

М. О. Шпілевий¹
Д. О. Босий¹
А. В. Антонов¹
Д. Р. Земський¹
А. В. Резник²

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

¹Український державний університет науки і технологій, Дніпро;

²ТОВ «ПРОМСПЕЦІНЖІНІРИНГ», Дніпро

Розглянуто актуальну для України проблему компенсації реактивної потужності в системах тягового електропостачання змінного струму, що має особливе значення в умовах енергетичної кризи, спричиненої військовими діями. Реактивна потужність є важливою складовою електричних мереж, яка суттєво впливає на стабільність і якість електропостачання. У статті висвітлено вплив реактивної потужності на ефективність роботи тягових підстанцій, які обслуговують залізничний транспорт. Особливу увагу приділено технічним аспектам проблеми та аналізу ефективності наявних методів компенсації, що є критично важливим для зменшення втрат електроенергії та підвищення загальної ефективності систем електропостачання. В умовах застарілого обладнання та обмежених ресурсів проблема ускладнюється, що вимагає впровадження сучасних технологічних рішень.

Проаналізовано основні методи і пристрої для компенсації реактивної потужності, зокрема таких, як конденсаторні установки та синхронні компенсатори, а також використання сучасних технологій гнучких систем передачі змінного струму (FACTS). Особливу увагу приділено експериментальним дослідженням, проведеним на реальній тяговій підстанції, де здійснено вимірювання реактивної потужності та показано ефективність застосування компенсуючих пристроїв. Результати досліджень демонструють, що компенсація реактивної потужності дозволяє суттєво зменшити втрати енергії, поліпшити якість електроенергії та підвищити стабільність роботи мережі.

У статті також зазначено перспективність впровадження систем FACTS для динамічного регулювання реактивної потужності та поліпшення роботи електричних мереж. Використання цих систем може значно підвищити надійність і ефективність енергосистеми, особливо в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції. Це дозволить забезпечити надійне електропостачання в критичних умовах і підвищити ефективність роботи енергетичної інфраструктури України.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсація, тягове електропостачання, енергоефективність, результати вимірювань, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), гармонічні спотворення, коефіцієнт потужності.

Вступ

З початком війни в Україні перед енергетичним сектором постали суттєві виклики, пов'язані зі зниженням виробництва електроенергії, що створює критичні умови для підтримання стабільної роботи електромережі. Однією з основних проблем, яка виникає в цих умовах, є забезпечення якості електроенергії, що постачається як побутовим, так і промисловим споживачам. Особливо гостро це питання постає перед залізничними споживачами, які є критично важливими для забезпечення функціонування інфраструктури країни.

Якість електроенергії значною мірою залежить від наявності реактивної потужності, яка збільшує втрати в системі та знижує ефективність роботи обладнання. Реактивна потужність, яка коли-

вається між генераторами та споживачами, через превалювання індуктивного опору в електричних мережах може суттєво погіршувати показники якості напруги і таким чином впливати на роботу всіх споживачів, які живляться від неї [5]. На практиці системи електропостачання майже ніколи не працюють за ідеальних умов. Натомість переважають складні режими, де наявні несиметричні, несинусоїдні режими роботи через нелінійні навантаження. Це спричиняє відхилення від ідеальної синусоїдної форми електричних сигналів, що проявляється у вигляді викривлення синусоїдності, появи інтергармонік та інших аномалій. У випадку залізничного транспорту, що використовує тягові підстанції змінного струму, в умовах збільшення еквівалентного опору системи зовнішнього електропостачання внаслідок виведення з ладу генерувальних потужностей та трансформаторних підстанцій через ракетні обстріли, проблема компенсації реактивної потужності набуває більшої актуальності.

Наявні методи компенсації реактивної потужності передбачають використання різноманітних технічних засобів, які працюють в основному на основі конденсаторних батарей. Проте сучасні підходи до управління такими системами часто стикаються з проблемами, пов'язаними із застарілим обладнанням та відсутністю гнучкості в регулюванні навантажень. Зокрема, традиційні системи компенсації мають обмежені можливості щодо регулювання потужності в реальному часі, що може призводити до перевантаження або недостатньої компенсації в певних умовах.

У відповідь на ці виклики, останні дослідження сфокусовані на впровадженні інноваційних методів компенсації, таких як використання активних фільтрів та регульованих компенсаторів [7], [13]. Ці пристрої дозволяють точніше контролювати рівень реактивної потужності, забезпечуючи стабільність роботи системи навіть за умов значних коливань навантаження. До того ж, для ефективного управління компенсаційними пристроями активно досліджуються нейронні мережі та алгоритми машинного навчання, які можуть допомогти у визначенні оптимальних параметрів розміщення та розміру компенсаторів, а також у прогнозуванні майбутніх потреб реактивної потужності [6], [8].

Таким чином, дослідження проблеми компенсації реактивної потужності є надзвичайно актуальним для забезпечення стабільної роботи енергосистеми в умовах кризи, особливо з огляду на впровадження нових технологій та потребу в модернізації наявних підстанцій.

Мета роботи полягає у дослідженні проблеми компенсації реактивної потужності в системах тягового електропостачання змінного струму, дослідженні діючої тягової підстанції змінного струму з проведенням вимірювань та оцінкою впливу компенсатора реактивної потужності на якість електроенергії.

Визначення реактивної потужності за наявності нелінійних навантажень

Реактивна потужність є складовою електричної потужності, що виникає внаслідок зсуву фаз між напругою та струмом у системах змінного струму через наявність індуктивних або ємнісних параметрів у електричних колах.

Реактивна потужність у колі синусоїдного струму визначається за формулою

$$Q = U \cdot \sin \varphi = U \cdot I_r. \quad (1)$$

За наявності нелінійних навантажень в системі тягового електропостачання, важливо врахувати додаткову складову, яка викликана спотвореннями форми кривих струму і напруги.

Нелінійні навантаження зазвичай спотворюють форму хвилі струму, та можуть не впливати на фазовий зсув між напругою та струмом. Такі навантаження широко поширені в сучасних енергосистемах і часто виникають унаслідок роботи перетворювачів змінного-постійного струму із застосуванням силової електроніки [12]. Прикладами таких пристроїв є перетворювачі приводу зі змінною швидкістю, комп'ютери, трансляційне обладнання, компактні люмінесцентні та світлодіодні лампи, зарядні пристрої, індукційні печі тощо.

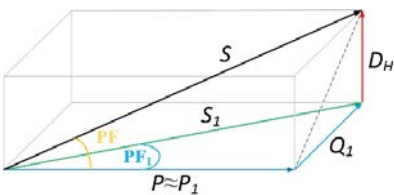


Рис. 1. Тетраедр складових повної потужності при наявності гармонічних спотворень

Для нелінійних навантажень співвідношення між складовими повної потужності можна представити у вигляді тетраедра у тривимірному просторі, де кожне з ребер відповідає окремій складовій потужності: активній, реактивній та спотворення (рис. 1) [13].

Система тягового електропостачання, хоча і є по суті трифазною незбалансованою системою, але може бути розглянута як дві

однофазні системи, оскільки третя фаза використовується опосередковано.

У більшості електричних систем струм переносить основну енергію першою гармонікою, оскільки вона відповідає встановленій частоті мережі. Проте через нелінійні навантаження або перетворювальне обладнання можуть виникати вищі гармоніки, які також впливають на загальну потужність. У більшості таких випадків перша гармоніка домінує, оскільки амплітуди вищих гармонік значно менші. Проте у системах зі значними спотвореннями внесок вищих гармонік може бути суттєвим, що потрібно враховувати під час аналізу.

На практиці можна вважати, що основна частина активної потужності зосереджена в першій гармоніці ($P \approx P_1$). За аналогією, так можна було б вважати і для реактивної потужності, але це спричинить значну похибку і тому треба врахувати, що додатково до реактивної потужності першої гармоніки Q_1 буде додаватись потужність гармонічних спотворень D_H [17].

Для визначення коефіцієнта потужності PF за наявності нелінійних спотворень необхідно враховувати потужності гармонічних спотворень D_H як окрему складову повної потужності.

Для типового нелінійного навантаження коефіцієнт потужності за першою гармонікою PF_1 буде близьким до одиниці. Проте коефіцієнт потужності PF з тим самим рівнем спотворень зазвичай буде нижчим [10].

Враховуючи це, реактивна потужність може бути представлена як сума реактивних потужностей окремих гармонік і потужності спотворення [13].

$$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D_H^2. \quad (2)$$

На практиці системи електропостачання майже ніколи не працюють за ідеальних умов. Натомість переважають складні режими, де наявні несиметричні, несинусоїдні режими роботи через нелінійні навантаження. Це спричиняє відхилення від ідеальної синусоїдної форми електричних сигналів, що проявляється у вигляді викривлення синусоїдності, появи інтергармонік та інших аномалій [9], [11].

Електротягове навантаження відрізняється від інших типів споживачів не лише своїм несиметричним та нелінійним характером, який змінюється у часі та просторі, а й тим, що електрифіковані залізниці виконують розподіл електроенергії на значній території. Через що неможливо забезпечити живлення такої системи від єдиного джерела енергії. Внаслідок цього можуть виникати перетікання вирівнювальних струмів у тяговій мережі змінного струму через відхилення кута зсуву фаз однострумних напруг суміжних тягових підстанцій, що паралельно живлять міжпідстанційну зону [1].

Ще однією проблемою є реактивний характер навантаження, що змінюється динамічно [2]. Динамічні зміни можуть виникати з різних причин, таких як коливання споживання електроенергії, запуск або зупинка великих електродвигунів, а також коливання в роботі електростанцій тощо. Змінні реактивні навантаження можуть впливати на стабільність і якість електропостачання, викликаючи коливання напруги, додаткові втрати в обладнанні та інші проблеми, зокрема передчасний вихід з ладу.

Некомпенсована реактивна потужність в системі тягового електропостачання, крім підвищених втрат електроенергії [4], призводить до низки інших проблем, серед яких: зниження пропускної спроможності мережі, погіршення якості електроенергії, збільшення експлуатаційних витрат, необхідність використання додаткового обладнання для компенсації, зниження ефективності енергосистеми, підвищення ризику перевантаження та пошкодження обладнання.

Сучасні методи компенсації реактивної потужності

Для компенсації реактивної потужності та забезпечення стабільності системи можуть використовуватись різні методи та обладнання, зокрема батареї конденсаторів, синхронні компенсатори, системи FACTS (гнучкі системи передачі змінного струму) та інші технології для керування реактивною потужністю [3].

Методи боротьби з реактивною потужністю поділяються на пасивні та активні. Пасивні методи спрямовані на зменшення реактивної потужності шляхом оптимізації роботи обладнання, а активні передбачають встановлення пристроїв для компенсації спожитої реактивної потужності, зокрема батарей конденсаторів, синхронних компенсаторів тощо.

Сьогодні найперспективнішими пристроями в галузі електроенергетики є гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS). Ці технології дозволяють ефективно керувати параметрами електричних мереж у реальному часі, що сприяє підвищенню їхньої стабільності, надійності та пропус-

кної здатності. Використання FACTS оптимізує розподіл енергії, знижує втрати під час передачі та полегшує інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Завдяки своїй гнучкості, швидкості реакції та економічній ефективності пристрої FACTS стають ключовими елементами сучасних енергосистем, забезпечуючи стабільне та якісне електропостачання. Однією з основних функцій систем FACTS є компенсація реактивної потужності, що підвищує якість електроенергії та ефективність роботи мережі.

Гнучкі системи передачі змінного струму вперше розроблені Інститутом електроенергетики EPRI (США) на початку 1990-х років. Ці технології суттєво підвищили пропускну здатність наявних електричних мереж, на 50 % і більше, одночасно з поліпшенням стабільності напруги, надійності мережі та енергетичної безпеки. Пристрої FACTS належать до силової електроніки та застосовуються для динамічного керування параметрами електричної мережі, такими як напруга, струм, потужність і фазовий кут. Вони забезпечують можливість активного впливу на режими роботи електричних мереж, підвищуючи їхню керованість і стабільність. Основна перевага цих пристроїв полягає у здатності підтримувати високий рівень керованості в реальному часі, що дозволяє ефективно реагувати на зміни умов роботи мережі.

Пристрої FACTS можна розділити на три основні категорії: поздовжня компенсація, поперечна компенсація та комбіновані пристрої [16].

Поздовжня компенсація включає такі пристрої, як статична синхронна поздовжня компенсація (SSSC), яка виконується пристроєм з тиристорним керуванням, що забезпечує контроль потужності у мережі. Тиристорно-керована поздовжня компенсація (TCSC) складається з конденсаторних батарей та тиристорно-керованого реактора, що забезпечує ефективне керування реактивною потужністю у мережі. Тиристорно-керований поздовжній реактор (TCSR) складається з реактора, приєднаного до тиристорно-керованого реактора, що дає змогу варіювати індуктивність у мережі. Поздовжній конденсатор з тиристорним керуванням (TSSC) є системою конденсаторних батарей, шунтованих тиристорно-керованим реактором, що забезпечує швидке перемикання та стабілізацію напруги у мережі. Поздовжній реактор з тиристорним керуванням (TSSR) включає послідовно приєднаний реактор, шунтований реактором з тиристорним керуванням, що дозволяє гнучко регулювати індуктивний опір у мережі.

Поперечна компенсація реалізується за допомогою статичних компенсаторів реактивної потужності (Static VAR Compensator, SVC), що включають кілька основних типів обладнання. Тиристорно-керований реактор (Thyristor-controlled reactor, TCR) — це реактор, підключений до двонаправленого тиристорного вентиля з фазовим керуванням, що дозволяє постійно змінювати еквівалентний реактивний опір для плавного регулювання реактивної потужності в мережі. Реактор з тиристорним керуванням (Thyristor-switched reactor, TSR) є аналогом TCR, але відрізняється тим, що тиристори працюють у режимі повного включення або вимкнення, забезпечуючи ступінчасту зміну еквівалентного реактивного опору і дискретне регулювання реактивної потужності.

Конденсатор з тиристорним керуванням (Thyristor-switched capacitor, TSC) — це конденсатор, підключений до тиристорного вентиля, в якому тиристори також функціонують у режимах повного включення або вимкнення. Це забезпечує ступінчасту зміну еквівалентного реактивного опору, що дозволяє здійснювати компенсацію реактивної потужності в певних діапазонах.

Конденсатор з механічним керуванням (Mechanically-switched capacitor, MSC) використовує механічний вимикач для перемикання конденсатора, що забезпечує компенсацію стабільних значень реактивної потужності. Цей пристрій зазвичай активується лише кілька разів на день і є аналогом батареї статичних конденсаторів.

Реактор з механічним керуванням (Mechanically-switched reactor, MSR) також використовує механічний вимикач для підключення реактора; застосовується переважно в мережах з надвисокою напругою (понад 500 кВ) для ефективного керування реактивною потужністю в таких умовах. Схематичне зображення пристроїв поперечної компенсації подано на рис. 2.

Наразі в Україні діють три тягові підстанції з працюючими пристроями поперечної компенсації, які є з'єднанням батарей конденсаторів послідовно з реактором та блоком тиристорів для плавного регулювання потужності за принципом TCR. Наявність реактора в контурі компенсації зменшує генеровану реактивну потужність, проте унеможливає виникнення резонансних явищ

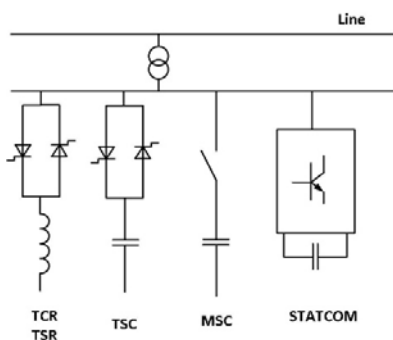


Рис. 2. Системи FACTS для поперечної компенсації реактивної потужності

та за певного налаштування на близькорезонансу частоту сприяє зменшенню вибраної гармонічної складової (найчастіше 3-ї).

Впровадження на тягових підстанціях змінного струму автоматичних плавно регульованих пристроїв компенсації реактивної потужності розпочато з 2008 року. Конструктивно ці пристрої доповнюються контуром декомпенсації, який складається з реактора та силового напівпровідникового регулятора змінного струму (рис. 3). Як ключові елементи застосовуються тиристори з фотоелектродним керуванням.

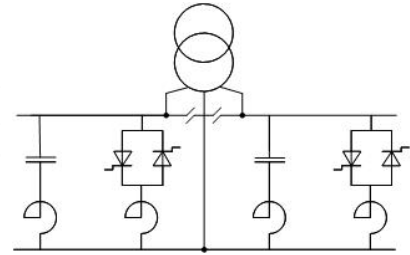


Рис. 3. Принципова схема застосування поперечної компенсації TCR на тяговій підстанції змінного струму

Системи FACTS мають мінімальний вплив на навколишнє середовище та не потребують великої площі для встановлення.

Проекти FACTS реалізуються значно швидше й дешевше ніж альтернативи, такі як будівництво додаткових ліній електропередач і нових електростанцій. Окрім основної задачі — підвищення пропускної здатності та поліпшення управління мережею, вони також допомагають знизити втрати енергії під час передачі на великі відстані, усунути мережеві обмеження, зменшити ризик тривалих збоїв у постачанні та інтегрувати відновлювані джерела енергії, як-от вітрову енергію, в електричну мережу.

У промисловості системи FACTS широко застосовуються у сталеливарному виробництві для підвищення продуктивності та стабілізації впливу великих електродугових печей на мережу електропостачання, що поліпшує якість електроенергії. Використання FACTS значно знижує коливання напруги, що є критичним для сталеливарних печей, які дуже чутливі до змін параметрів мережі [15].

Прикладом успішного впровадження технології FACTS є найбільший у світі статичний компенсатор реактивної потужності (SVC) напругою 500 кВ на підстанції Black Oak у штаті Меріленд, власності Allegheny Power [18]. Це рішення підвищило надійність критично важливої лінії передач в Середньоатлантичному регіоні США та збільшило її пропускну здатність.

Ще одним прикладом є рішення з використанням поздовжньої компенсації для Саудівської енергетичної компанії (SEC), яке збільшило пропускну здатність важливої міжсистемної лінії електропередач на 30 %. Це дозволило уникнути дефіциту електроенергії в столиці Саудівської Аравії, Ер-Ріяді, без необхідності будівництва нових ЛЕП. В Індії рішення ABB забезпечує стійкість важливої міжсистемної лінії в Райпурі, що дозволяє передавати енергію зі східної частини країни, де є надлишок енергії, на захід і південь, де її не вистачає. Це рішення також суттєво збільшило пропускну здатність енергосистеми і є найбільшою подібною установкою в країні [15].

Один з найвідоміших проектів — завод Tornio Works у Фінляндії, де SVC Light і SVC забезпечують стабільну напругу для електроплавильних цехів з річною продуктивністю в 1 млн тонн. Це рішення знижує коливання електроенергії та пригнічує вищі гармоніки напруги, дозволяючи заводу відповідати стандартам електромережі [19].

Впровадження технологій FACTS дозволяє значно підвищити ефективність використання наявних електричних мереж, зменшити втрати енергії, підвищити стабільність та надійність роботи електроенергетичних систем. Це особливо важливо в умовах попиту, який зростає, на електроенергію та обмежених ресурсів, що робить технології FACTS невід'ємною частиною сучасних електроенергетичних систем.

Таким чином, системи FACTS є ключовими для сучасних електроенергетичних систем, сприяючи підвищенню ефективності, стабільності та надійності мереж.

Експериментальні вимірювання

Для наочної демонстрації проблематики реактивної потужності розглянуто реальний об'єкт — опорна тягова підстанція X, проте у зв'язку з чутливістю теми та безпеки в умовах воєнного конфлікту всі назви, що ідентифікують об'єкти, замінені загальними термінами або псевдонімами.

Розглянутий об'єкт є важливою складовою енергетичної інфраструктури України і відіграє значну роль у забезпеченні електропостачання регіону. Аналіз його роботи та впливу на систему дозволить краще зрозуміти динаміку та виклики, з якими стикається енергетичний сектор країни в умовах війни.

Підстанція X має 9 вводів: 8 вводів мають напругу 110 кВ, 1 ввід має напругу 154 кВ. 3 секцій шин 110 кВ напруга подається на два паралельно встановлені однакові трансформатори ТДТНЖ-40000 110/38,5/27,5 кВ (Т1, Т2).

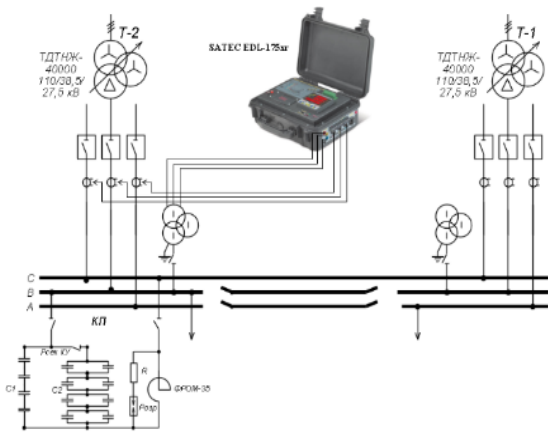


Рис. 4. Принципова однолінійна схема опорної тягової підстанції з підключенням аналізатора потужності SATEC EDL-175xr

У фазі «В» працює пристрій компенсації реактивної потужності. Принципова схема тягової підстанції з підключенням приладу показана на рис. 4.

Вимірювання параметрів електроспоживання на тяговій підстанції проведені шляхом підключення приладів SATEC EDL-175xr [14] у вторинні кола ТН-27,5 кВ та ТТ-1500/5 обох ввідів Т1, Т2 трансформаторів. В період вимірювань в роботі знаходився трансформатор Т2. Схема живлення ділянки відповідала нормально встановленій.

За вказаний період отримані профілі навантажень активної та реактивної потужностей за даними системи АСКОЕ для подальшого зіставлення.

Умовні позначення: V_1 — напруга плеча живлення фази «А», I_1 — струм плеча живлення фази «А», V_2 — напруга плеча живлення фази «В», I_2 — струм плеча живлення фази «В».

У фазі «В» працює пристрій компенсації реактивної потужності величиною 1/3 від встановленої потужності.

Детальний профіль активного навантаження першого плеча живлення показано на рис. 5. Фактично 70 % інтервалу спостереження припадає на режим генерації активної потужності зі сторони тягової мережі, інші 30 % часу відносяться до режиму споживання активної потужності. Найбільше значення споживання активної потужності досягається у нічний час з 0:00 до 9:00 та у вечірні години з 17:00 до 19:00.

На рис. 6 показано детальний профіль реактивного навантаження першого плеча. З погляду режиму споживання, то 100 % інтервалу спостереження відповідає режиму споживання реактивної електроенергії зі сторони шин тягової підстанції.

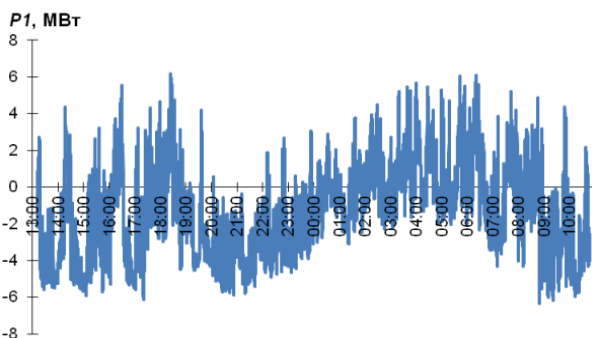


Рис. 5. Профіль активної потужності фази «А»

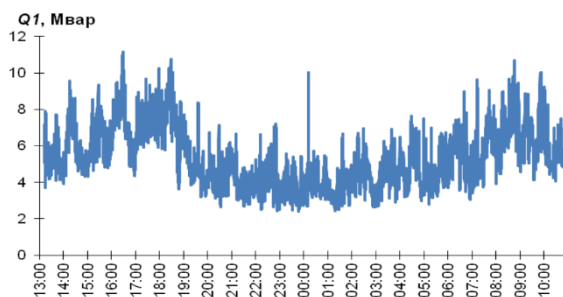


Рис. 6. Профіль реактивної потужності фази «А»

Детальний профіль активного навантаження другого плеча живлення подано на рис. 7. Режим споживання активної потужності у цій фазі відповідає її споживанню за винятком окремого інтервалу доби між 03:00 та 04:00, який носить випадковий характер і не має суттєвого впливу на загальну картину.

На рис. 8 показано детальний профіль реактивної потужності у другому плечі живлення.

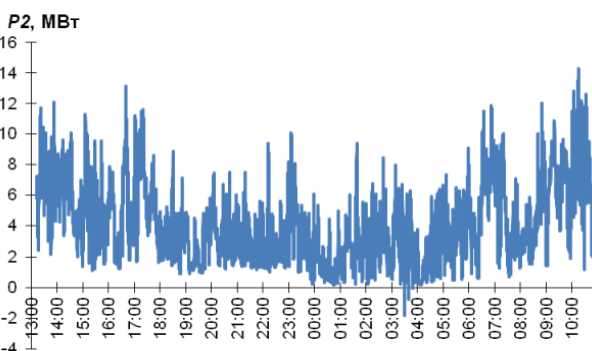


Рис. 7. Профіль активної потужності фази «В»

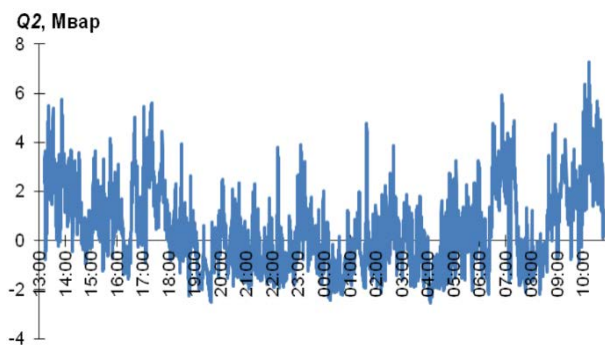


Рис. 8. Профіль реактивної потужності фази «В»

Оскільки у цій фазі працює компенсувальний пристрій, то наявні режими і споживання і генерації реактивної електроенергії. На всьому інтервалі спостереження 54 % часу відповідає режиму споживання та 46 % генерації. Такий розподіл режимів вказує на цілком доцільну вибрану потужність компенсувального пристрою у цьому плечі живлення.

Лічильниками електроенергії на вводах трансформатора 27,5 кВ фіксується підсумкова потужність обох плечей живлення з розділенням за квадрантами.

На рис. 9 показано детальний профіль активної потужності, яка визначає сумарне тягове навантаження обох плечей живлення.

В результаті накладання профілів лівого та правого плечей живлення, майже 82 % часу інтервалу спостереження припадає на режим споживання електроенергії від шин тягової підстанції, інші 18 % часу становлять режим генерації активної потужності зі сторони тягової мережі та за відсутності стороннього навантаження можуть призвести до перетікання активної потужності безпосередньо в первинну мережу.

На рис. 10 показано сумарний профіль реактивного навантаження тягової підстанції. В результаті накладання профілів потужностей плечей, маємо протягом всього інтервалу спостереження режим споживання реактивної електроенергії.

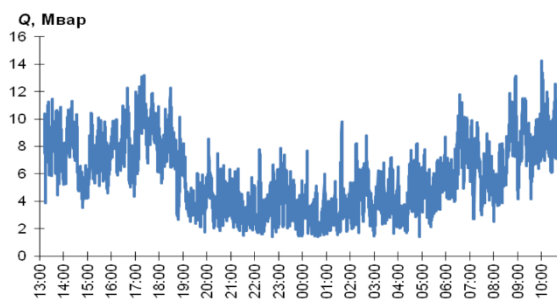


Рис. 9. Активна потужність обох плечей живлення

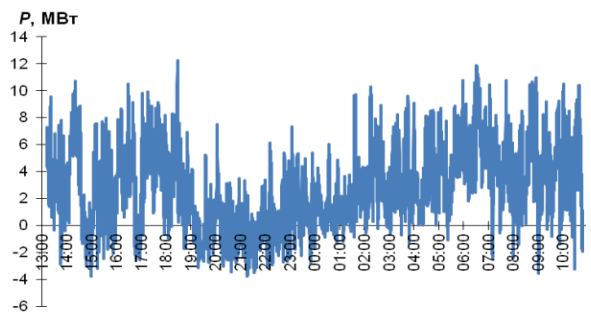


Рис. 10. Реактивна потужність обох плечей живлення

Аналіз числових результатів

На рис. 11—13 подані результати зіставлення усереднених значень вимірних потужностей та зафіксованих АСКОЕ за розділенням їх за квадрантами.

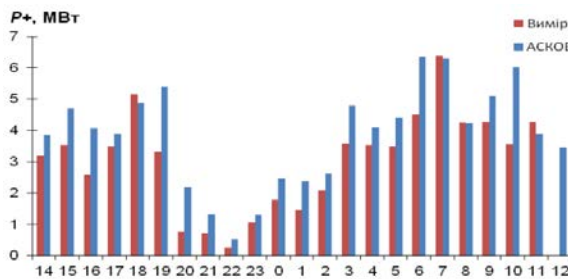


Рис. 11. Споживання активної потужності за добу

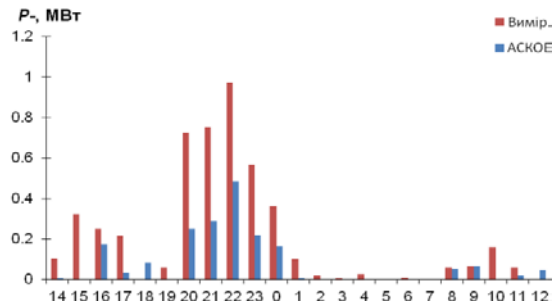


Рис. 12. Генерація активної потужності за добу

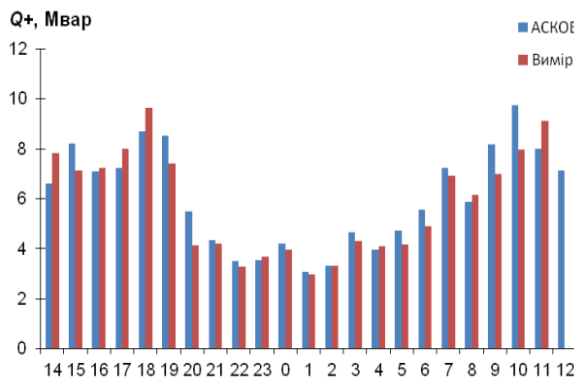


Рис. 13. Споживання реактивної потужності за годинами доби

Генерації реактивної потужності ні вимірюваннями, ні системою АСКОЕ не зафіксовано.

На рис. 14—16 показані вибіркові осцилограми режимів споживання.

З метою аналізу впливу компенсувального пристрою на показники якості напруги розглянемо момент часу 23.04.14 р. о 14:32:37, коли зафіксовані практично однакові струми в плечах живлення тягової підстанції (241,9 А) (рис. 17). При цьому, за стандартною схемою живлення, пристрій компенсації реактивної потужності працював лише в одному плечі живлення.

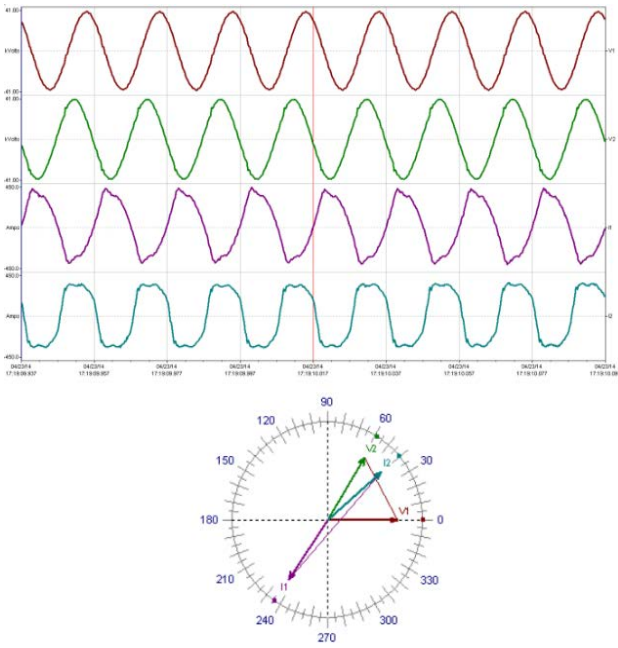


Рис. 14 Осцилограми струмів і напруги у плечі фази «А» 124° , у плечі фази «В» — $17,5^\circ$

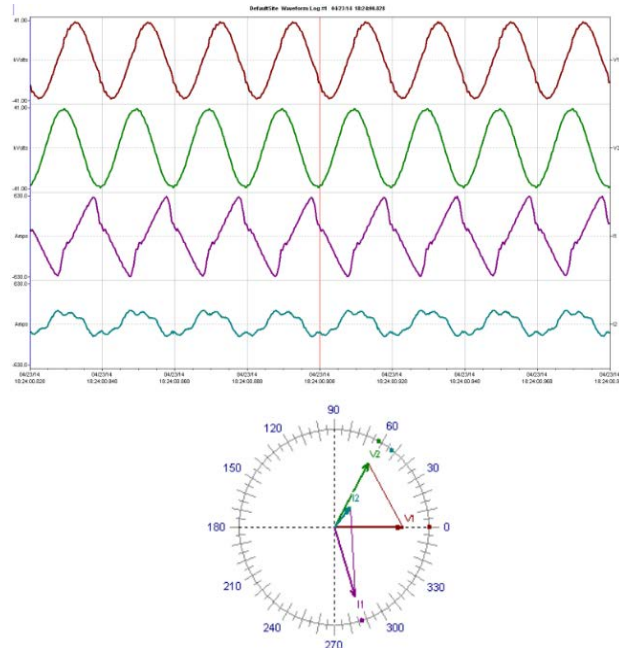


Рис. 15. Осцилограми струмів і напруги у плечі фази «А» $72,9^\circ$, у плечі фази «В» — $9,2^\circ$

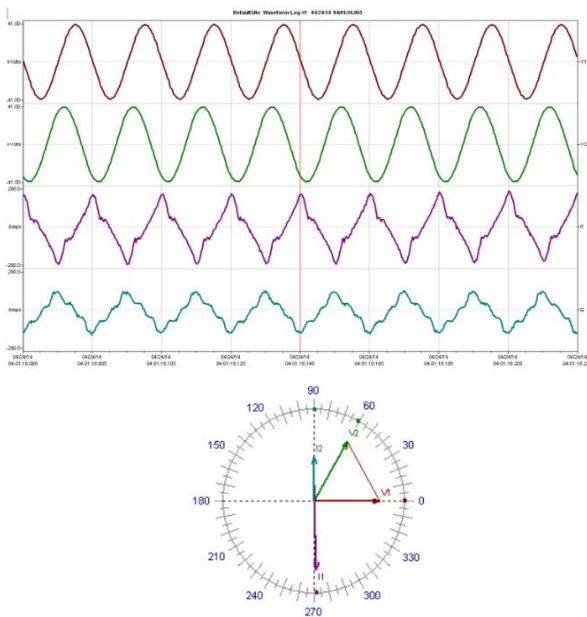


Рис. 16. Осцилограми струмів і напруги у плечі фази «А» $87,7^\circ$, у плечі фази «В» — 29°

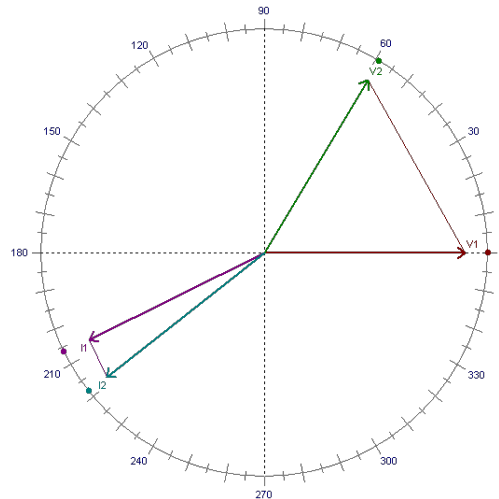


Рис. 17. Векторна діаграма струмів та напруг у момент часу 23.04.14 р. 14:32:37

Такий момент часу дозволяє оцінити вплив фільтрокомпенсувального пристрою на коефіцієнти спотворення форми кривих напруги і струму, а також на коефіцієнти потужності PF та PF_1 .

Як видно з даних таблиці, за величини коефіцієнтів спотворення струму в плечах живлення тягової підстанції одного порядку 9,1 % у першому та 10,3 % у другому, спотворення напруги у фазі з включеним пристроєм компенсації значно менше від спотворення у фазі без компенсації — 1,7 % проти 3,7 %.

Ця закономірність прослідковується і для коефіцієнтів потужності PF та PF_1 . У фазі з компенсацією PF_1 становить $-0,566$, а в іншій — $-0,794$. Від’ємні значення коефіцієнтів потужності вказують на режим генерації електроенергії зі сторони тягової підстанції в мережу, що на ділянках змінного струму найімовірніше викликане вирівнювальними струмами. Водночас коефіцієнти спотворення показують наявність потужності спотворення тільки в одній фазі (в іншій фазі PF та

PF₁ практично не відрізняються), оскільки завдяки фільтрокомпенсувальному пристрою та зниженому коефіцієнту спотворення THD потужність спотворення практично відсутня.

**Показники спотворення напруги і струму та коефіцієнти потужності
у різних фазах тягової підстанції змінного струму**

THD V1 (A)	THD V2 (B)	THD I1	THD I2	PF ₁ A	PF A	PF ₁ B	PF B
1,7 %	3,7 %	9,1 %	10,3 %	-0,566	-0,553	-0,794	-0,743

Ці результати дозволяють зробити висновок про ефективність компенсації реактивної потужності та зниження гармонічних спотворень на тяговій підстанції. Та доцільність подальшого впровадження автоматично регульованих компенсувальних пристроїв та управління реактивною потужністю в усіх фазах тягового трансформатора.

З розвитком відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, виникає потреба в інтеграції систем компенсації реактивної потужності, особливо для джерел вітрової енергії. Це дозволяє підвищити ефективність використання відновлюваних джерел та забезпечити стабільність роботи мережі, зменшуючи ризики від коливань у виробництві енергії.

Висновки

Під час дослідження використано реально діючу тягову підстанцію змінного струму, на якій проведено вимірювання та продемонстровано позитивний вплив сучасного пристрою компенсації реактивної потужності на якість електроенергії.

Проведені дослідження показали, що коефіцієнт спотворення форми струмів та напруг впливає на коефіцієнт потужності за наявності нелінійних навантажень.

Електричні навантаження в тягових мережах змінного струму мають стохастичний характер і специфічні особливості, які спричиняють гармонічні спотворення та несиметрію навантажень, що виникають у нормальних режимах роботи. Ці фактори значно впливають на якість електроенергії та вимагають детального аналізу для забезпечення стабільної та ефективної роботи тягових мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Д. О. Босий, «Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 2, с. 95-103, 2015.
- [2] I. Verbytskyi and K. Khodakov, "Analysis of electricity quality parameters within installing reactive power compensators," *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New Solutions in Modern Technologies*, vol. 45 (1321), pp. 234-242, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.45.32>. Accessed: Apr. 15, 2024.
- [3] В. В. Кирик, *Методи організації гнучких електричних систем, навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні системи і мережі»*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021.
- [4] В. Г. Сиченко, і Д. О. Босий, «Критерії керування пристроями компенсації реактивної потужності тягових підстанцій змінного струму», *Гірнична електромеханіка та автоматика*, № 83, с. 36-45, 2009.
- [5] Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, і С. В. Бараненко, «Методи компенсації реактивної потужності в мережах з нелінійними навантаженнями», *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету, серія: технічні науки*, № 26, с. 204-210, 2013.
- [6] M. Jaramillo, D. Carrión, and J. A. Muñoz, "A Deep Neural Network as a Strategy for Optimal Sizing and Location of Reactive Compensation Considering Power Consumption Uncertainties," *Energies*, vol. 15, pp. 9367, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15249367>. Accessed: Nov. 07, 2023.
- [7] M. Jaramillo, L. Tipan, and J. A. Muñoz, "A novel methodology for optimal location of reactive compensation through deep neural networks," *SSRN Electronic Journal*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4139215>. Accessed: Jan. 12, 2024.
- [8] D. Blaszcok, et al., "Forecasting of reactive power consumption with the use of artificial neural networks," *Electronics*, vol. 11, no. 13, p. 2005, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11132005>. Accessed: Feb. 27, 2024.
- [9] Є. І. Сокол, та ін., *Облік та компенсація реактивної потужності при несиметричних режимах роботи систем електропостачання*, Харків, Україна: ФОП Панов А. Н., 2017.
- [10] Dewesoft, "Power Analysis Measurement." [Online]. Available: <https://training.dewesoft.com/online/course/power-analysis>. Accessed: Feb. 07, 2024.
- [11] A. Hoevenaars, "How Harmonics Have Contributed to Many Power Factor Misconceptions," Mirus International Inc., 2014. [Electronic resource]. Available: <https://www.mirusinternational.com/downloads/MIRUS-TP003-A-How%20Harmonics%20have%20Contributed%20to%20Many%20Power%20Factor%20Misconceptions.pdf>. Accessed: Apr. 02, 2024.

- [12] S. Basu, "Note on Harmonic Distortion Control Power Factor Correction Circuitry for Switched Mode Power Supply," Research Gate, 2018. [Electronic resource]. Available: https://www.researchgate.net/publication/323187242_Note_on_Harmonic_Distortion_Control_Power_Factor_Correction_Circuitry_for_Switched_Mode_Power_Supply_MN . Accessed: Mar. 17, 2024.
- [13] NHP Electrical Engineering Products Pty Ltd., "Power Quality and Harmonics in Electrical Systems," 2017. [Online]. Available: <https://www.nhp.com.au/-/media/Project/NHP/Sites/Shared/White-Papers/Files/NHPTNL65.pdf>. [Accessed: May 27, 2024].
- [14] АТЕС Ltd., «Руководство по эксплуатации EDL175XR,» 2023. [Online]. Available: <https://www.satec-global.com/wp-content/uploads/2023/03/EDL175-Manual-Russian.pdf> . Accessed: Jan. 14, 2024.
- [15] ABR Electric, «Системи FACTS від компанії АВВ: Опис, переваги, можливості.» [Electronic resource]. Available: <https://abr-electric.com.ua/abb/facts.html> . Accessed: Aug. 12, 2024.
- [16] Гнучкі системи передачі змінного струму, Wikiwand. [Electronic resource]. Available: https://www.wikiwand.com/uk/articles/Гнучкі_системи_передачі_змінного_струму . Accessed: Aug. 21, 2024.
- [17] IEEE Std 1459-2010, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," *Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power & Energy Society*, 2010.
- [18] Hitachi Energy, "Reference: Black Oak." [Electronic resource]. Available: <https://www.hitachienergy.com/news-and-events/customer-success-stories/reference-black-oak> . Accessed Dec. 1, 2024.
- [19] ABB, *Get the FACTS on FACTS*. [Electronic resource]. Available: <https://new.abb.com/news/detail/41960/get-the-facts-on-facts> . Accessed: Dec. 01, 2024.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.09.2024

Шпільєвий Максим Олегович — аспірант кафедри інтелектуальних систем енергопостачання, e-mail: 23045@stud.ust.edu.ua ;

Босий Дмитро Олексійович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інтелектуальних систем енергопостачання, e-mail: d.o.bosyi@ust.edu.ua ;

Антонов Андрій Владиславович — канд. техн. наук, доцент кафедри інтелектуальних систем енергопостачання, e-mail: a.v.antonov@ust.edu.ua ;

Земський Денис Романович — канд. техн. наук, доцент кафедри інтелектуальних систем енергопостачання, e-mail: d.r.zemskyi@ust.edu.ua ;

Український державний університет науки і технологій, Дніпро;

Резник Андрій Вікторович — головний інженер ТОВ «Промспецінжиніринг», e-mail: info@promspecing.com

M. O. Shpilievyi¹
D. O. Bosyi¹
A. V. Antonov¹
D. R. Zemskyi¹
A. V. Rezyk²

Modern Approaches to Reactive Power Compensation in AC Traction Power Supply Systems

¹Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro;

²LLC Industrial Special Engineering "PROMSPECENGINEERING", Dnipro

The article considers the problem of reactive power compensation in AC traction power supply systems, which is of particular importance in the context of the energy crisis caused by military actions, which is relevant for Ukraine. Reactive power is an important component of electric networks, which significantly affects the stability and quality of power supply. The article highlights the impact of reactive power on the efficiency of traction substations serving railway transport.

Special attention is paid to the technical aspects of the problem and the analysis of the effectiveness of existing compensation methods, which is critically important for reducing electricity losses and increasing the overall efficiency of power supply systems. In conditions of outdated equipment and limited resources, the problem becomes more complicated, which requires the implementation of modern technological solutions.

The paper analyzes main methods and devices for compensation of reactive power, in particular, such as capacitor units and synchronous compensators, as well as the use of modern technologies of flexible alternating current transmission systems (FACTS). Particular attention is paid to experimental studies conducted at a real traction substation, where reactive power was measured and the effectiveness of compensating devices was shown. Research results show that reactive power compensation allows to significantly reduce energy losses, improve the quality of electricity and increase the stability of the network.

The article also discusses the prospects of implementing FACTS systems for dynamically regulating reactive power and improving the operation of electrical networks. The use of these systems can significantly increase the reliability and efficiency of the power system, especially in the context of the integration of renewable energy sources such as solar and wind power plants. This will ensure reliable power supply in critical conditions and increase the efficiency of Ukraine's energy infrastructure.

Keywords: reactive power, compensation, traction power supply, energy efficiency, measurement results, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), harmonic distortion, power factor.

Shpilevyi Maxim O. — Post-Graduate Student of the Chair of Intelligent Energy Supply Systems, e-mail: 23045@stud.ust.edu.ua ;

Bosiy Dmytro O. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Intelligent Power Supply Systems, e-mail: d.o.bosyi@ust.edu.ua ;

Antonov Andrii V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Intelligent Power Supply Systems, e-mail: a.v.antonov@ust.edu.ua ;

Zemskyi Denys R. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Intelligent Power Supply Systems, e-mail: d.r.zemskyi@ust.edu.ua ;

Reznyk Andrii V. — Chief Engineer of Industrial Special Engineering LLC, e-mail: info@promspecing.com