

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В роботі розглядаються сучасні тенденції, які використовуються у сфері компенсації реактивної потужності, основні напрямки розвитку сучасних методів компенсації реактивної потужності. В процесі аналізу розглянути доцільність застосування різних видів компенсації реактивної потужності, охарактеризувати їхні особливості.

Ключові слова: реактивна потужність, системи компенсації, фільтро-компенсувальна схема, промислова електрична мережа, електрична потужність.

KOVAL OLEH
Lviv Polytechnic National University

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF REACTIVE POWER COMPENSATION SYSTEMS

This paper surveys current trends and developments in reactive power compensation systems, elucidating their significance in enhancing system capacity and flexibility. By analyzing the capacity factor enhancement enabled by reactive power compensation, the study underscores its role in optimizing electricity delivery, thus conserving energy resources and facilitating the integration of renewable energy sources. It explores the key models and concepts driving advancements in reactive power compensation within power grids. As modern electrical systems grow in complexity, ongoing research into improving compensation methods becomes imperative to ensure the reliability and efficiency of industrial power grids. Future endeavors will involve developing a model utilizing real-world enterprise data to investigate the effects of technological variations in filter parameters on the performance of complex reactive power compensation schemes, encompassing both filters and capacitor banks. Keywords: reactive power, compensation systems, filter-compensating circuit, industrial power grid, electric power.

Context. The paper considers the current trends used in the field of reactive power compensation, and the main directions of development of modern methods of reactive power compensation.

Objective. The purpose of the work is to overview of current trends in the development of reactive power compensation systems, as well as an overview of possible ways of their effective application in various industrial networks.

Methods. The paper presents a key aspect of reactive power compensation is its ability to increase system capacity and flexibility. By improving the capacity factor, utilities can deliver electricity more efficiently, reducing the need for excess capacity and thus conserving energy resources. In addition, this process plays an important role in supporting the integration of renewable energy sources such as wind and solar power, which often introduce volatility into electricity generation schemes.

Results. The paper presents the main models and concepts in the field of reactive power compensation in power grids.

Conclusions. Given the growing complexity of modern electrical systems, it is important to continue research into improving methods and means of reactive power compensation to ensure the reliability and efficiency of industrial power grids. In further research, it is planned to develop a model using a real enterprise as an example and investigate the impact of technological deviations of filter parameters on the steady-state and transient performance of complex reactive power compensation schemes, including not only filters but also capacitor banks.

Keywords: reactive power, compensation systems, filter-compensating circuit, industrial power grid, electric power.

Постановка проблеми

Автор роботи ставить за мету розглянути методи і сучасні системи компенсації реактивної потужності у промислових мережах та сучасні тенденції розвитку цих методів.

Аналіз останніх джерел

Процес компенсації реактивної потужності має вирішальне значення для підтримки ефективних, надійних і безпечних систем електроенергії. Це включає в себе управління реактивною потужністю в системі для оптимізації коефіцієнта потужності, що є важливим для зменшення втрат у мережах передачі та розподілу електроенергії. Ефективна компенсація реактивної потужності допомагає стабілізувати рівні напруги в мережі, що є надзвичайно важливим для стабільної роботи електрообладнання та мінімізації ризику падіння напруги або проблем з якістю електроенергії [1-3].

Ключовим аспектом компенсації реактивної потужності є її здатність підвищувати пропускну здатність і гнучкість системи. Покращуючи коефіцієнт потужності, комунальні підприємства можуть постачати електроенергію ефективніше, зменшуючи потребу у створенні надлишкової потужності та, таким чином, зберігаючи енергетичні ресурси. Крім того, цей процес відіграє важливу роль у підтримці інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як вітрова та сонячна електроенергія, які часто вносять волатильність у систему виробництва електроенергії [4-6].

Нижче наведено основні методи компенсації реактивної потужності, які і будуть описані у даному дослідженні:

- Шунтові конденсатори;
- Топологія та номінальні характеристики власних потреб електростанції;
- Синхронні конденсатори;
- Статичні конденсатори VAR (SVC) ;

- Статичні синхронні компенсатори (STATCOM) ;
- Послідовні конденсатори;
- Пасивні фільтри;

Метою роботи є дослідження сучасні тенденції розвитку систем компенсації реактивної потужності, а також огляд можливих способів їх ефективного застосування у різних промислових мережах.

Виклад основного матеріалу

У сфері електроенергетики компенсація реактивної потужності є вирішальним методом для підвищення ефективності та стабільності енергосистем. Він передбачає керування реактивною потужністю для зменшення навантаження на енергосистему, покращення рівнів напруги та підвищення коефіцієнта потужності [7].

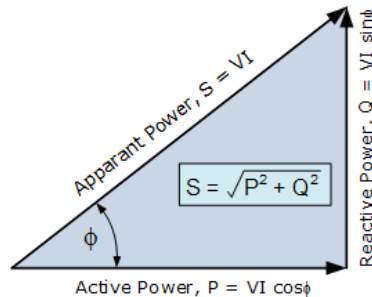


Рис. 1. Трикутник потужностей

Нижче наведені основні методи компенсації реактивної потужності:

1. Шунтові конденсатори: це найбільш поширений і економічний метод компенсації реактивної потужності. Шунтові конденсатори забезпечують генерацію реактивної потужності, яка необхідна для нормальної роботи систем з великим індуктивним навантаженням, такими як двигуни та трансформатори. Вони використовуються для покращення коефіцієнта потужності та якості напруги в системах розподілу. Вони підключаються паралельно до навантаження енергосистеми. Додавання ємнісної реактивної потужності покращує коефіцієнт потужності та зменшує загальний струм, що протікає в лініях електропередачі, тим самим зменшуючи втрати та покращуючи характеристики напруги на навантаженні. Рівень компенсації можна регулювати, змінюючи кількість конденсаторів, підключених до схеми [8].

2. Синхронні конденсатори: Синхронний конденсатор – це, по суті, синхронний двигун, що працює без механічного навантаження, через надмірне збудження конденсатора він генерує реактивну потужність; при недозбудженні споживає реактивну потужність [9].

Його можна контролювати під час використання, як споживача так і генератора реактивної потужності за потреби, що робить його динамічним і гнучким рішенням для керування реактивною потужністю. Ця здатність динамічного регулювання коефіцієнта потужності особливо корисна в системах із змінним рівнем навантаження.

3. Статичні компенсатори VAR (SVC): SVC є типом гнучкої системи передачі змінного струму (FACTS), яка використовує тиристори та інші силові електронні пристрої для швидкого керування потоком реактивної потужності в електричних мережах. Вони забезпечують швидку компенсацію реактивної потужності та можуть допомогти стабілізувати рівні напруги під час перехідних процесів. Статичні компенсатори складаються з тиристорно-керованих реакторів (TCR), тиристорно-керованих конденсаторів (TSC), а іноді і постійних конденсаторів і реакторів.

Принцип роботи SVC полягає у використуванні тиристорів для контролю пропускної здатності реактора (індуктора) і конденсаторів в системі живлення змінного струму для забезпечення швидкодіючої компенсації реактивної потужності. Шляхом регулювання кута спрацьовування тиристорів SVC може динамічно змінювати кількість споживаної або відданої реактивної потужності.

4. Статичні синхронні компенсатори (STATCOM): Подібно до SVC, STATCOM також є пристроями FACTS, але використовують перетворювачі джерела напруги (VSC) для забезпечення реактивної потужності. STATCOM мають більший діапазон керування та кращу продуктивність на низьких рівнях напруги порівняно з SVC, що робить їх придатними для застосувань у системах, які вимагають швидкого та точного контролю напруги. STATCOM використовує перетворювач джерела напруги для генерації напруги, яка є синфазною та поєднується з напругою системи через реактор. Він працює подібно до SVC, але використовує силову електроніку для генерування будь-якої необхідної кількості випереджальної або відстаючої реактивної потужності. STATCOM можуть реагувати швидше, ніж традиційні SVC, і ефективно працювати в більш широкому діапазоні рівнів напруги. Вони регулюють вихід, змінюючи амплітуду і фазовий кут напруги, виробленої перетворювачем, тим самим безпосередньо впливаючи на потік реактивної потужності. STATCOM підключаються в точках електромережі, де необхідна підтримка реактивної потужності, наприклад поблизу великих

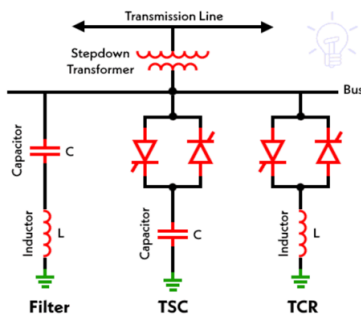


Рис. 2. Типова схема статичного VAR компенсатора

промислових навантажень або на вітрових електростанціях.

5. Послідовні конденсатори: послідовні конденсатори, які встановлюються послідовно у лінію електропередачі, використовуються в основному в системах транспортування електроенергії для збільшення пропускної здатності лінії та регулювання потоків електроенергії. Вони зменшують реактивний опір лінії, тим самим дозволяючи передавати більше потужності на великій відстані. Зменшуючи реактивний опір лінії, послідовні конденсатори допомагають покращити регулювання напруги вздовж лінії передачі. Це особливо корисно на довгих лініях електропередачі, де падіння напруги є значною проблемою, оскільки це допомагає підтримувати більш рівномірний рівень напруги від джерела до навантаження. Послідовні конденсатори можуть підвищити стабільність енергосистеми, забезпечуючи додаткову передачу потужності через існуючі лінії електропередачі без необхідності введення в експлуатацію нових пропускних потужностей. Вони покращують амортизацію коливань потужності та зменшують ризик нестабільності системи в умовах несправності або різких змін навантаження. Встановлення послідовних конденсаторів часто є економічно ефективнішим, ніж будівництво нових ліній електропередачі або модернізація існуючих ліній до вищої напруги. Вони є капіталоєфективним способом збільшення пропускної спроможності та ефективності мереж передачі електроенергії. Забезпечуючи передачу потужності при зменшених струмах для тієї самої передачі потужності, послідовні конденсатори допомагають зменшити втрати у лінії передачі. Це не тільки покращує ефективність, але й призводить до економії енергії та зниження експлуатаційних витрат. Послідовні конденсатори можуть бути обладнані схемами захисту та контролю, щоб відключати їх у разі несправностей або інших аварійних умов роботи, таким чином захищаючи конденсатор і підтримуючи надійність системи. Сучасні системи включають тиристорно-керовані послідовні конденсатори (TCSC), які дозволяють змінно контролювати ємність, що вводиться в лінію, підвищуючи гнучкість реагування на різні умови системи [10].

Одним із потенційних недоліків є те, що послідовні конденсатори можуть викликати гармонічний резонанс в системі живлення. Це вимагає ретельного проектування та часто використання додаткового фільтруючого обладнання для керування та пом'якшення впливу гармонік на роботу системи. Послідовні конденсатори відіграють вирішальну роль в управлінні ефективністю та стабільністю систем передачі електроенергії, особливо коли мережі стають більш складними з інтеграцією змінних відновлюваних джерел енергії. Їхня здатність збільшувати пропускну спроможність і стабілізувати потоки напруги та потужності робить їх важливим компонентом сучасних електричних мереж.

6. Пасивні фільтри: Пасивні фільтри – це комбінації конденсаторів і котушок індуктивності, спеціально розроблені для націлювання на певні частотні діапазони гармонійних струмів, вони використовуються не тільки для компенсації реактивної потужності, але й для фільтрації гармонійних спотворень, викликаних нелінійними навантаженнями досягають цього, забезпечуючи шлях з низьким імпедансом на гармонічних частотах, тим самим поглинаючи та відфільтровуючи небажані гармонічні струми з системи. Пасивні фільтри встановлюються в місцях, де генеруються гармонічні струми, наприклад, на промислових підприємствах з великими приводами та випрямлячами. Зменшуючи гармонійні спотворення, пасивні фільтри покращують загальну якість електроенергії в системі. Пасивні фільтри допомагають зменшити ці втрати шляхом мінімізації присутності гармонік, тим самим підвищуючи ефективність роботи системи. Багато регулюючих документів (як-от IEEE та IEC) встановили стандарти для рівнів гармоній в енергосистемах. Пасивні фільтри допомагають підприємствам і комунальним службам дотримуватися цих стандартів, уникаючи штрафів і забезпечуючи більш плавну роботу підключеного обладнання. Вони, як правило, простіші за конструкцією порівняно з активними фільтрами та не залежать від складних електронних систем керування, що робить їх більш надійними та менш схильними до збоїв. Хоча вартість початкового налаштування може бути значною, особливо для великих промислових застосувань, пасивні фільтри є економічно ефективними в довгостроковій перспективі через низькі вимоги до обслуговування та довговічність. Пасивні фільтри можуть бути розроблені для вирішення конкретних проблем з гармоніками в енергосистемі. Вони можуть бути налаштовані на один або кілька гармонійних порядків залежно від характеру нелінійного навантаження та конкретних вимог місця установки. Зміни умов експлуатації або рівнів навантаження можуть знизити їх ефективність, вимагаючи повторного налаштування або заміни відповідно до нових умов. Крім того, вони можуть бути громіздкими та займати фізичний простір, що може бути важливим для тісного середовища [11].

Нижче наведено порівняльну таблицю, яка описує характеристики та відмінності між різними методами компенсації реактивної потужності на основі останніх наукових досліджень.

Базуючись на останніх дослідженнях і розробках у сфері компенсації реактивної потужності, можна охарактеризувати основні тенденції розвитку систем компенсації реактивної потужності:

- Шунтові конденсатори та статичні змінні генератори (SVG):

Зростає інтеграція SVG із традиційними батареями конденсаторів для створення комбінованих систем компенсації реактивної потужності, особливо в умовах відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові електростанції. Ці системи цінуються за швидку реакцію та економічну ефективність завдяки здатності SVG справлятися з динамічними навантаженнями та економічній ефективності конденсатора.

Особливо ефективний у регіонах з коливаннями вихідної потужності, наприклад, на об'єктах відновлюваної енергетики, де енергія вітру може спричинити проблеми зі стабільністю напруги. Цей гнучкий підхід використовує швидку реакцію SVG та економічні переваги батарей конденсаторів.

Порівняльна таблиця основних методів компенсації реактивної потужності

Метод	Переваги	Недоліки	Місця встановлення
Шунтові конденсатори	Економічність, проста установка	Фіксована компенсація, потенційні проблеми з резонансом	Системи розподілу з постійним навантаженням
Синхронні конденсатори	Динамічне регулювання	Висока вартість, потрібне технічне обслуговування	Системи з коливаннями навантажень і відновлюваними джерелами енергії
Статичні компенсатори VAR (SVC)	Швидка реакція на зміни, справляються з перехідними умовами	Складні системи керування, чутливі до гармонік	Системи передачі зі швидкими змінами навантаження
Статичні синхронні компенсатори (STATCOM)	Чудові при низькій напрузі, швидке реагування	Вища вартість, ніж SVC, складна технологія	Системи, які потребують точного контролю напруги
Послідовні конденсатори	Збільшує потужність передачі електроенергії	Потрібен спеціальний захист від несправностей	Довгі лінії електропередачі
Пасивні фільтри	Фільтрує гармоніки, забезпечує реактивну потужність	Фіксована фільтрація гармонік	Промислові системи

Синхронні конденсатори:

Сучасні синхронні конденсатори все частіше оснащуються вдосконаленими системами керування, які покращують їх динамічну реакцію на зміну умов мережі, що має вирішальне значення для мереж із високим рівнем проникнення відновлюваної енергії.

- Статичні компенсатори VAR (SVC) і STATCOM:

Порівняльне дослідження показало, що STATCOM працюють краще, ніж SVC, у підтримці якості електроенергії та покращенні коефіцієнта потужності за різних умов навантаження. STATCOM забезпечують чудову підтримку напруги за менших витрат і підвищену гнучкість у роботі. STATCOM особливо корисні для додатків, які вимагають швидкого та точного контролю напруги, що робить їх придатними для промислових зон і точок інтеграції відновлюваних джерел енергії.

- Послідовні конденсатори:

Триває розробка вдосконалення захисних механізмів послідовних конденсаторів для запобігання аварійних ситуацій і підвищення надійності системи під час високих навантажень.

- Пасивні фільтри:

Нові методології в конструкціях пасивних фільтрів спрямовані на вирішення конкретних потреб у фільтрації гармоній сучасних електричних мереж, які включають кілька типів нелінійних навантажень [14]. Також ведуться напрацювання у зменшенні впливу технологічних відхилень, які виникають через особливості процесу виробництва фільтрів гармонік, одним з таких способів є відповідний аналіз і подальше налагодження систем компенсації реактивної потужності з врахуванням цих відхилень.

- FACTS Пристрої:

Технології FACTS, включаючи послідовні та шунтові типи, все частіше використовуються для забезпечення динамічної підтримки реактивної потужності, стабільності напруги та покращеної надійності енергосистеми. Ці системи мають вирішальне значення в управлінні складнощами, пов'язаними з розподіленою генерацією та відновлюваними джерелами енергії.

Ці розробки відображають постійну еволюцію технологій компенсації реактивної потужності, оскільки попит на більш складні, надійні та економічно ефективні рішення зростає у відповідь на виклики, пов'язані з сучасними енергетичними системами, особливо тими, що включають високий рівень відновлюваної енергії.

Висновки

Враховуючи зростаючу складність сучасних електричних систем, важливо продовжувати дослідження в напрямку вдосконалення методів і засобів компенсації реактивної потужності для забезпечення надійності та ефективності роботи промислових електромереж. У цьому дослідженні було продемонстровано основні моделі та концепції у сфері компенсації реактивної потужності у електромережах. У подальших дослідженнях планується розробити модель, використовуючи реальне підприємство як приклад, та дослідити вплив технологічних відхилень параметрів фільтра на показники стаціонарних і перехідних режимів комплексних схем компенсації реактивної потужності, включаючи не лише фільтри, але й конденсаторні батареї.

References

1. Varetsky Y, Gajdzica M. Power Compatibility of Induction Motors in Industrial Grids Containing

Synchronous Generators. *Energies*. 2024; 17(5):1066. <https://doi.org/10.3390/en17051066>

2. Gumilar, L.; Nugroho, W.S.; Sholeh, M. Power Quality of Synchronous Generator under Conditions of Starting Large Induction Motors Simultaneously and Sequentially. In Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), Malang, Indonesia, 2 October 2021; pp. 66–71.

3. Li, X.; Xu, J.; Zhang, H. Research on Torque Ramp Current Limit Starting of Induction Motor Based on Dspic30f6014. In Proceedings of the 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 15–17 December 2017; pp. 1627–1630.

4. Jannesar M.R., Sedighi A., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Guerrero J.M. "Optimal probabilistic planning of passive harmonic filters in distribution networks with high penetration of photovoltaic generation", *Int. J. Electrical Power Energy Syst.*, vol. 110, 2019, pp. 332-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.025>

5. Wang, S.; Ding, X.; Wang, J. Multi-objective optimization design of passive filter based on particle swarm optimization. In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series. *J. Physics Conf. Ser.* 2020, 1549, 032017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1549/3/032017>

6. VanderMeulen, A.H.; Natali, T.J.; Dionise, T.J.; Paradiso, G.; Ameele, K. Exploring new and conventional starting methods of large medium voltage induction motors on limited kVA sources. *IEEE Trans. Ind. App.* 2019, 55, 4474–4482.

7. Simba, K.G.; Quilumba, F.L.; Granda, N.V. Parameter Estimation of a Three-Phase Induction Motor from Direct Starting Stator Transient Measurements. In Proceedings of the 2020 IEEE ANDESCON, Quito, Ecuador, 13–16 October 2020; pp. 1–5.

8. Kotlicki, T. Energy efficiency of power plant auxiliaries. *Prz. Elektrotechniczny* 2021, 11, 154–158.

9. Varetsky Y., Gajdzica M., Koval O. / Concern of overvoltages on power filters in industrial electrical networks / *SEPES.2023*, Vol. 5, № 1, pp. 20 – 30. DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2023.01.020>

10. Matanov, N. Study of the impact of induction motors starting on the supply voltage. In Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2019, Varna, Bulgaria, 6–8 June 2019.

11. Kotlicki, T. Improvement of energy efficiency in auxiliaries system of a power station. *Energetyka* 2013, 8, 627–630.