

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка засобу компенсації реактивної потужності у мережі з використанням конденсаторних батарей

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка


Шифр БРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу група ЕТс-20-1


Підпис

Вознюк М.А.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

К.т.н., доц. Горященко С.Л.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

К.т.н. доц. Тимошук О.С.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

20 06 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Спеціалізація Електропобутова техніка

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

20.06.2023

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Вознюк Микола Анатолійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка засобу компенсації реактивної потужності у мережі з використанням конденсаторних батарей

керівник роботи Горященко Сергій Леонідович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 1 03 2023 р. № 5

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 20.06.23

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики силового обладнання та мережі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд пристроїв компенсації реактивної потужності та енергозберігаючих систем. 2. Розробка пристрою компенсації реактивної енергії. 3. Розрахунки. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Пристрої компенсації реактивної потужності та схеми їх підключень (ДО, А1). 2. Конденсатори компенсації реактивної потужності та схеми їх підключень (ДО, А1). 3. Схеми підключення конденсаторних батарей до блоку компенсації (Д, А1). 4. Конденсаторна батарея (ВЗ, А1). 5. Засіб

компенсації реактивної потужності (ВЗ, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

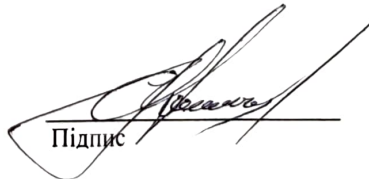
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. <u>Огляд пристроїв компенсації реактивної потужності та енергозберігаючих систем</u>		
2. <u>Розробка пристрою компенсації реактивної енергії</u>		
3. <u>Розрахунки, що підтверджують працездатність</u>		
4. <u>Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу</u>		

Студент


Підпис

М.А. Вознюк
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

С.Л. Горященко
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Вознюк Микола Анатолійович

2. Тема магістерської роботи Розробка засобу компенсації реактивної потужності у мережі з використанням конденсаторних батарей

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 66

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: _____
Вступ. 1. Огляд пристроїв компенсації реактивної потужності та енергозберігаючих систем. 2. Розробка пристрою компенсації реактивної енергії. 3. Розрахунки. Висновки.

Підпис студента 

"26" 06 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 11 від "27" 06 2023 р.

Оцінка проекту ЕК добре 3,75/0

Рекомендації ЕК з виробництва

Особливі відмітки _____

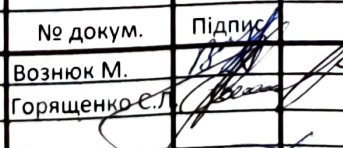
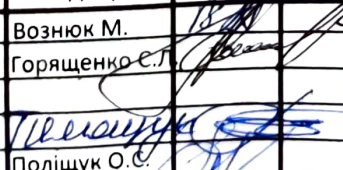

Технічний секретар 

"27" 06 2023 р.

ЗМІСТ

	стр
Вступ.....	4
1. Огляд пристроїв компенсації реактивної потужності та енергозберігаючих систем.....	5
1.1 Статичні і статичні синхронні компенсатори.....	6
1.2 Аналіз проблем транспортування енергії.....	8
1.3 Аналіз роботи регулятор коефіцієнта потужності DCRK.....	11
1.4 Прилад RGT з контролером компенсації реактивного впливу.....	14
1.5 Мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ.....	16
1.6 Конденсатори для компенсації реактивної енергії.....	19
1.7 Споживачі реактивної потужності й заходи для її зменшення.....	21
1.8 Засоби компенсації реактивної потужності.....	23
1.9 Конденсаторні батареї.....	25
Висновки до першого розділу.....	27
2. Розробка пристрою компенсації реактивної енергії.....	28
2.1 Моделювання синхронних конденсаторів (СК).....	29
2.2 Моделювання статичних змінних компенсаторів (SVC).....	32
2.3 Моделювання статичних синхронних компенсаторів (STATCOM).....	33
2.4 Проектування засобу компенсації реактивної енергії.....	38
Висновки до другого розділу.....	42
3. Розрахунки пристрою компенсації.....	43
3.1 Розрахунок і вибір КП.....	43
3.2 Моделювання роботи засобу.....	51
3.3 Ітераційне розв'язання потоку навантаження.....	56
Висновки до третього розділу.....	58

БРМА23.00.00.000ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Розробка засобу компенсації реактивної потужності у мережі з використанням конденсаторних батарей			Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Вознюк М.					Б	2	63
Перев.		Горященко Є.Л.					ХНУ, гр. ЕМ-19-1		
Н. контр.		Поліщук О.С.							
Затв.									

ВИСНОВКИ.....61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....62

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

Електроенергія - це товар, якість якого має відповідати стандартам. Сьогодні споживачі цікавляться, якої якості електроенергію вони купують і чи варта вона цих грошей (з точки зору того, скільки вони втрачають за кожне порушення якості електроенергії), скільки електроенергії вони споживають і з якою метою (обґрунтовано чи ні), як мінімізувати споживання електроенергії, грамотно управляти енергоспоживанням (в який момент і які навантаження слід вимикати, щоб не перевищити ліміти споживання) [1].

Як тільки споживачі матимуть достовірну інформацію про те, де і скільки кіловат-годин вони використовують, їхнє загальне споживання може скоротитися на 10-12%. Це лише невелика частина потенціалу енергозбереження, який можна реалізувати, не витрачаючи великих коштів на модернізацію електромереж та обладнання.

Загалом, електромережа має бути збалансованою між генерацією та споживанням активної та реактивної потужності. Основним регулюючим показником для підтримання балансу активної потужності в будь-який момент часу є частота змінного струму, яка є загально системним еталоном. А основним регулюючим показником для підтримання балансу реактивної потужності в будь-який момент часу є рівень напруги, який є локальним критерієм, що змінюється в широких межах для кожного вузла навантаження і кожної фази номінальної напруги. Тому, на відміну від балансу активної потужності, баланс реактивної потужності необхідно забезпечувати не тільки в масштабах енергосистеми, але й у вузлах навантаження. І багато, якщо не все, залежить від того, як і де "гуляє" реактивна потужність (РП) в мережі. Саме тому до питання компенсації реактивної потужності потрібно ставитися серйозно.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

1. ОГЛЯД ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ СИСТЕМ

Реактивна потужність відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності та ефективності енергосистем. Компенсатори реактивної потужності використовуються для управління реактивною потужністю в енергосистемах. Це пристрої, які допомагають підтримувати коефіцієнт потужності системи, генеруючи або поглинаючи реактивну потужність.

Коефіцієнт потужності-це відношення фактичної потужності (у ватах) до повної потужності (у вольт-амперах). В ідеальній електричній системі коефіцієнт потужності дорівнює 1, це означає, що вся потужність використовується ефективно. Однак у практичних системах коефіцієнт потужності часто менше одиниці через наявність реактивної потужності.

Компенсатори реактивної потужності використовуються для управління реактивною потужністю в системі та підвищення коефіцієнта потужності. В електричних мережах використовуються два типи компенсаторів: шунтуючі та послідовні компенсатори. Шунтові компенсатори підключаються паралельно навантаженню, а послідовні- послідовно з навантаженням.

Шунтуючі компенсатори також поділяються на ємнісні та індуктивні компенсатори. Ємнісні компенсатори поглинають реактивну потужність і покращують коефіцієнт потужності, надаючи системі ємнісну реактивну потужність. Індуктивні компенсатори генерують реактивну потужність і покращують коефіцієнт потужності, подаючи в систему індуктивну реактивну потужність.

Кількість реактивної потужності, необхідної для системи, можна розрахувати за такою формулою:

$$Q = V^2 \tan(\theta), \quad (1.1)$$

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

де Q-реактивна потужність(VAR), U-напруга(Volt) і θ -кут зсуву фаз між напругою і струмом.

Кількість реактивної потужності, що подається компенсатором, можна розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$Q = V^2\omega C \text{ (для ємнісних компенсаторів),} \quad (1.2)$$

$$Q = V^2\omega L \text{ (для індуктивних компенсаторів),} \quad (1.3)$$

де Q-реактивна потужність(VAR), U-напруга (Вольт), ω -кутова частота(радіанів/секунду), C-ємність (Фарад) (для ємнісних компенсаторів) і L-індуктивність (Генрі) (для індуктивних компенсаторів).

Для розрахунку необхідної ємності або індуктивності компенсатора наведене вище рівняння можна модифікувати наступним чином:

$$C = Q/(V^2\omega) \text{ (для ємнісних компенсаторів)} \quad (1.4)$$

$$L = Q/(V^2\omega) \text{ (для індуктивних компенсаторів)} \quad (1.5)$$

Компенсатори реактивної потужності є важливим компонентом енергосистеми, оскільки вони покращують коефіцієнт потужності і допомагають підтримувати стабільність та ефективність системи. Розрахунки, пов'язані з проектуванням таких компенсаторів, є складними, тому важливо, щоб компенсатори були правильно розраховані та встановлені для оптимальної роботи.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

1.1 Статичні і статичні синхронні компенсатори

Існує кілька типів компенсаторів реактивної потужності, доступних для використання в електричних мережах, включаючи постійні та комутовані конденсатори, статичні компенсатори VAR (SVC) і статичні синхронні компенсатори (STATCOM).

Конденсатори постійної ємності є простим і економічно вигідним рішенням для компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Вони забезпечують фіксовану кількість реактивної потужності в системі, і їх розмір визначається на основі вимог до реактивної потужності навантаження.

З іншого боку, комутовані конденсатори забезпечують змінну кількість реактивної потужності в системі в залежності від вимог навантаження. Вони складаються з декількох паралельно з'єднаних конденсаторів, які вмикаються і вимикаються для забезпечення необхідної кількості реактивної потужності. Це робить їх більш гнучкими, ніж постійні конденсатори, але також більш складними.

SVC і STATCOM є більш просунутими рішеннями для компенсації реактивної потужності. SVC використовують реактори з тиристорним керуванням (TCR) і конденсатори з тиристорною комутацією (TSC) для забезпечення змінної кількості реактивної потужності в системі. Вони також можуть забезпечити фільтрацію гармонік і контроль напруги.

STATCOM, з іншого боку, використовують перетворювач джерела напруги (VSC) для забезпечення змінної кількості реактивної потужності в системі. Вони дуже гнучкі і можуть забезпечувати як компенсацію реактивної потужності, так і фільтрацію гармонік. Вони також здатні регулювати напругу в системі.

При проектуванні компенсатора реактивної потужності необхідно враховувати кілька факторів, включаючи вимоги до реактивної потужності нава-

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

нтаження, рівень напруги системи, гармоніки, присутні в системі, а також вартість і складність компенсатора. Розмір компенсатора визначається на основі вимог до реактивної потужності навантаження та рівня напруги системи.

Загалом конструкція компенсатора реактивної потужності передбачає наступні етапи:

- 1) Визначте вимоги до реактивної потужності навантаження.
- 2) Визначте рівень напруги системи.
- 3) Визначте необхідний тип компенсатора на основі вимог до навантаження та характеристик системи.
- 4) Вибирайте розмір компенсатора на основі вимог до реактивної потужності навантаження та рівня напруги системи.
- 5) Визначте стратегію керування компенсатором.

Стратегія керування компенсатором залежатиме від типу використовуваного компенсатора. Постійні конденсатори не потребують контролю, оскільки вони забезпечують фіксовану кількість реактивної потужності в системі. Комутовані конденсатори вимагають алгоритму комутації для керування конденсаторами та забезпечення необхідної кількості реактивної потужності. SVC і STATCOM вимагають більш складних стратегій керування, включаючи контури керування напругою та струмом.

Підсумовуючи, компенсатори реактивної потужності є важливим компонентом електричних мереж, і існує кілька типів компенсаторів, доступних для використання, кожен зі своїми перевагами та недоліками. При проектуванні компенсатора важливо враховувати вимоги до реактивної потужності навантаження, рівень напруги системи, гармоніки, присутні в системі, а також вартість і складність компенсатора. Стратегія керування компенсатором також залежатиме від типу використовуваного компенсатора.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1.2 Аналіз проблем транспортування енергії

Завдяки значному прогресу в технології силової електроніки протягом останніх двох років десятиліттями використовується передача електроенергії постійного струму високої напруги (HVDC) стає все більш привабливим. Передача HVDC пропонує значні переваги для передачі потужності на велику відстань, для передачі потужності під водою, і для з'єднання двох великих систем зі слабким демпфуванням. В результаті швидке збільшення схем передачі електроенергії HVDC, поведінка систем HVDC відіграють все більшу роль у продуктивності всієї системи живлення змінного/постійного струму. Це є важливо досконало зрозуміти механізми взаємодії між Система HVDC і мережа змінного струму, щоб схема HVDC могла працювати таким чином що підвищує стабільність і надійність всієї електромережі.

Аналіз продуктивності різних пристроїв компенсації реактивної потужності, дав можливість вивчити механізм реактив компенсації потужності для систем HVDC, а також для розробки вказівок щодо проектування схеми компенсації реактивної потужності систем HVDC. Більшість систем HVDC які працюють сьогодні, використовують звичайні лінійні комутовані перетворювачі та велику кількість реактивної потужності у випрямних станціях та інверторних станціях [4], [5], [6].

Необхідно ефективно проектування та експлуатація системи компенсації реактивної потужності щоб досягти та підтримувати хорошу загальну продуктивність систем HVDC.

Взаємодія між мережею змінного струму та лінією HVDC є однією з головних проблем у системах живлення змінного/постійного струму [7], [8]. Значущість цієї взаємодії значною мірою залежить від потужності системи змінного струму на шині перетворювача. Міцність системи змінного струму демонструється її здатністю підтримувати напругу на досліджуваній шині про-

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

тягом різних порушення в енергосистемі, такі як несправності та зміни навантаження. Слід зазначити, що міцність системи проявляється силою напруги на шині. Слід також зазначити, що потужність системи залежить від місця розташування, оскільки зазвичай вона різна для різних шин навіть в одній мережі змінного струму. У роботах [9, 10] обговорювалося, що потужність системи на шині перетворювача є одним із найважливіших факторів, які слід брати до уваги при дослідженні або прогнозуванні взаємодії між змінним струмом і Системи HVDC. Загальновідомо, що компенсація реактивної потужності є ефективним і економічним способом керування напругою на шині, тому вона природно має здатність покращувати міцність системи. Тому важливо розуміти, як працює компенсація реактивної потужності та як оптимізувати її роботу в системах живлення змінного/постійного струму.

Пристрої реактивної компенсації, доступні сьогодні, можна розділити на три основні категорії: синхронні конденсатори (SC), статичні змінні компенсатори (SVC) і статичні синхронні компенсатори (STATCOM). SC є найбільш зрілою технологією, і вони пропонують додаткову перевагу в тому, що вони збільшують міцність системи, оскільки вони є справжніми обертовими машинами. Синхронні конденсатори допомагають підтримувати напругу змінного струму на шині перетворювача і, отже, роблять систему змінного струму сильнішою для перетворювача HVDC. Вони успішно використовуються в кількох великих системах HVDC, таких як Bipole Systems Nelsen River [13], [14], і система HVDC Itaipu [9].

Кілька дослідників запропонували використовувати для досягнення тієї ж мети компенсацію реактивної потужності на основі силової електроніки, яка є меншою та дешевшою в деяких випадках.

Перетворювальна станція Châteauguay Hydro Quebec використовує тиристорний компенсатор статичної зміни (SVC). Недоліками SVC є те, що вони не збільшують коефіцієнт короткого замикання (SCR) і втрачають здатність

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

компенсувати, коли напруга значно падає. У статичних синхронних компенсаторах (STATCOM) використовуються вимикачі затвора, тому вони набагато легші керовані та продовжують видавати реактивну потужність навіть при дуже низькій нарузі. Деякі попередні дослідження [17] показують, що вони є перспективними для застосування HVDC, і цей аспект потребує подальшого дослідження.

Ще одна перевага компенсаторів на основі силової електроніки, таких як SVC і STATCOM, полягає в тому, що вони збільшують здатність підтримувати напругу шини перетворювача без збільшення SCR. Виникає питання, як оцінити міцність системи при підключенні таких компенсаторів до шини перетворювача.

Було стверджено, що механічна інерція синхронних конденсаторів забезпечує деяку додаткову стабільність частоти; але також стверджується, що механічна накопичена енергія насправді не потрібна, оскільки система HVDC вже забезпечує велике джерело енергії для цієї мети. Однак коли постійний струм раптово блокується, це створює значні перешкоди в системі, що викликає відхилення напруги та частоти. Інерція SC допомагає стабілізувати частоту, а його керування збудником допомагає стабілізувати напругу. STATCOM, з іншого боку, може лише стабілізувати напругу, але не має значної енергії для забезпечення підтримки частоти. Важливо визначити, чи є стабільність частоти проблемою, якщо є STATCOM використовується як компенсатор реактивної потужності системи HVDC.

З підвищенням коефіцієнта одночасності вмикання навантаження знижується потужність і підвищується ефективність роботи КУ, який можна встановлювати на стороні 0,4 кВ або 6 (10) кВ. Недоліками такого рішення є роздільна комутація КП й неповне розвантаження розподільних мереж від РП.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.3 Аналіз роботи регулятор коефіцієнта потужності DCRK

Централізована (як правило, регульована) для вузлів навантаження із широким діапазоном зміни споживання струму система має компенсаційний пристрій (КП). Потужність КП можна регулювати у функції реактивного струму навантаження, але для цього КП повинний бути обладнаний спеціальним автоматичним регулятором, а його повна компенсаційна потужність (що дорівнює реактивній потужності (РП) установлених конденсаторів) поділена на щаблі, що комутуються окремо. Такі комплектні КП називаються автоматизованими (АКП). АКП компенсують РП відповідно до її фактичного споживання. Крім керування щаблями КП, автоматичні регулятори РП вимірюють параметри якості електроенергії мережі з виведенням результатів на дисплей регулятора (у більшості типів автоматичних регуляторів, наприклад Prophi, BR6000, передбачена також опція передавання через інтерфейс результатів вимірювань у комп'ютер) [13].

На рис. 1.2 наведено регулятор коефіцієнта потужності DCRK, а в таблиці 1 його технічні параметри.



Рисунок 1.2 - Зовнішній вигляд регулятора коефіцієнта потужності DCRK

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики DCRK5,7,8,12

Назва показників	Значення
Номинальна напруга	380...415 В
Відхилення напруги	(-15... + 10)UH
Номинальна частота	<u>50 або 60 Гц +1%</u>
Споживана потужність	6,2 ВА
Відключення при зникненні напруги	> <u>8мс</u>
Номинальний струм	5 А
Робочий діапазон струму	0,125...6 А
Короткочасний струм к.з.	10I _н
Робоча температура	<u>-20... + 150 0C</u>
Вологість повітря	≥90%
Корпус	Щиток
Габарити	96x96x65 мм
Розміри вікна	91x91 мм
Ступінь захисту	IP54

Цифровий регулятор коефіцієнта потужності підключається до мережі за схемою, наведеною на рис.1.3. Трансформатор струму VT1 повинен підключатися до вільної фази, яка не використовується для живлення регулятора. Вторинна обмотка трансформатора струму повинна бути заземлена і з'єднана з корпусом.

DCRK-5,7,8,12 має тризначний семи сегментний дисплей, мембранну клавіатуру з чотирма кнопками, внутрішній датчик температури.

Існує три способи установки параметрів, при яких контролер буде працювати належним чином:

- ручна установка за допомогою клавіатури;
- швидка установка через персональний комп'ютер;

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- автоматична установка.

Контролер може працювати в режимі ручного і автоматичного керування. DCRK5,7,8,12 установлений у пульті керування з 5,7,8,12 конденсаторними банками. Номінальна реактивна потужність однієї ступені конденсаторів становить 5 кВАр. Номінальна напруга 400В.

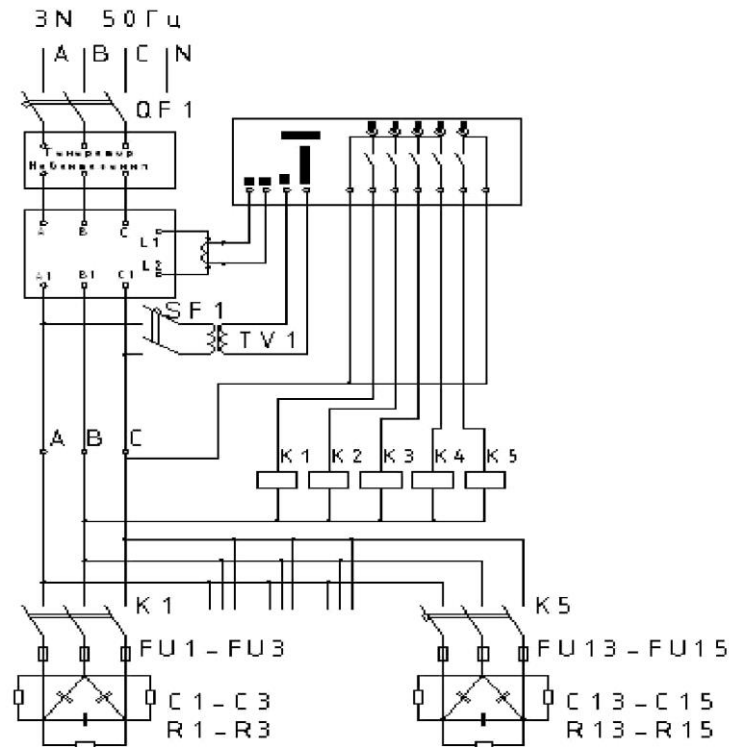


Рисунок 1.3 - Електрична схема вмикання регулятора коефіцієнта потужності DCRK-5, 7, 8, 12

В автоматичному режимі контролер враховує оптимальну конфігурацію ступенів для досягнення потрібного значення $\cos\phi$, що задається при установці.

1.4 Прилад RGT з контролером компенсації реактивного впливу

Нова розробка компанії TENSE [3] втілила всі останні вимоги сучасних систем компенсації реактивної потужності встановлюваних на різних об'єктах

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				14

- можливість використання як з трьома, так і з одним трансформатором струму;
- 2,9 дюймовий LCD дисплей + 17 LED індикаторів - дають можливість легкої установки і повного оперативного контролю над встановленням компенсації;
- порт RS485 з протоколом MODBUS RTU - віддалений контроль і можливість використовувати в SCADA;
- окремий релейний вихід, програмований для різних аварійних ситуацій - стрибки напруги, гармоніки, кос.фі;
- захист паролем меню налаштувань для запобігання несанкціонованого зміни параметрів роботи конденсаторної установки;
- індикація підключених ступенів;
- автоматичний і/або ручного введення значень конденсаторів по східцях.

1.5 Мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ

Відомо Мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ фірми LOVATO [16]. Регулятор коефіцієнта потужності DCRK / DCRJ — цифровий пристрій, який виконує функції контролю і регулювання реактивної потужності системи і здійснює зчитування показів коефіцієнта потужності з високою точністю, на яку не впливають зміни властивостей електронних компонентів (Див. рис.1.5).

Алгоритм контролю забезпечує нормальну роботу приладу навіть в системі, яка характеризується високим коефіцієнтом гармонік. Коефіцієнт потужності системи регулюється групою перемикаючих конденсаторів виходячи з розрахованої реактивної потужності системи своєчасно і точно. Результатом є суттєве зменшення кількості перемикачів і більш ефективно використання конденсаторних батарей.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Основні параметри:

- цифрове програмування;
- кількість ступенів 5, 7, 8 та 12;
- 5- або 7-ступенева конфігурація в корпусі 96x96 мм;
- 8- або 12-ступенева конфігурація в корпусі 144x144 мм;
- захист від перевантажувального струму конденсаторів;
- внутрішній захист від перегріву щита керування;
- інтерфейс програмування TTL/RS232;
- автоматична настройка;
- конфігуровані аварійні сигнали.



Рисунок 1.5 – Мікропроцесорні контролери DCRK та DCRJ

Технічні характеристики:

- напруга живлення і керування U_e 380-415 В (стандарт);
- напруга живлення і керування U_e 220/415/440/480/525 В (по запити);
- номінальна частота 50/60 Гц;
- споживана потужність 6,2ВА (DCRK5/7) та 5 ВА (DCRK8/12);

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

- номінальний струм I_e 5А;
- регулювання коефіцієнта потужності 0,8 індуктивного- 0,8 ємнісного;
- вимірювання напруги 0,85...1,1U_e;
- вимірювання струму 2,5%... 120% I_e ;
- вимірювання температури -30...+85°C;
- вимірювання перевантаження конденсаторів 0...250%;
- час перекомутації ступеней 5...240с;
- ступінь захисту IP54 (DCRK5/7) та IP41 (DCRK8/12).

Мікропроцесорний контролер DCRJ.

Основні параметри.

- цифрове програмування;
- 8- або 12-ступенева конфігурація в корпусі 144x144 мм;
- подвійний дисплей;
- розділений вхід вимірювання напруги;
- захист від перевантажувального струму конденсаторів;
- сенсорний контроль температури щита керування;
- внутрішній та зовнішній захист від перегріву;
- інтерфейс програмування RS485;
- автоматична настройка;
- вимірювання гармоніки струму і напруги;
- журнал станів;
- конфігуруванні аварійні сигнали;
- можливість роботи в мережі середньої напруги.

В нормальному режимі роботи дисплей відображає коефіцієнт потужності системи, причому світлодіоди IND і CAP відображають характер навантаження (індуктивне і ємнісне відповідно). Мигаюча десяткова крапка означає від'ємне значення (віддача реактивної енергії в мережу).

Технічні характеристики :

- подвійна напруга живлення і керування U_e 100-690 В (стандарт);

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

- номінальна частота 50/60 Гц;
- споживана потужність 0,3ВА;
- номінальний струм I_e 5А;
- регулювання коефіцієнта потужності 0,8 індуктивного- 0,8 ємнісного;
- вимірювання напруги 85...760 В;
- вимірювання струму 2,5%... 120% I_e ;
- вимірювання температури -40...+85°C;
- вимірювання перевантаження конденсаторів 0...250%;
- час перекомутації ступеней 5...240с;
- ступінь захисту IP41.

Для відображення і перемикання значень натиснути кнопку MODE.

При висвічуванні світлодіодів V, A, kvar і т. д. на дисплеї відображаються відповідне значення.

При висвічуванні світлодіоду KVAR, на дисплеї відображається значення реактивної потужності, необхідне для регулювання коефіцієнта потужності системи до встановленого значення.

Для кожного параметра передбачено додаткові функції, які можна переглядати натискуванням кнопки, при цьому світлодіод мигає.

Для деяких параметрів передбачено друга додаткова функція. При висвічуванні світлодіоду SET COSφ відбувається встановлення потрібного коефіцієнта потужності з допомогою клавіш. Діапазон від 0.8 індуктивного до 0.8 ємнісного.


Стандартна напруга котушки:

- 50/60 Гц 024/ 048/ 110/ 230 В АС;
- 60 Гц 024 60/ 048 60/ 120 60/ 230 60/ 460 60/ 575 60 В АС.

Приклад. ВFK09 10 230 - з котушкою на 230 В АС.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Таблиця 1.2 - Контактори для комутації конденсаторних батарей фірми LOVATO

	Тип	Потужність, кВАР при напрузі			
		220-240В	380-400В	415-440В	575-690
	BFK09 10 А....	4,5	7,5	9	10
	BFK12 10 А....	7	12,5	14	16
	BFK18 10 А....	9	15	17	20
	BFK26 10 А....	11	20	22	22
	BFK32 10 А....	14	25	27,5	30
	BFK38 10 А....	17	30	33	36
	11 BF50K 10 А....	22	38	41	46
	11 BF65K 10 А....	26	45	50	56
	11 BF70K 10 А....	30	50	56	65
	11 BF80K 10 А....	34	60	65	70

1.6 Конденсатори для компенсації реактивної енергії

Конденсатори для компенсації реактивної енергії обладнанні захистом від розриву корпусу фірми DUCATI Energia і виготовлені за технологією МКР-металоплівкові конденсатори [11].

Основні характеристики (рис.1.6):

- напруга 220-800 В, 50/60 Гц;
- потужність 2,5-50 кВар;
- допустима перенапруга 10% 8 годин в добу;
- перевантаження за струмом 50 %;
- втрати <0,3 Вт/кВАр;
- температура -25...+55 °С.



MODULO 10 - 2,5...10 кВАР



MODULO 50 - 7,5...30 кВАР



DUCATI F50 - 12,5...50 кВАР

Рисунок 1.6 - Конденсатори для компенсації реактивної енергії

Схеми підключення показані на рис.1.7 та 1.8.

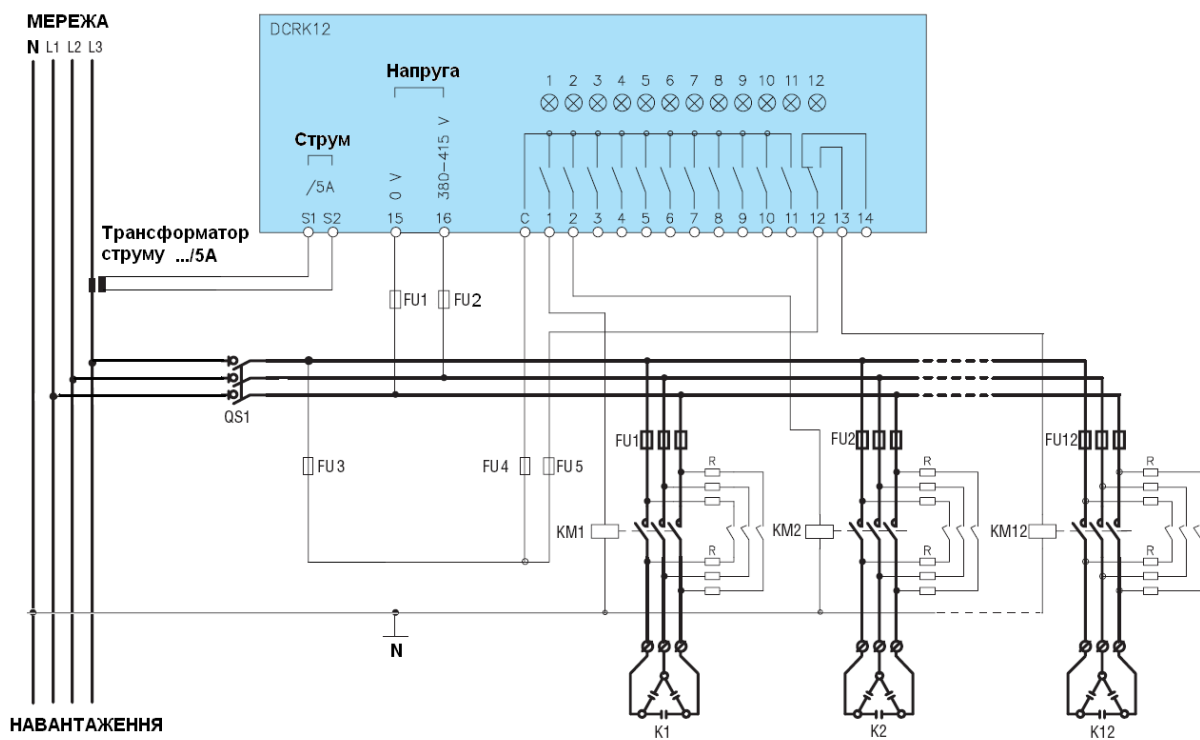


Рисунок 1.7 - Схема підключення регулятора DCRK.

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

БРМА23.00.00.000ПЗ

Арк.

21

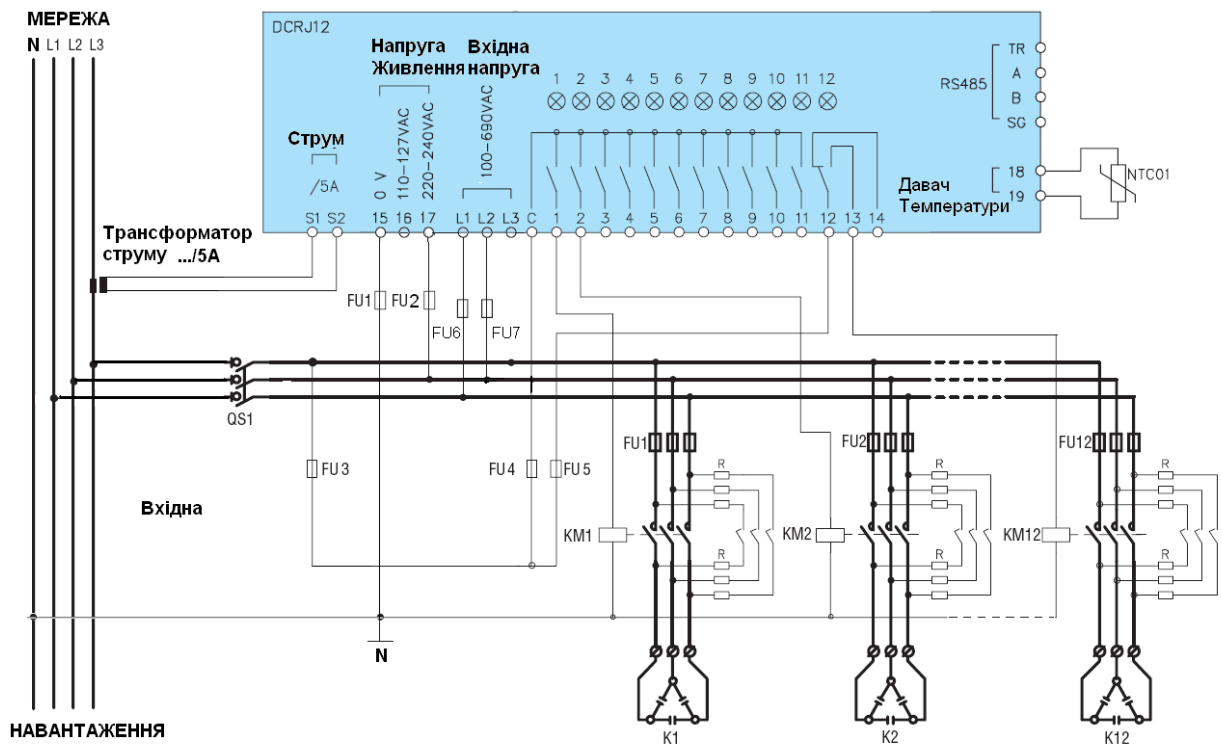


Рисунок 1.8 - Схема підключення регулятора DCRJ

Визначити ємнісну реактивну потужність, необхідну для досягнення заданого $\cos\varphi$ можна за допомогою формули

$$Q = P \cdot F, \quad (1.1)$$

де

Q – ємнісна реактивна потужність;

P – активна потужність навантаження;

F – коефіцієнт з таблиці 2.

1.7 Споживачі реактивної потужності й заходи для її зменшення

Відомо з джерел [18] та [19], що при підключенні до електричної мережі активно-індуктивного навантаження струм I_H відстає від напруги U на кут

зрушення φ . Косинус цього кута ($\cos \varphi$) називається коефіцієнтом потужності.

Електроприймачі з таким навантаженням споживають як активну P , так і реактивну Q потужність. Реактивна потужність $Q = P \operatorname{tg} \varphi$.

Активна енергія, споживана електроприймачі, перетвориться в інші види енергії: механічну, теплову, енергію стисненого повітря й газу й т.п. Певний відсоток активної енергії витрачається на втрати. Реактивна потужність Q не пов'язана з корисною роботою ЕП і витрачається на створення електромагнітних полів в електродвигунах, трансформаторах, лініях [5].

З курсу ТОЭ відомо, що реактивна потужність може мати індуктивний або ємнісний характер. Умовимося вважати реактивну індуктивну потужність Q_L навантажувальну або споживаною, а реактивну ємнісну потужність Q_C що генерується.

Проходження в електричних мережах реактивних струмів обумовлює додаткові втрати активної потужності в лініях, трансформаторах, генераторах електростанцій, додаткові втрати напруги, вимагають збільшення номінальної потужності або числа трансформаторів, знижує пропускну здатність всієї СЭС.

Повна потужність [6,18] визначається:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = P / \cos \varphi ; \quad (1.2)$$

втрати активної потужності

$$P_{\Delta} = (P^2 + Q^2)R / U_{\text{НОМ}}^2 ; \quad (1.3)$$

коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = P / S = P / \sqrt{P^2 + Q^2} ; \quad (1.4)$$

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

втрати напруги

$$\Delta U = (PR + QX) / U_{НОМ}, \quad (1.5)$$

де P, Q, S -відповідно активна, реактивна й повна потужності; R і X -відповідно активний і реактивний опори елементів електричної мережі; $U_{НОМ}$ -номінальна напруга мережі.

Основним споживачем реактивної потужності індуктивного характеру в побуті є асинхронні двигуни АД (60-65 % загального її споживання), трансформатори, включаючи зварювальні (20-25%), вентильні перетворювачі, реактори та інші ЕП.

Реактивною потужністю додатково навантажуються живильні й розподільні мережі побутових приміщень, відповідно збільшується загальне споживання електроенергії.

1.8 Засоби компенсації реактивної потужності

Для штучної компенсації реактивної потужності згідно з [18] та [19], названої іноді «поперечною» компенсацією, застосовуються спеціальні пристрої, що компенсують, що є джерелами реактивної енергії ємнісного характеру.

Основним нормативним показником, що характеризує споживану промисловим підприємством реактивну потужність, був середньозважений коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{CP, BЗВ}$ [8, 18].

Середньозважений коефіцієнт потужності за час t:

$$\cos \varphi = W_{at} / \sqrt{W_{at}^2 + W_{pt}^2} \quad (1.6)$$

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

де W_{at} й W_{pt} -відповідно витрата активної й реактивної електроенергії за розглянутий проміжок часу.

Однак у відповідності зі старим провідними вказівками по компенсації реактивної потужності підприємства не були зацікавлені у відключенні встановлених КП в годинники мінімальних навантажень. У зв'язку із цим у живильній енергосистемі часто спостерігалася перекомпенсація реактивної потужності [18]. Перекомпенсація- це надлишкова реактивна потужність, вироблювана установкою, що компенсує, у періоди зниження навантажень (уночі, в обідні перерви, у неробочі й святкові дні й т.п.) і передана в мережу енергосистеми. Результатом перекомпенсації було збільшення сумарних втрат потужності й енергії в електричних мережах і ускладнення, і подорожчання пристроїв регулювання напруги.

Наочне подання про сутність компенсації реактивної потужності дає рис.1.9. [18] На рис 1.9, а зображена схема електричного кола. Нехай до компенсації споживач мав активну потужність P , відповідно струм I_a відрізок ОВ на рис 1.10, б і реактивну потужність від індуктивного навантаження Q_1 з відповідним струмом I_L (відрізок ВА). Повної потужності S_1 відповідає вектор I_H (відрізок ОА). Коефіцієнт потужності до компенсації $\cos\varphi_1$. Векторна діаграма компенсації представлена на рис.1.9, в.

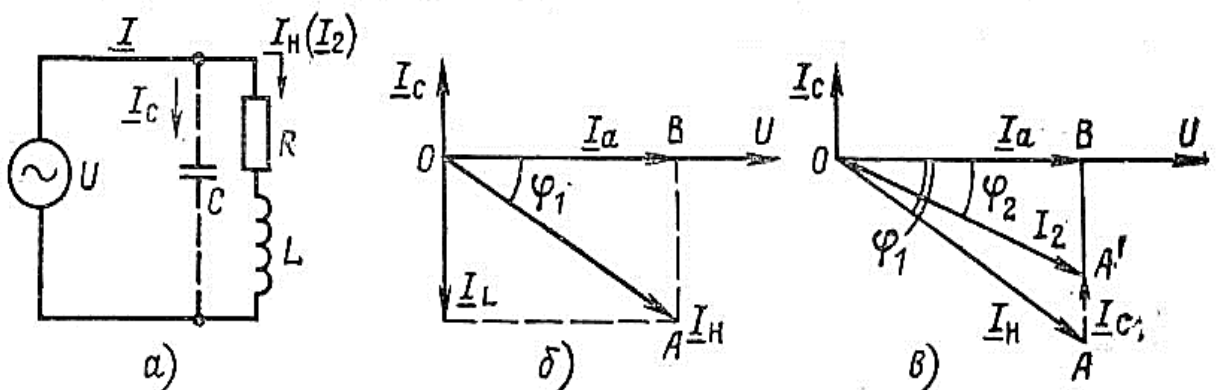


Рисунок 1.9 – Векторна діаграма компенсації реактивної потужності

Після компенсації, тобто після підключення паралельно навантаженню КП (конденсатора) з потужністю Q_k (струм I_c), сумарна реактивна потужність споживача буде вже $Q_1 - Q_k$ (ток $I_L - I_c$) й відповідно знизиться кут зрушення фаз із φ_1 до φ_2 й підвищиться коефіцієнт потужності з $\cos \varphi_1$ до $\cos \varphi_2$. Повна споживана потужність при тій же споживаній активній потужності P (струмі I_a) знизиться з S_1 (струм I_H) до S_2 (струм I_2) (відрізок OA'). Отже, у результаті компенсації можна при тій же перетині проводів підвищити пропускну здатність мережі при активній потужності.

До технічних засобів компенсації реактивної потужності ставляться наступні види пристроїв, що компенсують: конденсаторні батареї (КБ), синхронні двигуни, вентильні статичні джерела реактивної потужності (ДРП).

1.9 Конденсаторні батареї

Найбільше поширення на промислових підприємствах мають конденсатори (КБ)-великі (на відміну від конденсаторів радіотехніки) спеціальні пристрої, призначені для виробітку реактивної ємнісної потужності. Конденсатори виготовляють на напругу 220, 380, 660, 6300 і 10500 У в однофазному й трифазному виконанні для внутрішньої й зовнішньої установки. Вони бувають масляні (КМ) і соволові (КС) [7]. Діелектрична проникність совола приблизно вдвічі більше, ніж масла. Однак негативна припустима температура становить -10°C для соволових конденсаторів, у той час як масляні можуть працювати при температурі -40°C . [7]

Широке застосування конденсаторів для компенсації реактивної потужності пояснюється їхніми значними перевагами в порівнянні з іншими видами КУ: незначні питомі втрати активної потужності до 0,005 кВт/квар, відсутність

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

надійніше в експлуатації. Комплектні конденсаторні установки мають убудований розрядний опір R для зняття залишкової напруги при відключенні ККУ від мережі. Іноді як розрядний опір застосовують два однофазних трансформатори напруги TV .

За рахунок приєднання до мережі КП з потужністю Q_K зменшуються втрати потужності й напруги. Після компенсації втрати потужності [18]:

$$\Delta P = \frac{[P^2 + (Q - Q_K)^2]R}{U_{НОМ}^2} + \Delta P_{KV}, \quad (1.7)$$

де ΔP_{KV} -втрати потужності в пристрої, що компенсує, кВт.

Втрати напруги після компенсації, В,

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_K)X}{U_{НОМ}}. \quad (1.8)$$

1.10 Висновки по першому розділу

Провівши аналіз існуючих засобів компенсації реактивної потужності ми визначили основні напрямки подальших розробок з урахуванням застосування конденсаторних батарей.

Враховуючи сучасні підходи слід приділити увагу засобам компенсації реактивної потужності заснованих на мікроконтролерах з використанням конденсаторних батарей.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

Однією з властивостей індуктивності є підтримання постійного струму, тому при протіканні струму в індуктивності відбувається зсув фаз між струмом і напругою (струм відстає від напруги на кут зсуву фаз). Знак струму і напруги в період зсуву фаз змінюється, в результаті чого електромагнітна енергія котушки індуктивності зменшується і поповнюється з мережі. Для багатьох промислових споживачів це означає, що Крім активної енергії, яка виконує корисну роботу, в мережі між джерелом живлення і споживачем протікає реактивна енергія, яка не виконує корисної роботи і призначена лише для створення магнітного поля в індуктивному навантаженні. Активна і реактивна енергія складають повну енергію, а відношення активної енергії до повної енергії визначається косинусом кута зсуву фаз струму і напруги - $\cos \varphi$. Однак, коли в кабелі або обмотці трансформатора протікає реактивний струм, частка активного струму, що протікає в його ємності, зменшується, що значно збільшує втрати на нагрівання провідника, тобто ефективні втрати. Це означає, що за нинішніх правил розрахунків за електроенергію споживачі змушені платити щонайменше двічі за одні й ті ж непродуктивні витрати.

Перший раз вони платять безпосередньо за реактивну енергію, спожиту з мережі (за лічильником реактивної енергії), а другий раз, таким же чином, але опосередковано, вони платять за ефективні втрати через перетоки реактивної енергії, зафіксовані лічильником ефективної енергії. Цю ситуацію можна змінити, розмістивши джерело реактивної енергії безпосередньо у споживача, розвантаживши мережу від реактивного струму і практично усунувши всі перераховані вище недоліки. Такими джерелами можуть бути й інші фазозсувні елементи, наприклад, конденсатори. На відміну від індуктивності, конденсатори прагнуть підтримувати напругу на своїх обкладках постійною, тобто для конденсаторів струм "перевищує" напругу. Оскільки кількість енергії, яку спо-

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

живає будь-яка компанія, не є постійною і змінюється протягом досить короткого періоду часу і в значному діапазоні, відношення споживання активної енергії до загального споживання енергії, тобто $\cos\varphi$, також може змінюватися відповідним чином. Крім того, чим менше ефективне навантаження індуктивних споживачів (асинхронних двигунів, трансформаторів), тим менше буде $\cos\varphi$. Це означає, що компенсація реактивної потужності вимагає встановлення комплексу пристроїв, тобто компенсації реактивної потужності, яка забезпечує належне регулювання $\cos\varphi$ у відповідь на зміну умов експлуатації обладнання. [19].

2.1 Моделювання синхронних конденсаторів (СК)

СК — це в основному синхронний генератор лише з вихідною реактивною потужністю. На рисунку 2.1 показана принципова схема СК та його керування. Реактивна потужність, що обмінюється між СК та приєднаною електромережею, визначається внутрішньою напругою, який пропорційний струму збудження. Змінюючи напругу збудження, можна змінювати вихідну реактивну потужність СК, щоб підтримувати напругу кінцевої шини.

У стаціонарному стані СК можна моделювати як кероване джерело напруги, яке підтримує постійну напругу шини до досягнення межі реактивної потужності. Для координації керування напругою часто вводять «падіння», яке регулює напругу шини з невеликим нахилом відносно реактивного струму. Після досягнення обмеження реактивної потужності СК можна моделювати як джерело струму. Обмеження струму зазвичай встановлюється реле захисту від надструму.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

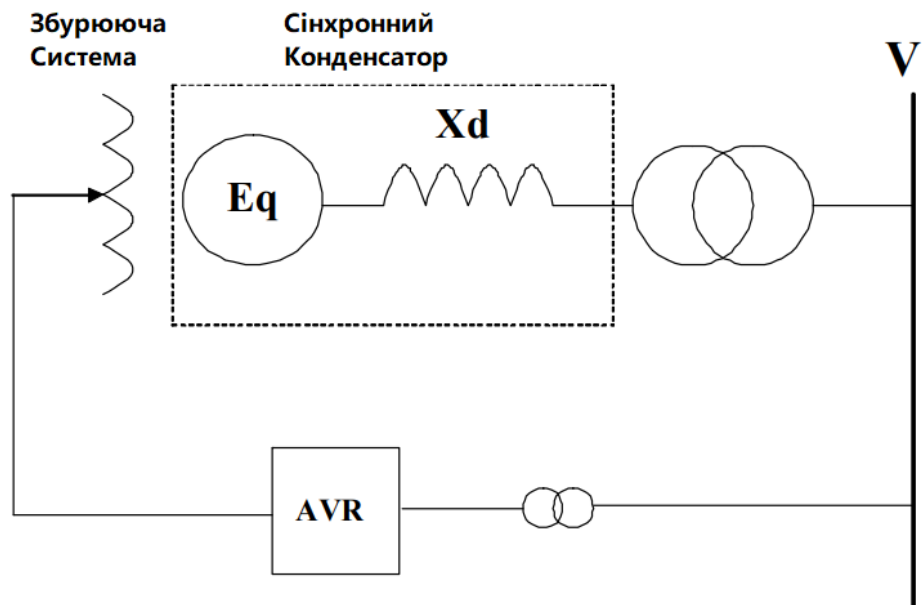


Рисунок 2.1- Схема синхронного конденсатора

Це моделювання є доцільним у стабільному стані, оскільки реле спрацює SC, якщо він постійно працює з дуже великим струмом. Під час перехідного періоду обмеження струму, встановлене реле надструму, більше не діє. Це пояснюється тим, що реле максимального струму має затримку часу і не відключить пристрій протягом короткого перехідного періоду. Саме стеля збудження визначає потужність синхронного конденсатора під час перехідних процесів. У деяких випадках вихідна потужність синхронного конденсатора може бути значно вищою, ніж його номінальний показник у стаціонарному режимі. Вищезазначена філософія керування показана на рис. 2.2. Додатково це можна пояснити за допомогою еквівалентної схеми SC, підключеної до енергосистеми, як показано на рис. 2.3. Струм від SC до системної шини можна розрахувати як:

$$I = \frac{E_q - V}{X_d}, \quad (2.1)$$

$$I = \frac{V - V_s}{X_s}, \quad (2.2)$$

де E_q – напруга збудження;

X_d – еквівалентний імпеданс;

V_s – напруга системи;

V - напруга на терміналах SC;

X_s – імпеданс між SC і системою.

Основний принцип роботи SC полягає в підтримці напруги V кінцевої шини шляхом зміни E_q при зміні V_s . З (2.3) видно, що E_q буде збільшуватися, коли напруга системи V_s зменшується, і навпаки. Припустимо, що вихідною робочою точкою SC є A на малюнку 2.2. Коли напруга системи зменшується, SC збільшить E_q і виведе більше реактивної потужності, перемістивши робочу точку в бік B . У точці B струм I_c є номінальним ємнісним струмом, а також межею стаціонарного стану SC. Якщо напруга в системі продовжує збільшуватися, робоча точка переміститься до C , при якій струм буде більшим за I_{cs} . SC може працювати лише протягом короткого періоду в цій ситуації, тому що захист від надструму в кінцевому підсумку відключить його. Якщо системна напруга падає далі протягом короткого періоду часу, SC все ще може підтримувати напругу кінцевої шини, збільшуючи E_q до E_{qmax} у точці D . Ми позначимо струм у цій точці як обмеження ємнісного перехідного струму I_{ct} . Поза D напруга збудження E_q більше не має місця для збільшення. Якщо напруга в системі все ще знижується, напруга на клемі V має зменшитися, щоб збалансувати рівняння (2-3), як у точці E . Знову ж таки, у будь-якій робочій точці за B , наприклад C , D або E , час, протягом якого SC може спрацювати визначається часом затримки захисту від надструму. Подібним чином можна проаналізувати поведінку СК при поглинанні реактивної потужності. На рис. 2-2 помічено, що межа перехідного струму SC може бути значно вищою, ніж межа струму в стаціонарному стані.

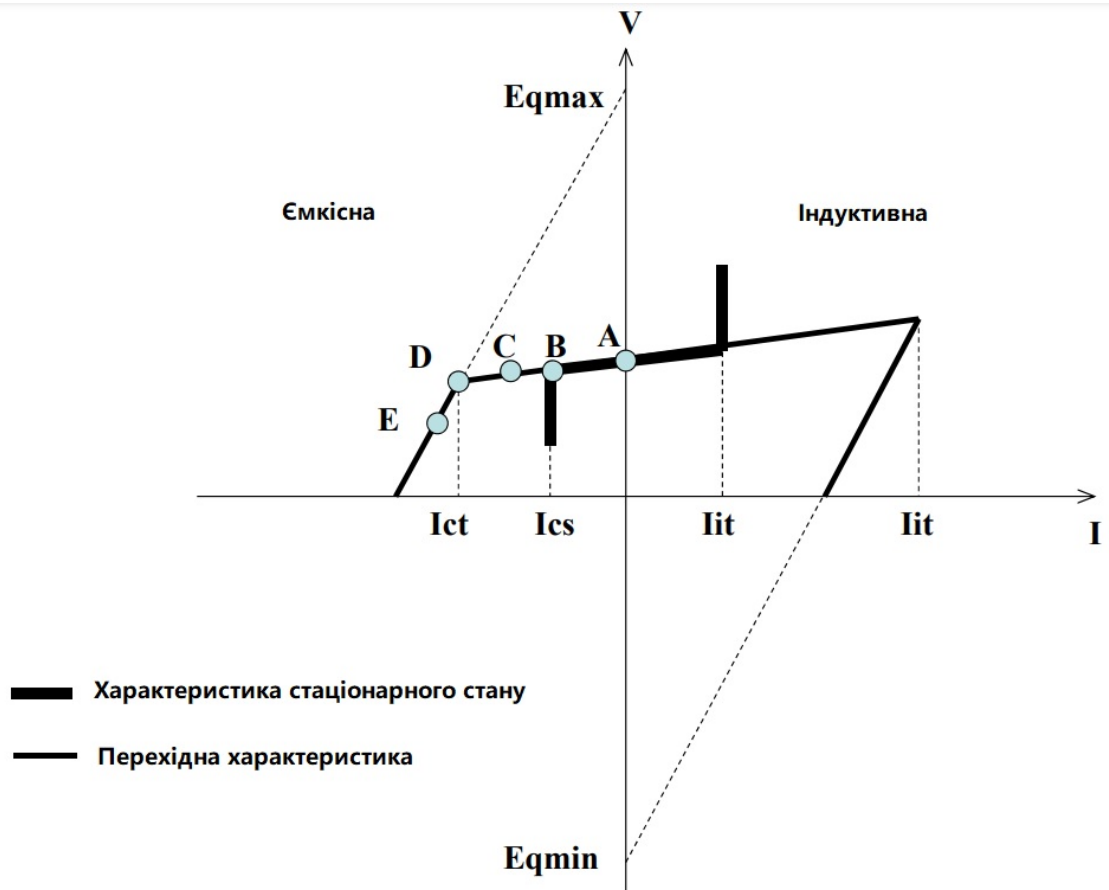


Рисунок 2.2 – Вольт-амперні характеристики SC

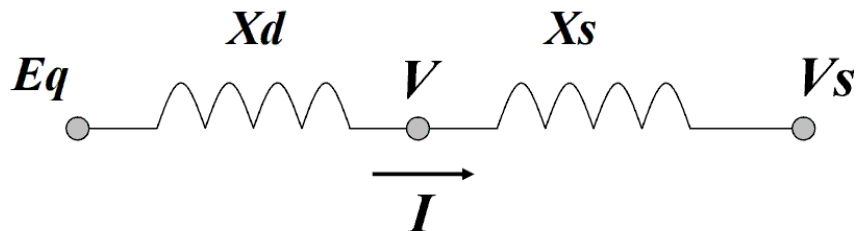


Рисунок 2.3 - Еквівалентна схема SC, підключеного до системи

2.2 Моделювання статичних змінних компенсаторів (SVC)

SVC є найбільш часто використовуваним тиристорним компенсатором реактивної потужності [22]. SVC зазвичай є комбінованою системою, яка містить тиристорно керований реактор (TCR), тиристорний комутований конденсатор (TSC), а іноді й батареї конденсаторів, як показано на Рис. 2.4 (а). Межі

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

вихідної реактивної потужності SVC визначаються його максимальний і мінімальний допуски. На відміну від SC, SVC в основному є пасивним пристроєм який діє як змінний допуск. Керуючи кутом запалювання тирситорів, допуск SVC змінюється з індуктивного на ємнісний, так що SVC може поглинати або виробляти реактивну потужність. VI-характеристика SVC показана на рисунку 2.4(б).

Коли реактивний вихід SVC знаходиться в межах діапазону регулювання, SVC підтримуватиме напруга шини, і він поводить як кероване джерело напруги в усталеному стані. Після досягнуто обмеження реактивної потужності, SVC буде поводитися як постійний імпеданс. Його реактивний вихідна потужність буде пропорційна квадрату напруги шини.

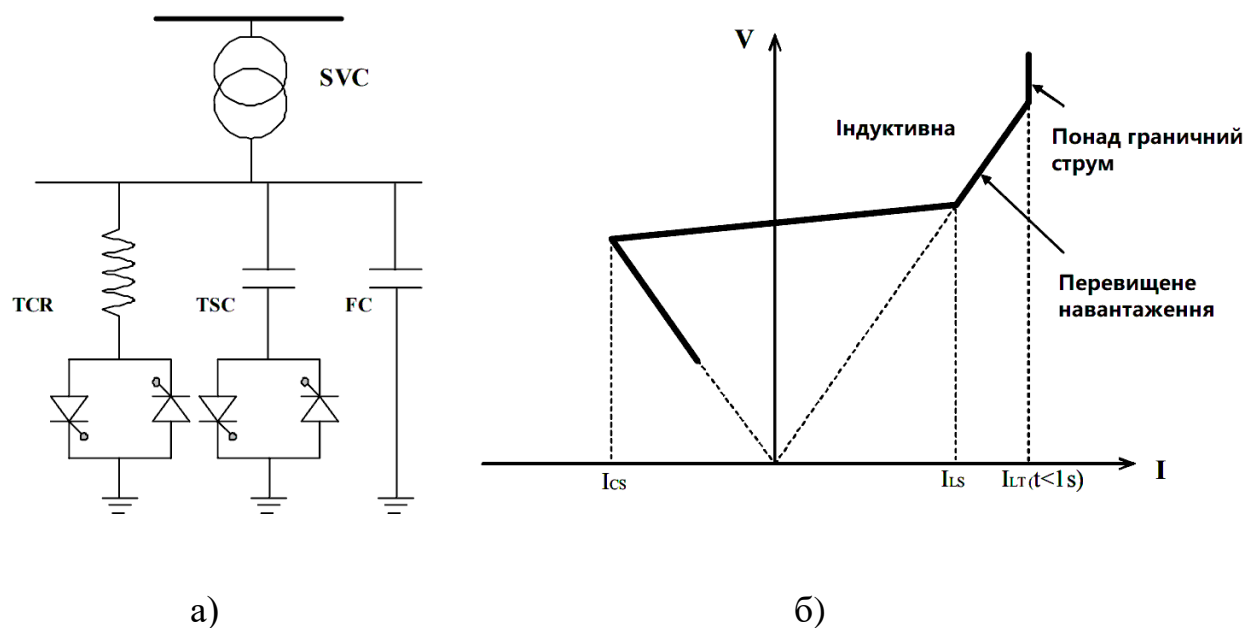


Рисунок 2.4 - Схема SVC і вольт-амперна характеристика

Якщо напруга шини а набагато нижче, вихідна реактивна потужність буде значно зменшена. Ця характеристика має тенденцію викликати колапс напруги і є основним недоліком SVC. На відміну від SC, межі SVC протягом перехідного періоду та в стаціонарному стані встановлюються межі імпедансу.

Тому не буде великої різниці між межами SVC протягом перехідного періоду та в стаціонарному стані.

2.3 Моделювання статичних синхронних компенсаторів (STATCOM)

STATCOM — це сучасний компенсатор реактивної потужності, який базується на технології перетворювача джерела напруги. Хоча він складається з силових електронних схем, як SVC, його поведінка більше схожа на SC [22]. Насправді це повністю керований активний компенсатор, як показано на рис. 2.5 (а). STATCOM працює як кероване джерело напруги, яке утримує напругу шини до досягнення її межі. Задача STATCOM — це обмеження струму, яке він дозволяє протікати через свою силову електронну схему. На рис. 2.5,б показано вольт-амперні (VI) характеристики STATCOM. Слід зазначити, що STATCOM може забезпечити максимальний струм, навіть якщо напруга впала до дуже низького значення. Його вихідна реактивна потужність, що перевищує контрольоване значення, пропорційна напрузі шини, а не пропорційна квадрату напруги шини, як у випадку з SVC. Ця функція надає STATCOM більше можливостей підтримувати напругу системи та покращувати стабільність напруги системи. Поточний ліміт STATCOM зазвичай накладається в системі керування, наприклад, обмеження порядку I_q в управлінні розв'язкою DQ. Обмеження струму в стаціонарному та перехідному режимах зазвичай реалізуються за допомогою одного механізму. Незважаючи на те, що вони можуть бути сконструйовані таким чином, щоб дозволити певний короткочасний надструм за певних обставин, різниця між межами стаціонарного та перехідного стану не буде дуже великою.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

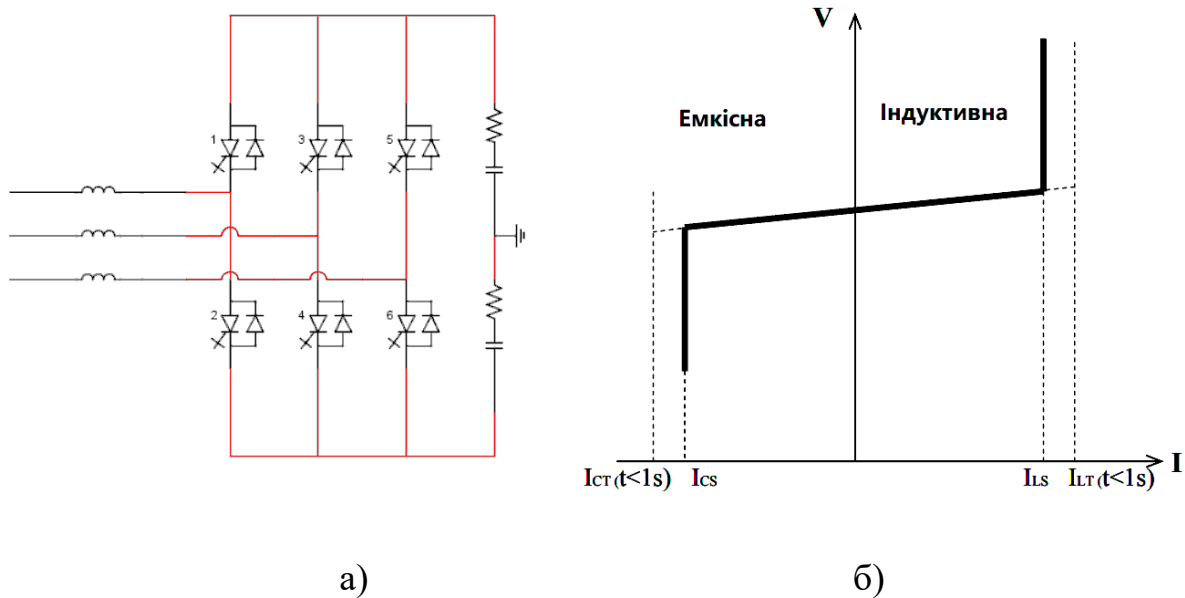


Рисунок 2.5 - Схема STATCOM і вольт-амперна характеристика

Компенсація реактивної потужності широко використовується для підвищення стабільності напруги в усталених або перехідних енергосистемах. При аналізі стабільності напруги в стаціонарному режимі компенсація реактивної потужності може збільшити максимальну пропускну здатність P_{\max} . Механізм, за допомогою якого компенсація реактивної потужності збільшує P_{\max} , можна проілюструвати на прикладі простої системи змінного струму, як показано на рисунку 2.6.

Профіль напруги та стабільність напруги в енергосистемі можна значно покращити, розмістивши на стороні навантаження регулюючий компенсатор реактивної потужності з вихідним сигналом Q_c . Функція динамічних компенсаторів реактивної потужності розрізняється двома різними етапами. До того, як буде досягнута межа реактивної потужності, компенсатор контролює напругу на шині до постійного значення, регулюючи вихідну реактивну потужність. Саме обмін реактивною потужністю між навантаженням і мережею визначає напругу на шині. Якщо реактивна потужність досягає граничного значення, задана напруга не може підтримуватися. Вихідна реактивна потужність

компенсатора буде обмежена $Q_{сmax}$, $Im_{сax}$ або $V_{сmin}$, залежно від типу використовуваного компенсатора. Слід зазначити, що в усталеному режимі, до досягнення межі реактивної потужності, всі типи компенсаторів виробляють однакову кількість реактивної потужності для одного і того ж порядку напруги. Після досягнення межі реактивної потужності різні типи компенсаторів виробляють різну кількість реактивної потужності для одного і того ж порядку напруги.

P і Q на приймальному кінці лінії передачі можна записати так:

$$P = \frac{EV}{X} \sin(\delta), \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \cos(\delta) - \frac{V^2}{X}. \quad (2.4)$$

У якому E і V — напруга шини генератора і шини навантаження відповідно, а X і δ — імпеданс і різниця кутів фаз між шиною генератора і шиною навантаження. Коли вихідна реактивна потужність знаходиться в межах компенсатора, напруга шини навантаження регулюється до заданого значення. Отже, маємо:

$$\sin(\delta) = \frac{PX}{EV}, \quad (2.5)$$

$$\cos(\delta) = \sqrt{1 - \frac{(PX)^2}{E^2 X^2}}, \quad (2.6)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \sqrt{1 - \frac{(PX)^2}{E^2 X^2}} - \frac{V^2}{X}, \quad (2.7)$$

$$Q_C = P_L \tan(\varphi) - Q. \quad (2.8)$$

Коли , ми маємо $Q_C < Q_{сmax}$

$$Q + Q_c = Q_L = P_L \tan(\varphi). \quad (2.9)$$

Коли , напруга шини навантаження не може бути утримана, і вона почне падати.

Напруга шини навантаження може бути розрахована за наступним рівнянням:

$$\frac{EV}{X} \sqrt{1 - \frac{(PX)^2}{E^2 X^2} - \frac{V^2}{X}} = P_L \tan(\varphi) - Q_{Cmax}, \quad (2.10)$$

$$Q_{Cmax} = \begin{cases} Q_{Cmax} \\ V^2 B \\ VI_{Cmax} \end{cases}, \quad (2.11)$$

Для ідеального компенсатора напруга має бути визначена за формулою:

$$Y = X(P \tan(\varphi) - Q_{Cmax})/ \quad (2.12)$$

Отже рівняння стійкості буде:

$$(V + Y)^2 = E^2 V^2 + P^2 X^2. \quad (2.13)$$

Тому 2.10 стає:

$$\frac{EV}{X} \sqrt{1 - \frac{(PX)^2}{E^2 X^2} - \frac{V^2}{X}} = P_L \tan(\varphi) - V^2 B_{Cmax},$$

А з урахування 2.13, отримаємо рівняння:

$$\sqrt{E^2 V^2 + P^2 X^2} = P_L \tan(\varphi) + (1 - B_{Cmax}) V^2,$$

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Провівши відповідні рішення з квадратичним рівнянням з детермінантом :

$$\Delta = (2Y - E^2)^2 - 4(Y^2 + P^2 X^2);$$

отримаємо рішення, результат якого показано на рис.2.6.:

$$V = \sqrt{\frac{E^2 V^2 + P^2 X^2 \pm \sqrt{\Delta}}{2}}.$$

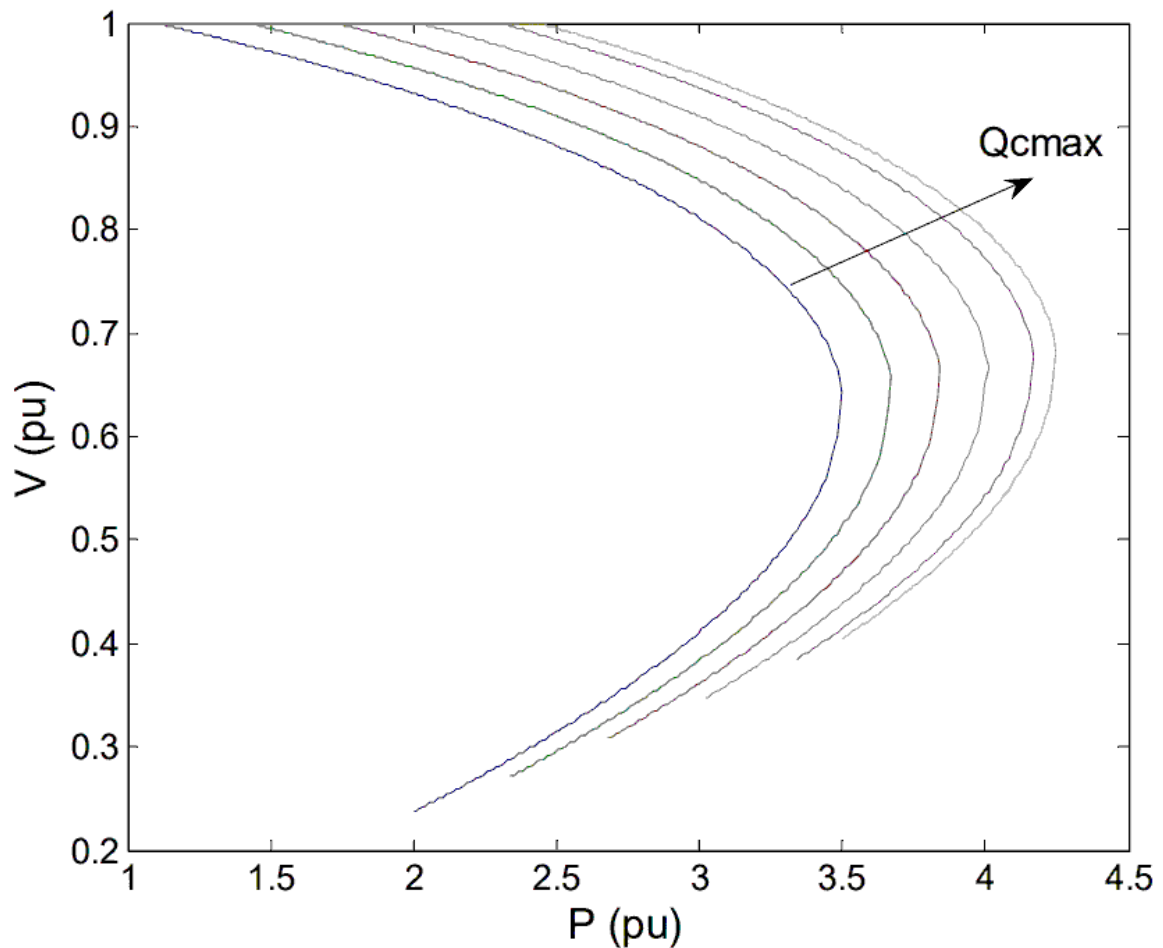


Рисунок 2.6 - PV криві при зростанні компенсації реактивної потужності

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2.4 Проектування засобу компенсації реактивної енергії

Для керування сигналом компенсації пропонується пристрій на основі регулятора блоку компенсації реактивної потужності BR6000, який поєднує в собі інноваційні ідеї та різноманітні функції. [24, 25, 26] Регулятор призначений для вимірювання напруги в діапазоні 30,525 В (L-L, L-N) і живиться від мережі 230 В змінного струму. Регулятор має різноманітні меню на дисплеї та максимально спрощене управління. Він оснащений алфавітно-цифровим дисплеєм для різних мов, включаючи російську. Відображення різних параметрів мережі, зберігання різних значень і функції тестування дозволяють легко аналізувати несправності мережі і налаштування компенсації реактивної потужності. Автоматична ініціалізація зводить до мінімуму роботи з технічного обслуговування. Основні характеристики 6 або 12 комутаційних виходів (7 або 13 виходів в залежності від обраного типу). 20 стандартних варіантів конденсаторних батарей, включених в програму контролера. Редактор для стандартних варіантів наборів конденсаторів - всі операції можна контролювати через меню дисплея 2x16 символів з підсвічуванням.

Контролер може працювати в чотирьох квадрантах системи координат. Різні параметри мережі (V, I, f, Q, P, S...), гармоніки струму і напруги відображаються на дисплеї. Також є відображення і контроль температури в конденсаторному блоці, потужності на кожному ступені, кількості вмикань і часу роботи кожного ступеня:

- При відсутності напруги живлення вимикається.
- Виявлення несправностей і відображення повідомлень в різних станах.
- Повна свобода у встановленні другої програми/параметрів, що перемикаються.
- Тестування систем компенсації реактивної потужності (RPC) шляхом аналізу несправностей.
- Розміри корпусу регулятора 144x124x45 мм.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

СР 253 - це серія конденсаторних батарей, призначених для використання в електричних мережах до 12 кВ. СР виготовлений з нефарбованого алюмінію або оцинкованої сталеві рами і панелі, з конденсаторами PROPIVAR, газовими (SF6) контакторами ROLLARC, запобіжниками HRC і настроювальними реакторами.

Запобіжники HRC забезпечують захист від внутрішніх відмов конденсаторів. Кілька конденсаторних ступенів контролюються реле коефіцієнта потужності, створюючи систему автоматичного регулювання коефіцієнта потужності [27]. Як показано на рис. 2.7, реле доповнюються КБ.

Електричну принципову схему та зовнішній вигляд триступеневого СР253СГ показано на рис.2.8.

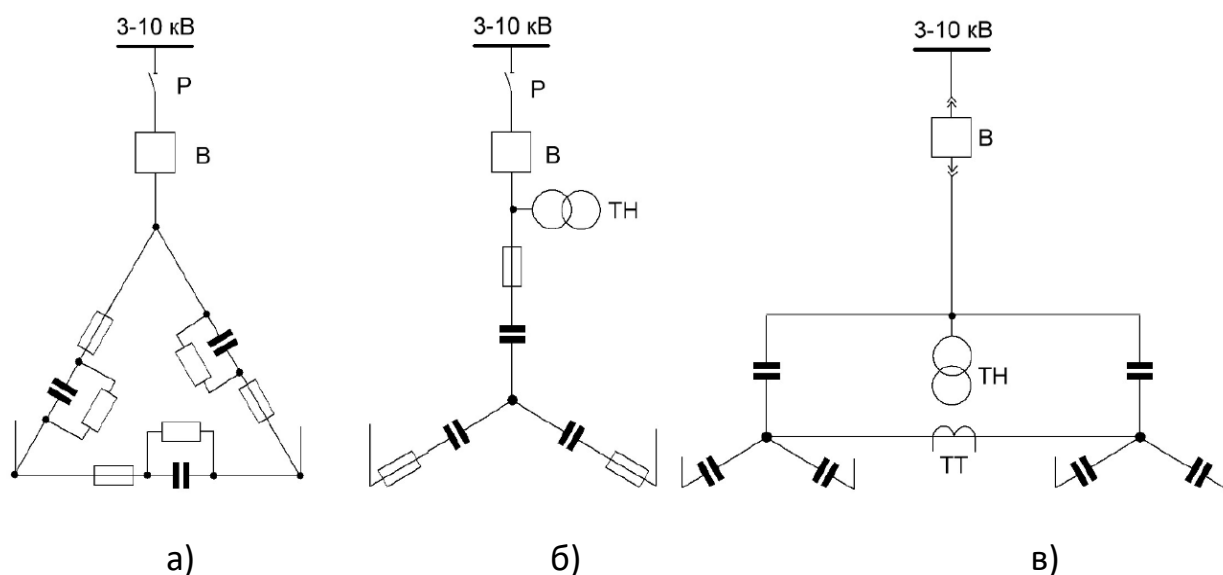


Рисунок 2.7 - Схема з'єднання конденсаторної батареї: а - конденсатор з вбудованим вимикачем і розрядним резистором, б - вимикач і трансформатор напруги для розряду, в - формат подвійної зірки з висувним вимикачем [27].

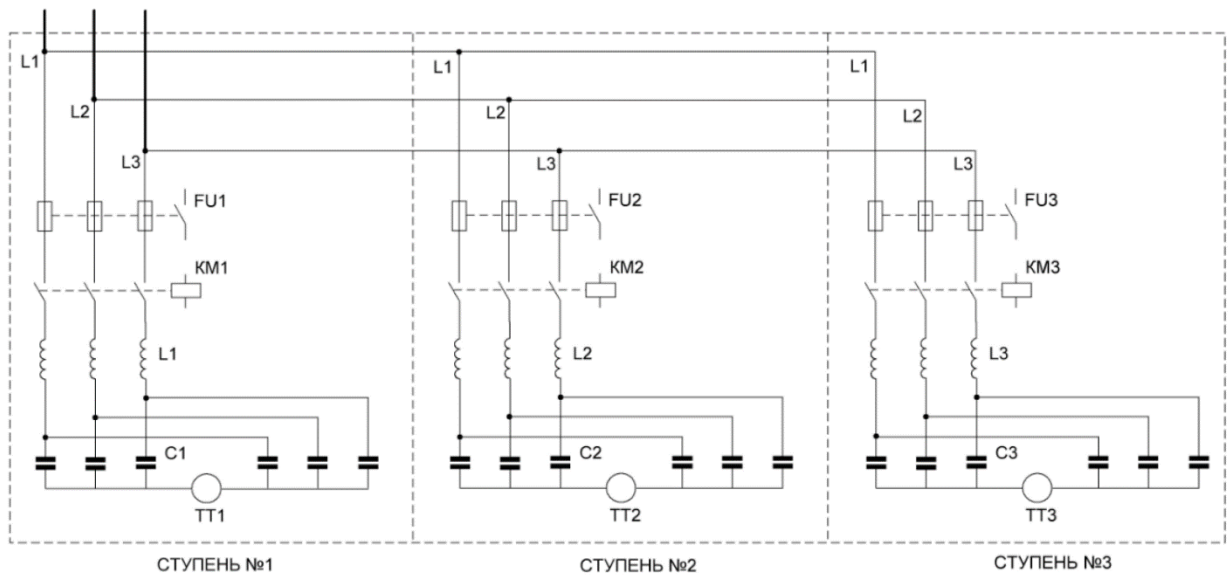


Рисунок 2.8 – Електрична схема конденсаторної установки СР 253-3 [27]

Загальний вигляд конденсатора представлено на рис. 2.9. Більш детальний склад показано на вигляді загальному БРМА 23.00.01.000 ВЗ.

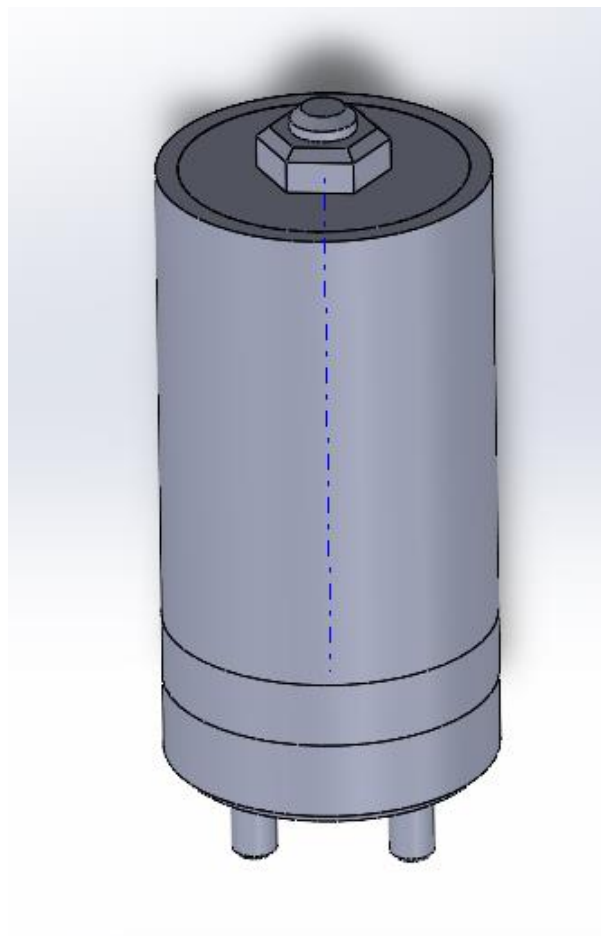


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд конденсаторної батареї

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				42

Батарея складається з блоку конденсаторів, захисного кожуху, накопичувальної ємності, двох ізоляторів та двох терміналів підключення до мережи.

Сам засіб компенсації реактивної потужності електричної енергії змонтовано у шафі, що має дверцята, які закриваються на замок. Засіб складається з блока конденсаторних батарей (від 4 до 12), вимикачів, вмикачів, блоку лічильника електричної енергії. Загальний вигляд конструкції засобу компенсації реактивної потужності представлено на БРМА 23.00.00.00 ВЗ. Засіб також оснащений мікроконтролером управління, аварійною кнопкою зупинки, що розташована ззовні.

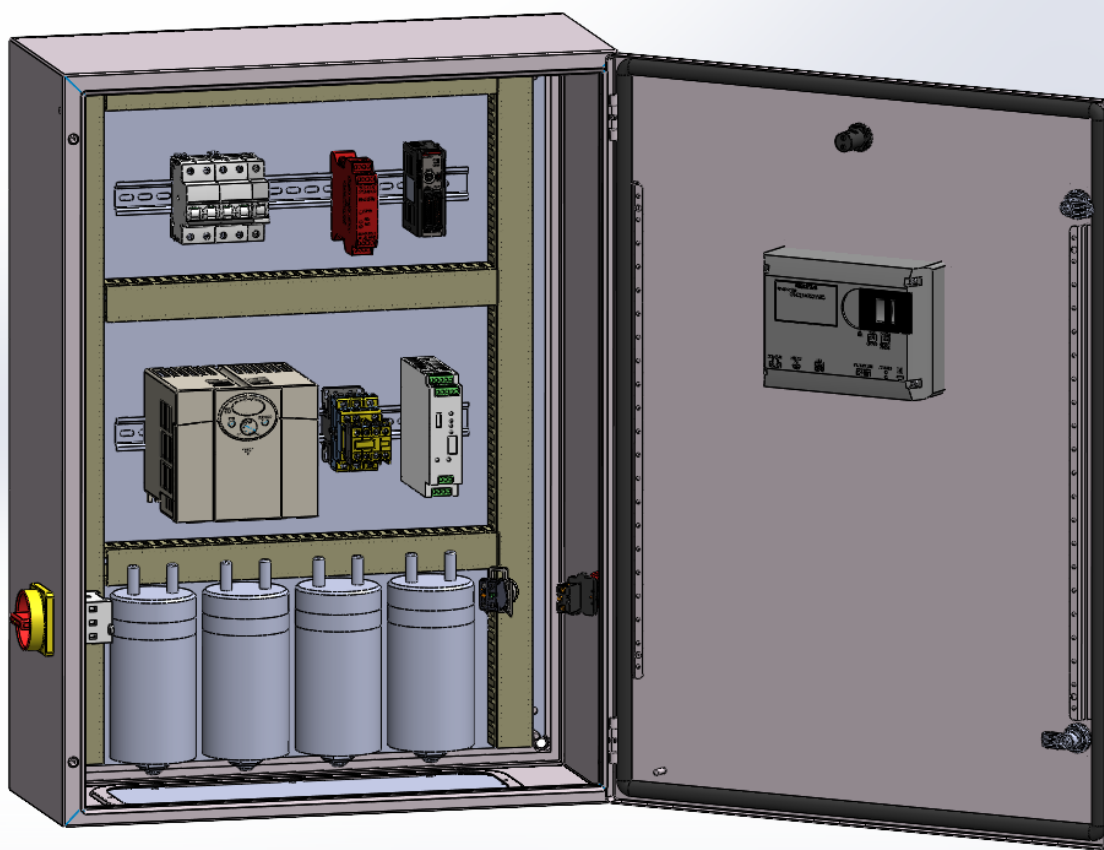


Рисунок 2.10 – Засіб компенсації реактивної потужності

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА23.00.00.000ПЗ

Арк.

43

Конденсаторна система обладнана захистом від перенапруги (напруга, що перевищує 110% номінальної напруги) для відключення батареї, якщо ефективне значення напруги перевищує допустиме значення. Відключення системи повинно відбуватися з витримкою часу 3-5 хвилин.

У випадку батарей, зібраних за схемою електричного з'єднання з декількома секціями, захист кожної секції від струмів короткого замикання повинен застосовуватися незалежно від захисту конденсаторної батареї в цілому.

2.5 Висновки до другого розділу

Спроектована конструкція засобу компенсації реактивної потужності, що має вигляд шафи з встановленими елементами, такими як конденсаторними батареями, вимикачі, захист від перенавантажень, аварійна кнопка вимкнення засобу, мікроконтролерний блок управління та лічильник електроенергії.

У конденсаторних батареях паралельно з конденсаторами вмикаються спеціальні активні або індуктивні резистори. Ці резистори необхідні для розрядки конденсатора після його від'єднання через повільний природний розряд. Конденсаторні батареї повинні розряджатися автоматично кожного разу, коли батарею від'єднують від мережі. Наприклад, підключіть трансформаторний резистор напруги VT до батарей понад 1000 В або омичний резистор SR до батарей до 1000 В (рис. 3.2, а і б) [27].

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3. РОЗРАХУНКИ

3.1 Розрахунок і вибір КП

Розрахунок і вибір КП здійснюється на основі завдання енергосистеми та відповідно до "Керівництва з компенсації". Задача розрахунку і вибору КП вирішується разом з проектуванням всіх елементів навантаження у побутових приміщеннях.

Споживана потужність КП вибирається з урахуванням максимальної вхідної реактивної потужності Q_E kvar, яка може бути передана з мережі енергосистеми. У загальному випадку повинні бути виконані наступні умови. [10]:

$$Q_P - Q_K \leq Q_E, \quad (3.1)$$

де Q_P - розрахункова (споживана) мережі побутового приміщення реактивна потужність, квар; Q_K - реактивна потужність, що компенсується мережею (тобто потужність КП).

Енергосистема враховує розрахункове максимальне навантаження споживача та режим споживання реактивної потужності споживача з урахуванням Q_P і P_P . Ця вимога означає, що встановлюється Q_{E1} - реактивна потужність, що відпускається енергосистемою споживачу в період максимального ефективного навантаження енергосистеми, Q_{E2} - середня реактивна потужність, що передається з мережі енергосистеми, або реактивна потужність, що генерується в мережі енергосистеми в період мінімального навантаження енергосистеми. Практично у всіх випадках $Q_{E2} \approx 0$. Розглядаючи рівняння (4.1) вище, отримаємо наступний вигляд:

$$Q_{K \max} = Q_{P \max} - Q_{E1}; \quad (3.2)$$

$$Q_{K \min} = Q_{P \min} - Q_{E2}, \quad (3.3)$$

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

де $Q_{K \max}$ й $Q_{K \min}$ - відповідно необхідна потужність КП в режимі максимальних і мінімальних навантажень; $Q_{P \max}$ і $Q_{P \min}$ - розрахункова реактивна потужність споживача в режимах максимального та мінімального навантаження (наприклад, нічний час, святкові дні).

Рівняння (3.2) та (3.3) стосуються споживачів потужністю 750 кВА і вище; для споживачів до 750 кВА енергосистема рекомендує повну компенсацію реактивної потужності на стороні до 1 кВ.

Такі вимоги енергосистеми обумовлені тим, що, як правило, коефіцієнт потужності навантаження не перевищує 0,8 для мереж напругою до 1 кВ. Водночас, оскільки мережі нижче 1 кВ електрично віддалені від енергосистеми та промислових ТЕЦ, передача реактивної потужності з енергосистеми в мережі нижче 1 кВ до споживачів призводить до збільшення витрат, в тому числі зменшення перерізу проводів, збільшення потужності трансформаторів та збільшення електричних втрат.

Таким чином, дефіцит реактивної енергії в енергосистемі для покриття реактивного навантаження споживачів усувається за допомогою компенсаційних пристроїв. При цьому, якщо встановлюється компенсуючий пристрій, сумарна потужність його нерегульованої ділянки не повинна перевищувати розрахункової реактивної потужності в режимі мінімального навантаження $Q_{P \min}$.

Для стимулювання заходів з компенсації реактивної потужності запроваджено шкалу знижок та надбавок до ціни на електроенергію, що відпускається електропостачальними організаціями. Штрафні санкції у вигляді надбавок до тарифів на електроенергію, які сплачують споживачі за недотримання схем компенсації, не усувають фактичних втрат в електромережі, а лише перерозподіляють їх вартість між енергосистемою та споживачами. Однак, надбавка до рахунку за електроенергію стимулює споживачів вживати заходів для раціональної експлуатації ТЕЦ.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Енергосистема контролює режими споживання реактивної потужності за допомогою лічильника з 30-хвилинним максимальним показником та реле часу. Лічильники встановлюються на межі між енергосистемою та споживачем у точці, визначеній у договорі про постачання електроенергії. За відсутності спеціального лічильника використовуються показання звичайного лічильника. Реєстрації підлягають 30-хвилинні показання лічильника в нічні години максимуму та мінімуму роботи енергосистеми.

Вибір потужності та розподіл по мережі напруги вище 1 кВ розраховується технічно та економічно за мінімальними витратами [11]. Вартість компенсації реактивної потужності, грн.,

$$Z_K = Z_{OK} + Z_{V,K1} Q_K + Z_{V,K2} Q_K^2, \quad (3.4)$$

де Q_K - реактивна потужність КП, кВАр; Z_{OK} - постійна складова витрат, що не залежить від потужності Q_K , грн.; $Z_{V,K1}$ - питомі витрати на 1 квар реактивної потужності, грн/квар; $Z_{V,K2}$ - питомі витрати на 1 квар² реактивної потужності, грн/квар².

Постійна складова витрат, грн.,

$$Z_{OK} = E_H K_0, \quad (3.5)$$

де $E_H = 0,12$ - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних інвестицій - вартість комутаційного обладнання, ввідно-регулюючого обладнання, обладнання захисту та іншого компенсуючого обладнання, грн.

Для РП, значення $Z_{OK} = 0$ й вираження (3.4) приймає вид [11]:

$$Z_{K,ДВ} = Z_{V,K,ДВ1} Q_{НОМ} + Z_{V,K,ДВ2} Q_{НОМ}^2, \quad (3.6)$$

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

де $Q_{НОМ}$ - номінальна реактивна потужність СД, квар (8);

$$z_{y,k,дв1} = C_{ПОТ} \left[\left(D_1 / Q_{НОМ} + 2D_2 Q_{ПР} / (Q_{НОМ}^2 n) \right) \right] \quad (3.7)$$

$$z_{y,k,дв2} = C_{ПОТ} D_2 / (Q_{НОМ}^2 n); \quad (3.8)$$

тут $C_{ПОТ}$ - вартість втрат, грн/кВт; n -число однотипних СД; $Q_{ПР}$ - реактивна потужність, вироблена СД попередньо, квар. Якщо СД уводиться знову, то $Q_{ПР} = 0$ і (3.7) приймає вид:

$$z_{y,k,дв1} = C_{ПОТ} D_1 / Q_{НОМ} \cdot \quad (3.9)$$

Для КБ $Q_K^2 = 0$, тоді

$$z_{кКБ} = z_{окКБ} + E'_n z_{y,кКБ1} \left(\frac{U_{КБ}}{U_{НОМ}} \right) Q_{КБ} + C_{ПОТ} \Delta P_{КБ} Q_{КБ}, \quad (3.10)$$

де $Q_{КБ}$ - потужність КБ, квар; $\Delta P_{КБ}$ - питомі втрати потужності в конденсаторах, кВт/квар. $U_{КБ}$ - напруга на конденсаторній батареї, В; $z_{y,кКБ1}$ - питомі витрати на установку КБ; $z_{окКБ}$ - постійна складова витрат для КБ

$$z_{окКБ} = E'_n (K_с + K_p); \quad (3.11)$$

де $E'_n = 0,223$ - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень у КБ; $K_с$ і K_p - витрати на вхідний вузол та вузол керування, відповідно, грн.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

При проектуванні СЕС часто трапляється так, що місце розташування ТЕЦ ще не визначено. Тому можна прийняти середню питому вартість компенсації 1 кВт-год $z_{y.k1} = 0,75$ грн/(кВт-год/рік) з достатньою для практичних цілей точністю.

Для установок потужністю понад 750 кВА після заходів природної компенсації некомпенсовані реактивні навантаження в мережі до 1 кВ можуть покриватися як установкою до 1 кВ, так і перетіканням реактивної потужності з шин 6-10 кВ, оптимальне співвідношення яких визначається розрахунковим шляхом.

Джерела реактивної потужності на напругу 6-10 кВ є більш економічними, ніж джерела реактивної потужності на напругу до 1 кВ. Однак передача реактивної потужності з системи 6-10 кВ в систему 1 кВ збільшує навантаження за рахунок реактивної потужності, що може призвести до збільшення кількості трансформаторів на передавальній підстанції та відповідного збільшення електричних втрат на лініях та трансформаторах.

Додаткові витрати, грн., збільшення:

$$\Delta Z = E'_H \Delta n K_T, \quad (3.12)$$

де K_T - вартість додатково встановлюваних Δn трансформаторів, грн.

Як правило, передавати надлишкову реактивну потужність з підстанцій 6-10 кВ в мережу на напругу до 1 кВ не вигідно, оскільки вартість КТП є значно вищою.

У більшості випадків реактивна потужність з розподільчих пристроїв 6-10 кВ використовується для компенсації реактивного навантаження на стороні 6-10 кВ.

Потужність РП в мережах напругою до 1 кВ визначається за мінімумом вищезазначених витрат шляхом вибору економічно оптимальної кількості трансформаторів в системі передачі та визначення додаткової потужності РП нижче 1 кВ для мінімізації втрат в трансформаторі та мережі 6-10 кВ.

Розрахована таким чином компенсуюча потужність розподіляється пропорційно реактивному навантаженню всіх трансформаторів на об'єкті.

Кількість встановлюваних трансформаторів має важливе значення при виборі КП для підприємства з великою кількістю трансформаторів.

Орієнтовна кількість трансформаторів однакової оптимальної економічної потужності, необхідна для покриття всього електричного навантаження будівельного майданчика, якщо навантаження нерівномірно розподілене по площі будівельного майданчика і відома середня щільність навантаження σ вибирають по виразу:

$$n_{TP} = S_{CM} / (\beta_T \lambda S_{НОМ,Т,ЭК}), \quad (3.13)$$

де S_{CM} - повна середня потужність за максимально завантажену зміну, кВ А; $S_{НОМ,Т,ЭК}$ - оптимальна економічна номінальна потужність трансформатора, обумовлена по рис.3.1; β_T - рекомендується коефіцієнт, для завантаження трансформаторів (таблиця 3.1); $\lambda = \cos\varphi_2 / \cos\varphi_1$ - відношення коефіцієнтів потужності на стороні вторинної напруги трансформатора відповідно після й до компенсації реактивних навантажень.

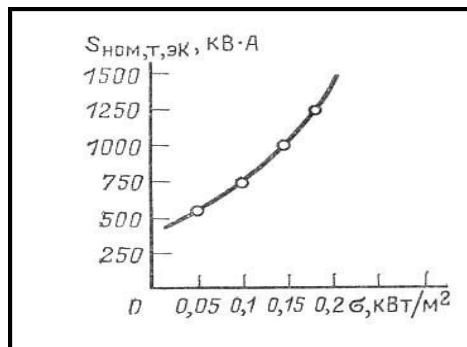


Рисунок 3.1 – Крива для вибору оптимальної потужності трансформатора

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Таблиця 3.1 - Коефіцієнти завантаження, що рекомендуються трансформаторів на підстанціях

Характер навантаження й вид ТП	β_T
При перевазі навантажень I категорії на двухтрансформаторних ТП.	0, 65-0,7
При перевазі навантаження II категорії на однострансформаторних ТП і взаємному резервуванні трансформаторів по зв'язках вторинної напруги.	0, 7-0,8
При перевазі навантаження II категорії й при наявності централізованого (складського) резерву трансформаторів, а також при навантаженні III категорії.	0, 9-0,95
На щаблях вищої напруги СЭС потужних промислових підприємств (на ГПП, УРП, великих ПГВ)	0, 5-0,55

При рівномірно розподіленій по площі цеху навантаженню число трансформаторних підстанцій:

$$n_{TP} = S_{CM} Z(S_{НОМ,Т,ЭК} \beta_T) \quad (3.14)$$

Для того, щоб вибрати найбільш сприятливу кількість трансформаторів та потужність розподільчого пристрою, слід провести техніко-економічне порівняння між варіантом мінімізації кількості трансформаторів та варіантом збільшення кількості трансформаторів на один або два. Для варіанту зі збільшеною кількістю трансформаторів необхідно враховувати витрати на встановлення додаткових трансформаторів відповідно до (3.12).

Якщо збільшення кількості трансформаторів неможливе, наприклад, з міркувань зайнятості робочих місць або резервування, необхідно визначити мі-

німально можливу потужність трансформатора. $S_{НОМ,Т,ЭК}$ по рис.3.1. Тому варіант встановлення трансформатора мінімальної потужності порівнюється з варіантом встановлення трансформатора на один крок більшої потужності.

Як правило, індуктивні реактивні навантаження в мережі 6-10 кВ спричинені реактивною потужністю енергоблоків 6-10 кВ та реактивними навантаженнями в мережі 0,4-0,69 кВ і не компенсуються.

$Q_{ВН}$ Коли враховуються втрати реактивної потужності в силовому трансформаторі на стороні 6-10 кВ.

Максимальна реактивна потужність, квар, яка може бути передана з межі 6-10 кВ в мережу 1 кВ для покриття залишку некомпенсованої реактивної потужності в мережі 1 кВ без збільшення $n_{ТР}$ встановлюваних трансформаторів і їхнього коефіцієнта β_T завантаження, визначається

$$Q_{ВН} = \sqrt{(n_{ТР}\beta_T S_{НОМ,Т})^2 - P_{СМ}^2}, \quad (3.15)$$

де $P_{СМ}$ - Активне середнє навантаження при максимальному зсуві навантаження, кВт.

Для оптимального зменшення втрат у трансформаторах та мережі 6-10 кВ сумарна потужність КТП на напругу до 1 кВ для груп з невеликою кількістю трансформаторів становить

$$Q_{КБ} = Q_p - Q_{вн} \quad (3.16)$$

де Q_p - Сума розрахованих реактивних навантажень для максимального зсуву навантаження.

Якщо встановлено, що $Q_{КБ} < 0$, то установка конденсаторів напруги до 1 кВ не потрібно.

На практиці в промисловості здебільшого порівнюють встановлення компенсуючих пристроїв у вигляді КР і ДР окремо або комбінації КР і ДР.

На підприємствах, де немає КД, що живлять виробниче обладнання, спочатку вибирається оптимальна потужність розподільчого пристрою на стороні до 1 кВ, а потім - оптимальна потужність силового трансформатора на підстанції.

3.2 Моделювання роботи засобу

Розглянемо енергосистему з п'ятьма шинами на рисунку 3.2. У випадку розподільчої мережі генератори можуть представляти розподільчі підстанції, а навантаження (позначені стрілками на шині) - фідери мережі. Умови роботи системи визначаються на основі виробленої (або імпортованої) потужності та потужності навантаження на кожній шині, а також напруги на генеруючій шині (або розподільчій підстанції). Крім того, необхідно знати імпеданс ліній мережі.

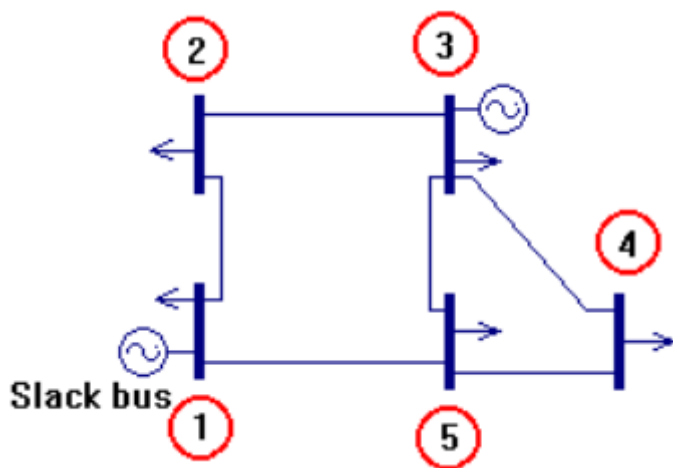


Рисунок 3.2 - Систему живлення з п'ятьма шинами

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Найбільш компактно системні дані можна ввести в Mathcad у вигляді матриці.

Ці дані заносяться в масив Series. Кожен трансформатор і лінія займають рядок у цьому масиві з таким значенням, пов'язаним з кожним стовпцем:

Sending End bus # = column 1

Receiving End bus # = column 2

Series Impedance in pu = column 3

Shunt Admittance in pu = column 4

Довгі лінії передачі представлені еквівалентами Пі. Стовпець 4 серії масиву містить пропускну здатність кожного з елементів шунта P_i . У разі трансформаторів цей стовпець може представляти пропускну здатність гілки намагнічування трансформатора або може бути встановлений на нуль, якщо цю гілку потрібно опустити. Для цього прикладу ми маємо такий опис мережі:

$$\text{Series} := \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0.042 + 1j \cdot 0.168 & 1j \cdot 0.020 \\ 1 & 5 & 0.031 + 1j \cdot 0.126 & 1j \cdot 0.014 \\ 2 & 3 & 0.031 + 1j \cdot 0.126 & 1j \cdot 0.014 \\ 3 & 4 & 0.084 + 1j \cdot 0.336 & 1j \cdot 0.04 \\ 3 & 5 & 0.053 + 1j \cdot 0.210 & 1j \cdot 0.024 \\ 4 & 5 & 0.063 + 1j \cdot 0.252 & 1j \cdot 0.06 \end{bmatrix}$$

Дані шунтової апаратури заносяться в масив Shunt. Стовпці цього масиву відповідають Shunt.

Bus # = column 1

shunt admittance in pu = column 2

Якщо шунтове обладнання недоступне, введіть номер будь-якої шини в перший стовпець і 0 у другий стовпець масиву шунтів.

$$\text{Shunt} := [1 \ 0]$$

Шунтуючі елементи можуть представляти собою компенсацію реактивної потужності на певних системних шинах. У цьому випадку розраховується реактивний опір відповідного компенсаційного пристрою (конденсатора або котушки індуктивності), а його пропускну здатність вноситься в наведений вище масив. Якщо лінії компенсуються послідовними конденсаторами, реактивний опір конденсатора віднімається від послідовного реактивного опору лінії, а чистий реактивний опір включається в масив Series.

Приймаємо :

P_G — це реальна потужність, створена на шині.

P_L — реальна потужність навантаження на шині pu.

Q_L — потужність реактивного навантаження на шині pu.

V — величина pu напруги шини. Це значення залишається незмінним під час процесу вирішення для шин провисання та фотоелектричних шин і є початковим припущенням для шин PQ.

δ — фазовий кут напруги шини в радіанах.

Зазвичай він дорівнює нулю для провислої шини. Значення цього стовпця береться як початкове припущення фазових кутів напруги шини для інших типів шин. Тип – тип автобуса. Введіть 0 для шин провисання, 1 для кожної PV-шини та 2 для кожної PQ-шини.

Рішення складається з наступних кроків: ініціалізація системних масивів, функцій та індексів, побудова матриці пропуску системної шини, побудова та інверсія системної матриці Якобі та ітераційне вирішення проблеми.

Таблиця 3.2 – Матриця пропуску системної шини

<i>#Bus</i>	P_G	P_L	Q_L	V	δ	<i>Type</i>
1	0.0	0.65	0.30	1.04	0.0	0
2	0.0	1.15	0.60	0.961	0.0	2
3	1.80	0.70	0.40	1.02	0.0	1
4	0.0	0.70	0.30	0.92	0.0	2
5	0.0	0.85	0.40	0.968	0.0	2

$N_{bus} := \text{rows}(\#Bus)$ number of buses

$N_{ser} := \text{rows}(Series)$ number of series elements

$N_{sh} := \text{rows}(Shunt)$ number of shunt elements

Визначте допоміжні масиви, що містять клери послідовного та шунтового обладнання, а також кількість і тип кожної шини.

$Is := \text{Re}(Series^{(1)})$

$Js := \text{Re}(Series^{(2)})$

$Ish := \text{Re}(Shunt^{(1)})$

$It := \text{Re}(Type)$

Обчисліть введення чистої потужності на кожній шині.

$i := 1 .. N_{bus}$

$Pb_i := P_{G_i} - P_{L_i}$

$Qb_i := -Q_{L_i}$

Ініціалізація Y_{bus} матриці.

$j := 1 .. N_{bus}$

$Y_{bus_{i,j}} := 0.0$

$m := 1 .. N_{ser}$

$$Y_{bus_{I_s}, I_s} := Y_{bus_{I_s}, I_s} + Series_{m,4} + \frac{1}{Series_{m,3}}$$

$$Y_{bus_{I_s}, J_s} := Y_{bus_{I_s}, J_s} - \frac{1}{Series_{m,3}}$$

$$Y_{bus_{J_s}, I_s} := Y_{bus_{J_s}, I_s} - \frac{1}{Series_{m,3}}$$

$$Y_{bus_{J_s}, J_s} := Y_{bus_{J_s}, J_s} + Series_{m,4} + \frac{1}{Series_{m,3}}$$

$m := 1 .. N_sh$

шунтуючі елементи.

$$Y_{bus_{I_s}, I_s} := Y_{bus_{I_s}, I_s} + Shunt_{m,2}$$

$$Y_{bus_{J_s}, J_s} := Y_{bus_{J_s}, J_s} + Shunt_{m,2}$$

Визначення функції введення чистої реальної та реактивної потужності за допомогою рівнянь (3.2).

$$f_p(k, x, y) := \sum_i (x_k \cdot x_i \cdot |Y_{bus_{k,i}}| \cdot \cos(\text{if}(Y_{bus_{k,i}} \neq 0, \arg(Y_{bus_{k,i}}), 0) + y_i - y_k))$$

$$f_q(k, x, y) := -\left(\sum_i (x_k \cdot x_i \cdot |Y_{bus_{k,i}}| \cdot \sin(\text{if}(Y_{bus_{k,i}} \neq 0, \arg(Y_{bus_{k,i}}), 0) + y_i - y_k)) \right)$$

Формування матриці Якобі:

$k := 2 .. N_bus$

$n := 2 .. N_bus$

Для алгоритму Ньютона-Рафсона необхідна матриця Якобі, сформо-

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

вана з частинних похідних матриці дійсної та реактивної потужності. Елементи матриці Якобі формуються наступним чином:

$$\frac{d}{dV_n} f_{p_k} Jac_{k-1, (n+N_{bus})-2} := V_k \cdot \left(|Y_{bus_{k,n}}| \right) \cdot \cos \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,n}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,n}} \right), 0 \right) + \delta_n - \delta_k \right)$$

$$\frac{d}{dV_k} f_{p_k} Jac_{k-1, (k+N_{bus})-2} := \sum_i V_i \cdot \left(|Y_{bus_{k,i}}| \right) \cdot \cos \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,i}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,i}} \right), 0 \right) + \delta_i - \delta_k \right) + V_k \cdot \left(|Y_{bus_{k,k}}| \right) \cdot \cos \left(\arg \left(Y_{bus_{k,k}} \right) \right)$$

$$\frac{d}{dV_n} f_{q_k} Jac_{(k+N_{bus})-2, (n+N_{bus})-2} := \left(-V_k \right) \cdot \left(|Y_{bus_{k,n}}| \right) \cdot \sin \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,n}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,n}} \right), 0 \right) + \delta_n - \delta_k \right)$$

$$\frac{d}{dV_k} f_{q_k} Jac_{(k+N_{bus})-2, (k+N_{bus})-2} := \sum_i \left(-V_i \right) \cdot \left(|Y_{bus_{k,i}}| \right) \cdot \sin \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,i}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,i}} \right), 0 \right) + \delta_i - \delta_k \right) - \left(V_k \right) \cdot \left(|Y_{bus_{k,k}}| \right) \cdot \sin \left(\arg \left(Y_{bus_{k,k}} \right) \right)$$

$$\frac{d}{d\delta_n} f_{p_k} Jac_{k-1, n-1} := \left(V_k \cdot V_n \cdot \left(|Y_{bus_{k,n}}| \right) \right) \cdot \sin \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,n}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,n}} \right), 0 \right) + \delta_n - \delta_k \right)$$

$$\frac{d}{d\delta_k} f_{p_k} Jac_{k-1, k-1} := \sum_i \left(V_k \cdot V_i \cdot \left(|Y_{bus_{k,i}}| \right) \right) \cdot \sin \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,i}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,i}} \right), 0 \right) + \delta_i - \delta_k \right) - \left(V_k \right)^2 \cdot \left(|Y_{bus_{k,k}}| \right) \cdot \sin \left(\arg \left(Y_{bus_{k,k}} \right) \right)$$

$$\frac{d}{d\delta_n} f_{q_k} Jac_{(k+N_{bus})-2, n-1} := \left(-V_k \right) \cdot V_n \cdot \left(|Y_{bus_{k,n}}| \right) \cdot \cos \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,n}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,n}} \right), 0 \right) + \delta_n - \delta_k \right)$$

$$\frac{d}{d\delta_k} f_{q_k} Jac_{k+N_{bus}-2, k-1} := \sum_i \left(V_k \cdot V_i \cdot \left(|Y_{bus_{k,i}}| \right) \right) \cdot \cos \left(\text{if} \left(Y_{bus_{k,i}} \neq 0, \arg \left(Y_{bus_{k,i}} \right), 0 \right) + \delta_i - \delta_k \right) - \left(V_k \right)^2 \cdot \left(|Y_{bus_{k,k}}| \right) \cdot \cos \left(\arg \left(Y_{bus_{k,k}} \right) \right)$$

$$Jac_{k-1, n+N_{bus}-2} := \text{if} \left(It_n = 1, 0, Jac_{k-1, n+N_{bus}-2} \right)$$

$$Jac_{k+N_{bus}-2, n-1} := \text{if} \left(It_k = 1, 0, Jac_{k+N_{bus}-2, n-1} \right)$$

$$Jac_{k+N_{bus}-2, n+N_{bus}-2} := \text{if} \left(It_k = 1, 0, Jac_{k+N_{bus}-2, n+N_{bus}-2} \right)$$

$$Jac_{k+N_{bus}-2, n+N_{bus}-2} := \text{if} \left(It_n = 1, 0, Jac_{k+N_{bus}-2, n+N_{bus}-2} \right)$$

$$Jac_{k+N_{bus}-2, k+N_{bus}-2} := \text{if} \left(It_k = 1, 1, Jac_{k+N_{bus}-2, k+N_{bus}-2} \right)$$

Інвертована матриця Якобі:

$$Jinv := Jac^{-1}$$

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Потік потужності від передаючого до приймального терміналу:

Невідповідність потужності ϵ :

$$\epsilon := \left(\sum_m \left(\left(P_{b_m} - f_p(m, V, \delta) \right)^2 + \text{if} \left(I_{t_m} = 1, 0, \left(Q_{b_m} - f_q(m, V, \delta) \right)^2 \right) \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\epsilon = 0.0000014$$

Потік потужності від приймального до передаючого терміналу:

$$V = \begin{bmatrix} 1.04 \\ 0.961 \\ 1.02 \\ 0.926 \\ 0.971 \end{bmatrix} \quad \delta = \begin{bmatrix} 0 \\ -6.312 \\ -3.698 \\ -10.9 \\ -6.18 \end{bmatrix} \text{ deg}$$

Величини напруги шини та фазові кути:

$$P_s := f_p(1, V, \delta) + P_{L_1}$$

Реальні втрати потужності в другій лінії становлять:

$$Max_it := 6 \quad P_{loss} = 0.03$$

Потік реактивної потужності від приймального до передаючого терміналу:

$$Iter := 1 .. Max_it \quad P_s = 2.345$$

$$P_{ij} := - \left(V_i \cdot V_j \cdot |ys| \cdot \cos(\arg(ys) + \delta_j - \delta_i) \right) + \left(V_i \right)^2 \cdot |ys| \cdot \cos(\arg(ys)) + \left(V_j \right)^2 \cdot |ysh| \cdot \cos(\arg(ysh))$$

Потік

$$P_{ji} := - \left(V_j \cdot V_i \cdot |ys| \cdot \cos(\arg(ys) + \delta_i - \delta_j) \right) + \left(V_j \right)^2 \cdot |ys| \cdot \cos(\arg(ys)) + \left(V_i \right)^2 \cdot |ysh| \cdot \cos(\arg(ysh))$$

$$m := 2 .. N_bus$$

Реальна і реактивна потужності слабину шини відповідно:

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

$$Num_1 := 0$$

Втрати лінії для другої лінії розраховуються таким чином: реактивної потужності від передаючого до приймального терміналу:

$$Q_s := f_q(1, V, \delta) + Q_{L1} \quad Q_s = 0.979$$

$$Q_{ij} := V_i \cdot V_j \cdot |ys| \cdot \sin(\arg(ys) + \delta_j - \delta_i) - (V_i)^2 \cdot |ys| \cdot \sin(\arg(ys)) + -((V_i)^2 \cdot |ysh| \cdot \sin(\arg(ysh)))$$

$$Q_{ji} := V_j \cdot V_i \cdot |ys| \cdot \sin(\arg(ys) + \delta_i - \delta_j) - (V_j)^2 \cdot |ys| \cdot \sin(\arg(ys)) + -((V_j)^2 \cdot |ysh| \cdot \sin(\arg(ysh)))$$

Втрати реактивної потужності в другій лінії становлять

$$P_{loss} := P_{ij} + P_{ji}$$

$$Q_{loss} := Q_{ij} + Q_{ji}$$

$$Q_{loss} = 0.095$$

3.4 Висновки по третьому розділу

Були проведені математичні розрахунки роботи компенсаційного засобу з використання конденсаторних батарей. Зроблено розрахунок і вибір КП. Проведено Моделювання роботи засобу в MathCAD. Отримано ітераційне розв'язання потоку навантаження. Визначені втрати в лініях.

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ВИСНОВКИ

Правильний вибір пристроїв компенсації реактивної потужності, як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації електромережі, зменшує їх перевантаження, підвищує коефіцієнт використання потужності трансформатора, зменшує імпульсні перешкоди в мережі та вплив вищих гармонік, а також гарантує дотримання стандартів якості електроенергії в компенсаційних мережах.

Спеціальні конденсаторні контактори згладжують стрибки комутаційних струмів, запобігають виникненню імпульсів і падінню напруги, а також збільшують термін служби і кількість дозволених замін перемикачів.

Установка комплектного обладнання з автоматичними регуляторами оптимізує режим компенсації як при максимальному, так і при мінімальному навантаженні і запобігає реактивній потужності, яка може виникнути в мережі. Незважаючи на різні вдосконалення, більшість сучасних автоматичних перемикачів функціонально ідентичні за своєю конструкцією.

Як показують розрахунки, сучасні конструкції дозволяють використовувати регульовані конденсатори потужності на 0,4 кВ з меншими вимогами до компенсаційної потужності. (150 кВАр і менш)

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бриж О.А. Підвищення надійності систем електропостачання зварювального цеху. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії. : Тернопіль.: ТНТУ.2019 – 90с.
2. Харченко В. Ф. Електропостачання міст та промислових підприємств : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, професійне спрямування «Електротехнічні системи електроспоживання») / В. Ф. Харченко, О. А. Якунін, В. Г. Воропай ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 238 с.
3. Калюжний Д. М. Конспект лекцій з курсу «Електропостачання та електрозбереження» (для студентів 4 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Електротехнічні системи електроспоживання) / Д. М. Калюжний, А. О. Карюк, І. Є. Щербак; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 124 с.
4. N. G. Hingorani., Laszio Gyugyi, “Understanding FACTS: Concept and Technology of Flexible AC Transmission Systems”, New York, 1999
5. P. Kundur, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994
6. T. J. Miller, “Reactive Power Control in Electric Systems”, John Wiley & Sons, Nov. 1982.
7. C. Taylor, “Power System Voltage Stability”, McGraw-Hill, 1994
8. “IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short –Circuit Capacities”, IEEE Std 1204-1997

										Арк.
										63
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ					

9. P.C.S. Krishnayya, R.J. Piwko, et al, "DC Transmission Terminating at Low Short Circuit Ratio Location", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, No. 3, July 1986, pp308-318.

10. C. V. Thio, J. B. Davies, and K. L. Kent, "Commutation Failures in HVDC Transmission Systems", IEEE Trans. Power Delivery, volume. 11, no. 2, April 1996.

11. A. Gavrilovic,, "AC/DC System Strength As Indicated By Short Circuit Ratios", AC/DC Conference,1991

12. Ефективне керування режимами систем забезпечення споживачів електричною енергією [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітніх програм «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» та «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,32 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 163 с.

13. Вказівки по проектуванню компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств/ Железко Ю.С. <http://prochan.com.ua/poleznaya-informacziya/teoriya/kompensacziya-reaktivnoj-moshhnosti.html>

14. Проектування систем електропостачання промислових підприємств : навчально-метод. посібник / Коліушко Д. Г., Асмолова Л. В. – Харків : НТУ «ХП», 2021. – 96 с

15. Красник В.В. Автоматичні пристрої компенсації реактивної потужності в електромережах підприємств. М.: Вища школа, 1983. 136с.

16. Левін М.С., Лещинська Т.Б. Особливості компенсації реактивної потужності в сільських мережах 0,3 8 кВ. Збірник наукових праць МГАУ ім. В.П. Горячкіна. Електрифікація, автоматизація та комп'ютеризація сільського господарства. М: 2000, С. 52-61

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

17. Статичні компенсатори. – Режим доступу:
<https://jak.bono.odessa.ua/articles/statichni-kompensatori-studopedija.php>

18. Середньозважений коефіцієнт потужності за час t (5) де i -відповідно витрата активної та реактивної потужності. – Режим доступу:
<https://jak.bono.odessa.ua/articles/serednozvazhenij-koeficient-potuzhnosti-za-chas-t.php>

19. Види отримання ємнісної потужності. Машинні компенсатори, синхронні електродвигуни, конденсаторні батареї і лінії електропередачі. . – Режим доступу: http://ni.biz.ua/5/5_11/5_119709_vidi-polucheniya-emkostnoy-moshchnosti-mashinnie-kompensatori-sinhronnie-elektrodivigateli-kondensatornie-batarei-i-linii-elektroperedachi-kak-ispolzuyutsya-poluchennje-vidi-energii.html

20. Демов А. О., Демов О. Д., Войнаровський А. Ж., Паламарчук О. П. Особливості впровадження компенсувальних установок у електричні мережі споживачів у сучасних економічних умовах. Енергетика та електрифікація. 2006. №2. С. 12-15.

21. Соломчак О. В. Методика вибору та порівняння варіантів компенсації реактивної потужності. Енергетика та електрифікація. 2004. №9. С. 23-27.

22. Демов О. Д. Компенсація втрат реактивної реактивної потужності в трансформаторах 10/0,4 кВ розподільних мереж енергопостачальних компаній / Демов О. Д., Миндюк А. Б., Бандура І. О // Новини енергетики – 2011. С. 27 – 31.

23. Правила улаштування електроустановок. Режим доступу:
<http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

24. Регулятор установки компенсації реактивної потужності BR6000 –
– Режим доступу: http://elsnab.kiev.ua/wp-content/uploads/2018/01/pasport_BR6000-R12_v5rus_2010_.pdf

25. Літковець С. П. Розроблення методу багатокординатного керування статичними тиристорними компенсаторами з примусовою комутацією:

									Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА23.00.00.000ПЗ				65

дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2016. 198 с.

26. General Specification for Automatic Capacitor Bank for Electrical Networks up to 12KV [Електроний ресурс]/ URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Specification+for+tender&p_File_Name=General+Specifications+for+Automatic+Capacitor+Bank+12+KV.zip&p_Doc_Ref=Dweb-MV-doc6-SA

27. Дипломний проект на здобуття ступеня бакалавра: Компенсація реактивної потужності промислової підстанції 35/10 кВ з заміною обладнання ЗРП 10 кВ/Клименок Н. С. // Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021, - 71 с. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/53344/3/Klymenok_bakalavr.pdf

28. General Specification for Automatic Capacitor Bank for Electrical Networks up to 12KV [Електроний ресурс]/ URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Specification+for+tender&p_File_Name=General+Specifications+for+Automatic+Capacitor+Bank+12+KV.zip&p_Doc_Ref=Dweb-MV-doc6-SA

					БРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66