

Дослідження якості електричної енергії на підприємствах м.Вінниця

Вінницький національний технічний університет.

Анотація

В доповіді показано, що покращення якості електричної енергії на підприємствах м.Вінниця приводить до створення нормального протікання технологічних процесів, а це в свою чергу сприяє випуску запланованої кількості продукції при належній її якості. Також підвищення якості електричної енергії безпосередньо відображається на умовах життя та діяльності людей.

Ключові слова: амплітуда, напруга, частота, несиметрія, підвищення якості електричної енергії.

Abstract

The report shows that improving the quality of electricity in Vinnitsa enterprises leads to the creation of normal flow processes, which in turn promotes the production of the planned number of products with appropriate quality. Improving the quality of electrical energy directly displayed on the living conditions and human activities.

Keywords: amplitude, voltage, frequency, asymmetry, improving the quality of electricity.

Вступ

Облік електричної енергії при її виробництві, розподілі та споживанні є найважливішими елементами ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів країни. Достовірність обліку електричної енергії цілком залежить від її якості, яка, крім того, впливає на працездатність електроустаткування, систем автоматики, релейного захисту, телемеханіки та зв'язку. Якість електричної енергії визначається ступенем відповідності її показників встановленим значенням. У світлі постійного росту цін на електричну енергію похибки вимірювань показників якості електричної енергії (ПЯЕЕ) виражають не тільки ступінь довіри до цих величин, але й стають економічними факторами. Огляд сучасного стану метрологічного забезпечення вимірювань ПЯЕЕ відповідно до ГОСТ 13109-97, що є основним нормативним документом у цій галузі, показав, що їх похибки вивчені у недостатній мірі. Це, насамперед, стосується показників відхилення та несиметрії напруг, для яких похибки не визначені взагалі. Крім того, ряд ПЯЕЕ, що характеризують несинусоїдальність напруги та несиметрію напруг, визначаються через оцінки параметрів, які розраховуються за тим самим набором дискретних значень досліджуваного електричного сигналу.

У теорії математичної статистики розроблено ряд методів визначення та вираження кореляційних зв'язків між досліджуваними величинами, які базуються на параметричному (при якому коефіцієнт кореляції визначається безпосередньо по параметрах розподілу досліджуваних величин) та непараметричному (заснованому на ранговій кореляції) підходах. Однак різні методи дають різні значення коефіцієнту кореляції при тих самих вибірках досліджуваних величин, і однозначної відповіді на питання вибору оптимального методу немає.

Достовірність оцінювання ПЯЕЕ залежить також від законів розподілу оцінок параметрів напруги, що для досліджуваних гармонійних електричних сигналів є арксинусоїдальними. Тому для достовірної оцінки ПЯЕЕ необхідно розрахувати статистику набору параметрів композиції декількох арксинусоїдальних законів розподілу, який традиційно застосовується при статистичній обробці результатів багатократних вимірювань у припущенні нормального закону їх розподілу.

Отже, задача підвищення достовірності вимірювань ПЯЕЕ шляхом урахування кореляційних зв'язків між вимірюваними даними та законів їх розподілу є важливою та актуальною, а її вирішення - доцільним та своєчасним.

Мета дослідження. Дослідити і оцінити якість електричної енергії.

Об'єкт дослідження: Методи та засоби підвищення якості електроенергії, норми якості електричної енергії, способи її корекції.

Предмет дослідження. Якість електроенергії і вимоги до щодо неї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити основні фактори, що впливають на вибір методів та засобів підвищення і контролю якості електроенергії ;
- виконати теоретичні дослідження методів та засобів підвищення і контролю якості електроенергії.

Рівень розробленості теми: Дане питання не поширене, але актуальне. Видано багато книг, навчальних посібників, додаткової літератури, дисертацій, проведена велика кількість наукових конференцій, в яких викладена дана проблема. Над даним питанням працюють Шидловський А.Д., Кузнецов В.Г., Шепеленко І.В.

Сучасні електричні мережі характеризуються збільшенням кількості споживачів, які негативно впливають на якість електричної енергії, при одночасному збільшенні споживачів, які ставлять підвищені вимоги до електроенергії. Це вказує на наявність тенденції загострення проблеми забезпечення якості енергії в електричних мережах. Разом з тим великого значення набуває питання застосування енергозберігаючих технологій передачі й розподілу електричної енергії.

Проблеми якості електричної енергії і регулювання напруги тісно пов'язані між собою і в умовах ринкових відносин є особливо актуальними. Практичне вирішення цих задач вимагає аналізу режимів роботи електричних мереж і використовуваних методів та засобів регулювання напруги.

У даний час основним методом регулювання напруги є централізоване, здійснюване за допомогою пристроїв регулювання під навантаженням (РПН) або переключення без збудження (ПБЗ) трансформаторів центру живлення (ЦЖ). Розподільні електричні мережі (РЕМ) характеризуються низькою кількістю вимірювальних приладів і засобів телеконтролю. Регулювання напруги в такій мережі утруднене через складність одержання необхідної інформації.

При регулюванні напруги враховуються вимоги до якості електричної енергії тільки у споживачів того ієрархічного рівня, на якому розташовуються засоби регулювання. У результаті споживачі з графіком навантажень, відмінним від графіка навантажень центру живлення, протягом тривалого часу працюють при напрузі, що не відповідає оптимальній.

Низька ефективність застосовуваних методів у сполученні з використовуваними на сьогоднішній день технічними засобами регулювання напруги вказує на необхідність коригування існуючої концепції регулювання напруги в напрямку розробки методів, здатних адаптуватися до структури, що змінюється, і режимів роботи електричних мереж, а також враховувати багатофакторність задачі регулювання напруги в них.

Застосування комплексного підходу до багаторівневої РЕМ як до складної ієрархічної системи кібернетичного типу з урахуванням вимог до якості електричної енергії з боку всіх споживачів дозволить удосконалити метод зустрічного регулювання напруги. Це забезпечить підвищення ефективності процесу

експлуатації багаторівневих РЕМ за рахунок оптимізації процесу регулювання напруги в мережі в рамках задач автоматизованих систем диспетчерського управління (АСДУ) з урахуванням вимог до якості електричної енергії одночасно у всіх споживачів.

Показники якості електричної енергії

Проблеми живлення - будь-які відхилення параметрів напруги від встановлених стандартом значень якості електроенергії.

Електропостачання характеризується надійністю та якістю. Передусім, це якість електроенергії, на яку впливають різноманітні порушення і спотворення напруги живлення. Їх спричиняють наприклад, блискавкові імпульси, комутаційні перенапруги, що виникають внаслідок комутації ділянок електричної мережі, провали та відхилення напруги під час автоматичного вмикання резерву і перемикавання споживачів на інші джерела живлення.

Види показників якості електричної енергії

Показниками якості електричної енергії являються:

- усталене відхилення напруги: фазної і міжфазної
- коефіцієнти несиметрії
- коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги;
- характеристики провалів і перенапруг;
- розмах зміни напруги δU_t ;

Параметри визначення показників якості електричної енергії.

При визначенні значень якості електричної енергії користуються наступними допоміжними параметрами:

- частота повторення змін напруги $F\delta U_t$;
- інтервал між змінами напруги $\Delta t_i, i+1$;
- глибина провалу напруги δU_p ;
- тривалість часової перенапруги $\Delta t_{пер} U$.

Норми якості електричної енергії

Встановлено два види норм якості електричної енергії: нормально допустимі та гранично допустимі. Оцінка відповідності показників якості зазначеним нормам проводиться протягом розрахункового періоду, який рівний 24 год.

Якість електричної енергії по установленому відхиленню напруги в точці сумісного з'єднання до електричної мережі вважають відповідним вимогам справжнього стандарту, якщо всі виміряні за кожну хвилину протягом періоду часу (24г) значення сталого відхилення напруги знаходяться в інтервалі, обмеженому гранично допустимими значеннями, а не менше 95 % виміряних за той же період часу значень сталого відхилення напруги знаходяться в інтервалі, обмеженому нормально допустимими значеннями.

Додатково допускається визначати відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю часу виходу виміряних значень даного показника за нормально і гранично допустимі межі.

При цьому якість електричної енергії по сталому відхиленню напруги рахують відповідним вимогам справжнього стандарту, якщо сумарна тривалість часу виходу за нормально допустимі значення складає не більше 5 % від встановленого періоду часу, тобто 1 ч 12 мін, а за гранично допустимі значення — 0 % від цього періоду часу.

Несиметрія напруг

Несиметрія напруг характеризується наступними показниками:

- Відхилення частоти. Відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти, для якого встановлено наступні норми: нормально припустиме і гранично допустиме значення відхилення частоти рівні $\pm 0,2$ і $\pm 0,4$ Гц відповідно.
- коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовності.

Нормально припустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж рівні 2,0 і 4,0% відповідно.

Нормально припустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг по нульовій послідовності в точках загального приєднання до чотирипровідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ рівні 2,0 і 4,0% відповідно.

Провал та тимчасова перенапруга

Провал напруги характеризується показником тривалості, для якого встановлена наступна норма:

- гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно дорівнює 30 с. Тривалість автоматично усуває провалу напруги в будь-якій точці приєднання до електричних мереж визначається витримками часу релейного захисту та автоматики.

Статистичні дані, що характеризують провали напруги в електричних мережах України напругою 6-10 кВ та аналогічні дані по електричних мереж країн Європейського Союзу.

Тимчасова перенапруга: Тимчасова перенапруга характеризується показником коефіцієнта тимчасової перенапруги. Значення коефіцієнтів тимчасових перенапруг, що виникають в електричних мережах енергопостачальної організації.

Класифікація пристроїв та засобів підвищення якості електроенергії

Загалом, при передачі енергії виникають три основні проблеми:

- стійкість передачі, значною мірою пов'язана з величиною транспортного кута;
- контроль напруги й зростання напруги за відсутності навантаження;
- підсинхронний резонанс, що може вивести з ладу генераторні установки електростанцій.

Будівництво нових ліній електропередачі пов'язано зі значними витратами й часто неможливе з причин екологічного характеру. Тому доводиться збільшувати потужність енергії, передаваної існуючими лініями, в основному за рахунок збільшення сили струму. Цього можна досягти тільки при таких умовах:

- коли немає теплових обмежень;
- є надійне керування розподілом потоків енергії між лініями, що живлять певну місцевість.

При дотриманні цих умов можна підвищити передавану потужність в режимі максимальної надійності, залишаючись у припустимих межах стійкості, тобто при значеннях транспортного кута не вище 40°. Для керування величиною транспортного кута використовуються різні пристрої, наприклад, поперечні (шунтувальні) й поздовжні компенсатори.

Пристрої для поздовжньої компенсації

Лінії високої напруги мають індуктивний опір: що вище спадання напруги на ньому, то вищий транспортний кут. Ідея збільшення передаваної потужності проста. Величина індуктивного опору повинна компенсуватися послідовно ввімкненою ємністю. Нині для цього використовується кілька конструктивних рішень.



Рисунок 1 - Конденсатор постійної ємності.

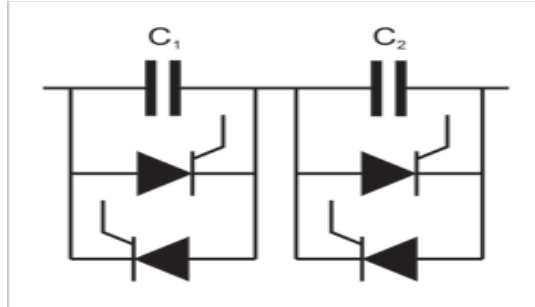


Рисунок 2 - Конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням.

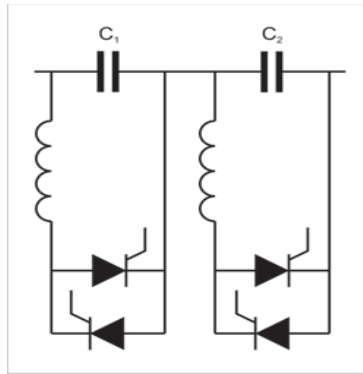


Рисунок 3 - Конденсаторна батарея з тиристорним керуванням.

У конденсаторі постійної ємності (рис. 1.3.1) ступінь компенсації постійний. Можна підвищувати передавану по лінії потужність, поки не будуть досягнуті обмеження по тепловиділенню. Такі системи не здатні придушувати появу підсинхронних коливань генераторів електростанцій, навпаки, при такому способі компенсації можуть створюватися умови, сприятливі для їхнього виникнення.

У конденсаторній батареї з тиристорним перемиканням (рис. 1.3.2) ступінь компенсації змінюється східчасто. Всі зауваження до рішення, зображеного на рис. 1.3.а, залишаються справедливими й для цього рішення.

У конденсаторній батареї з тиристорним керуванням (рис. 1.3.3) ступінь компенсації регулюється практично в будь-яких межах. Тут теж можна керувати стабільністю передачі й придушувати виникнення підсинхронних коливань. Тиристиори працюють у режимі підлаштування фази. Модуль TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) – конденсаторна батарея з тиристорним керуванням – у процесі роботи є або конденсатором змінної ємності, або дроселем змінної індуктивності. Однак перемикання з режиму ємності в режим індуктивності й назад неможливо без проміжного вимкнення через резонансні явища. Модулі TCSC звичайно мають достатню динаміку для придушення підсинхронних коливань.

Пристрій поперечної компенсації

Пристрій, увімкнений у середню точку лінії здатний поглинати й повертати реактивну потужність, забезпечує сталість напруги в цій точці. При цьому транспортний кут зменшується вдвічі й може бути збільшена передавана потужність. Рішення полягає в під'єднанні до лінії ємності, а паралельно їй - регульованого пристрою, здатного компенсувати надлишкову реактивну потужність для підтримування постійного значення напруги в точці під'єднання (рис. 1.3.4).

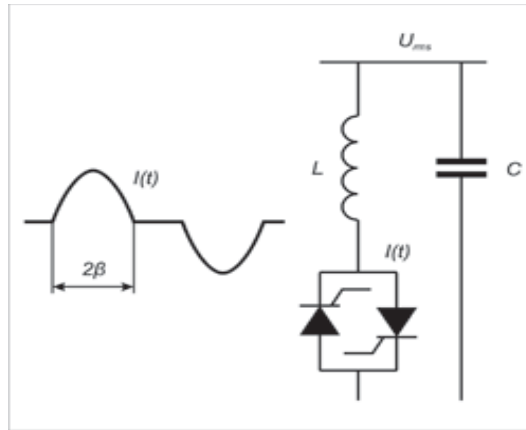


Рисунок 4 - Схема пристрою поперечної компенсації в лінії.

Де: $I(t)I_{rms}$ – діюче значення струму;

U_{rms} – діюче значення напруги;

L - індуктивність реактора;

C - ємність батареї конденсаторів; ω - кутова частота; β - кут пропускання струму;

Q_C – потужність конденсаторної батареї;

Q_L – потужність реактора; Q_{SVC} – потужність статичного тиристорного компенсатора.

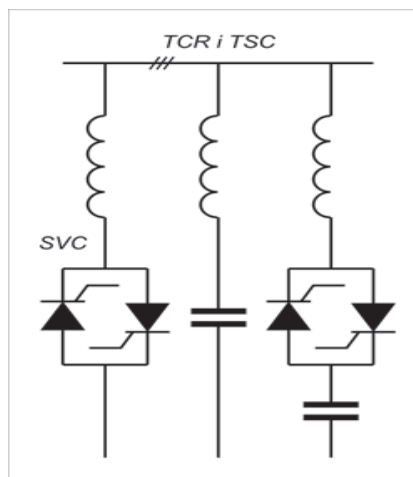


Рисунок 5 - Схема пристрою SVC.

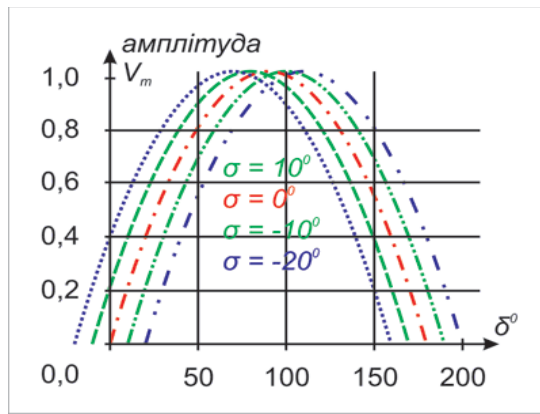


Рисунок 6 - Залежність потужності від кута δ .

Де: V_s – напруга джерела;

V_r – напруга приймача;

X - реактор, що має чисто індуктивний опір.

Індуктивність змінюється за рахунок використання тиристорів. Такі системи називаються SVC (Static VAR Compensator) - ССКРП (система статичної компенсації реактивної потужності).

Статичний контактор, який керує силою струму в реакторі, генерує в мережі гармоніки. Це послужило першою причиною для встановлення ємностей у систему фільтрів. Існують й інші причини, пов'язані зі структурою мережі, в основному, з виникненням паралельного резонансу через наявність ємностей в установці SVC. У загальному вигляді схема установки SVC показана на рис. 1.3.5. До неї входять коло керування реактором TCR (Thyristor Controlled Reactor – реактор з тиристорним керуванням) і коло ступінчастого під'єднання елементів конденсаторної батареї TSC (Thyristor Switched Capacitor - конденсаторна батарея з тиристорним перемиканням).

Через брак коштів часто важко встановити значну фіксовану ємність. Це потребує також встановлення модуля TCR великої потужності. Тому використовують кілька конденсаторних батарей. TSC можуть під'єднуватися або з'єднуватися окремо, а TCR значно меншої потужності має функцію «верньєра» для забезпечення постійного керування реактивною потужністю. Необхідно відзначити, що мережеві SVC, зазвичай, мають достатню динаміку для того, щоб придушувати виникнення підсинхронних коливань. Коли в мережі відсутнє навантаження, через розподілену ємність лінії відбувається зростання напруги. Для його обмеження необхідно поглинати реактивну потужність. Саме тому установки SVC часто проектуються з урахуванням необхідності працювати й як поглинальні пристрої.

Фазозсувальний трансформатор

Кут δ (між напругами) є найважливішим параметром регулювання потужності (рис. 1.3.6).

Фазозсувальні трансформатори використовуються з 80-х років для керування енергопотоками в мережах. У зв'язку зі обмеженням державного втручання в керування енергомережами, з розвитком торгівлі електроенергією й зв'язків між енергосистемами різних країн, нині завдання керування енергопотоками стає особливо актуальним. Залежність величини переданої потужності P від кута зсуву фаз, забезпечуваного фазозсувальним трансформатором, виражається в такий спосіб:

$$P = V^2/X \cdot \sin(\delta - \sigma).$$

Регулюючи кут зсуву фаз, можна керувати активною потужністю. При подальшому ускладненні технології можливі регулювання й амплітуди, що дає змогу керувати реактивною потужністю. На рис. 1.3.7 показана схема фазозсувального трансформатора.

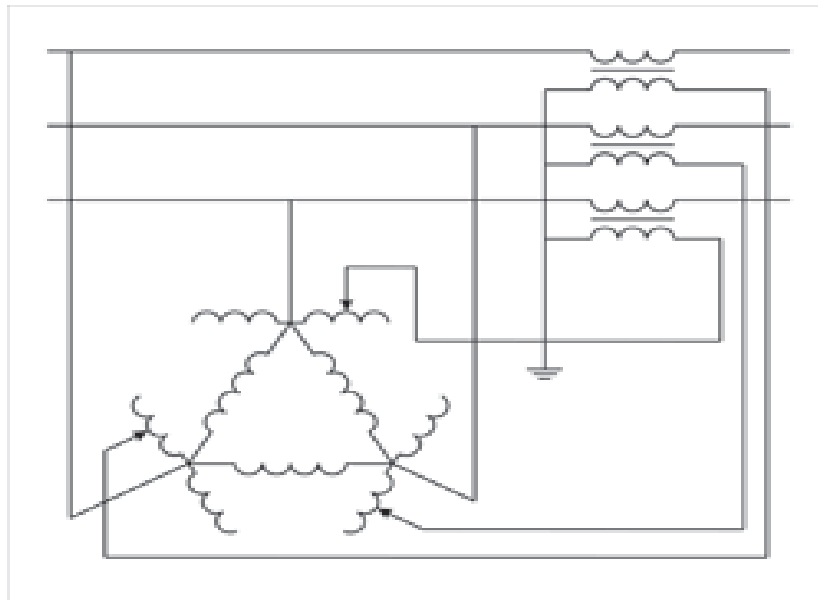


Рисунок 7 - Схема фазозсуваючого трансформатора.

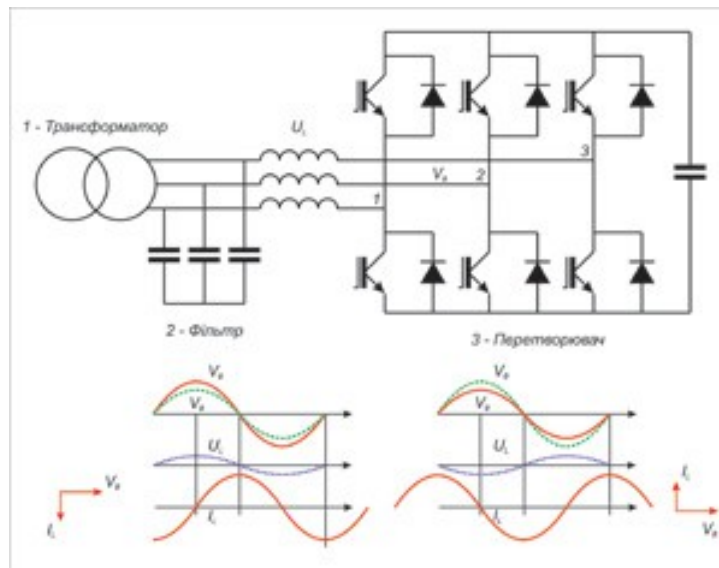


Рисунок 8 - Принцип роботи FACTS.

Сучасні FACTS (гнучкі системи передачі енергії змінного струму).

Системи FACTS з'явилися близько 15 років тому. Передумовою їхньої розробки була поява на ринку електронних компонентів високої потужності, що замикаються, – IGBT, GTO, IEGT. Дотепер широко застосовуються класичні системи FACTS, засновані на використанні тиристорів (керування за струмом). Сучасні системи FACTS використовують компоненти, які можуть керуватися командами за напругою. Найважливіша властивість FACTS – їхня здатність поглинати або повертати реактивну потужність – на рис. 1.3.8. На рисунку напруга вторинної обмотки трансформатора, V_g – основна гармоніка напруги на виході перетворювача. Перетворювач керується в режимі PWM (Pulse Width Modulation – широтно-імпульсної модуляції – ШІМ). Це виправдує наявність фільтра між перетворювачем і мережею. Напруга мережі V_0 і напруга на виході перетворювача співфазні. Виникнення будь-якого розходження між цими напругами викликає спад напруги на відповідному реакторі поздовжньої компенсації, яка також співфазна з напругою мережі (U_L). Знак цієї напруги відповідає знаку різниці $V_0 - V_g$. Підсумковий струм I_L зсунений щодо цієї напруги на 90° . При $V_g < V_0$ система працює в індуктивному режимі, при $V_g > V_0$ – у ємнісному. Відповідно

до описаної структури розроблялися й уже застосовуються сучасні пристрої поздовжньої й поперечної компенсації.

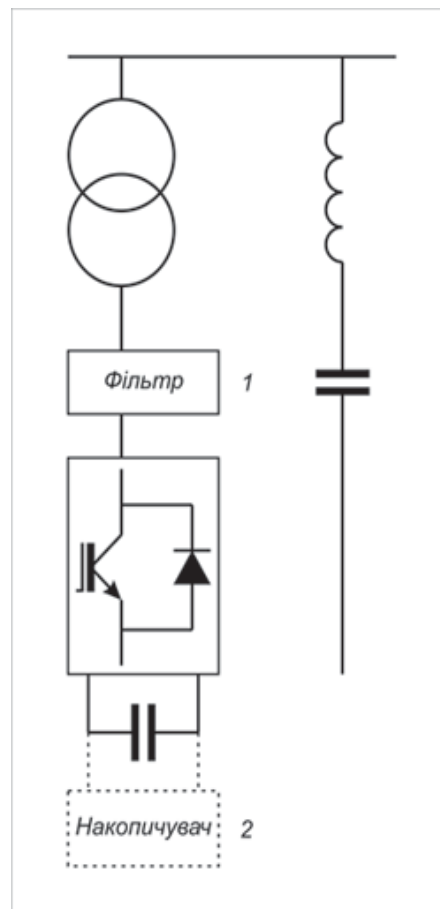


Рисунок 9 - Схема STATCOM.

Поперечна компенсація – STATCOM (STATic synchronous COMPensator - статичний синхронний компенсатор).

Хоча компенсатори STATCOM (рис. 1.3.9) здатні поглинати й повертати реактивну потужність Q , їхнє застосування, зазвичай, обмежується статичною компенсацією внаслідок браку коштів.

Звичайно $Q_{\max} = Q_F + Q_{\text{STATCOM}}$ і $Q_{\min} = Q_F - Q_{\text{STATCOM}}$, причому Q_{STATCOM} трохи вище від величини Q_F , щоб забезпечити можливість поглинання реактивної потужності за відсутності навантаження в мережі. Коли напруга в точці підключення залишається постійною, компенсатор STATCOM поводить, як компенсатор SVC. Однак у режимі обмеження потужності компенсатор STATCOM стає джерелом струму, тоді як компенсатор SVC набуває властивості конденсатора. Компенсатори STATCOM можуть також поводитися, як активні фільтри. Зрозуміло, що за додаткову функціональність компенсаторів STATCOM доводиться й додатково платити. Серед безлічі функцій цих компенсаторів класичними є наступні:

- регулювання напруги шляхом поглинання або повернення реактивної потужності;
- придушення підсинхронних коливань.

При зниженні напруги SVC поводить, як конденсатор, і реактивна потужність падає пропорційно квадрату напруги. Система STATCOM у такій же ситуації переходить у режим постійного джерела струму. Напруга на виводах конденсатора може підтримуватися постійною.

Поздовжня компенсація – SSSC (Static Synchronous Series Compensator - статичний синхронний поздовжній компенсатор)

У цих системах вдається уникнути таких недоліків систем TCSC (конденсаторна батарея з тиристорним керуванням), як неможливість плавного переходу від ємнісного режиму до індуктивного.

SSSC (рис. 1.3.10) може повертати тільки реактивну потужність за винятком випадків, коли контур постійного струму одержує живлення від накопичувача енергії. У розподілі енергії використовується такий самий принцип, що одержав назву DVR (Dynamic Voltage Restorer – система динамічного відновлення напруги), хоча за функціональністю вони трохи різняться. Тут метою є підтримка найбільш уразливих споживачів мережі при короткочасних збурюваннях. Потужність наявних на ринку установок DVR не перевищує 1 МВА.

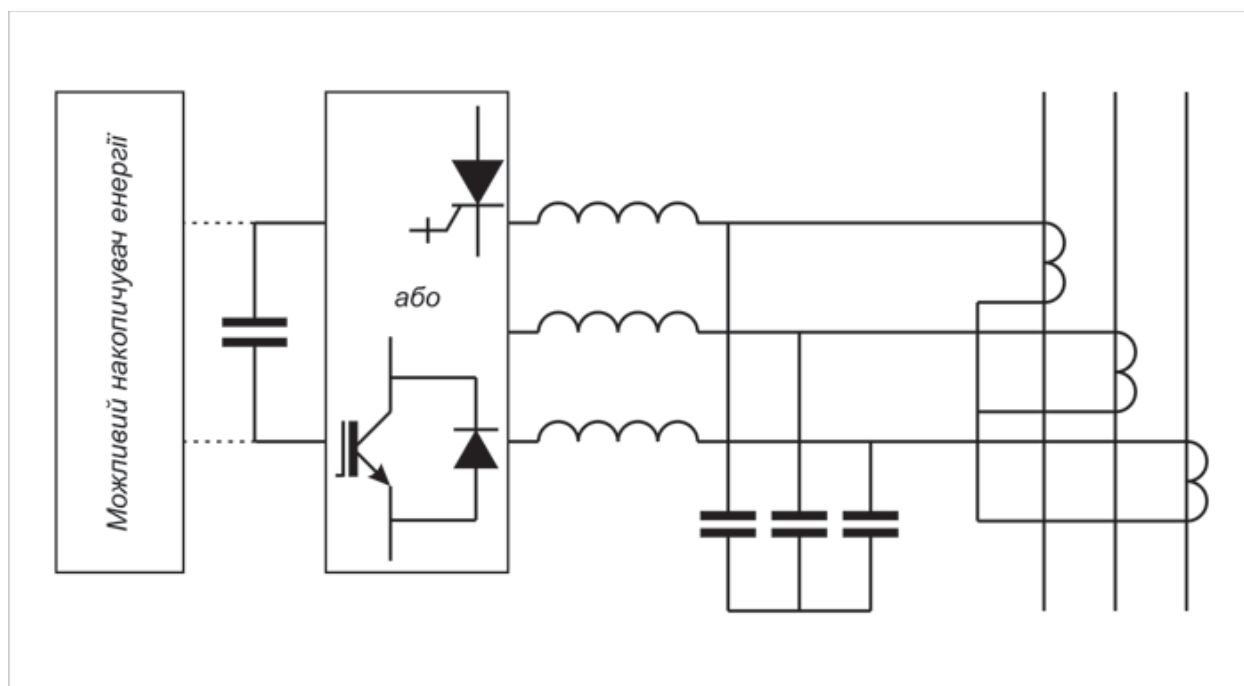


Рисунок 10 - Схема SSSC.

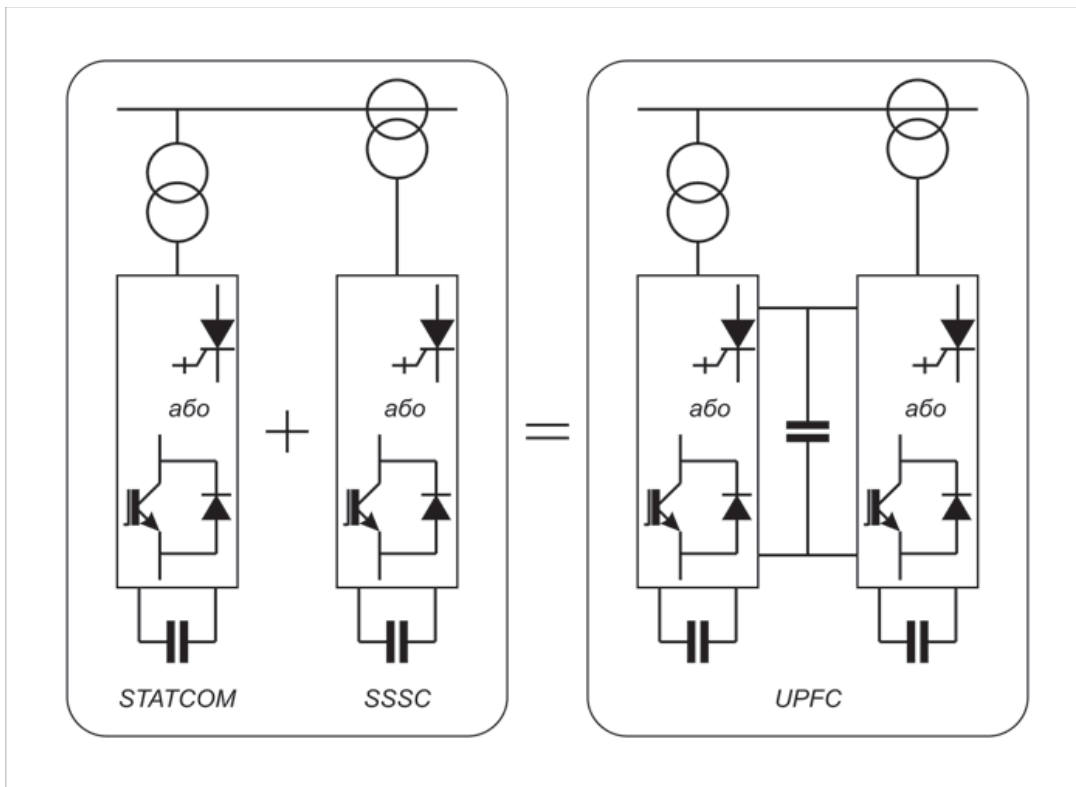


Рисунок 11 - Схема UPFC.

Універсальна компенсація – UPFC (Unified Power Flow Controller - уніфікована система керування енергопотоками).

Потужності систем STATCOM й інших типів SSSC настільки високі, що використання їх без накопичувачів енергії достатньої ємності неможливе. Якщо таких накопичувачів немає, має бути змога керувати величиною транспортного кута, як у випадку використання фазозсувального трансформатора, але зі значно вищою швидкістю.

Система UPFC робить цю проблему реальною без використання будь-якого накопичувача енергії. Система UPFC – це не що інше, як об'єднання систем STATCOM і SSSC (рис. 1.3.і).

Це найскладніша із систем FACTS. Вона дає змогу здійснювати такі функції:

- безпосередньо керувати напругою. Додавати або віднімати напруги, фазованих вузлом поперечної компенсації з реактивною потужністю;
- поперечну компенсацію – шляхом керування поперечним перетворювачем з переведенням останнього в режим поглинання або повернення реактивної потужності. Напруга повинна підтримуватися постійною;
- поздовжню компенсацію – шляхом додавання послідовної напруги, зі зсувом на 90° стосовно струму зв'язку. При цьому необхідно керувати вихідною напругою й реактивною потужністю на виході;
- зсув фаз фазозсувальним пристроєм: якщо величина й фаза поздовжньої напруги такі, що при її підтримці на виході модуля вона зменшує величину зсуву фаз стосовно входу. Це має важливе значення при керуванні передаваною активною потужністю.

Нарешті, можна одночасно використовувати всі функції – кількість ступенів свободи системи дає змогу це робити, – коли необхідно керувати реактивною, й активною потужністю. Переваги системи UPFC очевидні. Хоча нині система не дуже поширена, найближчим часом ця технологія буде активно розвиватися, здебільшого, в містах, де особливо складно будувати додаткові лінії.

Висновки

Енергетика - основа розвитку господарства. Вона забезпечує технологічні процеси в промисловості, дає тепло і світло людям. Це система галузей, що охоплює паливну промисловість та електроенергетику з їх підприємствами, комунікаціями, системами управління, науково-дослідною базою.

Сучасні електричні мережі характеризуються збільшенням кількості споживачів, які негативно впливають на якість електричної енергії, при одночасному збільшенні споживачів, які ставлять підвищені вимоги до електроенергії. Це вказує на наявність тенденції загострення проблеми забезпечення якості енергії в електричних мережах. Разом з тим великого значення набуває питання застосування енергозберігаючих технологій передачі й розподілу електричної енергії.

Проблеми якості електричної енергії і регулювання напруги тісно пов'язані між собою і в умовах ринкових відносин є особливо актуальними. Практичне вирішення цих задач вимагає аналізу режимів роботи електричних мереж і використовуваних методів та засобів регулювання напруги.

При регулюванні напруги враховуються вимоги до якості електричної енергії тільки у споживачів того ієрархічного рівня, на якому розташовуються засоби регулювання. У результаті споживачі з графіком навантажень, відмінним від графіка навантажень центру живлення, протягом тривалого часу працюють при нарузі, що не відповідає оптимальній.

Низька ефективність застосовуваних методів у сполученні з використовуваними на сьогоднішній день технічними засобами регулювання напруги вказує на необхідність коригування існуючої концепції регулювання напруги в напрямку розробки методів, здатних адаптуватися до структури, що змінюється, і режимів роботи електричних мереж, а також враховувати багатофакторність задачі регулювання напруги в них.

Таким чином, тема наукової роботи є актуальною, тому що спрямована на дослідження потреб енергетики України при вирішенні проблем енергозбереження завдяки підвищенню ефективності функціонування електричних мереж, а також забезпечення якості електричної енергії у споживачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шидловский А.Д. Повышение качества энергии в электрических цепях / Кузнецов В.Г. Научная думка, 1985 г – 254 с.
2. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 200 с.
3. Правила устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 648 с.

Янковецький Ярослав Анатолійович – студент групи 3Е-12Б, факультет електроенергетики. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: yva1995@bk.ru.

Науковий керівник: Бурбело Михайло Йосипович доктор. техн. наук, професор, Вінницький національний технічний університет

Yankovetskyu Jaroslav Anatolievich. - student group 3E-12B, Department of Electricity. Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, e-mail: yva1995@bk.ru.

Supervisor: Michael Yosipovich. Burbelo Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University

