

УДК 621.31:378

doi:10.20998/2413-4295.2025.04.02

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В. С. ОРЛОВ*, І. В. ХОМЕНКО, А. В. ШКРЕБЕЛА

Кафедра передачі електричної енергії, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: Viktor.Orlov@iee.khpi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглянуто фрагмент реальної розподільчої мережі 110–35–10 кВ, що складається із замкненої конфігурації мережі 110 кВ із відгалуженнями напругою 35 кВ і 10 кВ. Для аналізу було враховано актуальні значення навантажень у вузлах із врахуванням роботи альтернативних джерел електроенергії, під'єднаних до кожного вузла. Під впливом цих факторів деякі вузли перетворюються на генераторні. Використано реальні технічні параметри трансформаторів, встановлених у вузлах навантаження, а також характеристики проводів ліній електропередач. Отримана розрахункова схема заміщення цієї мережі з урахуванням як повздовжніх, так і поперечних параметрів. Розглянуто алгоритм розрахунків, який використовується для аналізу режимів роботи електричної мережі. Проведено числові розрахунки нормальних режимів роботи мережі за допомогою розрахункової програми, що дозволило дослідити вплив компенсації реактивної потужності на втрати електричної енергії. Зокрема, було досліджено, як впливає компенсація реактивної потужності у вузлах за допомогою встановлення статичних компенсаторних батарей на загальні втрати активної та реактивної потужності у всій мережі. Дослідження включає порівняльний аналіз втрат електричної енергії для різних компонентів: активної та реактивної складових потужності. Такий підхід дозволяє зробити висновки щодо впливу заходів встановлення компенсуючих пристроїв. На основі виконаних розрахунків визначений вплив компенсації реактивної потужності на зменшення втрат у всій мережі загалом. Таким чином, було зроблено висновок про можливість оптимізації режиму роботи електричної мережі при компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності; розподільча електрична мережа; схема заміщення; альтернативні джерела енергії; нормальний режим; втрати електроенергії; оптимізація режиму.

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION NETWORK OPERATION TAKING INTO ACCOUNT REACTIVE POWER COMPENSATION

V. ORLOV, I. KHOMENKO, A. SHKREBELA

Department of Electrical Power Transmission, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The fragment of a real 110–35–10 kV distribution network, which consists of a closed configuration of a 110 kV network with branches of 35 kV and 10 kV, is considered. For the analysis, the current values of loads in the nodes were taken into account, taking into account the operation of alternative sources of electricity connected to each node. Under the influence of these factors, some nodes are converted into generators. The real technical parameters of transformers in load nodes were installed, as well as the characteristics of the wires of power transmission lines were used. The calculation scheme for the replacement of this network was obtained, taking into account both longitudinal and transverse parameters. The calculation algorithm used to analyze the operating modes of the electric network was considered. Numerical calculations of normal network operating modes were performed using a calculation program, which made it possible to study the effect of reactive power compensation on electrical energy losses. In particular, it was investigated how reactive power compensation in nodes by installing static compensatory batteries affects the total losses of active and reactive power in the entire network. The study includes a comparative analysis of electrical energy losses for different components: active and reactive power components. This approach allows us to draw conclusions about the impact of measures to install compensating devices. Based on the calculations performed, the effect of reactive power compensation on reducing losses in the entire network as a whole was determined. Thus, a conclusion was made about the possibility of optimizing the operating mode of the electric network when compensating reactive power.

Keywords: reactive power compensation; distribution electrical network; equivalent circuit; alternative energy sources; normal mode; electricity losses; mode optimization

Вступ

Одним із ключових аспектів ефективного функціонування електричних мереж є забезпечення надійності та якості електропостачання при мінімальних втратах енергії.

У попередньому дослідженні [1] було встановлено, що підвищення напруги суттєво впливає на активні втрати електроенергії в мережі. Цей факт можна використовувати у комплексі для подальшого

дослідження питання ефективності енергозбереження, а саме для збільшення ефективності використання пристроїв компенсації реактивної потужності у мережах 35–110 кВ. Таким чином, це дослідження є продовженням попереднього, оскільки як регулювання напруги, так і компенсація реактивної потужності прямо впливають на енергозбереження та ефективність роботи електричних мереж.

У дослідженні [1] йдеться, зокрема, про те, що втрати у мережі 35–110 кВ складаються переважно з

активних втрат у проводах і трансформаторах (I^2R -втрати). Якщо напруга знижується нижче оптимального рівня, для передачі тієї ж активної потужності струм зростає, а втрати збільшуються. Якщо напруга завищена, то збільшується споживання реактивної потужності електроприймачами (особливо двигунами, трансформаторами, освітлювальними лампами розжарювання), зростають втрати холостого ходу трансформаторів, виникає додаткове нагрівання обладнання.

Оптимальне регулювання напруги (за допомогою автоматичних регуляторів трансформаторів, секційних конденсаторних установок, FACTS-пристроїв тощо) знижує сумарні втрати енергії та підвищує ККД мережі.

Водночас, компенсація реактивної потужності також зменшує втрати електроенергії та підвищує ефективність використання обладнання, оскільки при наявності великої кількості реактивної потужності у мережі струми у лініях і трансформаторах зростають, навіть якщо корисна (активна) передана потужність залишається тією ж. Зростання струму призводить до збільшення активних втрат (I^2R), падіння напруги в мережі, необхідності резервувати більшу пропускну здатність ліній і трансформаторів.

Це питання набуває актуальності у зв'язку зі зміною величин і характеру навантажень, підключенням пристроїв з високим рівнем споживання реактивної потужності, інтеграцією нових джерел енергії та модернізацією схем електропостачання. Забезпечення оптимальних умов компенсації реактивної потужності є актуальним завданням для зниження втрат електроенергії та підвищення ефективності.

Компенсація реактивної потужності залишається важливим аспектом у сучасних електроенергетичних системах, оскільки вона сприяє підвищенню ефективності передачі та розподілу електроенергії, зокрема зниженню втрат.

Традиційно в електромережах для компенсації реактивної потужності встановлюються конденсаторні батареї, які використовуються для багатьох цілей, таких як зниження втрат потужності, поліпшення профілю напруги і збільшення максимальної потужності, що передається в лініях і трансформаторах.

Сучасні дослідження зосереджені на розробці адаптивних систем компенсації, які можуть підлаштовуватися до змінних умов роботи електрообладнання. Зокрема, у роботі [2] представлено теорію адаптивної компенсації реактивної потужності для електричних мереж. Автори розробили математичні моделі, що враховують випадковий характер зміни напруги в мережі та адаптують роботу компенсатора до цих змін. У статті [3] розглядаються технічні аспекти впровадження сучасних методів компенсації з використанням інтелектуальних систем управління. Дослідження включають в себе управління режимами

реактивної потужності в електричних мережах. У роботі [4] автори досліджували методи управління, спрямовані на зниження втрат електроенергії. Вони підкреслюють важливість прогнозування електричного навантаження та використання адаптивних методів експоненціального згладжування для оперативного управління компенсуючими установками. Додатково, у дослідженні [5] розглядаються аспекти оптимізації параметрів компенсаційних пристроїв, що дозволяють значно зменшити втрати в електромережах.

У нормативній сфері розроблено методики визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії. Зокрема, в [6] містяться рекомендації щодо обчислення плати за перетікання реактивної енергії між електропередавальною організацією та споживачами.

Останні розробки галузі компенсації реактивної потужності охоплюють нові підходи до автоматизованого управління компенсацією. Наприклад, у [7] представлено аналіз використання інтелектуальних компенсаторів, які забезпечують покращену стабільність роботи мережі. Стаття [8] пропонує дослідження щодо впливу компенсаційних пристроїв на довговічність електрообладнання. Додатково, у [9] розглядаються регуляторні вимоги щодо впровадження таких технологій, а у [10] аналізується ефективність різних методів компенсації в умовах змінного навантаження.

Підвищення частки нетрадиційних (розподілених) джерел електроенергії формує зміщення від великих статичних компенсаторів до розподіленої, керованої і дано-орієнтованої реактивної підтримки — через smart-інвертори, системи накопичення енергії, статичні синхронні компенсатори (STATCOM), статичні тиристорні компенсатори (SVC) та інтелектуальні системи. Нетрадиційні джерела живлення одночасно знижують потребу в деяких традиційних рішеннях [11] та підвищують загальну складність керування реактивною потужністю.

Нетрадиційні (відновлювані) джерела електроенергії також додають невизначеності й динаміки (мінливі потоки інсоляції та вітру, реверсні потоки) — це підвищує цінність динамічної компенсації реактивної потужності (STATCOM, накопичувачі, керовані інвертори) замість фіксованих компенсуючих пристроїв. Тобто сукупна потреба в реактивній підтримці зберігається та навіть зростає, але її форма — більш оперативна й розподілена [12]. Оптимальне розміщення та розмір компенсаційних пристроїв також змінюється. У проектних задачах зростає потреба враховувати розподілену генерацію: оптимальний розподіл конденсаторів, SVC/STATCOM тепер залежить від розташування нетрадиційних джерел живлення і режимів їх роботи. Нові статті 2024–2025 описують алгоритми для цього [13].

Водночас, вибір типу компенсуючих пристроїв та їх потужності, місць розміщення компенсаторів реактивної потужності (КРП), регулювання напруги у загальному вигляді є складовими оптимізаційної задачі, важливими складовими якої є: витрати на компенсуючі пристрої у вузлах навантаження та витрати, що пов'язані із з експлуатацією цих компенсуючих та регулюючих пристроїв.

Головна вимога до місць встановлення джерел реактивної потужності – це необхідність їхнього розміщення ближче до споживачів реактивної потужності з метою зменшення потоків реактивної потужності мережею. При виборі типу КРП керуються аналізом їх можливості роботи як в режимі генерації, так і споживання реактивної потужності; рівень втрат активної потужності в КРП при генерації реактивної потужності; й експлуатаційні характеристики [14].

Найбільш простим, дієвим та ефективним способом зниження споживаної з мережі реактивної потужності є застосування установок компенсації реактивної потужності (конденсаторних установок).

Хоча сучасні наукові дослідження не містять загальних тверджень про те, що нерегульовані статичні конденсатори є технічно кращими, ніж регульовані компенсатори (SVC/STATCOM) в аспектах якості, стабільності та динамічного регулювання реактивної потужності, саме нерегульовані конденсатори дешевші й достатні для простих статичних випадків, один із яких розглянуто в цій статті. Це не означає, що традиційні конденсатори технічно кращі у загальному сенсі – вони можуть бути достатніми й економічними за певних статичних режимів навантаження. Про це йдеться, зокрема, в порівняльному аналізі [15].

Мета роботи

Метою цієї роботи є теоретичне дослідження впливу компенсації реактивної потужності на активні та реактивні втрати та на рівні напруги у фрагменті реальної електричної мережі 35–110 кВ за допомогою моделювання встановлення статичних конденсаторних КРП.

Виклад основного матеріалу

Задачі забезпечення споживачів електричної енергії відповідною якістю, регулювання напруги в процесі експлуатації системи електропостачання, вибір потужності конденсаторів, тісно пов'язані між собою та потребують комплексного підходу та розв'язання.

Найбільш дієвим та ефективним способом зниження споживаної з мережі реактивної потужності є застосування установок компенсації реактивної потужності (конденсаторних установок).

Розглянемо питання оптимізації роботи електричної мережі з урахуванням компенсації реактивної потужності детальніше. На рис. 1 показано фрагмент реальної електричної мережі. Топологія мережі та параметри базового випадку (типи та довжини ліній, номінали трансформаторів та рівні навантаження) повторюють набір даних, наведений у [1]. Усі вузли навантаження підключені та працюють з нетрадиційними джерелами енергії, переважно із сонячними панелями та вітровими електростанціями. Їхнє навантаження задано з урахуванням їх роботи.

На рис. 1 прийнята нумерація вузлів мережі для подальших розрахунків.

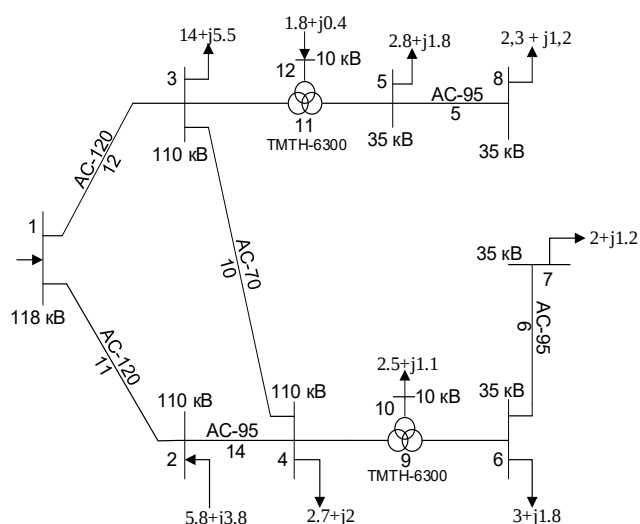


Рис. 1 – Схема досліджуваної розподільчої мережі (110/35/10 кВ) – адаптована з [1]

Схема заміщення електричної мережі, відповідна прийнятій розрахунковій схемі, представлена на рис. 2.

Підготовка даних до розрахунків нормальних режимів електричної мережі включає: складання схеми заміщення електричної мережі в нормальному режимі, нумерацію вузлів схеми; розрахунок електричних параметрів елементів мережі; підготовку файлів вихідних даних.

Для забезпечення необхідної точності результатів розрахунку всі елементи вихідної схеми представлені повними схемами заміщення (з урахуванням як поздовжніх R , L , так і поперечних G , C параметрів). В основу оптимізаційних розрахунків покладена послідовність розрахунків усталених нормальних режимів електричної мережі.

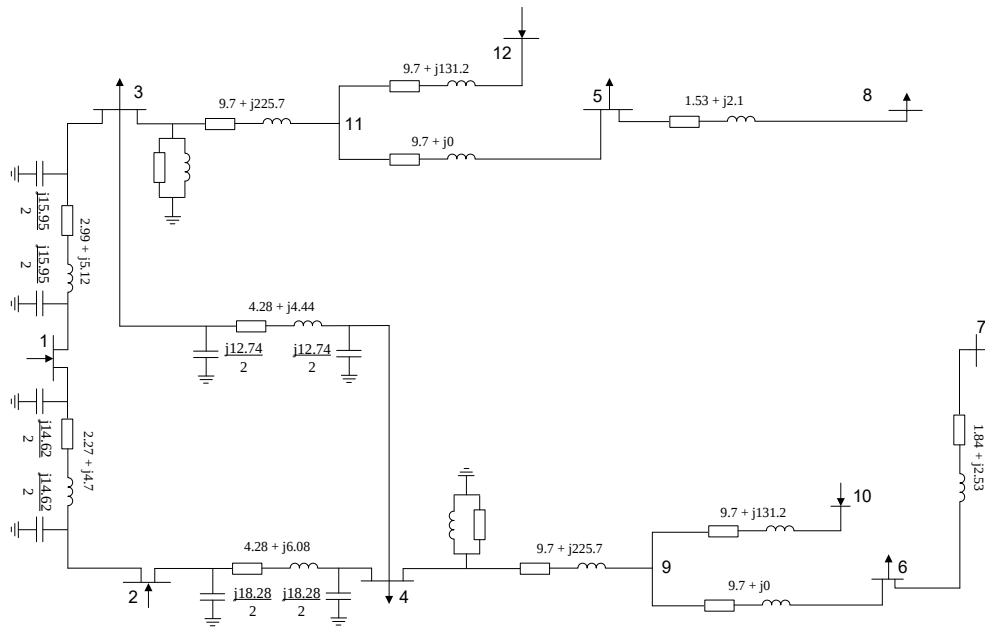


Рис. 2 – Еквівалентна схема електричної мережі – адаптована з [1]

Розглянемо заходи щодо підвищення ефективності роботи електричної мережі.

Як можемо бачити на рис. 1, мережа 110 кВ замкнена, мережа 35 кВ – розімкнена. На схемі представлено типи трансформаторів на підстанціях та типи і довжина проводів ліній електропередавання. Вузол 1 – базовий по напрузі та балансує по потужності. До всіх вузлів навантаження підключені та працюють нетрадиційні джерела енергії, переважно це сонячні батареї та вітрові електричні станції. Їх навантаження приведено з урахуванням їх роботи. Під впливом цих факторів вузли 2 та 12 перетворюються на генераторні.

Вихідні дані для розрахунків наступні. У табл. 1 подано вузлові навантаження для вузлів мережі, що досліджуються. В ній містяться значення активної (P , МВт) та реактивної (Q , МВАр) потужностей у вузлах розрахункової електричної мережі. Ми можемо впевнитись, серед вузових навантажень наявний нерівномірний розподіл, що потенційно може вплинути на втрати електроенергії в мережі.

Таблиця 1 – Вузлові навантаження

Вузол	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P , МВт	-5,8	14,0	2,7	2,8	3	2	2,3	0	2,5	0	-1,8
Q , МВАр	-3,8	5,5	2	1,8	1,8	1,2	1,2	0	1,1	0	-0,4

Прийняті з від'ємним знаком навантаження у таблиці слід розуміти як генераторні потужності (тобто розглядається режим, де потужність генераторів у вузлах перевищує вузлові навантаження).

Параметри проводів та трансформаторів, що формують основні ділянки мережі наведені у табл. 2, 3. Зокрема, для кожної ділянки представлені марка дроту, його довжина, а також поздовжні й поперечні параметри (r , x , b). Для трансформаторів представлені тип, номінальна напруга обмоток, а також активний та індуктивний опір (R , X). Ці дані є основою для побудови схем заміщення мережі та визначення величин втрат потужності. Зокрема, було встановлено, що параметри проводів і трансформаторів мають суттєвий вплив на загальні енергетичні характеристики мережі.

Матеріали та методика дослідження наступна. Кожна ділянка електричної мережі (лінії електропередачі, трансформатори та автотрансформатори) характеризується поздовжніми параметрами - активним R і реактивним X опорами, в яких переток активної і реактивної потужностей в умовах експлуатації супроводжуються загальними технологічними втратами:

$$\Delta P_{ij} + j\Delta Q_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} (R_{ij} + jX_{ij}), \quad (1)$$

де P_{ij} , Q_{ij} , U_i – відповідно активна і реактивна потужність перетікання початку ділянки $i - j$ і модуль напруги вузла початку ділянки.

Відповідно технологічні витрати активної потужності на ділянці $i - j$ визначаються, як:

$$\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij}. \quad (2)$$

Для електричної мережі, яка має n ділянок, технологічні витрати активної потужності розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_1^n \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij} . \quad (3)$$

Таблиця 2 – Параметри мережі

Ділянка	Марка дроту	l, км	r ₀ , Ом/км	x ₀ , Ом/км
1–2	АС-120	11	0,249	0,427
1–3	АС-120	12	0,249	0,427
2–4	АС-95	14	0,306	0,421
3–4	АС-70	10	0,428	0,432
5–8	АС-95	5	0,306	0,421
6–7	АС-95	6	0,306	0,421
Ділянка	b ₀ , мкСм/км	R, Ом	X, Ом	B, мкСм
1–2	2,658	2,27	4,7	29,24
1–3	2,658	2,99	5,12	31,90
2–4	2,611	4,28	6,08	36,55
3–4	2,547	4,28	4,44	25,47
5–8	—	1,53	2,10	—
6–7	—	1,84	2,53	—

Таблиця 3 – Параметри трансформаторів

Ділянка	Тип трансформатора	U _н обмоток, кВ	R, Ом	X, Ом
3-11	ТМТН-6300/110	ВН	115	9,70
11-5		СН	38,5	9,70
11-12		НН	11	9,70
4-9	ТМТН-6300/110	ВН	115	9,70
9-6		СН	38,5	9,70
9-10		НН	11	9,70

Вихідними даними для роботи програми розрахунку стаціонарних режимів електричної мережі є: число вузлів N і гілок M ; номінальна напруга вузлів мережі $U_{ном}$; потужності навантажень P_N , jQ_N та генераторів P_G , jQ_G ; опору R , X , провідності G , B гілок, коефіцієнти трансформації K_T .

Розрахунки нормальних режимів електричної мережі виконані із застосуванням розробленої на кафедрі програми W_МАЕСТРО на ЕОМ [16]. Програма складається з головної програми та низки процедур, що реалізують основні етапи вирішення задачі методом Ньютона:

- введення вихідних даних про параметри елементів та навантаження вузлів мережі;
- розрахунок елементів матриці власних та взаємних провідностей вузлів електричної мережі (процедура PROW);
- розрахунок небалансів потужності та лінійна апроксимація рівнянь (процедура ЯКОВІ). Результатом роботи процедури є елементи лінеаризованих вузлових рівнянь мережі – матриця Якобі та вектор небалансів активної та реактивної потужності ΔP_i , ΔQ_i у вузлах мережі;
- рішення лінеаризованих вузлових рівнянь методом Гаусса-Жордана, розрахунок поправок та

перехід до розрахунку нового наближення (процедура JORDAN);

Результатами розрахунку нормального режиму є струми, потоки та втрати потужності по всіх гілках, модулі та кути векторів вузлових напруг, активні та реактивні потужності балансуєчого вузла, сумарні активні та реактивні потужності навантажень, шунтів на землю та сумарні втрати в мережі.

Результатами розрахунку нормального режиму для кожного з вузлів є:

- струми, потужності та втрати активної та реактивної потужності, для кожної з гілок, що підходить до вузла;
- сумарна потужність, що споживаються або генерується у вузлі, напруги та небаланс потужності у вузлі.

Також певні дані по мережі:

- сумарні потужності, що використовуються або генеруються, активні та реактивні потужності;
- повні втрати активної та реактивної потужності в мережі.

Для забезпечення порівняльного аналізу спершу виконано розрахунок статичного режиму без будь-якої компенсації.

Моделювання компенсації реактивної потужності у вузлах виконане за урахування припущення, що відбувається повна компенсація (споживання Q дорівнює 0). На практиці такий режим досягається відповідним підбором номінальних значень статичних конденсаторних батарей. Проте технічний аспект (практична реалізація) підбору конденсаторів в цій статті не розглядається, оскільки задачею є теоретичне дослідження впливу компенсації реактивної потужності.

Компенсація реактивної потужності моделювалась у всіх вузлах споживання низької напруги (10 кВ) та середньої напруги (35 кВ).

Результати розрахунків активних і реактивних втрат при компенсації реактивної потужності у вузлах електричної мережі наведено в табл. 4. Результати розрахунку рівнів напруги при компенсації реактивної потужності наведено в табл. 5.

Таблиця 4 – Активні та реактивні втрати в при дослідженні компенсації реактивної потужності в вузлах електричної мережі

Вузли	ΔP , МВт			ΔQ , МВар		
	110	35	загальні	110	35	загальні
Без компенсації	2,031	0,023	2,054	0,444	0,484	0,928
10	1,798	0,023	1,821	0,471	0,479	0,95
8	1,921	0,021	1,942	0,435	0,456	0,891
7	1,781	0,019	1,8	0,424	0,435	0,859
6	1,688	0,022	1,71	0,414	0,456	0,87
5	1,888	0,023	1,911	0,43	0,457	0,887
6 і 7	1,551	0,019	1,57	0,409	0,437	0,846
5 і 8	1,86	0,02	1,88	0,388	0,441	0,829
5 і 6	1,546	0,022	1,568	0,401	0,429	0,83

Таблиця 5 – Рівні напруги при дослідженні компенсації реактивної потужності в вузлах електричної мережі

Вузли	Напруга у вузлах, кВ										
	3	11	5	8	2	4	9	6	7	10	12
Без компенсації	117,15	111,31	35,31	35,14	117,82	117,11	106,51	33,77	33,57	9,53	10,17
10	117,18	111,34	35,32	35,15	117,85	117,17	109,15	34,62	34,42	9,90	10,18
8	117,19	113,87	36,13	36,03	117,83	117,14	106,54	33,79	33,59	9,54	10,41
7	117,18	111,35	35,32	35,15	117,85	117,18	109,35	34,68	34,58	9,80	10,18
6	117,20	111,36	35,32	35,15	117,86	117,21	110,70	35,12	34,92	9,92	10,18
5	117,21	115,10	36,52	36,35	117,84	117,16	106,56	33,79	33,59	9,54	10,52
6 і 7	117,23	111,40	35,33	35,16	117,89	117,26	113,33	35,96	35,85	10,16	10,18
5 і 8	117,25	117,50	37,29	37,19	117,85	117,19	106,59	33,80	33,60	9,54	10,73
5 і 6	117,26	115,16	36,54	36,37	117,88	117,25	110,75	35,13	34,94	9,93	10,52

Аналіз проведених розрахунків показує, що при компенсації реактивної потужності втрати активної та реактивної потужності зменшуються не тільки у вузлах, в яких безпосередньо відбувається компенсація, а і у всій мережі. Результати розрахунку свідчать, що загальні втрати активної та реактивної потужностей зменшуються, якщо компенсація відбувається у кількох вузлах мережі: 6 і 7, 5 і 8, 5 і 6. Розрахунок показує, що завдяки компенсації реактивної потужності можна зменшити загальні втрати активної потужності в мережі на 22,3 % і реактивної потужності на 10,57 % при встановленні компенсуючих пристроїв одночасно у вузлах 5 і 6, де знаходяться прохідні підстанції 35 кВ.

Також розрахунок показує можливість істотного регулювання напруги у вузлах мережі за допомогою встановлення КРП. Найбільш ефективне регулювання напруги відбувається у вузлі 7 при одночасній компенсації в 6 і 7 вузлах: напруга змінилась на 6,79% відносно напруги в нормальному режимі без здійснення компенсації.

Висновки

У статті розглянута оптимізація режиму електричної мережі за допомогою компенсації реактивної потужності у вузлах навантаження. Ця проблема вирішується за допомогою дослідження впливу встановлення компенсуючих пристроїв на втрати електричної енергії. У дослідженні розглядався нормальний симетричний режим роботи фрагмента розподільчої мережі 110–35 кВ. Встановлено, що компенсація реактивної потужності суттєво впливає на активні та реактивні втрати електроенергії на прикладі розрахункового фрагмента реальної електричної мережі.

У взаємопоеднанні з дослідженням [1] ми можемо зробити висновок, що регулювання напруги і

компенсація реактивної потужності працюють разом:

- 1) компенсація реактивної потужності зменшує реактивні перетоки і вирівнює профіль напруги,
- 2) оптимальний рівень напруги, у свою чергу, зменшує реактивне споживання і втрати.

Список літератури

1. Хоменко І. В., Шкребела А. В., Орлов В. С. Оптимізація режиму розподільчої мережі по напрузі в сучасних умовах». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2024. № 2 (9). С. 72–76. doi:10.20998/EREE.2024.2(9).317375.
2. Зорін В. В., Мацкевич Ю. М. *Багатоцільова компенсація реактивної потужності в розподільних електричних мережах міст*. Магістерська дисертація. КПІ ім. Сікорського, 2018. 150 с.
3. *Сучасні методи компенсації реактивної потужності та їх впровадження в електроенергетичних системах*. Аналітичний огляд. URL: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4351.php> (дата звернення: 03.09.25).
4. Філімоненко Н. М., Філімоненко К. В. Сучасні системи компенсації реактивної потужності в міських електричних мережах. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2024. № 3 (283). С. 43-46. doi: 10.33216/1998-7927-2024-283-3-43-46.
5. Шестеренко В. Є., Ізволенький І. Є. Компенсація реактивної потужності як ефективний засіб зниження втрат електроенергії. Київ: Національний університет харчових технологій. *Наукові праці НУХТ*. 2015. Т. 21. № 5. С. 169-178.
6. Про затвердження порядку визначення плати за перетікання реактивної електроенергії: нормативно-правовий акт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0392-18#Text> (дата звернення: 02.09.25).
7. Калінчик В. В., Побігайло В. А., Калінчик В. В., Скосирев В. Г. Управління режимом реактивної потужності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів.

- Теорія і практика*. 2021. № 2 (6). С. 36–39. doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.07.
8. Лежнюк П. Д., Грицюк Ю. В., Пірняк В. М. Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга. *Наук. праці ВНТУ*. 2012. Вип. 2. С. 1-6.
 9. СОУ-Н МПЕ 40.1.20.510:2006 *Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача)*. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=68318 (дата звернення: 28.08.2025)
 10. Бондар О. І., Бондар І. Л. Оцінка впливу компенсації реактивної потужності на втрати електроенергії в електромережі залізничного вузла. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. 2009. С. 51–55.
 11. Othman R., Al-Yozbaky O. Influence of reactive power compensation from PV systems on electrical grid. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2023. P. 1172–1183. doi: 10.11591/ijpeds.v14.i2.
 12. Gao S., Zhang H., Meng X., Zhang Y. A review of dynamic voltage support for power grids with large-scale penetration of renewable generation. *Power Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Co. Ltd., Changchun, China*. 2025. doi: 10.3389/fenrg.2025.1606725.
 13. Feng N., Niu T., Yan J., Zhang Y., Feng Y., Lei Y. Optimal Placement and Sizing of Reactive Power Compensation Devices in Power Grids with High Penetration of Distributed Generation. *Processes, Section Energy Systems*. 2025. Iss. 13. P. 2953. doi: 10.3390/pr13092953.
 14. Стадніченко А. С., Шеїна Г. О. *Статичні тиристорні компенсатори. Тези доповідей*. Форум «ТАК», ДОНТУ. Покровськ. 2021. С. 58-60.
 15. Reza S., Azah M., Hussain S. Comparative study of effectiveness of different var compensation devices in large-scale power networks. *Journal of Central South University*. 2013. 20(3). P. 715–723. doi:10.1007/s11771-013-1539-2.
 16. Веприк Ю. М. Програма W_ МАЕСТРО розрахунку стаціонарних режимів електричних мереж методом Ньютона. *Методичні вказівки по застосуванню; сост.: Ю. М. Веприк, О. О. Загайнова*. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. 23 с.
 - of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2018, p. 150.
 3. *Suchasni metody kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti ta yikh vprovadzhennia v elektroenerhetychnykh systemakh. Analitychnyi ohliad [Modern Methods of Reactive Power Compensation and Their Implementation in Power Systems. Analytical Review]*. Available at: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4351.php> (accessed 03.09.2025).
 4. Filimonenko N. M., Filimonenko K. V. Suchasni systemy kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti v miskykh elektrychnykh merezhakh [Modern Systems of Reactive Power Compensation in Urban Electrical Networks]. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho Natsionalnoho Universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 2024, no. 3 (283), p. 43-46, doi: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-43-46>.
 5. Shesterenko, V. Ye., and Izvolenskyi I. Ye. *Kompensatsiia reaktivnoi potuzhnosti yak efektyvnyi zasib znyzhennia vtrat elektroenerhii [Reactive Power Compensation as an Effective Means of Reducing Electricity Losses]*. Kyiv. National University of Food Technologies, *Naukovi pratsi NUKhT*, 2015, Vol. 21, no. 5, p. 169-178.
 6. *Pro zatverdzhennia poriadku vyznachennia platy za peretikannia reaktivnoi elektroenerhii: normatyvno-pravovyi akt [On Approval of the Procedure for Determining the Fee for Reactive Electricity Flow: Regulatory Act]*. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0392-18#Text>. (accessed 02.09.2025).
 7. Kalinchyk V. V., Pobihailo V. A., Kalinchyk V. V., Skosyrev V. H. Upravlinnia rezhymom reaktivnoi potuzhnosti [Reactive Power Mode Control]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu “KhPI”. Seriya: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*, 2021, no. 2 (6), p. 36–39, doi:10.20998/2079-3944.2021.2.07.
 8. Lezhniuk P. D., Hrytsiuk Yu. V., Pirniak V. M. Rehuliuвання реактивної потужності у напруги в електричних мережах як допоміжна послуга [Regulation of Reactive Power and Voltage in Electric Networks as an Ancillary Service]. *Naukovi Pratsi VNTU*, 2012, no. 2, p. 1-6.
 9. SOU-N MPE 40.1.20.510:2006. *Metodyka vyznachennia ekonomichno dotsilnykh obsiahiv kompensatsii reaktivnoi enerhii, yaka peretikaie mizh elektrychnymy merezhamy elektroperepavchalnoi orhanizatsii ta spozhyvacha (osnovnoho spozhyvacha ta subsposhyvacha) [Methodology for Determining Economically Feasible Volumes of Reactive Energy Compensation Flowing Between the Electrical Networks of a Transmission Organization and a Consumer (Main Consumer and Subconsumer)]*. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=68318. (accessed 28.08.2025).
 10. Bondar O. I., Bondar I. L. Otsinka vplyvu kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti na vtraty elektroenerhii v elektromerezhii zaliznychnoho vuzla [Assessment of the Impact of Reactive Power Compensation on Energy Losses in the Electrical Network of a Railway Hub]. *Visnyk Dnipropetrovskoho Natsionalnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu im. akad. V. Lazaryana*, 2009, pp. 51–55.
 11. Othman R., Al-Yozbaky O. Influence of reactive power compensation from PV systems on electrical grid. *International Journal of Power Electronics and Drive*

References (transliterated)

1. Khomenko I. V., Shkrebel A. V., Orlov V. S. Optymizatsiia rezhymu rozpodilchoi merezhi po napruzi v suchasnykh umovakh [Optimization of the Distribution Network Voltage Mode in Modern Conditions]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu “KhPI”. Seriya: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist*, 2024, no. 2 (9), pp. 72–76, doi: 10.20998/EREE.2024.2(9).317375.
2. Zorin V. V., Matskevych Yu. M. *Bahatotsilova kompensatsiia reaktivnoi potuzhnosti v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist [Multi-Objective Reactive Power Compensation in Urban Distribution Electrical Networks]*. Master’s Thesis, National Technical University

- Systems (IJPEDS)*, 2023, pp. 1172–1183, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i2.
12. Gao S., Zhang H., Meng X., Zhang Y. A review of dynamic voltage support for power grids with large-scale penetration of renewable generation. *Power Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Co. Ltd., Changchun, China*, 2025, doi: 10.3389/fenrg.2025.1606725.
13. Feng N., Niu T., Yan J., Zhang Y., Feng Y., Lei Y. Optimal Placement and Sizing of Reactive Power Compensation Devices in Power Grids with High Penetration of Distributed Generation. *Processes, Section Energy Systems*, 2025, 13, p. 2953, doi: 10.3390/pr13092953.
14. Stadnichenko A. S., Sheina H. O. *Statychni tyristorni kompensatory. Tezy dopovidey [Static Thyristor Compensators. Conference Abstracts]*. Forum "TAK", DonNTU, Pokrovsk, 2021, p. 58-60.
15. Reza S., Azah M., Hussain S. Comparative study of effectiveness of different var compensation devices in large-scale power networks. *Journal of Central South University*, 2013, 20 (3), pp. 715-723, doi:10.1007/s11771-013-1539-2.
16. Vepryk Yu. M. *Prohrama W MAESTRO rozrakhunku statsionarnykh rezhymiv elektrychnykh merezh metodom Niutona. Metodychni vkazivky po zastosuvanniu [W MAESTRO Program for Calculating Steady-State Modes of Electrical Networks Using the Newton Method. Methodical Guidelines]*. Kharkiv. NTU "KhPI", 2013, 23 p.

Відомості про авторів (About authors)

Орлов Віктор Сергійович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-9809-0466; e-mail: viktor.orlov@ieee.khpi.edu.ua.

Orlov Viktor – postgraduate student of the Department of Electrical Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-9809-0466; e-mail: viktor.orlov@ieee.khpi.edu.ua.

Хоменко Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5141-5391; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Khomenko Igor – Candidate of Engineering Sciences, Docent, Professor of the Department of Electrical Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5141-5391; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Шкребела Андрій Вячеславович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0007-9321-3361; e-mail: Andrii.Shkrebela@ieee.khpi.edu.ua.

Shkrebela Andrii – postgraduate student of the Department of Electrical Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0007-9321-3361; e-mail: Andrii.Shkrebela@ieee.khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Орлов В. С., Хоменко І. В., Шкребела А. В. Оптимізація роботи розподільчої мережі з урахуванням компенсації реактивної потужності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 4 (26). С. 9-16. doi:10.20998/2413-4295.2025.04.02.

Please cite this article as:

Orlov V., Khomenko I., Shkrebela A. Optimization of distribution network operation taking into account reactive power compensation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 4(26), pp. 9-16, doi:10.20998/2413-4295.2025.04.02.

Надійшла (received) 02.09.2025

Прийнята (accepted) 18.12.2025