

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Безсмертний Дмитро Миколайович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Розробка та обґрунтування системи автоматичної компенсації
реактивної потужності навантаження в мережі 6-10 кВ.**

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Безсмертний Д.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов М.Я.

(прізвище, ім'я, по батькові)

**д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології**

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Безсмертний Д.В. Розробка та обґрунтування системи автоматичної компенсації реактивної потужності навантаження в мережі 6-10 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Якість електроенергії є однією з основних проблем, що стосуються електричних енергетичних систем, і її необхідно ретельно досліджувати для забезпечення надійної мережі електропостачання. Компенсація реактивної потужності є засобом досягнення якісної та надійної системи електропостачання. В роботі ми зроблено порівняльний огляд технологій компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності; синхронний компенсатор; статичний VAR-компенсатор; статичний синхронний компенсатор; технологія компенсації реактивної потужності

ABSTRACT

Bezsmertnyi D.V. Development and substantiation of an automatic reactive power compensation system for load in a 6-10 kV network. Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

Power quality is one of the main problems concerning electrical power systems and needs to be carefully investigated to ensure a reliable power supply network. Reactive power compensation is a means of achieving a qualitative and reliable power supply system. In this work, we provide a comparative review of reactive power compensation technologies.

Keywords: reactive power compensation; synchronous condenser; static VAR compensator; static synchronous compensator; reactive power compensation technology.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ПРИНЦИПИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	6
1.1. Шунтова компенсація	6
1.2. Послідовне компенсування	8
Висновок по першому розділу.	10
2. ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ: ОГЛЯД.	12
2.1. Синхронні конденсатори	13
2.1.1. Визначення та огляд.	13
2.1.2. Типи синхронних компенсаторів	15
2.2. Статичний компенсатор реактивної потужності (SVC)	16
2.2.1. Визначення та огляд	16
2.2.2. Типи статичних компенсаторів реактивної потужності (SVC)	17
Висновок по другому розділу	20
3. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ	22
3.1. Необхідність безконтактного пристрою для автоматизації компенсації реактивної потужності	22
3.2. Вимоги до компенсації реактивної потужності на промисловому підприємстві	23
3.3. Розробка схем безконтактних пристроїв автоматичного регулювання потужності	25
Висновок по третьому розділу	27
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Електричні мережі напругою 6–10 кВ є ключовою ланкою розподілу електроенергії для промислових підприємств, об'єктів інфраструктури та комунального господарства. Значна частина приєднаних споживачів цих мереж має індуктивний характер (електродвигуни, трансформатори, зварювальні установки, насосні та компресорні агрегати), що зумовлює підвищене споживання реактивної потужності. Наявність надлишкової реактивної складової призводить до збільшення струмів у лініях і силовому обладнанні, зростання втрат активної енергії, погіршення рівнів напруги, зниження пропускної здатності мережі та, як наслідок, до додаткових витрат на експлуатацію й обмеження можливостей підключення нових навантажень.

Традиційні підходи до компенсації реактивної потужності, що базуються на фіксованих або ступінчасто керованих батареях конденсаторів, не завжди забезпечують необхідну точність і швидкодію за умов змінного графіка навантаження та коливань напруги в мережі 6–10 кВ. Неправильно вибраний режим компенсації може спричиняти як не до компенсацію, так і перекомпенсацію, підвищувати ризик резонансних явищ, впливати на якість електроенергії та надійність роботи обладнання. У зв'язку з цим **актуальним** є впровадження автоматичних систем компенсації, здатних адаптивно підтримувати задані параметри (коефіцієнт потужності, рівень напруги, потоки реактивної потужності) з урахуванням реальних режимів роботи мережі.

Новизна. Обґрунтовано актуальність застосування синхронних компенсаторів як енергоефективної, надійної та стійкої технології регульованої компенсації реактивної потужності в сучасних електросистемах з урахуванням зростання автоматизованих навантажень та вимог до якості електроенергії.

Мета. Дослідити та обґрунтувати доцільність використання технологій компенсації реактивної потужності для підвищення якості електроенергії,

надійності та ефективності роботи електросистем при зростанні частки автоматизованих споживачів і ВДЕ.

Об’єкт дослідження. Процеси керування реактивною потужністю та підтримання параметрів режиму (напруга, частота, якість електроенергії) в електричних енергосистемах.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Безсмертний Д.М.

РОЛЬ СИНХРОННИХ КОМПЕНСАТОРІВ У РЕГУЛЮВАННІ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

2. Безсмертний Д.М., Яценко Б.Л.

ВИМОГИ ДО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

Наукові читання – 2026: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч.2. 119 с.

РОЗДІЛ 1

ПРИНЦИПИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

У лінійному колі реактивна потужність визначається як змінна складова миттєвої потужності, з частотою, що дорівнює 100/120 Гц у системах 50 або 60 Гц. Реактивна потужність, що генерується джерелом змінної напруги, накопичується в конденсаторі або реакторі протягом чверті циклу, а протягом наступної чверті циклу повертається назад до джерела живлення. Іншими словами, реактивна потужність коливається між джерелом змінної напруги та конденсатором або реактором, а також між ними, з частотою, що дорівнює подвоєному номінальному значенню (50 або 60 Гц). З цієї причини її можна компенсувати за допомогою генераторів реактивної потужності (VAR, VAR-генераторів), уникаючи її циркуляції між навантаженням (індуктивним або ємнісним) та джерелом, і таким чином покращуючи стабільність напруги енергосистеми. Компенсація реактивної потужності може бути реалізована за допомогою VAR-генераторів, підключених паралельно або послідовно. Принципи як шунтової, так і послідовної компенсації реактивної потужності описані нижче[1].

1.1. Шунтова компенсація

На рис. 1.1 показано принципи та теоретичний вплив шунтової компенсації реактивної потужності в базовій системі змінного струму, яка складається з джерела V_1 , лінії електропередачі та типового індуктивного навантаження. На рис. 1(а) показано систему без компенсації та відповідну векторну діаграму. На векторній діаграмі фазовий кут струму I_P пов'язаний зі стороною навантаження V_2 , що означає, що активний струм знаходиться у фазі з напругою навантаження. Оскільки навантаження вважається індуктивним, воно потребує реактивної потужності для належної роботи, і, отже, джерело повинно її забезпечувати, збільшуючи струм від генератора та через лінії електропередачі. Якщо реактивна потужність подається поблизу

навантаження, струм лінії може бути зменшений або мінімізований, що зменшує втрати потужності та покращує регулювання напруги на клеммах навантаження. Це можна зробити трьома способами: 1) за допомогою конденсатора; 2) за допомогою джерела напруги; або 3) за допомогою джерела струму. На рис. 1.1(b) для компенсації реактивної складової струму навантаження використовується пристрій на основі джерела струму I_Q . В результаті регулювання напруги в системі покращується, а реактивна складова струму від джерела зменшується або майже усувається.

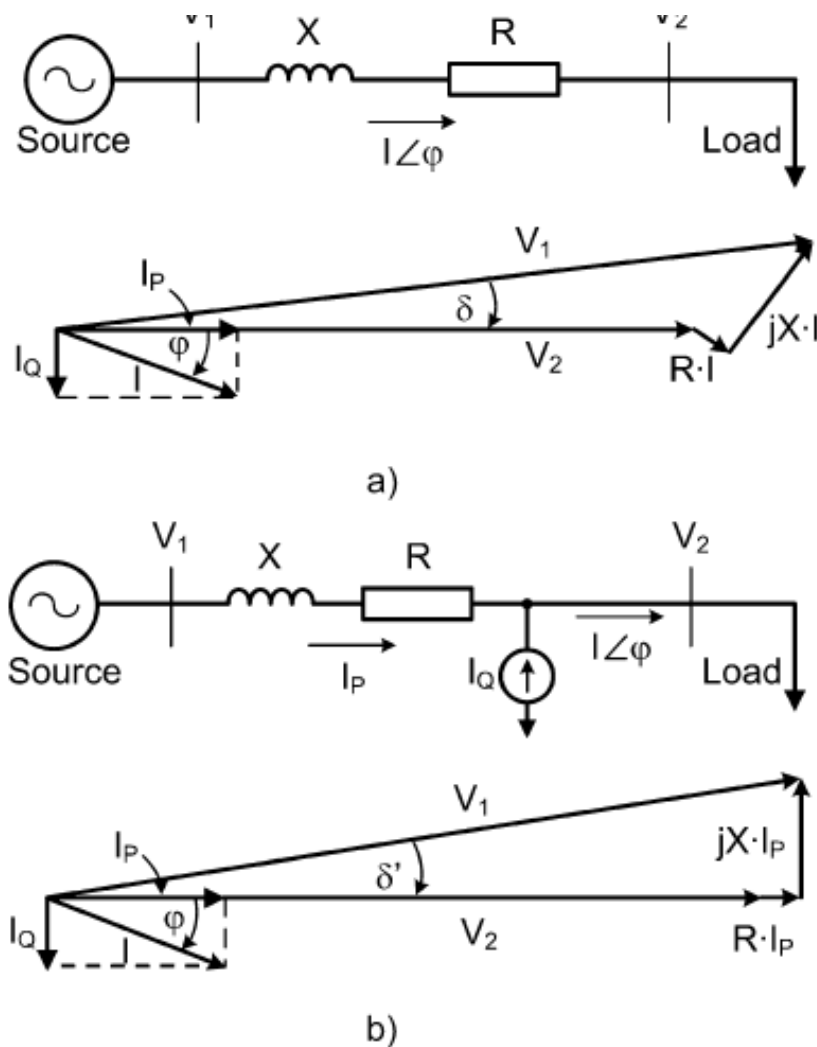


Рисунок 1.1 Принципи шунтової компенсації в радіальній системі змінного струму. (a) Без реактивної компенсації. (b) Шунтова компенсація з джерелом струму.

Якщо навантаження потребує випереджаючої компенсації, то знадобиться індуктор. Крім того, джерело струму або джерело напруги можна використовувати для індуктивної шунтової компенсації. Основною перевагою використання генераторів реактивної потужності на основі джерела напруги або струму (замість індукторів або конденсаторів) є те, що згенерована реактивна потужність не залежить від напруги в точці підключення.

1.2. Послідовне компенсування

VAR-компенсація також може бути послідовного типу. Типові системи послідовної компенсації використовують конденсатори для зменшення еквівалентного реактивного опору лінії електропередачі на номінальній частоті. Підключення послідовного конденсатора генерує реактивну потужність, яка в саморегульований спосіб врівноважує частину реактивного опору передачі лінії. Результатом є покращена функціональність системи передачі електроенергії завдяки:

- 1) підвищенню кутової стійкості енергетичного коридору;
- 2) покращенню стійкості напруги коридору;
- 3) оптимізованому розподілу потужності між паралельними ланцюгами.

Подібно до шунтової компенсації, послідовна компенсація також може бути реалізована за допомогою пристроїв з джерелом струму або напруги, як показано на рис. 1.2. На рис.1. 2(a) показана та ж енергосистема, що й на рис. 1(a), також із опорним кутом в V_2 . А на рис.1. 2(b) показані результати, отримані при послідовній компенсації через джерело напруги, яке знову було налаштоване для забезпечення одиничного коефіцієнта потужності в точці V_2 . Однак стратегія компенсації відрізняється порівняно з шунтовою компенсацією. У цьому випадку між лінією та навантаженням було додано напругу V_{COMP} , щоб змінити кут V_2^1 , який тепер є напругою на стороні навантаження. За допомогою відповідного регулювання величини V_{COMP} , знову можна досягти одиничного коефіцієнта потужності в точці V_2 . Як видно з векторної діаграми на рис. 2(b), V_{COMP} генерує напругу, яка має протилежний

напрямок до падіння напруги в індуктивності лінії, оскільки вона відстає від струму I_P .

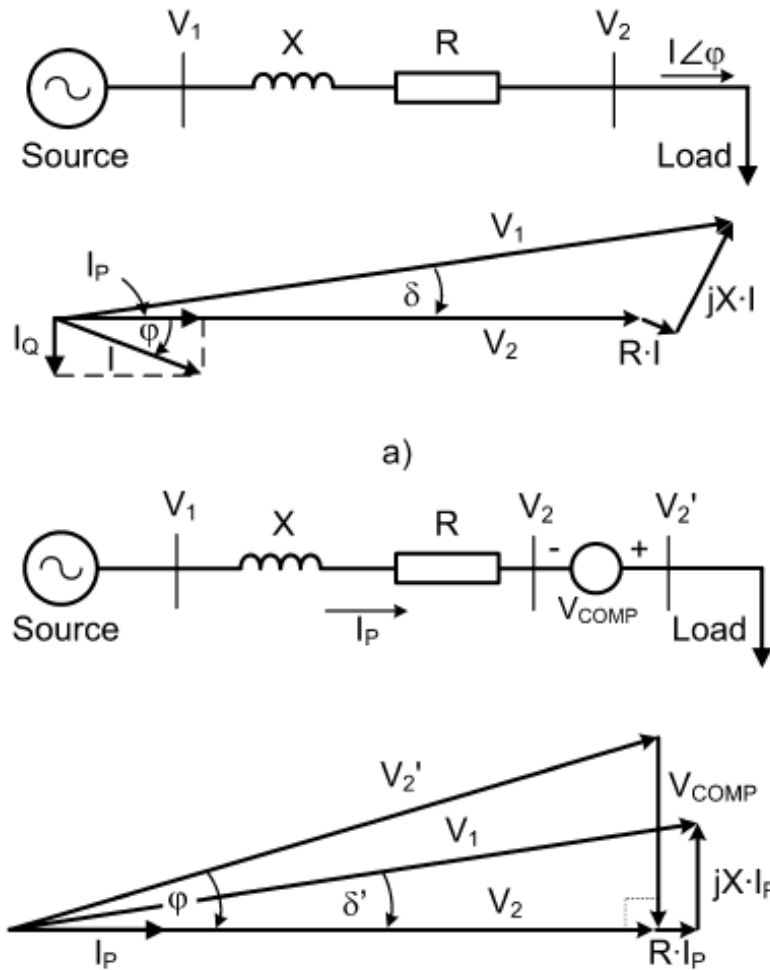


Рисунок 1.2. Принципи послідовної компенсації. а) Та сама система, що й на рис. 1(а), без компенсації. б) Послідовна компенсація з джерелом напруги.

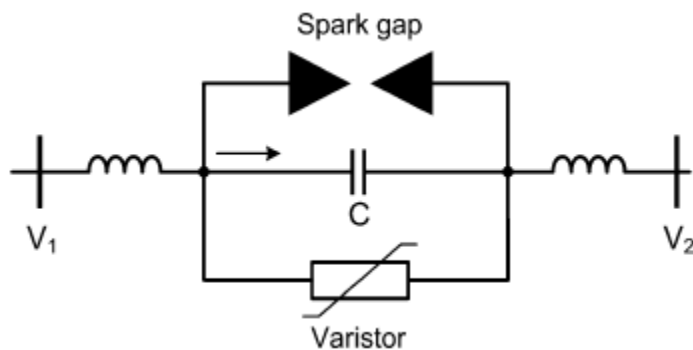


Рисунок 1.3 Конденсаторний компенсатор послідовного включення та пов'язана з ним система захисту.

Як вже згадувалося, послідовна компенсація за допомогою конденсаторів є найпоширенішою стратегією. Послідовні конденсатори встановлюються послідовно з лінією електропередачі, як показано на рис.1. 3, що означає, що все обладнання має бути встановлено на платформі, яка повністю ізольована на системну напругу (обидва термінали знаходяться під напругою лінії). На цій платформі розташований головний конденсатор разом із схемами захисту від перенапруги. Захист від перенапруги є ключовим фактором проектування, оскільки батарея конденсаторів має витримувати наскрізний струм короткого замикання, навіть при серйозному замиканні поблизу. Первинний захист від перенапруги зазвичай включає нелінійні металооксидні варистори, іскровий проміжок і швидкий байпасний вимикач. Вторинний захист досягається за допомогою електроніки, встановленої на землі, яка працює на основі сигналів від оптичних струмових перетворювачів у високовольтному ланцюзі. Незалежно від типу джерела або конфігурації системи, необхідно враховувати різні вимоги для успішної роботи генераторів реактивної потужності. Деякі з цих вимог – це простота, керованість, динаміка, вартість, надійність і гармонійні спотворення. У наступних розділах описано різні рішення, що використовуються для генерації реактивної потужності, з їхніми відповідними принципами роботи та характеристиками компенсації[2].

Висновок по першому розділу

У статті розкрито фізичну сутність реактивної потужності як змінної складової миттєвої потужності, що періодично накопичується в індуктивних/ємнісних елементах і повертається до джерела, створюючи небажану циркуляцію струмів у мережі. Показано, що компенсація реактивної потужності дає змогу зменшити струм у лініях, знизити втрати та покращити регулювання і стабільність напруги.

Розглянуто два базові підходи: “шунтову” та “послідовну” компенсацію. Шунтова компенсація, за умови розміщення джерела (Q) поблизу навантаження, зменшує або практично усуває реактивну складову струму від

джерела; вона може реалізовуватися конденсаторами/реакторами або керованими пристроями на основі джерела струму чи напруги, перевагою яких є відносна незалежність генерованого (Q) від напруги в точці приєднання. Послідовна компенсація переважно виконується конденсаторами для зменшення еквівалентного реактивного опору лінії, що підвищує кутову та напругову стійкість коридору і оптимізує перерозподіл потужності між паралельними ланцюгами; водночас підкреслено критичність систем захисту від перенапруги і струмів КЗ (варистори, іскровий проміжок, швидкий байпас).

Узагальнено, що вибір і проектування засобів VAR-компенсації мають базуватися на сукупності вимог — простота, керованість, динамічні властивості, вартість, надійність і гармонічні спотворення, оскільки саме баланс цих критеріїв визначає ефективність підтримання якості електроенергії та стійкої роботи енергосистеми.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ: ОГЛЯД

З огляду на те, що основна увага переміщується на автоматизацію, головною проблемою для ключових гравців є їхня здатність забезпечувати ідеальну потужність для використання цими автоматизованими пристроями, і при цьому за низькою вартістю та високою ефективністю. Таким чином, виникає потреба у подальшому просуванні та дослідженні енергоефективних, надійних та стійких технологій, таких як синхронні компенсатори для компенсації реактивної потужності в електричних енергосистемах [3]. Реактивна потужність (Q) – це вираз, що використовується для позначення уявної потужності від індуктивних навантажень, таких як двигуни, або ємнісних навантажень, які зазвичай не є настільки поширеними. Вона широко обчислюється в одиницях VAR, тобто вольт-амперах реактивних. Для підтримки найбільш вигідних умов для енергосистеми з інженерної та економічної точок зору, дуже важливо завжди застосовувати найбільш вигідні технології компенсації реактивної потужності в електричній енергосистемі. Компенсація реактивної потужності визначається як управління реактивною потужністю для покращення виробництва змінного струму (AC) в електричній мережі. Ідея компенсації реактивної потужності охоплює широку та різноманітну область проблем як системи, так і споживачів, переважно пов'язаних з питаннями якості електроенергії, оскільки більшість проблем з якістю електроенергії можна вирішити за допомогою відповідного контролю реактивної потужності [4]. Основна функція будь-якої електричної енергосистеми полягає в надійній передачі електроенергії з добре синхронізованою частотою та напругою. Надійні та ефективні енергосистеми WECS є одним з найпривабливіших варіантів серед усіх відновлюваних джерел енергії. Компенсація реактивної потужності є ефективним методом

покращення електричної мережі, існує потреба в регульованій компенсації реактивної потужності, яку можна здійснити за допомогою синхронних компенсаторів, статичних компенсаторів реактивної потужності (SVC) або статичних синхронних компенсаторів (STATCOM) [4,5].

2.1. Синхронні конденсатори

2.1.1. Визначення та огляд

Синхронний конденсатор – це синхронний пристрій, який виробляє реактивну потужність, що випереджає активну потужність за фазою на 90 градусів [6]. Це обладнання, подібне до синхронного двигуна, вал якого ні з чим не з'єднаний, а вільно обертається без обмежень. Його мета полягає не в перетворенні електричної енергії в механічну або навпаки, а в регулюванні ситуацій в електричній мережі передачі. Його збудження регулюється регулятором напруги для генерації або поглинання реактивної потужності, необхідної для зміни напруги в мережі або покращення коефіцієнта потужності. Кількість реактивної потужності від синхронного конденсатора може стабільно регулюватися. Реактивна потужність від синхронного конденсатора може нарощувати реактивний струм при зниженні напруги. Проте, синхронні машини мають вищі енергетичні втрати. Більшість синхронних конденсаторів, підключених до електричних мереж, мають номінальну потужність від 20 МВАр до 200 МВАр, і значна їх кількість охолоджується воднем. Немає загрози вибуху, якщо концентрація водню підтримується в належному стані вище 70%, зазвичай вище 91% [7].

Раніше синхронні конденсатори широко використовувалися як засіб забезпечення компенсації реактивної потужності до появи пристроїв на основі силової електроніки. Значна кількість синхронних конденсаторів використовувалася в електричних енергетичних системах з кінця 1920-х до кінця 1970-х років. Синхронні конденсатори були важливими в системі регулювання напруги та реактивної потужності протягом понад 50 років. Практично, синхронний конденсатор – це просто синхронна машина,

підключена до енергосистеми. Після синхронізації пристрою струм збудження регулюється для генерації або поглинання реактивної потужності, необхідної системам живлення змінного струму. Пристрій може забезпечувати безперервне регулювання реактивної потужності при використанні з відповідною схемою автоматичного збудження. Синхронні конденсатори використовувалися як на розподільчих, так і на передавальних рівнях напруги для поліпшення стабільності та підтримки напруги в межах бажаних меж за різних режимів навантаження та надзвичайних обставин [8]. Однак, синхронні конденсатори сьогодні використовуються нечасто, оскільки потребують значних фундаментів і значної кількості пускових і захисних пристроїв. Вони також впливають на струм короткого замикання і не можуть бути відрегульовані досить швидко для балансування швидких змін навантаження. Крім того, їхні втрати значно вищі, ніж ті, що пов'язані зі статичними компенсаторами, і вартість значно вища, ніж у статичних компенсаторів. Їх перевага полягає у високій тимчасовій перевантажувальній здатності. Синхронні компенсатори забезпечують підтримку напруги в мережі, підтримуючи ефективну та надійну роботу електричних мереж шляхом компенсації реактивної потужності та додаткової здатності до короткого замикання [9]. Синхронні компенсатори є добре прийнятою технологією для забезпечення реактивної потужності та вирішення проблем коефіцієнта потужності в промислових умовах. Надійні енергетичні системи Синхронні компенсатори розроблені з високою точністю, щоб відповідати вимогам гібридних систем відновлюваної енергетики. У порівнянні з дизель-генераторами, вони допомагають дизелям у регулюванні напруги. У періоди високої вітрової та/або сонячної активності дизель-генератори вимикаються, і синхронний компенсатор самостійно регулює напругу. Рішення на основі синхронних компенсаторів впроваджуються по всьому світу, щоб відігравати роль в оптимальному використанні енергетичних ресурсів і забезпечувати підтримку мережі зараз і в майбутньому, з метою досягнення надійного,

безпечного, ефективного, результативного та сталого електропостачання [10].

Робота синхронного компенсатора зображена на рисунку 1.

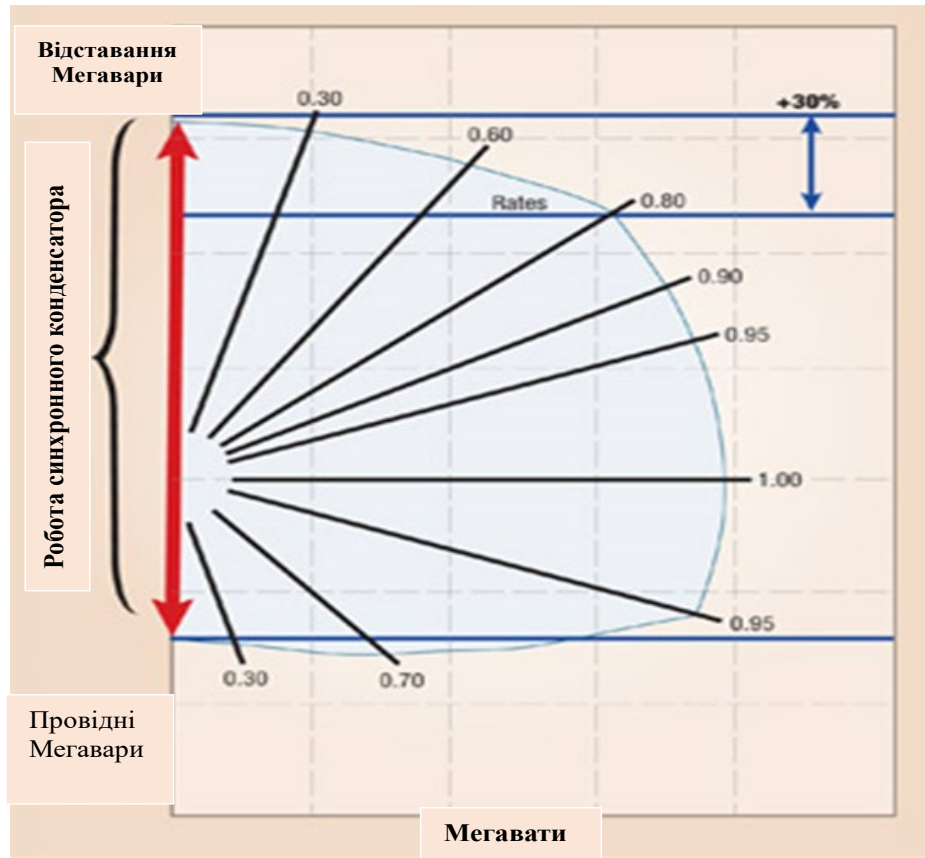


Рисунок 2. 1. Потужність реактивної енергії синхронного конденсатора.

2.1.2 Типи синхронних компенсаторів

Традиційний синхронний компенсатор: Це синхронний двигун без будь-якого механічного навантаження. Його поле регулюється регулятором напруги для генерування або споживання реактивної потужності для підтримки напруги в електричній енергосистемі або для підтримки коефіцієнта потужності системи на заданому рівні. Встановлення та експлуатація синхронних компенсаторів ідентичні великим електричним двигунам. Після синхронізації агрегату струм збудження регулюється для генерування або споживання реактивної потужності за потреби системи змінного струму. Машина може забезпечувати безперервне регулювання реактивної потужності при використанні з відповідним автоматичним збудником. Збільшення струму збудження обладнання призводить до забезпечення магнітної потужності

(кВАр) в електричну енергосистему. Його головною перевагою є легкість регулювання величини компенсації. [11]. Однофазна схема з синхронним компенсатором показана на рис. 2.2.

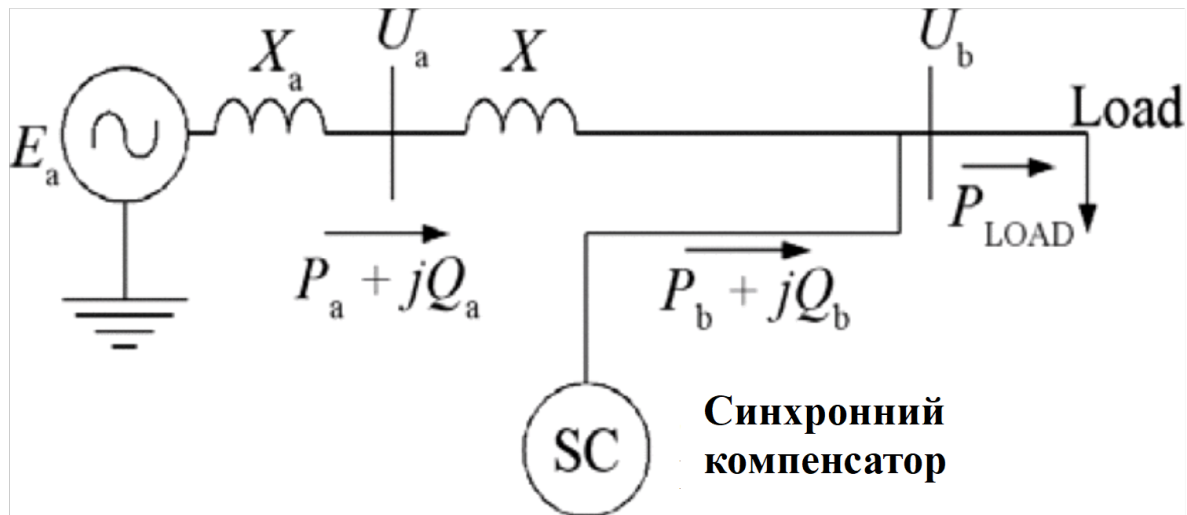


Рисунок 2.2. Однофазна векторна діаграма з синхронним компенсатором, підключеним до мережі.

2.2. Статичний компенсатор реактивної потужності (SVC)

2.2.1 Визначення та огляд

Статичний компенсатор реактивної потужності (SVC) - це генератор реактивної потужності, керований тиристорами (оскільки він керований тиристорами, тому і називається статичним), що може генерувати як випереджаючу, так і відстаючу реактивну потужність, або обидві. Це обладнання також називають статичним компенсатором реактивної потужності. SVC - це високовольтний пристрій, який ефективно регулює напругу мережі в точці приєднання. Його основна функція полягає в підтримці напруги мережі постійно на заданому опорному рівні. Іншими характеристиками управління SVC є: регулювання напруги, регулювання реактивної потужності, демпфування коливань потужності та регулювання не симетрії. Конструкція та конфігурація пристрою SVC завжди модифікуються відповідно до конкретних специфікацій проекту. SVC є одним з регуляторів,

заснованих на силовій електроніці та інших статичних пристроях, відомих як гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS), які використовуються для покращення здатності та гнучкості передавальної мережі.[12]. Статичний компенсатор реактивної потужності – це статичний генератор або поглинач реактивної потужності, підключений паралельно, вихід якого регулюється для обміну ємнісним або індуктивним струмом з метою підтримки в належному стані або регулювання певних параметрів електричної енергосистеми, зазвичай напруги шин. SVC заснований на тиристорах без можливості вимкнення затвором. Концепція роботи та особливості SVC зі змінним реактивним імпедансом, реалізованого на тиристорах, включає дві основні частини та їх об'єднання: реактор, керований тиристорами (TCR), і реактор, паралельно-зустрічно з'єднаних тиристорами (TSR); і конденсатор. Завданнями розробки SVC є компенсація реактивної потужності та не симетрії навантаження, і з використанням традиційних величин у своєму регуляторі, він може бути використаний у спільних методах компенсації для інтелектуальних мереж [13].

2.2.2. Типи статичних компенсаторів реактивної потужності (SVC)

Тиристорне-керований реактор (TCR): TCR визначається як шунтова з'єднаний тиристорне-керований індуктор, ефективний реактивний опір якого регулюється безперервно шляхом часткового керування провідністю тиристорного клапана. Тиристорне-керований реактор (TCR) є одним із традиційних SVC, використовуваних у сфері підвищення якості електроенергії. У конфігурації TCR у парі з фіксованими конденсаторами, при експлуатації системи з малою потребою в реактивній потужності, майже 100% реактивної потужності виробляється в блоці реактора, і загальна реактивна потужність системи зменшується. Він може поглинати сталу реактивну потужність на первинній частоті мережі електропостачання, але генерує значні непарні гармоніки, які можуть спричиняти небажані наслідки, такі як перевищення струмів, додаткові втрати та перешкоди в телекомунікаційних

системах [12,13]. Однолінійна схема для компенсації реактивної потужності та зменшення мерехтіння напруги в електроенергетичній системі, що містить дугову електропіч (EAF) із тиристорне регульованим реактором компенсації та фіксованим конденсатором (TCR/FC), показана на рис. 2.3. TCR також ілюстровано на рис. 2.4.

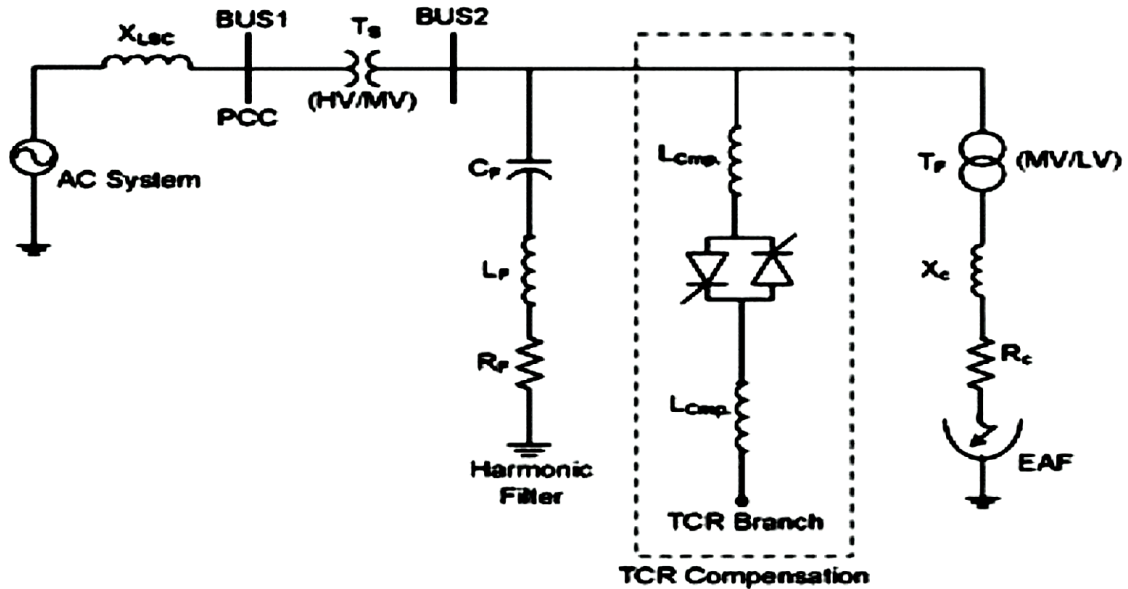


Рисунок 2. 3. Конфігурація TCR/FC, до електродугової печі (EAF).

Тиристорне-керований реактор (TSR): Це визначається як паралельно з'єднаний тиристорне-керований індуктивний реактор, чий ефективний реактивний опір змінюється ступінчасто шляхом повного або нульового пропускання струму через тиристорний вентиль. Тиристорне-керовані реактори є шунтовими компенсаторами, які можуть споживати реактивну потужність. Принцип роботи TSR простий; він має затримку на півперіоду і не генерує гармоніки. Найпоширеніша конструкція SVC складається з постійного шунтового конденсатора (FC) і тиристорного керованого реактора (TCR). Фільтри зазвичай використовуються для поглинання гармоніки, що утворюються конструкцією SVC і великими промисловими навантаженнями. Типовий TSR можна побачити на рисунку 5 [14].

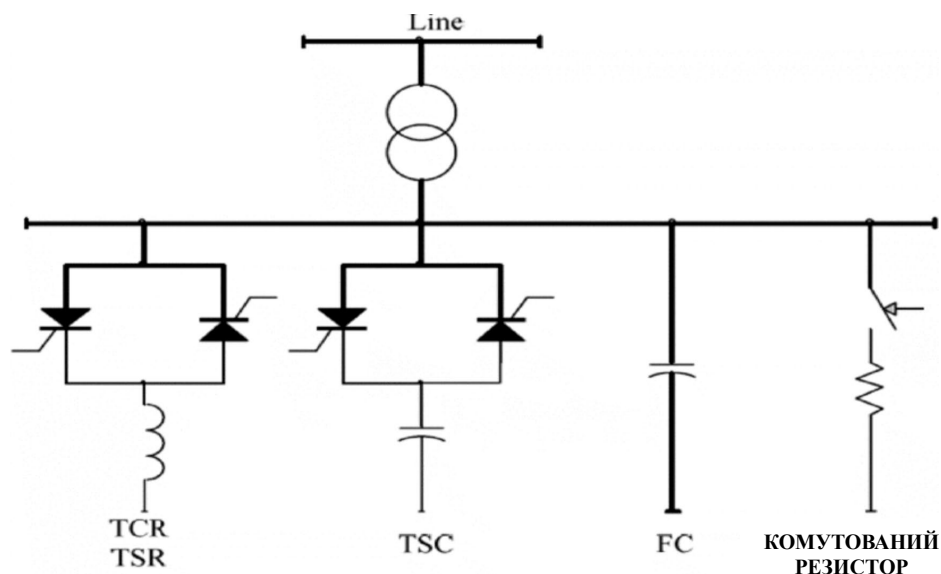


Рисунок 2.4. Статичні компенсатори реактивної потужності (SVC): TCR/TSR, TSC, FC та механічно комутований резистор.

Тиристорне-керований конденсатор (TSC): Відповідно до визначення TSC — це шунтове з'єднаний конденсатор із тиристорною комутацією, у якому загальний реактивний опір змінюється ступнево за рахунок режимів повної провідності або нульової провідності тиристорного клапана. Він має подібний склад і такий самий режим роботи, як TSR, але реактор замінено конденсатором. Через особливості конденсатора реактивний опір може бути або повністю підключеним, або цілком відключеним (нульовим) [15,16]. Кількість секцій конденсатора визначає зміну реактивної потужності TSC.

Комбінований тиристорне-керований реактор і тиристорне-включений реактор (TCR/TSR): TCR і TSR обидва складаються зі шунтового реактора, керованого двома паралельними, зустрічно ввімкненими тиристорами. TCR регулюється шляхом зміни кута керування (firing angle) для забезпечення безперервної роботи, тоді як TSR регулюється без керування кутом відкриття, що забезпечує ступінчасту зміну реактансу. TSC має таку ж конструкцію і режим роботи, як TSR, але реактор замінено конденсатором. Через особливості конденсатора реактивний опір може бути або повністю підключеним, або цілком відключеним (нульовим). За різних комбінацій TCR/TSR, TSC і

стаціонарних конденсаторів SVC може задовольняти різні вимоги щодо поглинання або подачі реактивної потужності у трансмісійну лінію або з неї. Система TSR забезпечує ступінчасту зміну струму, а TCR забезпечує плавну зміну струму[15]. Щоб компенсувати обмеження TSC, змінні реактори підключаються паралельно, щоб можна було тонко налаштовувати загальну реактивну потужність мережі. Комбінований тип поєднує переваги як TCR, так і TSC; він зазвичай підходить для конденсатора в підстанції для ліній електропередачі, які повинні регулювати реактивну потужність як для ведучої, так і відстаючої фаз; зазвичай він перебуває в стані очікування при нулі (0) ВАР і повинен швидко змінювати реактивну потужність у разі виникнення короткого замикання на лінії.

Відповідні комбінації технологій статичного компенсатора (SVC) зазвичай обираються на основі декількох чинників, таких як вимоги до швидкодії, мінімальна ширина регулювання, експлуатаційна ефективність та економічність.

Висновок по другому розділу

Компенсація реактивної потужності є ключовим інструментом підвищення якості електроенергії та надійності роботи енергосистеми, оскільки безпосередньо впливає на рівні напруги, коефіцієнт потужності, втрати та стійкість режимів, особливо в умовах зростання частки автоматизованих споживачів і відновлюваних джерел. Огляд показує, що для керованої (регульованої) компенсації найчастіше застосовують синхронні компенсатори та статичні пристрої FACTS (зокрема SVC і STATCOM).

Синхронні компенсатори забезпечують плавне регулювання Q , підтримку напруги та додаткову здатність до короткого замикання, мають високу короткочасну перевантажувальну здатність і залишаються актуальними для мережевої підтримки, та у гібридних ВДЕ-системах. Водночас їхні недоліки — вищі втрати, значні габарити/фундаменти, складніший пуск і захист, вплив

на струми КЗ та обмежена швидкодія — звужують сферу застосування порівняно зі статичними рішеннями.

SVC як тиристорне-керований шунтовий компенсатор ефективно стабілізує напругу у вузлі приєднання та може працювати як у ємнісному, так і в індуктивному режимі. Різновиди (TCR, TSR, TSC та їх комбінації) дозволяють підібрати компроміс між плавністю регулювання, швидкодією, гармонічними спотвореннями (особливо для TCR) та економічністю; практично це часто потребує фільтрації гармоніки і оптимального комбінування гілок.

Отже, вибір технології компенсації визначається вимогами конкретного вузла мережі (динаміка навантаження, допустимі гармоніки, потреба у швидкому регулюванні, рівень КЗ, капітальні та експлуатаційні витрати). Загальна тенденція — подальше впровадження керованих, енергоефективних і надійних засобів компенсації реактивної потужності для забезпечення стабільної напруги та ефективної роботи сучасних електросистем.

РОЗДІЛ 3

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ

3.1. Необхідність безконтактного пристрою для автоматизації компенсації реактивної потужності

Підвищення надійності систем електропостачання, розробка та впровадження енергозберігаючих технологій і способів зменшення втрат електроенергії є одним із актуальних питань сьогодення. Надійність системи електропостачання пов'язана з безпечним виконанням перемикань в системі шляхом вмикання, вимикання, переведення живлення на споживачів. На ефективність системи електропостачання впливає багато факторів, одним з основних серед них є оптимальний запуск, регулювання потужності конденсаторних установок [17,19]. Забезпечення економічної роботи конденсаторних установок можливе шляхом регулювання їх потужності при зміні величини і характеру навантажень, залежно від напруги в точці підключення конденсаторів [19]. Безконтактні пристрої для комутації та регулювання потужності конденсаторних установок відрізняються швидкодією, тривалим терміном служби, тихою роботою та іншими перевагами [18]. Останніми роками пристрої компенсації реактивної потужності з автоматичним регулюванням впроваджуються в системах електропостачання великих промислових і комерційних споживачів. Основною причиною такого застосування стала необхідність підтримки напруги в мережі на прийнятному рівні та компенсація реактивної потужності для зменшення втрат в розподільних мережах середньої напруги [18]. Для забезпечення найбільш економічних режимів роботи систем електропостачання використовується регулювання потужності компенсуючих пристроїв. Регулювання реактивної потужності, що генерується конденсаторами, може здійснюватися ступінчасто шляхом поділу батареї на

частини. Чим більша кількість таких ступенів, тим досконаліше регулювання, але тим більші капітальні витрати на встановлення комутаційних апаратів і захисного обладнання [19]. Режим роботи компенсуючих пристроїв визначається з урахуванням допустимих відхилень напруги на затискачах електричних приймачів. В якості параметрів управління можуть використовуватися напруга, струм навантаження, напрямки реактивної потужності, коефіцієнт потужності, фазовий кут між напругою живлення і струмом навантаження, і час [20].

3.2. Вимоги до компенсації реактивної потужності на промисловому підприємстві

Регулювання потужності пристроїв компенсації напруги здійснюється залежно від відхилення напруги. У цьому випадку управління компенсуючими пристроями має бути узгоджене з регулюванням значення напруги іншими засобами [21,23].

Найпростішим способом є управління за часом. В цьому випадку режим роботи системи електропостачання необхідно вивчити заздалегідь [22].

Відповідно до добового графіка споживання реактивної потужності, слід визначити, що одна частина батарей конденсаторів вмикається безперервно на 24 години, а друга вмикається відповідно до графіка навантаження лише на певний час t_1 [24].

Ступінчасте регулювання потужності батарей конденсаторів призводить до значного ускладнення схем управління, тому для напруг до 1000 В рекомендується використовувати комплектні конденсаторні установки з одиничною потужністю 75, 100, 150, 200, 250, 300 кВАр на одиницю, а при напрузі 6-10 кВ – комплектні конденсаторні установки з одиничною потужністю 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200 кВАр з підключенням через окремий вимикач [25].

Вимогу споживачів промислових підприємств щодо забезпечення мінімального відхилення робочої напруги від номінальної також можна задовольнити шляхом регулювання потужності конденсаторної батареї в залежності від напруги [26]. У цьому випадку, конденсаторні батареї, поряд з основною функцією підвищення коефіцієнта реактивної потужності підприємства, також використовуються для регулювання напруги [27].

У години мінімального навантаження, коли напруга висока, включення конденсаторних батарей призводить до надмірного підвищення напруги. Тому, для підтримки номінальної напруги на шинах підстанції, конденсаторні батареї відключаються, коли напруга піднімається вище допустимого значення, і коли напруга зменшується, вони включаються [28].

У системах електропостачання для компенсації реактивної потужності також використовуються автоматизовані низьковольтні установки з перемиканням ступенів конденсаторних батарей за допомогою спеціальних електромеханічних контакторів.

Часовий інтервал затримки перемикання ступенів (в середньому близько 60 секунд), обумовлений вимогами стандарту до рівня розряду конденсаторних батарей перед повторним перемиканням і відлаштуванням від короткочасних коливань реактивної потужності в компенсованій мережі, обмежує використання цих конденсаторних установок для великих груп технологічного обладнання (зварювального, підйомне-транспортного, ковальсько-пресового та іншого) [29].

Тому, при дуже змінному індуктивному навантаженні, використовується так звана "динамічна компенсація реактивної потужності" - Dynamics Power Factor Correction, тобто компенсація реактивної потужності в реальному часі, що значно розширює функціональність використання конденсаторних батарей, але вимагає встановлення спеціальних типів напівпровідникових пускачів і контролерів реактивної потужності.

Крім того, вищезазначені установки мають ряд недоліків, пов'язаних з появою дуги при кожному перемиканні, зносом і залипання контактів, шумом під час роботи, а також втратами потужності в котушках контакторів.

3.3. Розробка схем безконтактних пристроїв автоматичного регулювання потужності

Далі ми аналізуємо роботу пристроїв для автоматичного регулювання потужності компенсувальних пристроїв з використанням безконтактних елементів [30]. У світі проводяться наукові дослідження з метою вдосконалення регуляторів реактивної потужності та покращення експлуатаційних характеристик безконтактних комутаційних пристроїв. При цьому створення безконтактних пристроїв для автоматичного регулювання потужності конденсаторних батареї і комутації різних споживачів, що працюють у високовольтному режимі з частими перемиканнями, вважається одним з важливих завдань. Пропонується схему для автоматичного регулювання потужності конденсаторної батареї безпосередньо як функцію від значення коефіцієнта реактивної потужності, тобто кута між векторами напруги живильної мережі та струму навантаження. Цей метод дозволяє зменшити кількість комутацій, оскільки цей кут змінюється значно менше, ніж значення струму навантаження та напруги живлення, що призводить до підвищення якості роботи [31,32]. Схема одноступінчастого регулювання потужності конденсаторної батареї як функція від кута φ показана на рис.3.1. Пристрій складається з паралельно-зустрічно з'єднаних тиристорів $T1$ і $T2$, реле напруги KV , трансформатора струму з двома вторинними обмотками, резистора R , діодів D і додаткових опорів Rd .

Первинна обмотка трансформатора струму з'єднана послідовно з навантаженням, а вторинні обмотки підключені до керуючих електродів тиристорів через діоди та резистори, з'єднані послідовно. Зміна значення кута між напругою мережі та струмами навантаження викликає зміну фази запалювання тиристорів. Напруга на резисторі залежить від кута тиристорів.

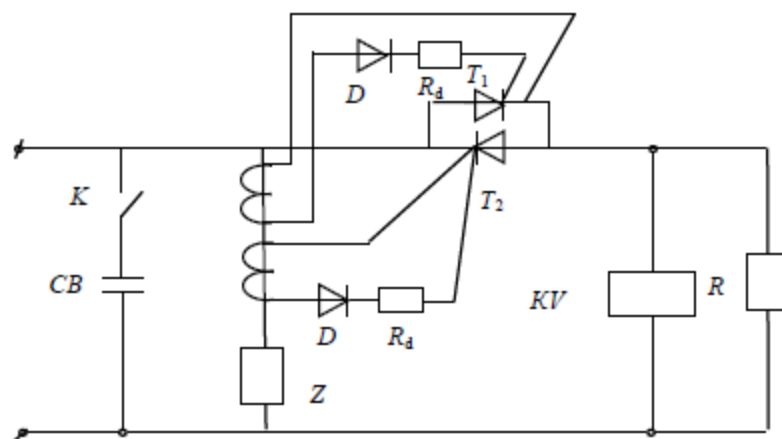


Рисунок 3.1. Схема керування потужністю батареї конденсаторів

Зі зменшенням кута ϕ , кут перемикання тиристорів зменшується, а напруга на резисторі R збільшується, і це призводить до спрацювання реле KV та відключення батареї конденсаторів від мережі [33].

Сигнали подаються на керуючі електроди тиристорів у ланцюзі силових конденсаторів через понижувальний трансформатор і безконтактне реле напруги. Перемикання трифазних батареї конденсаторів в залежності від напруги здійснюється за допомогою двох таких реле, налаштованих на різні робочі напруги [34].

Вибір елементів розглянутої схеми реле напруги проводився з урахуванням потужності навантаження, напруги вторинної обмотки трансформатора, робочих і керуючих струмів тиристорів [35,36].

Для перевірки працездатності розроблених схем безконтактних пристроїв і для експериментального вивчення установок, були створені прототипи безконтактних пристроїв для регулювання потужності батареї конденсаторів [37,38].

Експериментальні дослідження нового пристрою показали, що батареї конденсаторів підключаються до однофазної мережі при напрузі 140 В, а при напрузі 190 В вони відключаються від мережі.

Використання цього пристрою для безконтактного вмикання та вимикання батареї конденсаторів сприяє оптимальному використанню потужності батареї конденсаторів і зменшенню дефіциту реактивної

потужності. В цьому випадку заощаджується певна кількість електроенергії. Регулювання потужності батареї конденсаторів на промислових підприємствах дозволяє розвантажити систему від реактивного навантаження [39,40].

Прототипи таких розробок були протестовані в лабораторії кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології електропостачання Поліського національного університету.

Висновок по третьому розділу

Розвиток систем електропостачання із зростанням частки нелінійних та змінних навантажень підвищує актуальність автоматизованої компенсації реактивної потужності. Надлишок реактивної складової призводить до збільшення струмів у мережі, додаткових втрат активної енергії, погіршення напруги та зниження пропускної здатності ліній. У цьому контексті перспективним напрямом є розроблення безконтактних пристроїв керування батареї конденсаторів, здатних забезпечити швидке, надійне та ресурсозберігаюче комутаційне регулювання.

Безконтактні схеми вмикання ступенів конденсаторної батареї, реалізовані на напівпровідникових ключах, зменшують зношування порівняно з електромагнітними контакторами та підвищують частоту можливих перемикань. Ключовими вимогами до таких кіл є обмеження пускових струмів, зниження перенапруги під час комутації, електромагнітна сумісність і коректна робота в умовах гармонічних спотворень. Важливе значення має алгоритм автоматизації, який, спираючись на вимірювання коефіцієнта потужності та параметрів мережі, визначає оптимальну кількість підключених ступенів для підтримання заданого $\cos \varphi$ без пере регулювання.

Експериментальне дослідження таких кіл передбачає перевірку динаміки процесів комутації, термічних режимів силових елементів, точності вимірювального тракту та стійкості до завад. Під час випробувань оцінюють рівні перехідної перенапруги, пускові струми конденсаторів, час реакції системи та вплив перемикань на якість електроенергії. Окремо аналізують

роботу в режимах зміни навантаження та за наявності вищої гармоніки, що визначає коректність вибору фільтрації та захисних ланок.

Отже, розроблення схем безконтактного пристрою автоматизації компенсації реактивної потужності конденсаторної батареї є обґрунтованим шляхом підвищення енергоефективності та надійності електричних мереж. Практичні результати таких досліджень створюють передумови для впровадження швидкодіючих регуляторів $\cos \varphi$ із підвищеним ресурсом і поліпшеними показниками якості електроенергії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Компенсація реактивної потужності є одним із найефективніших технічних заходів для підвищення енергоефективності електропостачання. Її впровадження зменшує струми в елементах мережі, що безпосередньо веде до скорочення втрат активної енергії в лініях і трансформаторах, вивільнення пропускної здатності та можливості підключення додаткових навантажень без модернізації кабельних трас і силового обладнання. Для промислових споживачів з переважанням індуктивних приймачів (електродвигуни, трансформатори, зварювальні установки тощо) компенсація також виконує функцію стабілізації напруги, покращує якість електроенергії та зменшує ризики зупинок технологічних процесів через просідання напруги.

2. Шунтова компенсація (конденсаторні установки на шинах або у вузлах навантаження) у більшості виробничих умов є практичним і економічно обґрунтованим рішенням. Найкращий ефект забезпечує автоматичне ступінчасте регулювання, яке підтримує цільове значення $\cos\varphi$ або реактивної потужності за змінного графіка навантаження, запобігаючи як недокомпенсації, так і перекомпенсації. Послідовна компенсація має доцільність переважно в магістральних/розподільчих мережах для регулювання потоків потужності та зменшення падінь напруги на довгих лініях, але потребує складнішої координації із захистами, контролю режимів та врахування можливих резонансних і перехідних явищ.

3. Синхронні конденсатори та SVC є технологічно різними інструментами з взаємо доповнюваними перевагами. Синхронний конденсатор доцільний там, де важливі підвищення системної стійкості, підтримка напруги в “важких” вузлах, а також додаткові властивості, пов’язані з електромеханічною природою установки (умовна “інерційність” і робота в триваліших режимах віддачі/споживання реактивної потужності). SVC вирізняється високою швидкістю та точним регулюванням у динаміці, що є критичним при різко змінних навантаженнях (дугові печі, прокатні стани) та

для покращення напруги під час швидких збурень, однак потребує ретельного прокатування з урахуванням гармоніки, схем фільтрації та вимог до силової електроніки.

4. Запропонована концепція безконтактного пристрою керування конденсаторною батареєю перспективною для підвищення експлуатаційної надійності та ресурсу комутаційних елементів. Відмова від контактних вузлів зменшує вплив зносу, підгоряння контактів і чутливості до якості середовища (пил, вібрації), а підвищена швидкодія дає змогу точніше реагувати на зміни режимів. Такий підхід особливо доцільний для об'єктів зі змінним або імпульсним характером навантаження, де часті комутації є нормою, а також для систем, у яких важливі мінімізація простоїв і зниження витрат на техобслуговування.

Ефективність компенсації визначається не лише величиною встановленої КБ, а й правильним вибором алгоритму керування, урахуванням гармоніки, умов комутації та комплексом захистів і діагностики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Компенсація реактивної потужності. Схемні рішення на базі Контролера DCRK/DCRJ <https://www.svaltera.ua/solutions/typical/energy/6718.php>
2. Development and experimental study of circuits of contactless device for automation of compensation of reactive power of capacitor batteries https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/65/e3sconf_esr2021_07012.pdf
3. Somper, and A Baggini, “Electrical Energy Efficiency Technologies and Application,” John Wiley and Sons, West Sussex, United Kingdom, ISBN: 9780470975510, April 2012.
4. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, and R. Domke “Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review,” Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2144- 2164, Dec. 2005.
5. S. Teleke, T. Abdulahovic, T. Heringer, and J. Svensson, “Dynamic Performance Comparison of Synchronous Condenser and SVC,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, no. 3, pp. 1606-1612, Jun. 2008.
6. C. Corvin, “Slac Synchronous Condenser,” Stanford Linear Accelerator Center, Sanford University, Stanford, CA 94309 USA. [Online]. Available from: <http://epaper.kek.jp>
7. Abbreviations.com. "SYNCHRONOUS CONDENSER." STANDS4 LLC, 2015. Web. 18 Jan. 2015. [Online]. Available from: <http://www.abbreviations.com>
8. P. Marken, M. Henderson, D. LaForest, J. Salitas, J. Roedel, and T. Campbell, “Selection of Synchronous Condenser Technology for the Granite Substation,” New Orleans, LA, USA, ISBN: 978-1-4244-6546- 0, IEEE, Apr. 2010.
9. C. Edwards, K. Mattern, E. Stacey, P. Nannery, and J. Gubernick, “Advanced static Var generator employing GTO thyristors,” IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 4, pp. 1622–1627, Oct. 1988.

10. L. Walker, "Force-commutated reactive power compensator," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-22, no. 6, pp. 1091–1104, Nov./Dec. 1986.
11. K. E. Stahlkopf and M. R. Wilhelm, "Tighter controls for busier systems," IEEE Spectr., vol. 34, no. 4, pp. 48–52, Apr. 1997.
12. J. W. Dixon, Y. del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L. Morán, and C. Maffrand, "A full compensating system for general loads, based on a combination of thyristor binary compensator, and a PWM-IGBT active power filter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 50, no. 5, pp. 982–989, Oct. 2003
13. S. Torseng, "Shunt-connected reactors and capacitors controlled by thyristors," IEE Proc. Part C, vol. 128, no. 6, pp. 366–373, Nov. 1981.
14. J. W. Dixon, J. García, and L. Morán, "Control system for a three phase active power filter which simultaneously compensates power factor and unbalanced loads," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, no. 6, pp. 636–641, Dec. 1995.
15. J. Dixon and L. Morán, "A clean four-quadrant sinusoidal power rectifier, using multistage converters for subway applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 3, pp. 653–661, Jun. 2005
16. E.G. Usmanov, E.Kh. Abduraimov, R.Ch. Karimov. Using proximity relays to improve power quality (Journal "Bulletin of TSTU", Tashkent, Uzbekistan, 3-4, pp.48-51, 2012).
17. Usmanov, Radulov, Bobojanov, Karimov. Non-contact voltage relay for switching windings of a boost transformer (E3S Web of Conferences, 139, 01079, 2019), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901079>
18. Yu.M. Kurbonov, and others. Analysis of the influence of temperature on the operating mode of a photovoltaic solar station (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 614(1), 012034, 2020). doi:10.1088/1755-1315/614/1/012034
19. K.B. Nazirov, S.D. Dzhuraev, and others. Simulation of the Municipal-Household Electrical Supply System for Calculation and Forecasting the Level Current and Voltage Higher Harmonics (Proceedings of the 2020 IEEE Conference

of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, pp.1276–1281, 9038935, 2020).

20. R. Karimov, and others. Modeling of kinematics and kinetostatics of planetary-lever mechanism (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 883(1), 012129, 2020). doi:10.1088/1757-899X/883/1/012129

21. R. Karimov, and others. Reliability indicators of stabilizing devices in the agriculture electrical supply system (IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 883(1), 012142, 2020).

22. E.B. Saitov. Renewable Energy Development in Uzb.: Current Status, Problems and Solutions (E3S Web of Conf., 216, 01134, 2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202021601134

23. R. Karimov, and others. Non-contact-controlled voltage stabilizer for power supply of household consumers (IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 883(1), 012120, 2020). doi:10.1088/1757-899X/883/1/012120

24. S. Shoguchkarov, and others. The effect of the surface geometry of a photovoltaic battery on its efficiency (E3S Web of Conferences, 216, 01149, 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601149>

25. K.B. Nazirov, Z.S. Ganiev, S.D. Dzhuraev, and others. Elaboration of the Method for Providing the Level of Power Quality in the Nodes of the Energy System while Power Quality Monitoring 2020, pp.1282-1286, 9039416, 2020). DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039416

26. E.B. Saitov, and others. Networked interactive solar panels over the roof photovoltaic system (PVS) and its cost analysis at TSTU (E3S Web of Conferences, 216, 01133, 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601133>

27. R. Karimov. Study of the state of the issue of increasing the quality of electric energy in the power supply systems (E3S Web of Conferences, 216, 01163, 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601163>

28. I. Sapaev, and others. Matlab-model of a solar photovoltaic station

integrated with a local electrical network (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 883, 012116, 2020). doi:10.1088/1757-899X/883/1/012116

29. Karimov R.Ch. Using optoelectronic noncontact voltage relay in electrical supply systems (Technical science and innovation, 2, 2019). uzjournals.edu.uz/btstu/vol2019/iss2/8

30. Rasulov A.N., Karimov R.Ch. The Contactless Relay of Tension in System of Power Supply (EESJ, 4, pp.174-178, 2015), doi:10.12851/EESJ201508C05ART02

31. I.U. Rakhmonov, K.M. Reymov. Statistical models of renewable energy intermittency // RSES 2020. E3S Web of Conferences. 216 (2020) 01167. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601167>

32. I.U. Rakhmonov, N.N. Kurbonov. Analysis of automated software for monitoring energy consumption and efficiency of industrial enterprises // E3S Web of Conferences. 216 (2020) 01178. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601178>

33. F.A. Hoshimov, I.U. Rakhmonov, N.N. Niyozov. Technology to reduce energy costs in the electric steel melting shop // ENERGY-21. E3S Web of Conferences. 209 (2020) 07017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907017>

34. Rasulov A.N., Karimov R.Ch. The Contactless Thyristor Device for Inclusion and Shutdown of Condenser Installations in System of Power Supply (EESJ, 4, pp.179-183, 2015). doi:10.12851/EESJ201508C05ART01

35. Bobojanov M.K., and others. Study of the efficiency of conveyors of mining transport systems of mining complexes (E3S Web of Conferences, 177, 03023, 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017703023>

36. Rasulov A.N., and others. Graphical-analytical method for constructing load characteristics (E3S Web of Conf. 216, 01171, 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601171>

37. S.D. Dzhuraev, and others. Calculation of Permissible Power of Synchronous Generators Functioning with Transformer Load (Power Technology and Engineering, 2018, 52(4), pp.466-473, 2018). DOI: 10.1007/s10749-018-0976-

38. S.D. Dzhuraev, and others. Effect of additional capacities on transients recovery voltage in the short - Line - Fault regime (Proceedings of the 2019 IEEE Conference Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, pp.1044-1046, 8657006, 2019). DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657006

39. S.D. Dzhuraev, and others. Study of the operating modes of the 0.4 kV main distribution network, in Dushanbe city of the Republic of Tajikistan, with distributed solar generation for power losses and power quality estimation (Proceedings of the 2018 IEEE Conference Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, pp.737-742, 2018). DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317197

40. <https://kemt.kiev.ua/assets/library/files/avtomatizacz%D1%96ya-texnolog%D1%96chnix-proczes%D1%96v-%D1%96-sistem-avtomatichnogo-keruvannya-stisnuto.pdf>