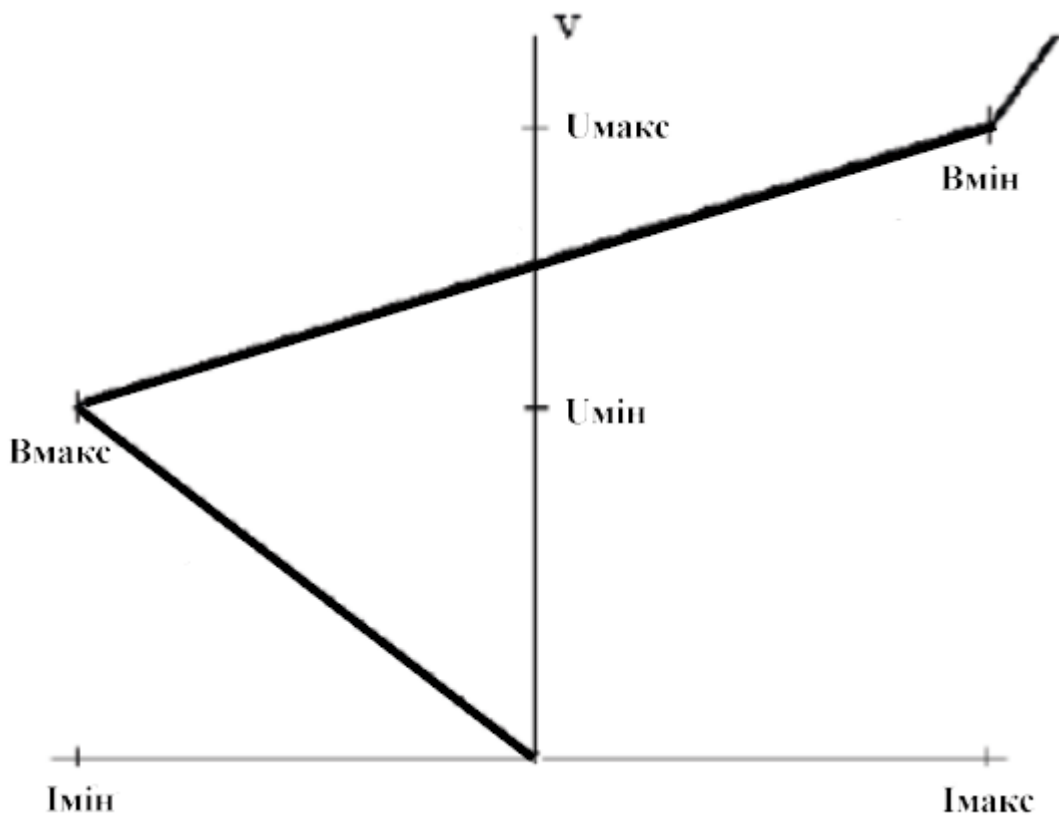


Рисунок 2.5 – Характеристика $U-I$ СТАТКОМ.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

141.ЕК9108.007.ДБ

Арк.

28

2.3 Трифазна компенсація небалансованого навантаження: методи та математичні моделі

Як описано в [4], якщо вважати трифазове навантаження, представлене комплексними опорами Z_a , Z_b і Z_c , підключеними до терміналів змінного струму-системи з фазовими напругами, як показано на рисунку 2.10, зазначимо:

$$U_a = U; \quad U_b = U \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad U_c = U \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}$$

Для встановлення основних вимог до компенсації, три опори навантаження вважаються різними і незмінними в часі. За цих умов проблема компенсації базується на знаходженні такого реактивного опору мережі, який у поєднанні з опором навантаження дає реальне і збалансоване навантаження. Використовуючи дельта-еквівалент, можна окремо компенсувати ці три активні опори, як якщо б вони були однофазними навантаженнями. Тобто, наприклад, для випадку фаз a і b, якщо вхідний опір Y_{ab} складається з дійсної частини і уявної частини, тобто

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab}$$

У рівнянні вище можна скасувати уявну або реактивну частину цієї прийнятності, як перший крок компенсації, через компенсаційну прийнятність $-jB_{ab}$, підключену паралельно до Y_{ab} . Як другий крок компенсації, реальна прийнятність G_{ab} повинна бути доповнена реактивними елементами мережі так, щоб можна було отримати збалансоване навантаження. Навантаження, підключене до джерела живлення, залишається збалансованим, якщо між фазами **bc** і **ca** підключена реактивна прийнятність конденсатора з такими значеннями:

$$B_{bc}^{(ab)} = \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad \text{та} \quad B_{ca}^{(ab)} = \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2.19)$$

Активна потужність, замінена джерелом змінного струму, до компенсації задається:

									Арк.
									29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				141.ЕК9108.007.ДБ	

$$P = \left[\frac{U}{\sqrt{3}} \right]^2 \cdot G_{ab} = 3U^2 G_{ab} \quad (2.20)$$

Наведена вище математична залежність повинна дорівнювати трифазній потужності після компенсації. Компенсоване навантаження може бути у вигляді трьох резисторів, з'єднаних в зірку, кожен з яких має провідністю G_{ab} . Еквівалентну процедуру можна виконати для компенсації навантажень у фазах bc і ca . Для цього, по-перше, реактивності B_{bc} і B_{ca} зрівноважуються двома компенсуючими реактивностями з протилежним знаком, $-B_{bc}$ і $-B_{ca}$ відповідно. По-друге, G_{bc} і G_{ca} врівноважуються двома парами наступних сприйнятливостей:

$$B_{ca}^{(bc)} = \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}}, \quad B_{ab}^{(bc)} = \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (2.21a)$$

$$B_{ab}^{(ca)} = \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}}, \quad B_{bc}^{(ca)} = \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (2.21b)$$

Висновки

В даному розділі розглянуто проблему компенсації реактивної потужності та ступеня навантаження системи в контексті дослідження системи STATCOM і керованого тиристорами реактора (КТР). Встановлено, що ємність системи є ключовим параметром для досягнення потрібного ступеня компенсації. Було використано числові та графічні методи для визначення відповідних величин.

Було показано, що в системі існує тісний зв'язок між кутом спрацювання тиристорів і ємністю системи. Основна частина реактивної потужності в системі надходить від конденсаторів, але важливу роль відіграють також і пасивні фільтри, які допомагають приглушити гармоніки.

У контексті трьохфазового навантаження, представленого комплексними опорами Z_a , Z_b і Z_c , проблема компенсації полягає в знаходженні відповідної реактивної прийнятності, яка при з'єднанні з

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

–
прийнятністю навантаження призводить до реального і збалансованого навантаження.

Загалом, ці розгляди підкреслюють складність і важливість правильної компенсації в системах з реактивним навантаженням. У майбутньому, подальші дослідження в цій області могли б зосередитись на оптимізації системи компенсації, щоб полегшити регулювання та покращити ефективність енергосистем.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

3 ОЦІНКА ЕФЕКТУ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСАТОРА СТАТКОМ

3.1 Моделювання лінеризованої системи синхронного двигуна

Системи електропостачання обмежені у своєму зростанні через різні фактори, зокрема, екологічні, економічні та експлуатаційні. Зі звільненням електроенергетичного сектора різні генеруючі та розподільні організації повинні ефективніше використовувати наявну інфраструктуру та покращувати надійність надання послуг. Це призводить до роботи системи на межі її експлуатаційних можливостей, тому необхідно використовувати пристрої, які не лише розширюють межі стабільності системи, але й покращують деякі параметри роботи.

Останні роки гнучкі пристрої для передачі змінного струму (FACTS) широко використовуються для забезпечення додаткового загасання коливань в енергетичній системі. Для аналізу поведінки компенсаторів реактивної потужності у потужній електричній системі може використовуватися наступна схема яка складається з синхронного генератора(СГ), підключеного до розподільчої системи, Таким чином, виходячи з лінійної моделі системи СГ, запропонованої Хеффроном-Філіпсом,[13] Як показано на рис. 3.1, ця модель містить шість коефіцієнтів K_1-K_6 , які називаються коефіцієнтами моделі Хеффрона-Філіпса. Значення цих коефіцієнтів є функцією робочої точки та реактивних опорів синхронного генератора. Ці реактивні опори включають постійні та перехідні реактивності прямої та квадратичної осей (тобто, X_d, X_q та $X'd$). Робоча точка включає напругу на затискачах(U_{t0}), а також активну та реактивну потужність машини (тобто, P_{e0} та Q_{e0}). Метод розрахунку цих коефіцієнтів повністю пояснюється в [15].

					141.ЕК9108.007.ДБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Кисіль Д.П.				Оцінка ефекту використання компенсатора статком	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Нестерко А.Б.						33	10
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. Контр.	Настенко Д.В.					ФЕА, гр. ЕК-91		
Утвердив	Марченко А.А.							

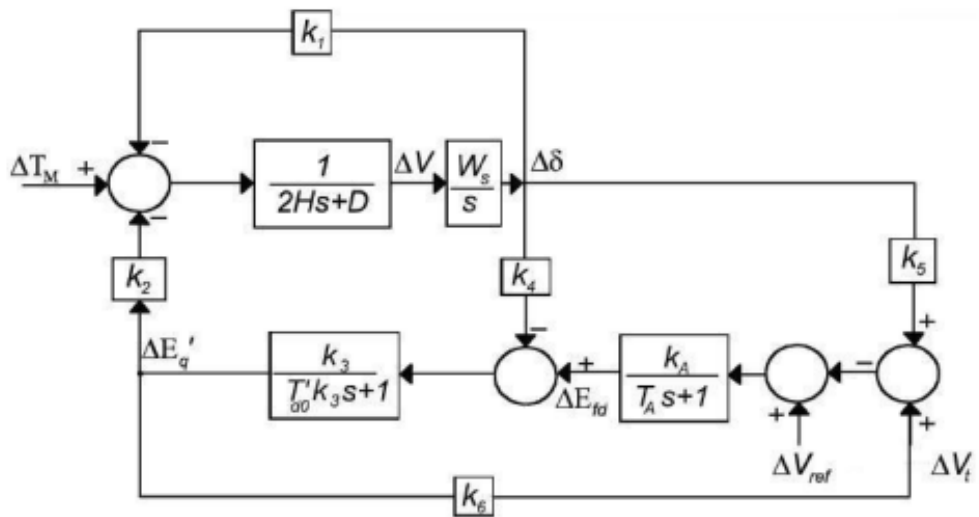


Рисунок 3.1 – Лінеарізована схема синхронного генератора Хеффона-Філіпса

В даній роботі буде проведено дослідження СГ за нормальних умов експлуатації. Будуть представлені результати, отримані при включенні СТАТКОМ і регулюванні його компенсатора коливань (КР). Випробування будуть проведені для різних збурень і різних типів навантажень, розташованих на локальному рівні. Це буде проаналізовано за допомогою програмного забезпечення MATLAB

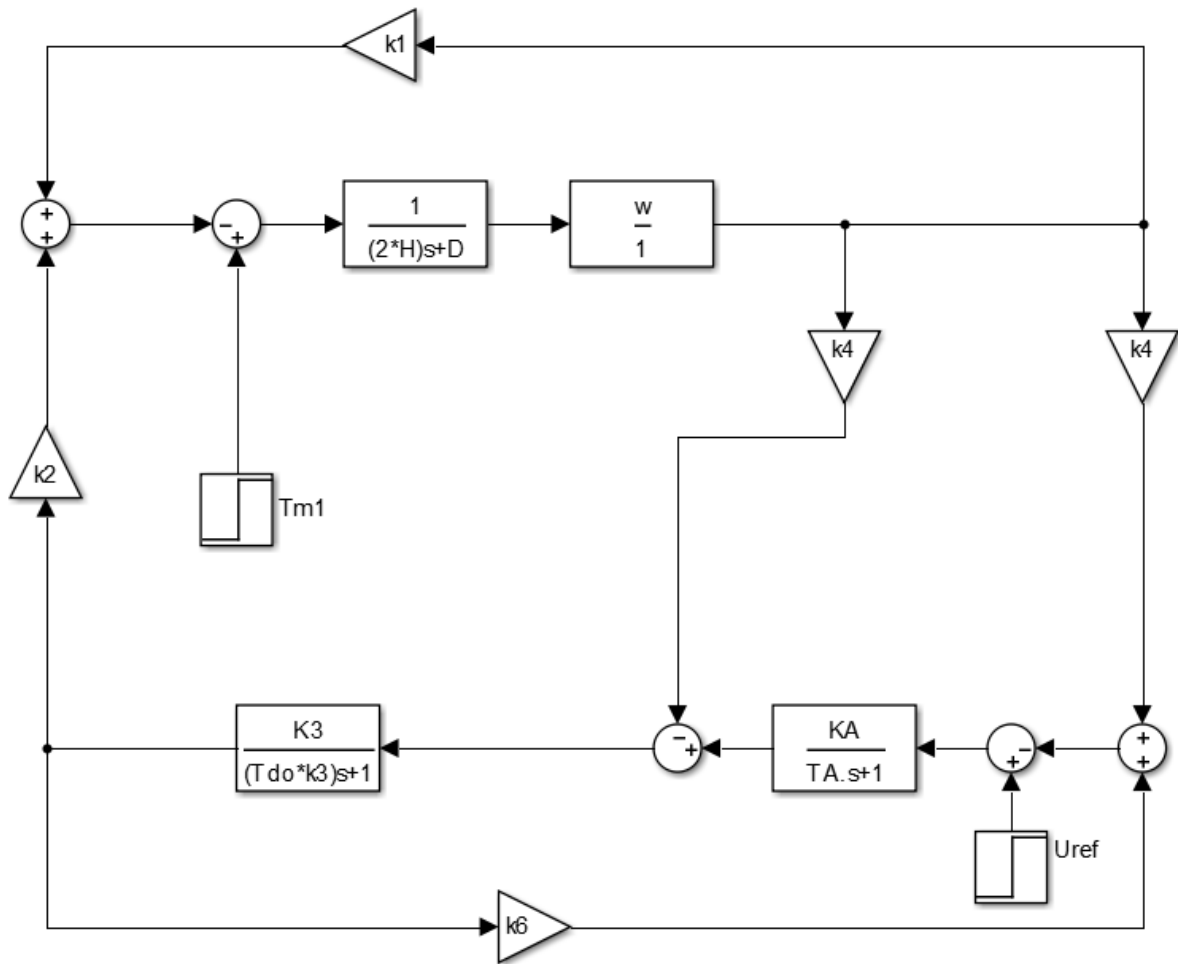


Рисунок 3.2 – Симуляція системи Хеффона-Філіпса в середовищі Matlab

Для побудови даної моделі згідно з методом описаним в джерелі [14] були розраховані дані параметри схеми

Таблиця 3.1 Параметри синхронного генератора

Параметр	Значення
синхронний реактивний опір вісі малого опору X_d	1,93
синхронний реактивний опір вісі великого опору X_q	1,77
перехідний реактивний опір вісі малого опору X_d'	0.23
перехідний реактивний опір вісі великого опору X_q'	0.5
Постійна збудження H	3.7
кутова швидкість ротора ω (рад/с)	377

Синхронний реактивний опір складається з реакції якоря та реактивного опору витoku. Для машин з гострими полюсами синхронний реактивний опір не буде постійним через нерівномірність повітряного зазору. Тому реактивний

опір поділяється на вісь q і вісь d. Вісь D - це шлях мінімального опору. Вісь Q, яка перпендикулярна до осі d, є шляхом великого опору.

Згідно з [15] коефіцієнти для даної системи розраховуються наступним чином:

Вплив кута крутного моменту на електричний крутний момент

$$K_1 = \frac{U}{(X_e + X_q)(X_e + X'_d)} (X'_d + X_e) \left(E_q^1 - (1X'_d - X_q) \right) \cos \delta - \sin(X_e + X_q)(X'_d - X_q)$$

Вплив внутрішньої напруги на електричний крутний момент

$$K_2 = I_q \left(1 - \frac{(X_e + X_q)(X'_d - X_q)}{(X_e + X_q)(X_e + X'_d)} \right)$$

Вплив кута обертання на кінцеву напругу

$$K_4 = \frac{U}{(X_e + X_q)(X_e + X'_d)} ((X_e + X_q)(X_d - X'_d) \sin \delta$$

Вплив кута крутного моменту на кінцеву напругу

$$K_5 = \frac{U}{(X_e + X_q)(X_e + X'_d)} (X_q((X'_d + X_e) \cos \delta - X'_d(X_e + X_q) \sin \delta$$

Вплив внутрішньої напруги на напругу на клеммах

$$K_6 = 1 - \frac{X'_d(X_e + X_q)}{(X_e + X_q)(X_e + X'_d)}$$

Таблиця 3.2 Коефіцієнти лінеаризованої моделі системи без СТАТКОМ

K1	K2	K3	K4	K5	K6
0.675	0.720	0.3796	1.2250	0.0845	0.6738

Для аналізу стабільності цієї системи використовується матриця A розміром 5 x 5 для отримання характеристичного полінома та його коренів. Де, A має розмірність n x n і називається матрицею зворотного зв'язку.

B має розмірність n x m і називається матрицею входу.

$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta E}'_q \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E}_{fd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.2 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 377.0 & 0 & 0 \\ -0.1 & -0.1 & -50.4 & 0 & 0 \\ -5390.2 & -675.7 & 0 & -20.0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 133.7 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

$$Y = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0) \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

Для аналізу стабільності цієї системи використовується матриця А розміром 4 x 4 для отримання характеристичного полінома та його коренів.

Характеристичний поліном:

$$A = s^4 + 70s^3 + 2043s^2 + 52390s + 30076$$

Таблиця 3.3 корені отриманого полінома

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
-49.7518	$-9.7777 + j 30.5578$	$-9.7777 + j 30.5578$	-0.5873

Бачимо, що корені знаходяться в лівій півплощині дійсних чисел, що свідчить про стабільність системи.

Симуляції проводяться за допомогою інструментарію MATLAB SIMULINK. Спочатку проводиться симуляція початкової системи без СТАТКОМ, щоб отримати графіки вихідних параметрів та спостерігати їх поведінку, оскільки це система без пристроїв керування та регулювання. Потім вводиться пристрій керування СТАТКОМ та налаштовуються його параметри згідно з теорією, згадану у попередніх розділах, щоб знову отримати графіки вихідних параметрів та встановити різницю між відповідями.

3.2 Побудова схеми в матлаб з використання статичного компенсатора

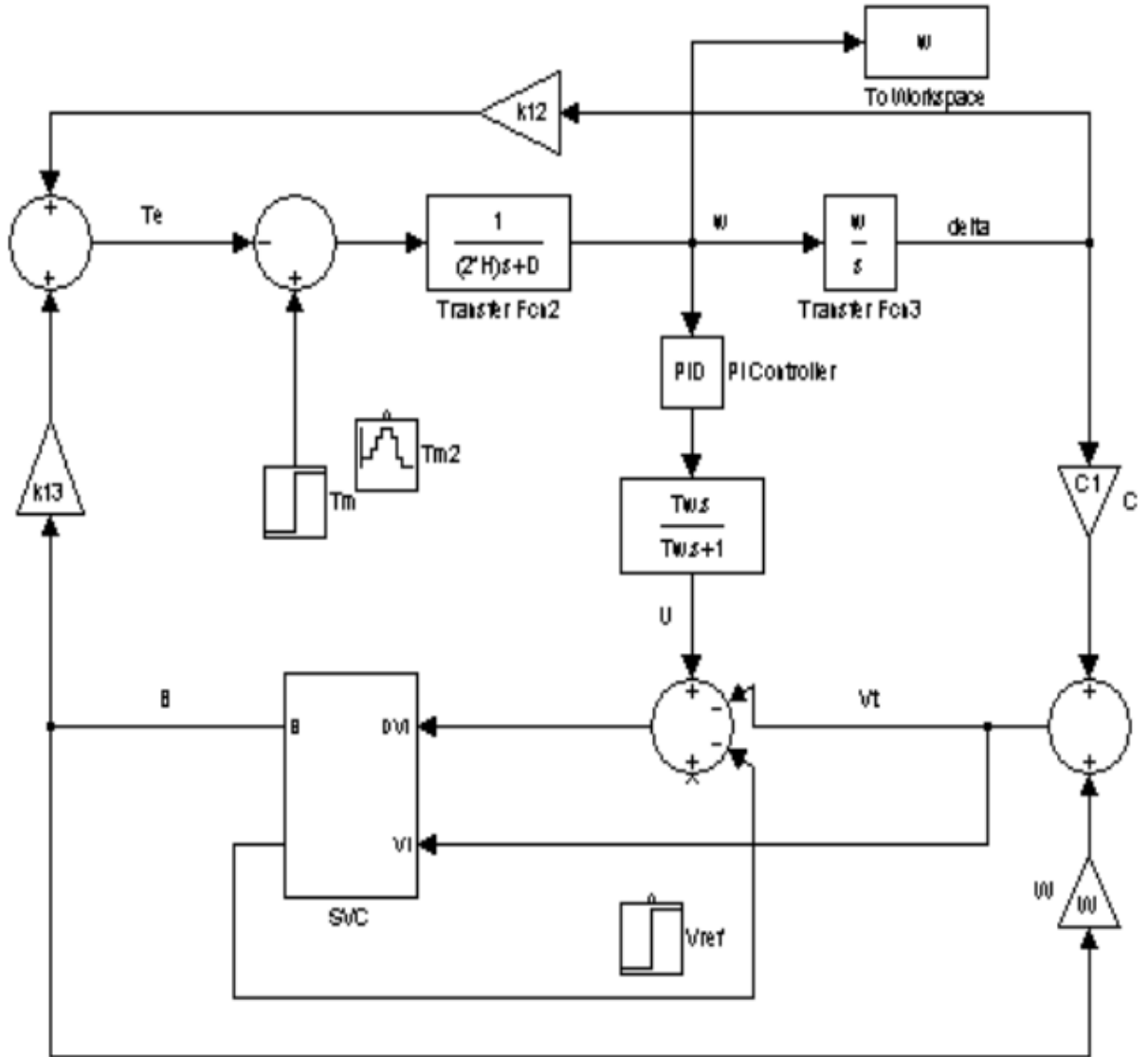


Рис 3.3 Модель, лініаризована з використанням СТАТКОМ

Таблиця 3.3 Коефіцієнти системи з використанням статичного компенсатора

K13	K12	C	W
-2.257	0.5938	0.0077	-2.111

C має розмірність $p \times n$ і називається матрицею виходу.

Звідси отримуємо характеристичний поліном:

$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta E}'_q \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E}_{fd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.2 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 377.0 & 0 & 0 \\ -0.1 & -0.1 & -50.4 & 0 & 0 \\ -5390.2 & -675.7 & 0 & -20.0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 133.7 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

$$Y = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0) \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \end{pmatrix}$$

(3.2)

Після отримання полінома знову обчислюємо його корені за допомогою Matlab.

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
-148.74	-49.75	$-9.78 + j30.56$	$-9.78 - j30.56$	-0.59

Знову бачимо, що корені знаходяться в лівій півплощині дійсних чисел, що свідчить про стабільність системи при включенні СТАТКОМ.

3.3.Налаштування моделі Статичного компенсатора в Matlab

Для практичних цілей цього дослідження беруться до уваги входи Опорної напруги (U_{ref}) і Механічного моменту (T_m)

$$U_{ref} = 1.0286$$

$$T_m = 0.4002$$

$$E_{fd} = E + (x_d - x'_d)$$

У цьому конкретному дослідженні були змінені деякі параметри симулятора, які за замовчуванням налаштовуються для кращого відповідності вимогам.

The screenshot shows the configuration interface for a simulation. On the left is a tree view with categories like Solver, Diagnostics, and Real-Time Workshop. The main area is divided into several sections:

- Simulation time:** Start time: 0.0, Stop time: 100.
- Solver options:**
 - Type: Variable-step
 - Solver: ode23s (stiff/Mod. Rosenbrock)
 - Max step size: auto
 - Relative tolerance: 1e-3
 - Min step size: auto
 - Absolute tolerance: auto
 - Initial step size: auto
 - Shape preservation: Disable all
 - Number of consecutive min steps: 1
 - Solver Jacobian method: auto
- Tasking and sample time options:**
 - Tasking mode for periodic sample times: Auto
 - Automatically handle rate transition for data transfer
 - Higher priority value indicates higher task priority
- Zero-crossing options:**
 - Zero-crossing control: Use local settings
 - Algorithm: Nonadaptive
 - Time tolerance: 10*128*eps
 - Signal threshold: auto
 - Number of consecutive zero crossings: 1000

Рисунок 3.4 –Налаштування параметрів зупинки та методу розв'язання.

Розрахунок коефіцієнтів системи: За допомогою лінійної моделі системи були розраховані відповідні коефіцієнти системи (K_{13} , K_{12}), які відображають різні взаємозв'язки між елементами системи.

Характеристичний поліном: На основі матриці A (матриця зворотного зв'язку) було отримано характеристичний поліном системи. Корені цього полінома були обчислені за допомогою MATLAB, що дозволило зрозуміти, наскільки стабільна система. Всі корені знаходилися в лівій півплощині комплексної площини, що свідчить про стабільність системи.

Налаштування моделі СТАТКОМ: У процесі моделювання були вибрані конкретні вхідні значення для опорної напруги (U_{ref}) та механічного моменту (T_m). Вивчення системи відбувалося в нормальних умовах роботи, при цьому результати порівнювалися з результатами без включення СТАТКОМ.

Визначення коефіцієнтів K_p та K_i : На основі обраних значень λ_2 та λ_5 було обчислено коефіцієнти K_p та K_i за допомогою системи рівнянь. Ці значення потім були використані для налаштування контролера PI СТАТКОМ, що допомагає регулювати вхідні та вихідні сигнали системи для підтримки її стабільності. Завдяки використанню методу Хеффона-Філіпса для лінійної моделі системи СГ, можливо розрахувати константи K_1 до K_6 , які залежать від параметрів системи та точки роботи. Ці константи можуть бути використані для подальшого аналізу та оптимізації системи.

					141.ЕК9108.007.ДБ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАТИЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ НА СИСТЕМУ

У цьому розділі згадуються результати, отримані за допомогою відповідних симуляцій, які дозволяють побачити поведінку системи при різних збуреннях і включенні різних типів навантаження. Таким чином, можна спостерігати, як на вихідну напругу (t), кут моменту (δ) і кутову швидкість (ω) впливають зміни вхідних сигналів, якими в даному випадку є механічний момент (T_m) і опорна напруга (U_{ref})

Оскільки системні рівняння були лінійними навколо певної робочої точки, можна побачити, що початкові амплітуди сигналів не враховуються, і показуються лише зміни відносно цих значень.

4.1 Аналіз впливу збурень механічного моменту на систему з пристроєм керування STATCOM.

Після обчислення початкових значень відповідно до обраної робочої точки, вводяться різні збурення в механічний момент вхідного сигналу, щоб спостерігати реакцію різних вихідних сигналів системи при використанні пристрою керування СТАТКОМ.

Для спостереження за реакціями системи на збурення моменту використовується ступінчаста функція з бібліотеки SIMULINK ToolBox з початковою амплітудою Початкова амплітуда 0.4 п.п., кінцева амплітуда 0.43 п.п. і крок за часом 60 секунд. Див. рисунок 4.1

Інший випадок, який розглядається, - це імпульсна послідовність, яка дозволяє послідовно змінювати ступінь механічного моменту збурення з характеристиками наведеними на рисунку 4.2 та 4.3.

					141.ЕК9108.007.ДБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження впливу статичних компенсаторів на систему	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Кисіль Д.П.						43	16
Перевірив	Нестерко А.Б.							
Реценз.								
Н. Контр.	Настенко Д.В.							
Утвердив	Марченко А.А.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-91		

Step

Output a step.

Parameters

Step time:

Initial value:

Final value:

Sample time:

Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

Рисунок 4.1 – Параметри сходянкової функції T_m

Repeating Sequence Stair (mask) (link)

Discrete time sequence is output, then repeated.

Main **Signal Attributes**

Vector of output values:

Sample time:

Рисунок 4.2 – Характеристики вектора імпульсів в T_m

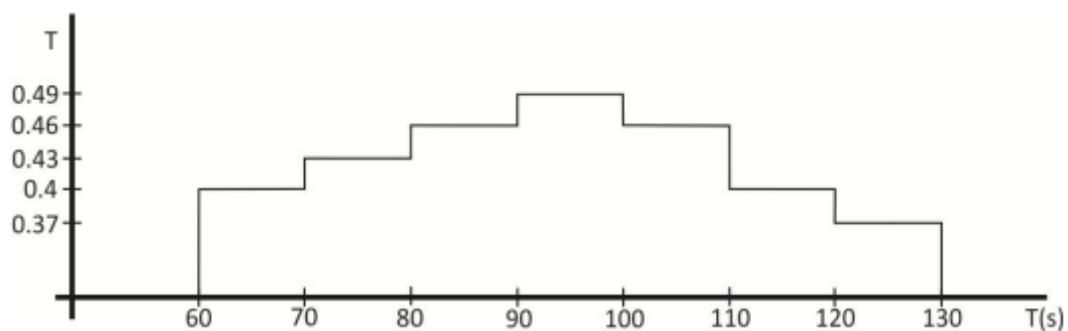


Рисунок 4.3 – Значення вектора імпульсів в T_m

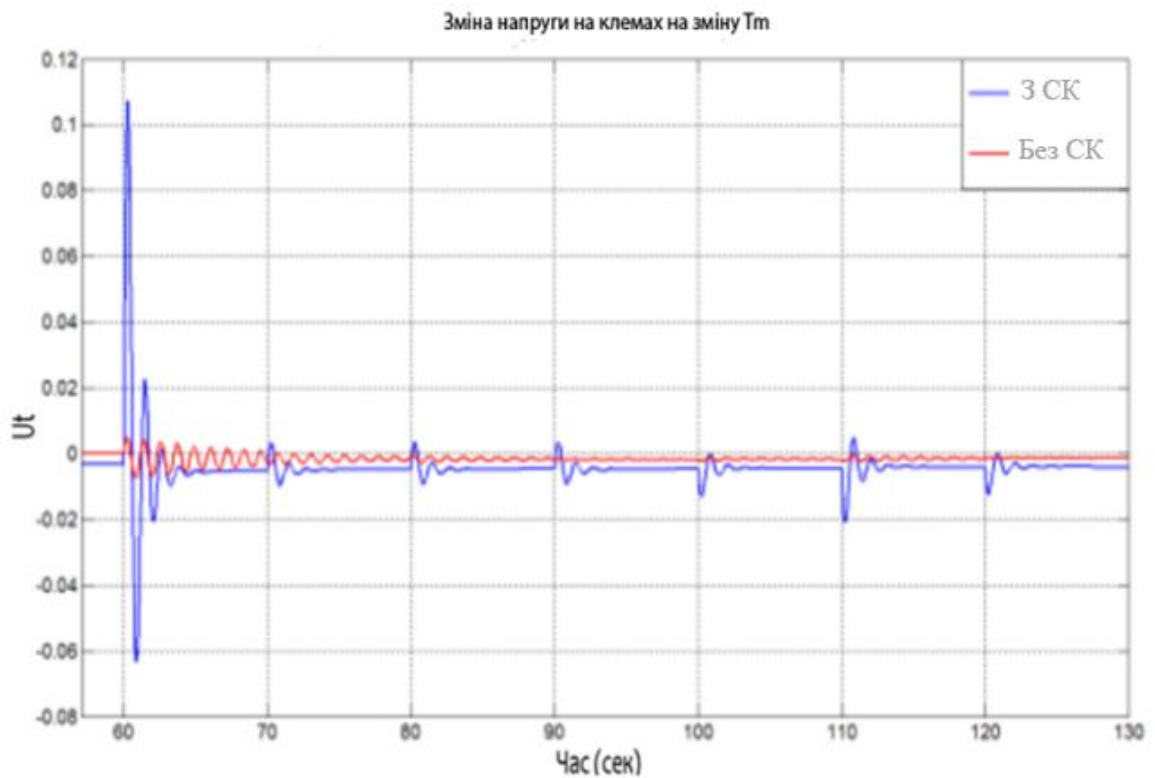


Рисунок 4.5 – Зміна напруги на клемі при введенні вектора імпульсів в T_m

У цьому випадку функцію кроку замінено на вектор імпульсів, що представляє зміну механічного крутного моменту входу. Ці сигнали вводяться через 60 секунд роботи системи з метою того, щоб запуск не вплинув на отримані результати. Слід зазначити, що кожен раз, коли змінюється амплітуда імпульсу, це викликає реакцію в амплітуді вихідного сигналу, яка згасає приблизно за 5 секунд або менше для випадку використання СК. В схемі з СК з СК видно великий пік на вісі напруги на клемі при введенні вектору імпульсів до системи порівняно з сигналом без СК, який має набагато менший пік, але дуже коливається, і з чого важко виміряти його час стабілізації

Отже, введення вектора імпульсів до T_m показує переваги використання СК, оскільки він забезпечує швидку стабілізацію і менші коливання напруги на клемі системи.

Реакція кутової швидкості ω на зміну T_m

					141.EK9108.007.ДБ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

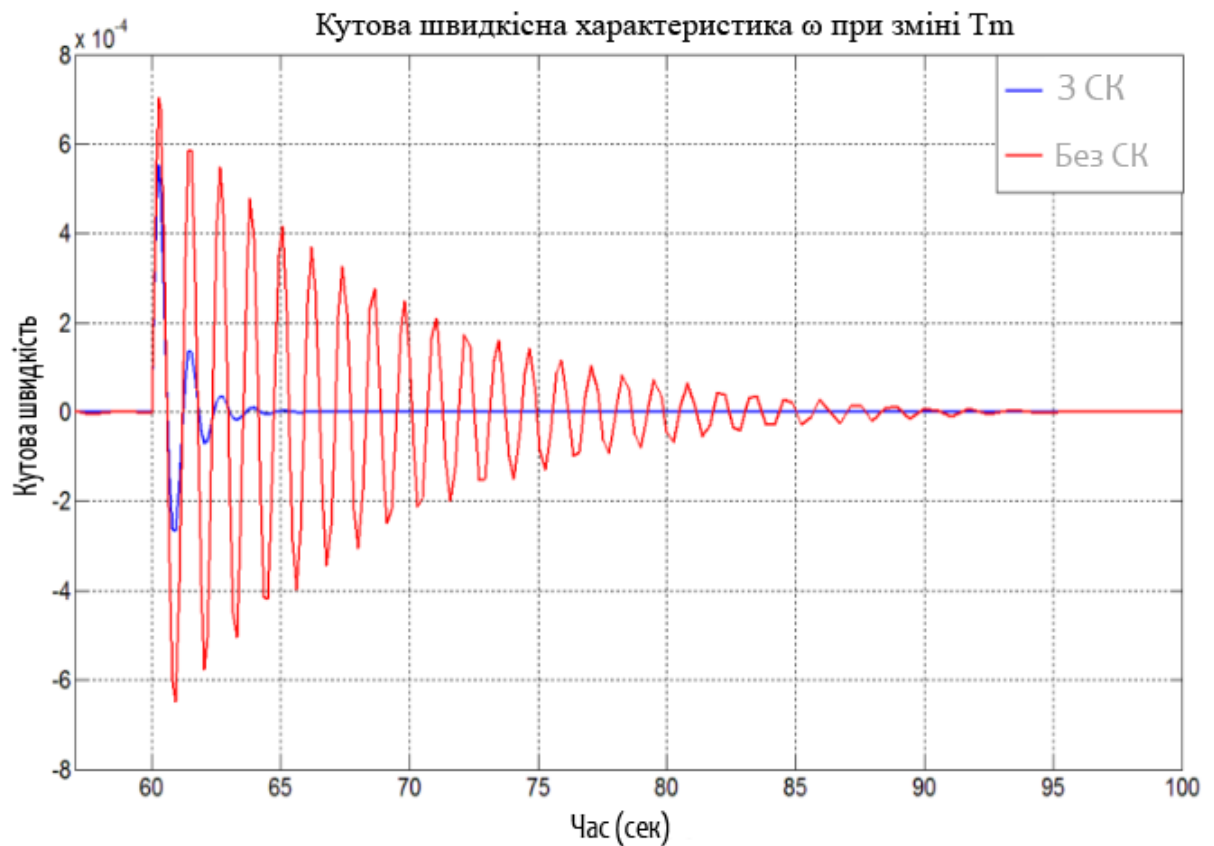


Рисунок 4.6 – Зміна кутової швидкості ω на зміну T_m

На рисунку 4.6 показана зміна кутової швидкості системи при зміні T_m . Видно, що сигнали системи без СК, як і в попередньому випадку, Сильно коливаються, а час стабілізації становить приблизно 35 секунд. У випадку використання СК відповідь системи поліпшується як з точки зору часу стабілізації (приблизно 7 секунд), так і з точки зору перешкод в амплітуді на вісі швидкості. Час стабілізації скорочується на 20% при використанні СК у системі.

Отже, використання СК сприяє поліпшенню стабільності системи та зниженню коливань кутової швидкості.

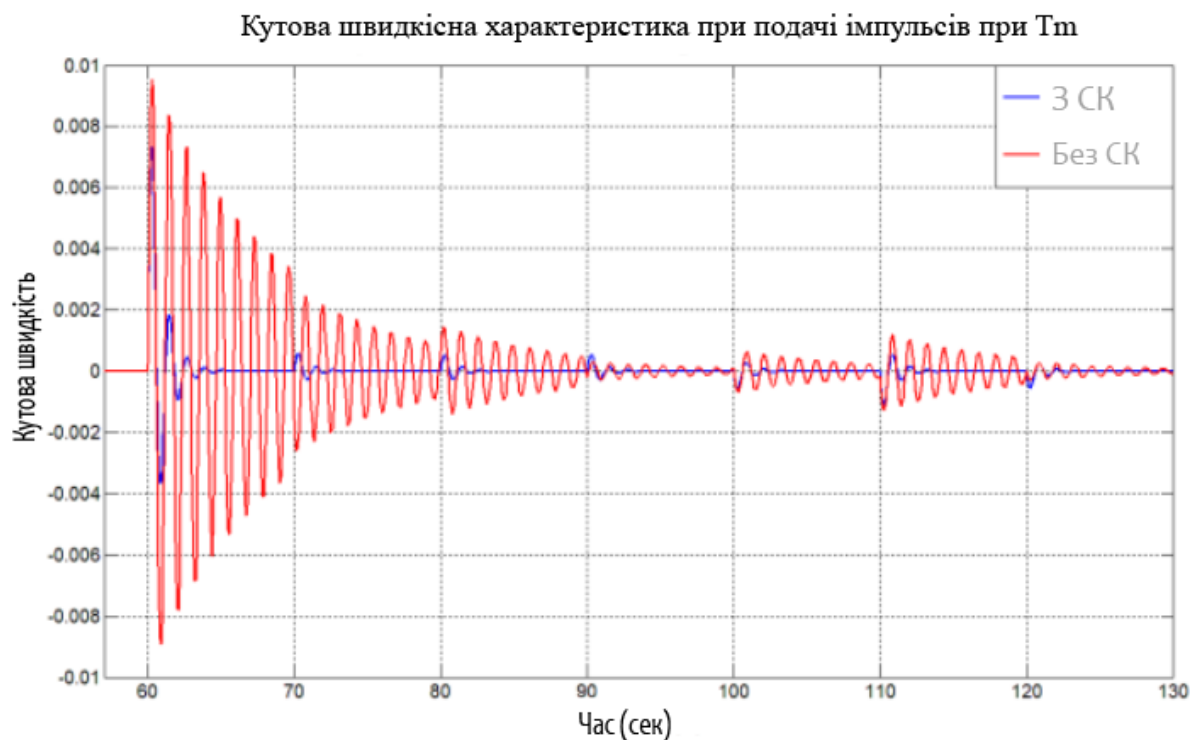


Рисунок 4.7 – Зміна кутової швидкості на вхідний імпульс у T_m

Після 60 секунд роботи системи подається вхідний імпульс у T_m . Можна побачити, що сигнал без компенсатора проявляє дуже коливальну поведінку з великими змінами амплітуди, які починають зменшуватися після 30 секунд, але не досягають повної стабілізації. У системі з компенсатором спостерігається великий перепад на початку вхідного імпульсу, але швидко стабілізується (приблизно за 5 секунд), поки вводяться кроки в ході вхідного імпульсу, коли спостерігаються дуже маленькі піки.

Отже, використання компенсатора сприяє зниженню коливань і швидкій стабілізації системи при введенні вхідного імпульсу у T_m .

Реакція кута на зміну T_m .

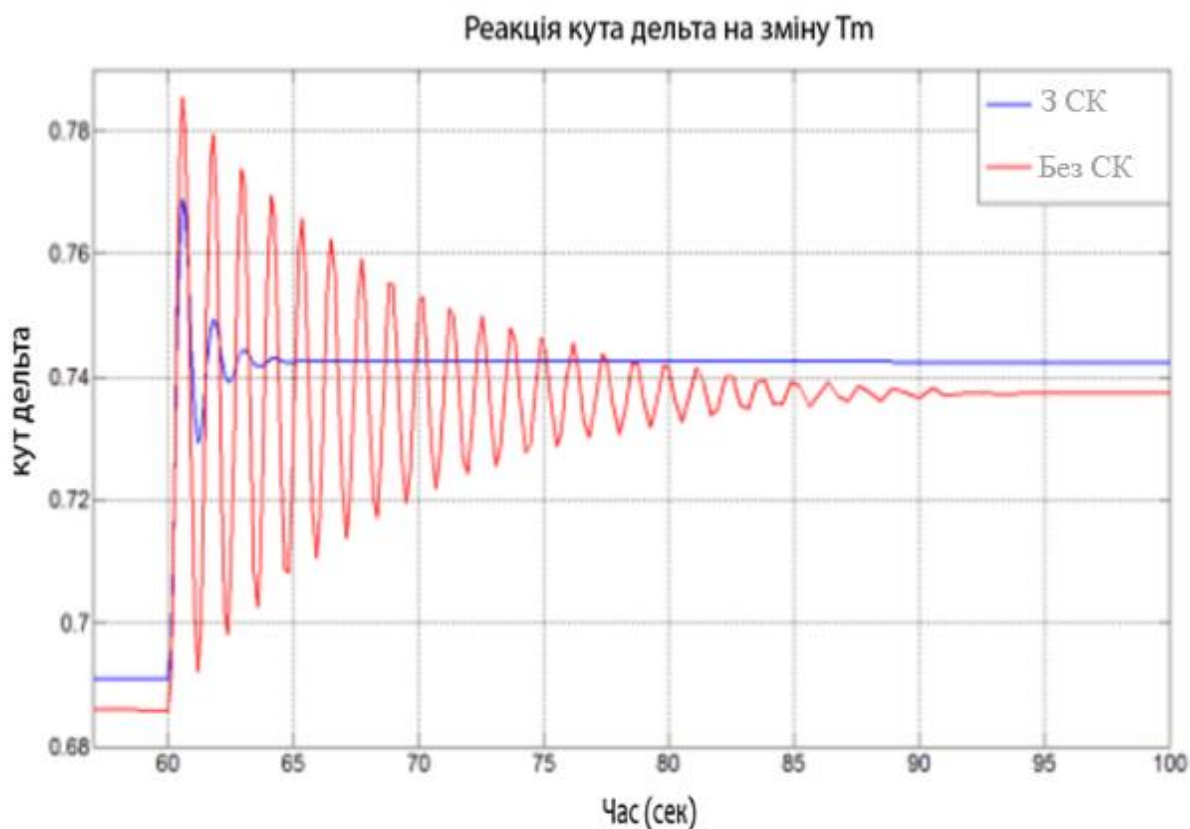


Рисунок 4.8 – Реакція кута на зміну T_m .

У цьому випадку можна побачити, що сигнал з використанням компенсатора стабілізується приблизно через 10 секунд після імпульсу, його зміна амплітуди сигнал відхиляється в 0.01 одиниць порівняно з сигналом без компенсатора, який, зі свого боку, стабілізується приблизно через 35 секунд, що становить 29% більше часу, ніж при використанні компенсатора, і амплітуда сигналу зазнає значних змін протягом свого періоду стабілізації.

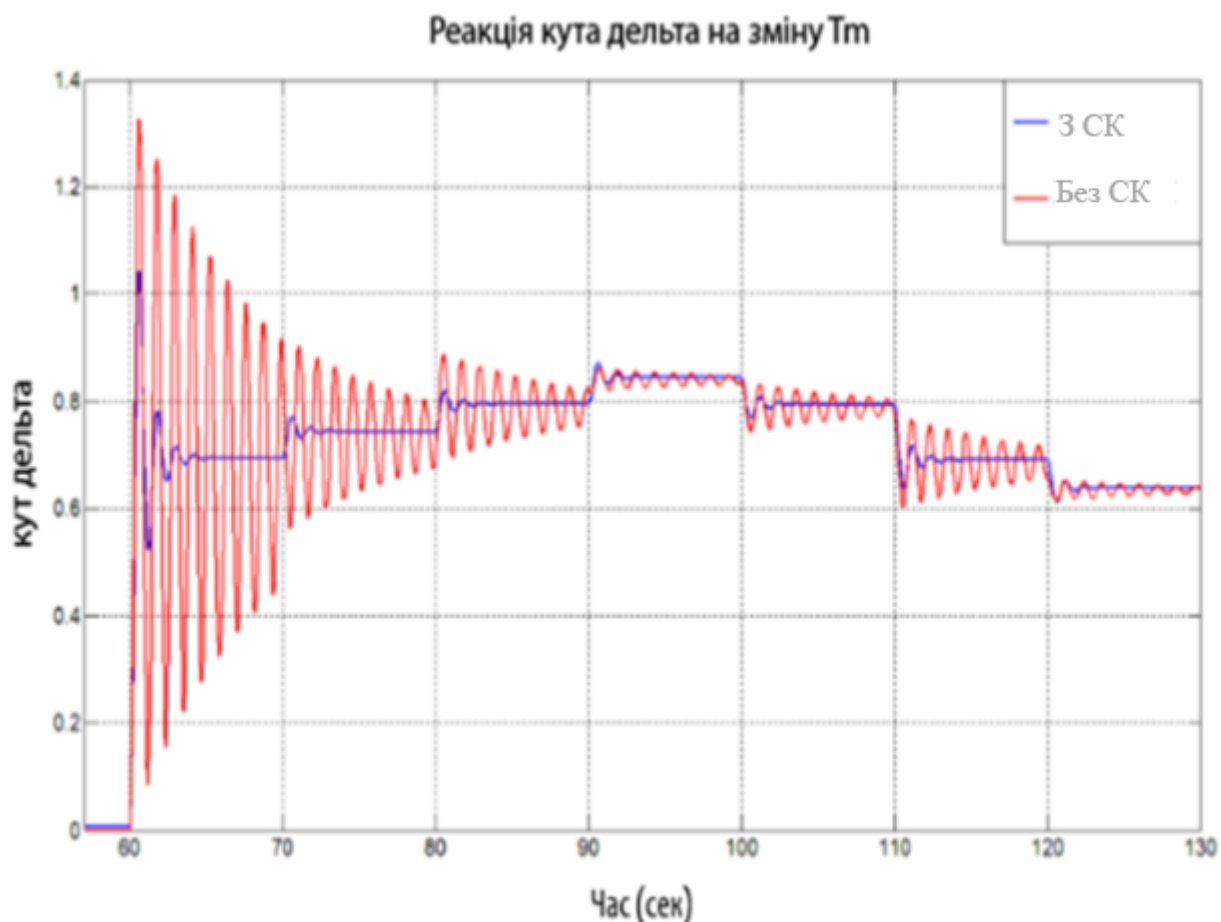


Рисунок 4.9 – Реакція кута дельта на вхідний імпульс у T_m

Можна побачити, що сигнали мають схожу схему реакції на вхідні зміни. Сигнал без компенсатора є дуже нестабільним, а сигнал з компенсатором швидко приглушується при введенні збурень.

4.2 Зміна опорної напруги в системах з статичним компенсатором (U_{ref})

Після розрахунку початкових значень у розділі 4.7.1 згідно з обраною точкою роботи, вводяться різні зміни вхідної напруги, щоб спостерігати відповідь системи на різних виходах, коли використовується контрольний пристрій СТАТКОМ.

Для спостереження за реакцією системи на збурення опорної напруги використовується унітарна ступінчаста функція бібліотеки SIMULINK ToolBox з початковим значенням 1, і скачком до 1.05 та часовим кроком 60 секунд.

Step

Output a step.

Parameters

Step time:

Initial value:

Final value:

Sample time:

Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

Рисунок 4.10 – Параметри сходинок Uref

З іншого боку, буде використовуватися імпульсна послідовність, яка дозволить змінювати опорну напругу ступінчастим чином з наступними характеристиками

Repeating Sequence Stair (mask) (link)

Discrete time sequence is output, then repeated.

Main **Signal Attributes**

Vector of output values:

Sample time:

Рисунок 4.11 – Характеристики вектора імпульсів Uref

Реакція напруги на виході при зміні U_{ref}



Рисунок 4.12 – Реакція напруги на виході при зміні U_{ref}

Видно, що система без будь-якого керування має час стабілізації 20 секунд, тоді як відповідь при використанні СК стабілізується протягом 5 секунд після введення кроку у напрузі зворотного зв'язку, тобто при використанні пристрою керування сигнал стабілізується на 25% швидше. Обидва графіки мають схожий пік амплітуди напруги на виході з тією різницею, що відповідь з СК має другий пік перед початком стабілізації.

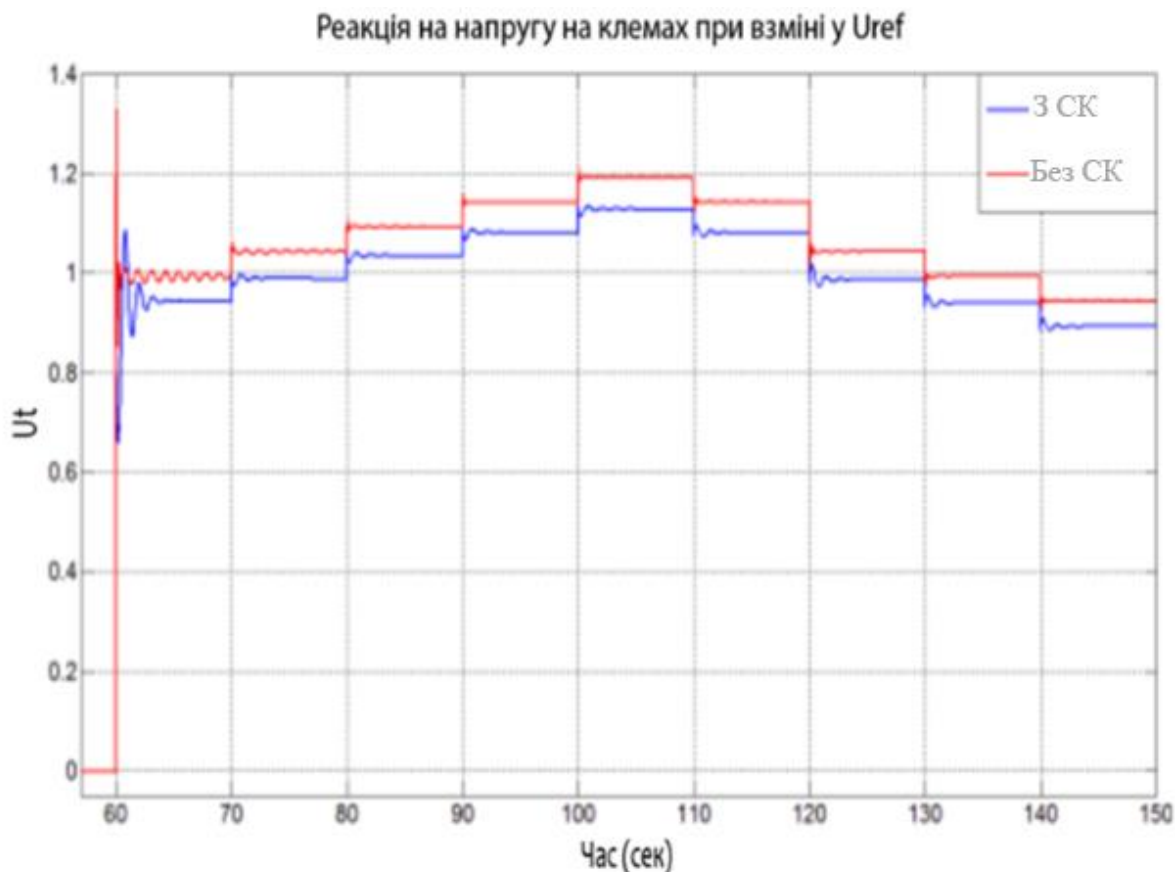


Рисунок 4.13 – Графік напруги на виході при введенні вектору імпульсів в Uref

Через 60 секунд з моменту запуску машини вводиться вектор імпульсів в напругу зворотного зв'язку і помітно, що амплітуда напруги на виході при використанні СК знову швидше стабілізується протягом перших 30 секунд з моменту врахування вектору . Протягом наступних 30 с, беручи до уваги, що коливання в послідовності імпульсів є меншими, спостерігається, що відгук без СК має тенденцію до ще швидшої стабілізації, яка змінюється лише в разі різкої зміни в послідовності імпульсів.

Графік кутової швидкості ω при зміні U_{ref}

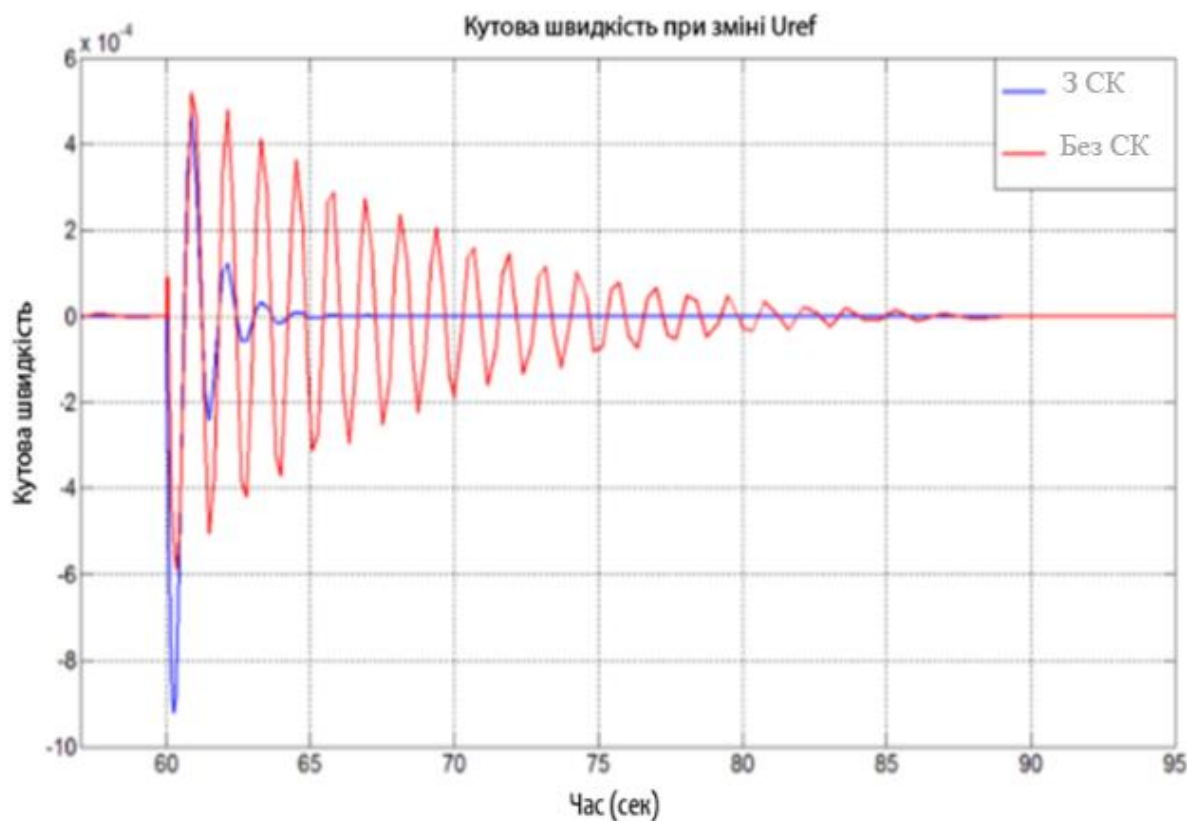


Рисунок 4.14 – Реакція кутової швидкості при зміні U_{ref}

В цьому випадку відповідь кутової швидкості без СК має час стабілізації приблизно 33 секунди, крім того, вона має дуже великі коливання порівняно з графіком при використанні СК, оскільки остання має тільки два значні відхилення на початку і стабілізується приблизно за 10 секунд, що становить різницю у 33% в часі стабілізації сигналу.

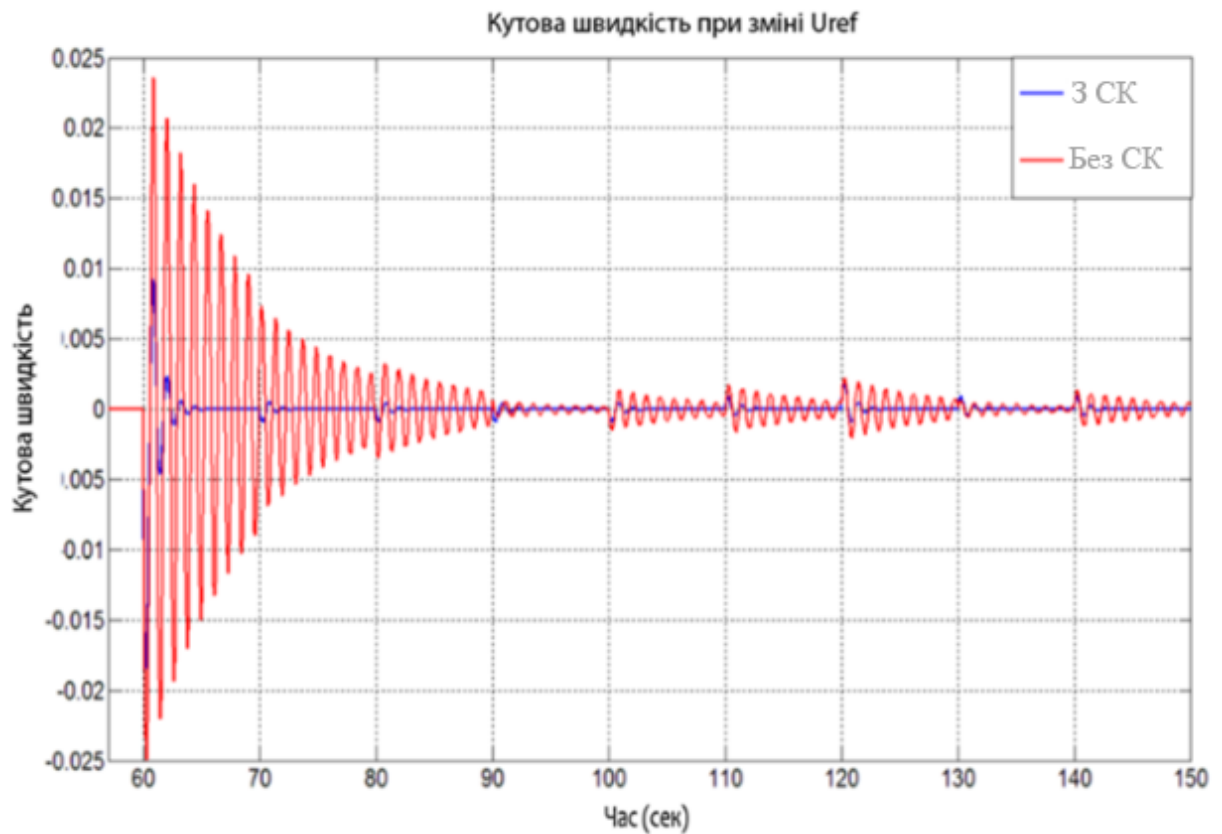


Рисунок 4.15 – Реакція кутової швидкості при введенні імпульсів у Uref

Слід зазначити, що при введенні імпульсів система без компенсатора є нестійкою та має дуже великі коливання в амплітуді кутової швидкості протягом приблизно 30 секунд, після чого коливання продовжуються, але з меншою амплітудою. Натомість сигнал з СК має великий пік на початку імпульсу, але швидко стабілізується (приблизно за 5 секунд) і показує дуже швидку реакцію на невеликі зміни в імпульсах.

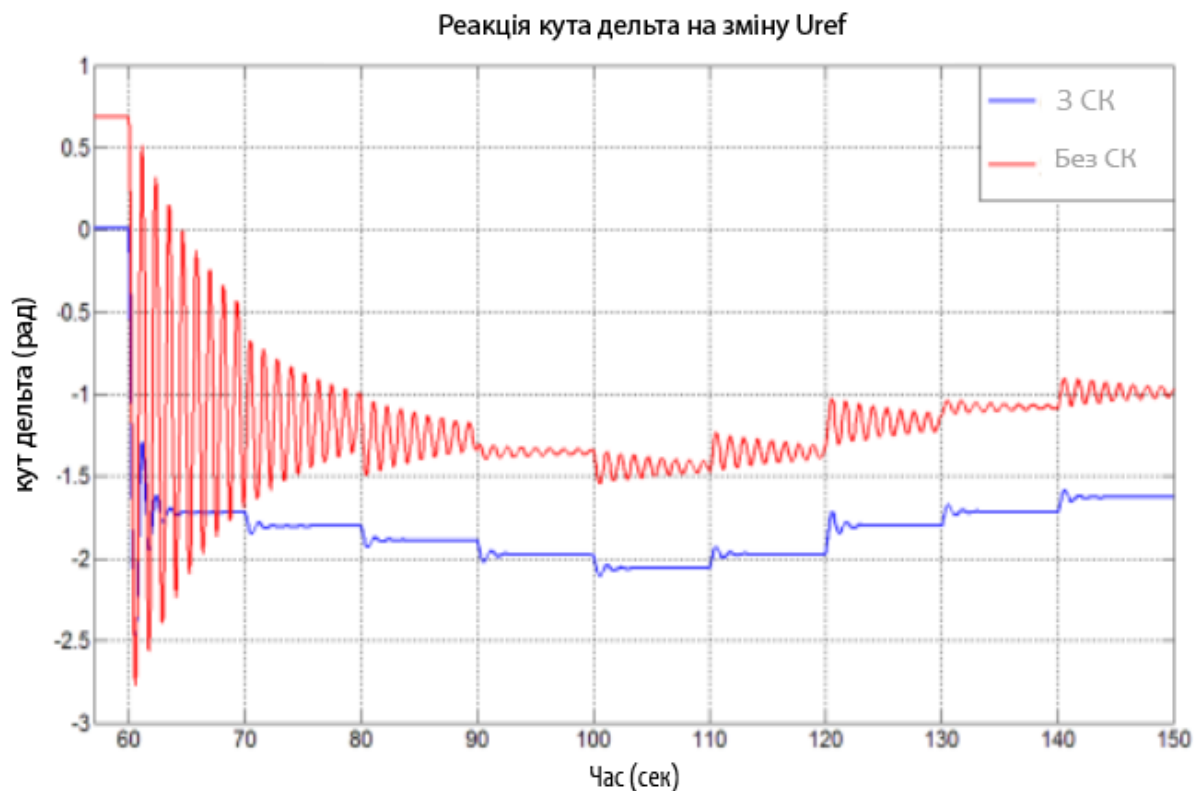


Рисунок 4.16 – Графік куту моменту при введенні імпульсів у Uref

Можна побачити, що сигнал без використання компенсатора стає дуже коливальним протягом перших 30 секунд після подачі імпульсів, сигнал починає згладжуватися, але не встигає стабілізуватися повністю в межах використовуваного часу. Натомість при використанні компенсатора загалом менші перевищення в амплітуді і сигнал швидко стабілізується (приблизно через 5 секунд після зміни імпульсів).

Відповідь кута дельта на зміну Uref

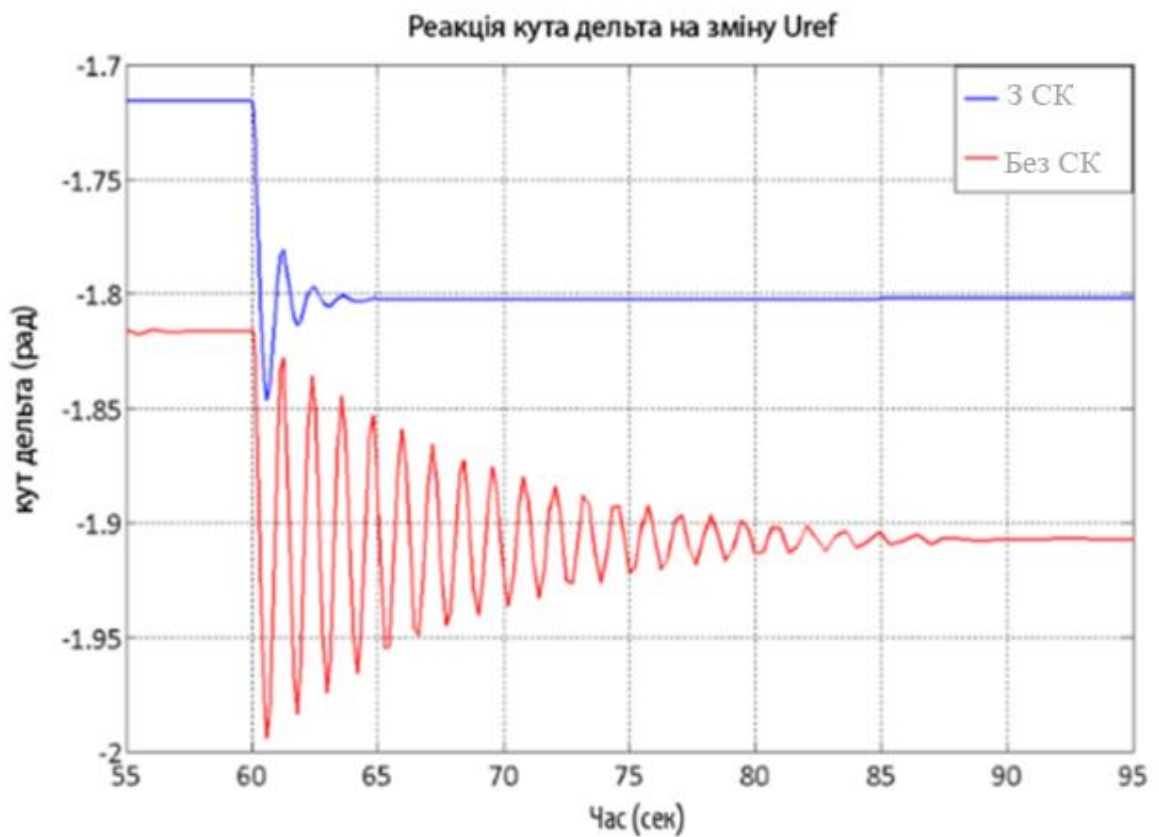


Рис. 4.17. Графік куту моменту при зміні Uref

Спочатку варто зазначити, що між двома сигналами спостерігається зсув на 1,1, що є результатом зв'язку СК з системою. Сигнал системи з СК показує менші перевищення в амплітуді кута і час стабілізації приблизно 7 секунд, що на 23% менше порівняно з часом стабілізації звичайної системи (приблизно 30 секунд).

Висновки

На підставі аналізу графіків можна зробити висновок, що використання системи керування (СК) значно покращує роботу механічної системи.

Використання СК приводить до зменшення часу стабілізації системи при зміні опорної напруги (U_{ref}) та введенні імпульсів. В деяких випадках, цей час скорочується до 5 секунд, що на 25-33% швидше, ніж в системі без СК.

Також було виявлено, що СК забезпечує більш швидку стабілізацію амплітуди напруги на виході, кутової швидкості та куту моменту. Важливим є те, що при введенні імпульсів СК дозволяє системі швидше реагувати на зміни імпульсів, зменшуючи коливання.

Незважаючи на корисність СК, слід зазначити, що його використання може призвести до деякого зсуву сигналу, як було помічено на графіку куту моменту.

Загалом, дані дослідження підтверджують ефективність використання систем керування для оптимізації роботи механічних систем. Це може мати важливі наслідки для розробки та модернізації машин та механізмів в різних галузях промисловості.

					141.EK9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		57

ВИСНОВКИ

На основі виконаного в даній роботі детального аналізу поведінки системи з компенсатором СТАТКОМ, можна сформулювати наступні ключові висновки:

1. Застосування компенсатора СТАТКОМ в системі має значний позитивний вплив на її стабільність, обмежуючи коливання вихідних сигналів. Це особливо відноситься до напруги на клеммах та кута пари, що в результаті набувають більш контролюваних характеристик.

2. Компенсатор СТАТКОМ ефективно виступає в ролі амортизатора, здатного пом'якшувати коливання в реакціях системи. Внаслідок цього, система працює більш плавно та стабільно.

3. При збуреннях в механічному моменті та напрузі, система демонструє високий рівень стійкості. У порівнянні з варіантом без компенсатора СТАТКОМ, система з компенсатором забезпечує менші коливання та швидше досягає стабілізованого стану.

Підсумовуючи, варто підкреслити, що компенсатор СТАТКОМ виявляє себе як важливий інструмент для оптимізації роботи системи з синхронним генератором. Його застосування призводить до підвищення стабільності системи та контролюваності ключових показників.

					141.EK9108.007.ДБ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

-
11. K. Ellithy, K. El-Metwally, "A Self Organizing Fuzzy Controller for CTATKOM Stabilizer Design in the Presence of Load Characteristics Uncertainty", IRANIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, VOL. 7, 2008.
12. W. Price, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE Task Force, Transactions on Power Systems, Vol. 8, 1993.
13. W. G. Heffron and R. A. Phillips, "Effect of modern amplidyne voltage regulators on underexcited operation of large turbine generators." American Institutions of Electrical Engineers, vol. 71, 1952
14. Vinay Kakkar "IMPROVEMENT OF POWER SYSTEM OPERATION USING SIMULINK MODEL OF UPFC"
15. ANDREA BEDOYA LONDOÑO "APLICACIÓN DEL CONTROL INTELIGENTE EN EL AMORTIGUAMIENTO DE OSCILACIONES USANDO FACTS (STATCOM Y SVC)" Pereira 2014

					141.EK9108.007.ДБ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		60