

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ГНУЧКОЇ ПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ (FACTS) В СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

S.DENYSYK, D.DEREWYANKO

MAIN FEATURES OF THE FACTS IMPLEMENTATION IN MODERN ELECTRIC POWER NETWORKS

Анотація. Проведено аналіз особливостей використання в системах електроживлення гнучкої передачі змінним струмом. Показано, що пристрої сімейства FACTS є ефективним засобом коригування наявних в системі спотворень, і забезпечення оптимальних режимів роботи, як системи керування, так і системи електроживлення в цілому. Для ефективного вибору окремих типів FACTS доцільно проводити поглиблений аналіз на основі обмінних процесів із визначенням рівнів взаємного впливу елементів системи як один на одного, так і на процеси в системі в цілому. Проведено аналіз щодо застосування технологій FACTS в об'єднаних енергетичних системах та в локальних системах. Проаналізовано світові тенденції впровадження технологій FACTS та тенденції впровадження технологій гнучкої передачі в мережах України.

Ключові слова: Smart Grid, FACTS, гнучкі системи, компенсація, стійкість за напругою, модернізація електричних мереж.

Анотация. Проведен анализ особенностей использования в системах электропитания гибкой передачи переменным током. Показано, что устройства семейства FACTS являются эффективным средством коррекции имеющихся в системе искажений и обеспечения оптимальных режимов работы как системы управления, так и системы электропитания в целом. Для эффективного выбора отдельных типов FACTS целесообразно проводить углубленный анализ на основе обменных процессов с определением уровней взаимного влияния элементов системы как друг на друга, так и на процессы в системе в целом. Проведен анализ по применению технологий FACTS в объединенных энергетических системах и в локальных системах. Проанализированы мировые тенденции внедрения технологий FACTS и тенденции внедрения технологий гибкой передачи в сетях Украины.

Ключевые слова: Smart Grid, FACTS, гибкие системы, компенсация, устойчивость по напряжению, модернизация электрических сетей..

Annotation. In this article authors made the analysis of features used in flexible alternating current transmission systems. It is shown that FACTS device family is the effective adjustment of existing distortions in the system and helps to achieve optimal operating mode as in the control system and in power supply system as a whole. To effectively identify individual types of FACTS it is appropriate to conduct in-depth analysis based on the metabolism definition of levels of mutual influence of elements of one another, and on processes in the system as a whole. Also the analysis of

FACTS implementation in the integrated power systems and local systems was made. Authors also made the analysis of global trends of the FACTS technology implementation and the analysis of trends of implementing flexible transmission systems in Ukraine.

Key words: Smart Grid, FACTS, flexible systems, compensation, voltage stability, modernization of electrical networks.

Вступ

Умови функціонування сучасних електроенергетичних систем характеризуються зростанням щільності електроенергії, яка передається як в нормальних, так і в аварійних режимах (перш за все в мегаполісах), необхідністю компактного виконання електроенергетичних об'єктів (внаслідок значного підвищення вартості землі), завищеними вимогами до забезпечення надійності, керуваності та автоматизації, а також більш жорстких екологічних обмежень [1].

Сьогодні в світі ідеологією розвитку складних і напружених електроенергетичних систем стала концепція розвитку інтелектуальних мереж [2].

В закордонній англійській літературі загальноновизнаним терміном для інтелектуальних мереж є Smart Grid. Принципово новим в концепції Smart Grid є, по-перше, відведення особливої, провідної ролі ядру енергосистеми – електричній мережі, яка в енергосистемі «все» поєднує і «все» узгоджує, і, по-друге, в самій мережі принципово новим є її здатність не тільки до адаптації, яка вже давно закладається в сучасні енергетичні системи, але й до самонастроювання [1]. Це новий рівень мереж і важливий крок до перетворення їх в інтелектуальні, «розумні» мережі.

За останні роки вже визначилась система основних характеристик інтелектуальної електроенергетичної системи, що охоплює більшу частину галузі енергетики. Відповідно до цієї моделі інтелектуальні енергетичні системи [3]:

- гнучкі, при меншій залежності від операторів, зокрема, щодо швидкого реагування на мінливі умови;
- гнучкі з точки зору застосування оперативних даних у практиці технічного обслуговування обладнання і навіть при виявленні потенційних перебоїв до їх виникнення;
- інтегровані щодо обміну даними в реальному часі та контрольних функцій;
- інтерактивні між клієнтами та ринками;
- оптимізовані щодо максимальної надійності, доступності та економічної ефективності;
- захищені від збурень, техногенних аварій та природних катаклізмів.

Впровадження інтелектуальних технологій в Україні має здійснюватися за рахунок підвищення ефективності існуючих енергомереж, раціонального керування енергоспоживанням, впровадження упереджувального планування на основі сучасних технічних засобів, зокрема, пристроїв силової електроніки (СЕ).

На сьогодні чітко означились два основних види питань силової електроніки, які набувають все більшого значення в енергетичних системах: інтегральні характеристики та миттєві характеристики.

Сфера застосування групи пристроїв для вирішення проблем з інтегральними характеристиками – системи постачання, вони відомі як Гнучкі Системи Передачі Змінного Струму (FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems)), де новітні обладнання силової електроніки і новітні методи використовуються для керування системою передачі.

Сфера застосування групи пристроїв для вирішення проблем з миттєвими характеристиками, відомих як Custom Power System (CUPS), є системи розподілу електроенергії, що забезпечують електроенергією кінцевого користувача. Ця технологія є технологією, створеною для підвищення якості постачання електроенергії, що впливає на роботу підприємств, організацій та сферу домашнього господарства.

Основна ідея використання пристроїв FACTS базується на добре відомих принципах позовжньої та поперечної компенсації реактивних параметрів передачі електроенергії, а отже і складових реактивної потужності. Застосування ж швидкодіючих напівпровідникових ключів і мікропроцесорних систем керування дозволило перейти від повільного і дискретного оперативного керування до плавного автоматичного регулювання реактивних параметрів передачі (напрямків енергопотоків з різною інтенсивністю) зі швидкодією, яка достатня для керування режимами при протіканні перехідних процесів в енергосистемах.

Напрямки впливу інтелектуальних технологій на функціонування і загальний стан роботи сучасної мережі [1]:

- поінформованість у режимі реального часу та ситуаційний аналіз системи розподілу допоможуть удосконалити керувати системою, що, у свою чергу, підвищить надійність;

- визначення місць пошкоджень ізоляції та прискорення відновлення роботи мережі, коли трапляються перебої, дозволяючи працюючим бригадам різко звузити поле пошуку пошкоджених ліній;
- автоматизація підстанцій дозволяє пристроям планування, моніторингу та керування обладнанням у децентралізованій формі, що дозволяє більш ефективно використовувати бюджет та підвищує надійність;
- SCADA/DMS (Системи керування розподілом) дають більш глибокий аналіз і контрольні функції в руки операторів мережі;
- керування напругою за допомогою компенсації реактивної потужності та більш широкого застосування пристроїв силової електроніки, збільшення пропускної спроможності існуючих ліній і покращення відмовостійкості системи в цілому.

Пристрої FACTS на базі перетворювачів

Варто відзначити, що серед пристроїв на базі перетворювачів є два основних типи перетворювачів, це перетворювачі напруги і перетворювачі струму. Перший видається більш вигідним з загальної точки зору і, отже, стане основою для представлення всього класу перетворювачів на базі пристроїв FACTS. Пристрої FACTS розділяються на три основні групи: поздовжньої компенсації; паралельної компенсації; комбіновані пристрої.

Пристрої поздовжньої компенсації – це пристрої змінного опору (конденсатори, реактори і т.ін.) або пристрої силової електроніки на джерелах напруги змінного струму(рис. 1).

Згідно з даними IEEE відомі наступні пристрої цього класу:

- SSSC (Static Synchronous Series Compensator) – статичний синхронний поздовжній компенсатор;
- IPFC (Interline Power Flow Controller) – контролер потоків потужності між лініями електропередач;
- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) — тиристорно-керований поздовжній конденсатор.

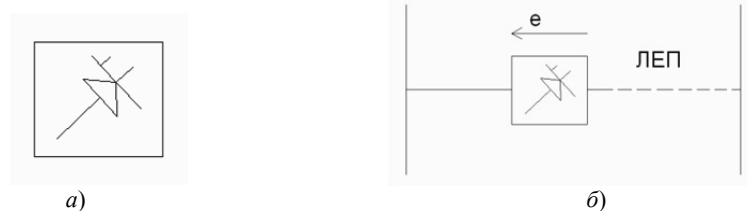


Рис. 1. Умовні позначення:

а) пристроїв FACTS;

б) схеми підключення пристроїв поздовжньої компенсації

TCSC є найбільш поширеним пристроєм поздовжньої компенсації. Він являє собою ємнісний компенсатор, який включає поздовжню батарею конденсаторів, що шунтуються тиристорно-керованим реактором з метою плавного регулювання реактивного опору.

Пристрої поздовжньої компенсації передбачають реалізацію наступних функцій:

- збільшення пропускної спроможності ЛЕП;
- зменшення втрат активної потужності за рахунок зміни поточкорозподілу паралельних ділянок у мережі;
- зменшення вартості передачі електроенергії, оскільки використання пристроїв поздовжньої компенсації є альтернативою побудові нових ЛЕП і встановлення додаткових пристроїв поперечної компенсації;
- збільшення межі перехідної стійкості, а також поліпшення динамічної стійкості.

Рівень компенсації повинен бути максимальним (ємнісним), коли генератор прискорюється – для забезпечення максимуму переданої електроенергії, і мінімальним (індуктивним) при гальмуванні генератора – забезпечення мінімального значення переданої електроенергії.

Пристрої паралельної компенсації – це пристрої змінного опору (конденсатори, реактори і т.д.) або змінне джерело, яке генерує струм в систему в точці загального підключення (рис. 2).

Найбільш поширені пристрої цього класу – це статичний компенсатор реактивної потужності (SVC – англ. Static Var Compensator) та статичний синхронний компенсатор (STATCOM – англ. Static Synchronous Compensator).

SVC – це поперечно приєднаний статичний генератор чи споживач реактивної потужності, який налаштований для генерування ємнісного або індуктивного струму так, щоб підтримувати або керувати заданими параметрами електричної системи, наприклад напругою на шинях. До сімейства SVC належать тиристорно-керований реактор (TCR) та тиристорно-комутований конденсатор (TSC).

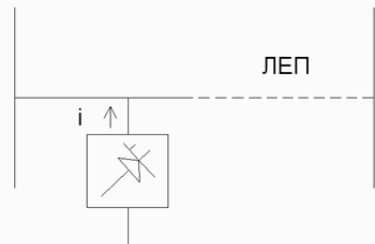


Рис. 2. Умовне позначення схеми підключення пристроїв паралельної компенсації

Відповідно до визначень IEEE:

- TCR – це поперечно приєднана тиристорно-керована індуктивність, реактанс якої плавно змінюється за рахунок керування провідністю тиристорного вентиля.
- TSC – це поперечно приєднаний тиристорно-комутований конденсатор, реактанс якого змінюється дискретно за рахунок роботи тиристорного вентиля в режимі повної або нульової провідності.

Загальні риси пристроїв SVC наступні:

- відсутність рухомих (оберткових) механічних елементів;
- використання звичайних індуктивних та ємнісних елементів;
- функції керування виконуються за допомогою силової електроніки.

В конструкції SVC використовуються такі основні елементи регулювання:

- реактор з тиристорним управлінням (TCR);
- конденсатор з тиристорною комутацією (TSC);
- реактор з тиристорною комутацією (TSR);
- конденсатор з механічною комутацією (MSC).

Конденсатор з механічною комутацією (MSC) є пристроєм, що включає конденсаторну батарею і комутатор. Він розрахований на комутацію не більше декількох разів на день, оскільки його комутація здійснюється відповідними вимикачами. Призначенням MSC є забезпечення реактивною потужністю в періоди зростання реактивного навантаження.

Регульована компенсація реактивної потужності досягається використанням конфігурацій вище наведених пристроїв (TCR, TSC, TSR, MSC).

STATCOM – це статичний синхронний генератор, що працює як статичний компенсатор SVC (рис. 3), вихідний ємнісний або індуктивний струм якого є керованим незалежно від змінної напруги електричної системи. Він в основному складається з понижувального трансформатора, реактивних опорів, трифазних запираних тиристорів (GTO) чи інвертора напруги (VSC), заснованого на багатоімпульсних біполярних транзисторах (IGBT), і конденсатора постійного струму.

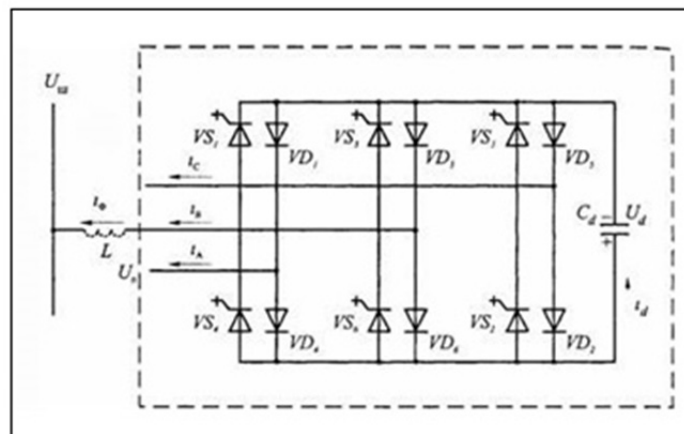


Рис. 3. Схема STATCOM з інвертором напруги

VSC є складовим блоком STATCOM і його задача полягає у перетворенні синусоїдальної напруги змінного струму з мінімальними гармонічними складовими.

STATCOM може працювати у двох режимах:

- у режимі регулювання напруги;
- у режимі компенсації реактивної потужності.

Типове застосування STATCOMа є:

- ефективного регулювання та керування напруги;
- скорочення тимчасової перенапруги;
- покращення потенціалу передачі потужності;
- покращення межі перехідної стійкості;
- демпферування коливань в енергосистемі.

Наведені можливості поперечних компенсаторів для контролю переданої потужності можуть бути використані для збільшення меж перехідної стійкості, а також покращення динамічної стійкості.

STATCOM сьогодні можна розглядати як найбільш досконалий та багатофункціональний статичний пристрій FACTS, оскільки він може керувати як модулем, так і фазовим кутом вектора напруги, хоча він є досить дорогим. Однак за минулі десять років XXI століття за кордоном ціла низка пристроїв STATCOM вже реалізована. Зазначимо, що використання двох пристроїв STATCOM, включених за спеціальною схемою, дозволяє не тільки регулювати напругу, але й збільшити пропускну здатність мереж, оптимізувати потоки потужності, покращити форму кривої напруги, забезпечувати об'єднання енергосистем, працюючих несинхронно.

Комбіновані пристрої включають в себе пристрої поздовжньої та паралельної компенсації зі змінними джерелами (UPFC) (рис. 4). У цьому класі пристроїв струм генерується в систему з паралельної частини, а напруга з поздовжньої. Оскільки обидві частини об'єднані, може бути обмін активною потужністю між частинами через силову ланку. Серед комбінованих пристроїв також розглядають поздовжньо-поздовжні і поздовжньо-поздовжньо-паралельні змінні джерела, які пов'язані з багатолінійною системою передачі (IPFC). У цих конфігураціях можливе збалансування потоків як активної, так і реактивної потужності в лініях.

До даного класу відносять наступні пристрої:

- TCPST (Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer) – тиристорно-керований фазорегулювальний трансформатор;
- IPC (Interphase Power Controller) – регулятор потужності між фазами;
- UPFC (Unified Power Flow Controller) – об'єднаний регулятор потоків потужності.

UPFC є найбільш відомим. Він є одним з найрізноманітніших пристроїв сімейства FACTS, що використовує прилади силової електроніки для керування всіма параметрами, які впливають на потік потужності в лінії передачі [4, 5]. UPFC використовує поєднання поперечного контролера (STATCOM) і поздовжніх контролерів (SSSC) між собою через загальну шину постійного струму, як показано на рис. 4а. Така топологія FACTS забезпечує набагато більшу гнучкість керування за активною та реактивною потужністю лінії ніж SSSC, оскільки активна потужність тепер може бути передана з поперечного перетворювача у поздовжній перетворювач через шину постійного струму.

Еквівалентна схема UPFC, що наведена на рис. 5, складається з паралельно підключеного джерела напруги, послідовно з'єднаних джерел напруги та обмежувача активної потужності, яка з'єднує два джерела напруги. Два джерела напруги підключені до системи змінного струму через трансформатори перетворювачів напруги VSC.

Можливості UPFC керування переданої потужності можуть бути використані для збільшення меж перехідної стійкості, а також покращення динамічної стійкості системи.

Комбіновані пристрої компенсації можуть бути використані для демпферування коливань потужності.

Пристрої HVDC

Пристрої HVDC є принципово іншою технологією, придатною для гнучкого керування потоками енергії в системах передачі змінного струму [4]. За визначенням IEEE, HVDC – це системи високої напруги постійного струму. Вони перетворюють змінний струм в постійний, транспортують його через лінію постійного струму, а потім перетворюють постійний струм в змінний. Завдяки своїй керованості передача постійного струму має повний контроль керування переданою потужністю, а отже здатність до розширення перехідної і динамічної стійкості в

пов'язаних з ним мережах змінного струму. Крім того, передача постійним струмом вирішує наступні проблеми, пов'язані з передачею змінного струму:

- відстань передачі не впливає на передачу потужності лінією постійного струму;
- навіть якщо перетворювачі потребують реактивну потужність, то сама лінія постійного струму її не потребує;
- в лініях постійного струму не треба розглядати питання стійкості;
- лише за наявності ланки постійного струму можливий асинхронний зв'язок двох енергосистем.

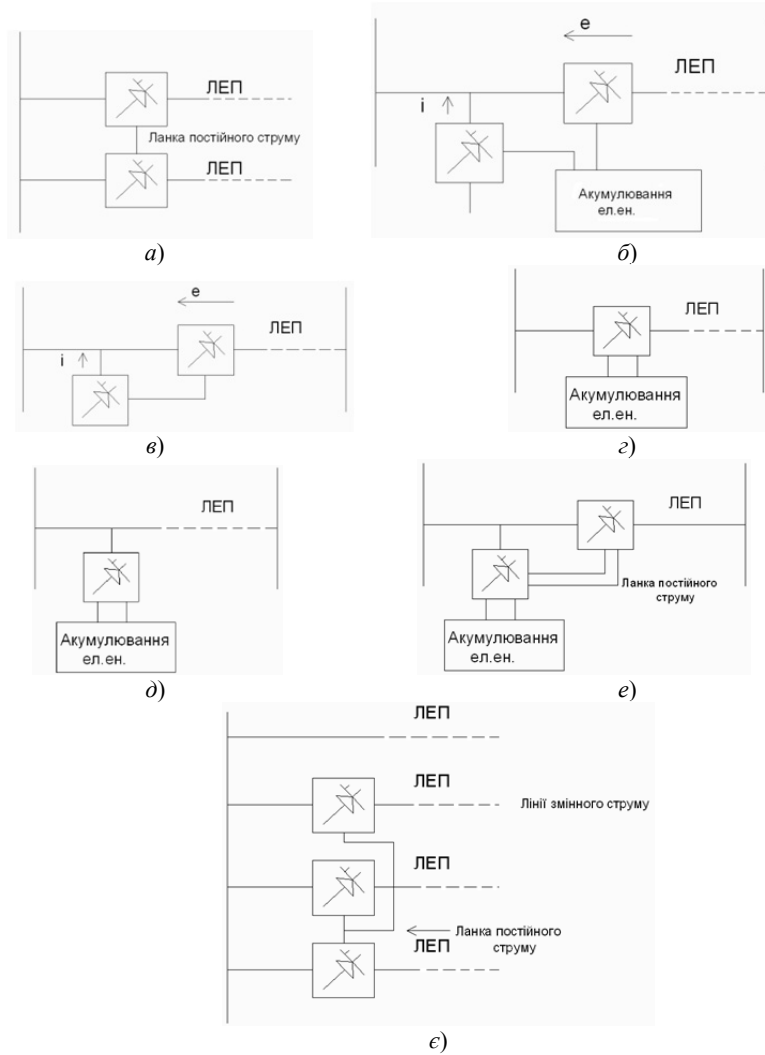


Рис. 4. Умовне позначення схеми підключення комбінованих пристроїв

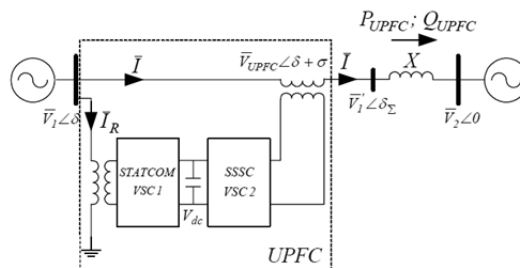


Рис. 5. Еквівалентна схема UPFC

Перетворювачі є основною складовою частиною HVDC. Вони перетворюють постійний струм в змінний і навпаки, і забезпечують можливість контролю потоку потужності HVDC.

Є два типи систем HVDC: система звичайних перетворювачів на базі тиристорів на основі джерела струму, і нові VSC системи [5, 6].

Оскільки в обох типах системи HVDC є необхідність перетворення ЗС/ПС та ПС/ЗС, вартість пристрою HVDC частково залежить від перетворювачів, які в ньому застосовуються.

Основний модуль звичайного перетворювача HVDC – це трифазна, двонапівперіодна мостова схема (рис. 5).

Хоча одним з головних обмежень пристроїв HVDC є їх залежність від тиристорів SCR, тим не менш споживачі не постраждають від будь-яких перерв в електропостачанні, бо необхідна реактивна потужність надходить з перетворювачів.

Основними перевагами впровадження технологій гнучкої електропередачі в електроенергетику є:

- підвищення економічної ефективності перспективного розвитку мереж;
- збільшення пропускної здатності існуючих мереж;
- поліпшення статичної і динамічної стійкості;
- демпферування низькочастотних коливань потужності;
- ефективне керування напругою, потоками активної та реактивної потужності в складнозамкнених мережах згідно з транзакціями енергоринку чи програм експорту-імпорту електроенергії; підвищення надійності;
- зниження втрат електроенергії;
- скорочення загального часу регулювання.

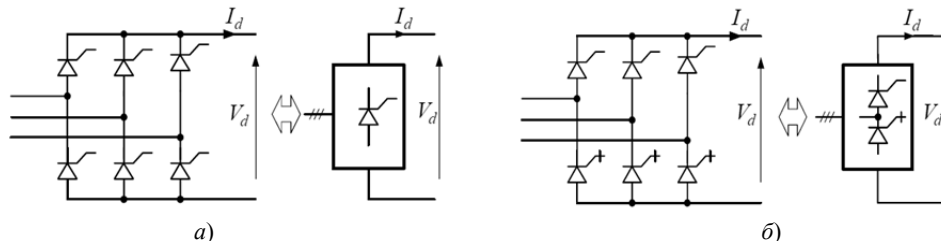


Рис. 5. Мостова схема перетворювача:

а) на базі SCR;

б) на базі SCR+GTO

І хоча мережева технологія FACTS є новою, її системні пристрої останніми роками вже зазнали певних трансформацій (див. табл. 1) [4].

До пристроїв FACTS першого покоління (FACTS-1, п.п. 1–6 табл. 1) відносять пристрої, які забезпечують регулювання напруги (реактивної потужності) і забезпечують необхідний ступінь компенсації реактивної потужності в електричних мережах (статичний компенсатор реактивної потужності (SVC), реактор з тиристорним керуванням, стаціонарний послідовний конденсатор з тиристорним керуванням тощо).

До нових FACTS другого покоління (FACTS-2, п.п. 7-12 табл. 1) відносять пристрої, які забезпечують регулювання режимних параметрів на базі повністю керованих приладів силової електроніки (IGBT транзистори, IGCT-тиристори тощо). FACTS-2 характеризуються новою якістю регулювання – векторним, коли регулюється не тільки величина, але й фаза вектора напруги електричної мережі (синхронний статичний компенсатор (STATCOM), об'єднаний регулятор потоків потужності (UPFC) тощо).

Крім проблем розподілу потоків потужності і проблем динамічної стійкості існують і інші питання, пов'язані з пристроями FACTS – їх розташування і підключення. Розміщення пристроїв FACTS а також аналіз їх підключення може бути здійснений у зв'язку з однією з наступних цілей:

- максимальний вплив на характеристики передачі;
- зниження втрат активної потужності в лінії;
- зниження втрат активної потужності всієї системи;
- зниження втрат реактивної потужності всієї системи;
- вплив на стійкість системи.

Технології FACTS вже широко впроваджуються в розвинених країнах, ось деякі приклади того, як технології гнучких систем впроваджуються в Росії та світі.

Деякі з проектів компанії ABB, що засновані на технологіях FACTS:

- ЛЕП з Техасу в Мексику оснащена VSC та BtB;

- ЛЕП в Швеції, що з'єднує вітрякову ферму та ЕС Швеції, оснащена HVDC;
 - ЛЕП в Австралії довжиною 239 км оснащена HVDC;
 - Підводна ЛЕП довжиною 40 км до Лонг Айленду в Нью Йорку США оснащена HVDC;
 - Підводна ЛЕП довжиною 70 км до газодобувної ділянки в Норвегії оснащена HVDC.
- Перелік об'єктів, на яких застосовуються технології та пристрої FACTS в Росії:
- ЛЕП 330/220 кВ Лененерго – Карелія – Кола оснащена STATCOM, UPFC;
 - ЛЕП 220/500 кВ Тюмень – Урал оснащена STATCOM, SVC, UPFC;
 - ЛЕП 220 кВ між ОЕС Сибіру та ОЕС Сходу (п/с Могоча) оснащена STATCOMом;
 - ЛЕП 220 кВ Нижньовартовська – Томськ (п/с «Советско-Соснинская») оснащена STATCOMом;
 - п/с Східна (Ржевська) МЕС Північно-Західна оснащена STATCOMом.

Таблиця 1

Приклади технологій FACTS для коригування спотворень в мережах Smart Grid

№	Пристрої FACTS	Предмет управління
1	Статичний компенсатор реактивної потужності (SVC) (TCR, TCS, TRS)	Керування та регулювання напруги, усунення коливань
2	Керований тиристорами поздовжній компенсатор Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC, TSSC)	Керування струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
3	Керований тиристорами поздовжній реактор Thyristor Controlled Reactor Series (TCSR, TSSR)	Керування струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
4	Керований тиристорами фазний перетворювач Thyristor Controlled Phase Transformer (TCPST, TCPR)	Перехід до керування активної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
5	Керований тиристорами регулятор напруги Thyristor Controlled Voltage Regulator (TCVR)	Керування реактивною потужністю, регулювання напруги, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
6	Керований тиристорами обмежувач напруги Thyristor Controlled Voltage Limited (TCVL)	Тимчасове і динамічне обмеження напруги
7	Синхронний статичний компенсатор Synchronous Static Compensator без акумулювання електричної енергії (STATCOM Without storage)	Керування напругою, усунення коливань, стійкість за напругою, компенсація реактивної потужності
8	Синхронний статичний компенсатор з акумулюванням електричної енергії Synchronous Static Compensator (STATCOM With storage)	Керування напругою та забезпечення стійкості, компенсація реактивної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
9	Синхронний статичний компенсатор послідовного ввімкнення без акумулювання електричної енергії Static Synchronous Series Compensator (SSSC Without storage)	Контроль струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
10	Синхронний статичний компенсатор послідовного ввімкнення з акумулюванням електричної енергії Static Synchronous Series Compensator (SSSC With storage)	Керування струмом, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
11	Об'єднаний регулятор потоків потужності Unified Power Flow Controller (UPFC)	Керування активною та реактивною потужностями, регулювання напруги, компенсація реактивної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
12	Керування розподілом навантаження між лініями Interline Power Flow Controller (IPFC) or Back to Back (BtB)	Керування реактивною потужністю, регулювання напруги, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою

На основі цих даних можна зробити висновок, що світова спільнота поступово починає переходити до інтелектуалізації електричних мереж та впровадження технологій систем гнучкої передачі змінним струмом.

Висновки

Враховуючи вищевикладене можна зробити висновок, що технологія FACTS є однією із найбільш перспективних електромережових технологій, завдяки якій електрична мережа із пасивного обладнання транспортування електроенергії перетворюється в обладнання, яке здійснює керування режимами роботи електричних мереж.

Завдяки цьому вдається «в темпі реального процесу» керувати значенням пропускнуої здатності лінії електропередачі, перерозподіляти між паралельними лініями електропередачі потоки потужності, оптимізуючи їх в ustalених режимах, і перенаправляти їх по збережених після аварій лініях електропередачі без порушення стійкості, тим самим забезпечуючи підвищення надійності електропостачання споживачів.

Використання FACTS дозволяє в окремих випадках відмовитися від спорудження нових ліній електропередачі за рахунок більшого завантаження вже існуючих. Ці пристрої дозволяють також обмежувати рівні струмів КЗ в електричних мережах, об'єднувати на сумісну роботу несинхронно працюючі електричні системи.

Література

1. Стогній Б. С. Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи/ Стогній Б.С. – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – С. 6–10. – (Праці ІЕД НАНУ Спец. випуск).
2. Стогній Б.С., Особенности управления режимами ОЭС Украины при реформировании рынка электроэнергии / Стогній Б.С., Кириленко А.В., Павловский В.В. –К.: ІЕД НАНУ, 2006. – С. 69–72.– (Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”, Ч.1).
3. Song Y.-H. Flexible AC Transmission systems (FACTS) / Song Y.-H., Johns A. T.– IEE – Power and Energy Series 30. – London, 1999.
4. Strzelecki R., Active power filter – new control system and topology/ Strzelecki R., Benysek G., Rusinski J., Jarnut M., Meckien G. – 2003. – P. 99–106.–(Proc. Conference AES’2003, Edinburg).
5. Chun L, Qirong J, Jianxin X, (2000) Investigation of voltage regulation stability of static synchronous compensator in power system. IEEE Power Engineering Society, winter meeting, vol.4:2642–2647.
6. Hingorani N, (1996) High-voltage dc transmission: a power electronics workhorse. IEEE spectrum, vol.33, no.4:63–72.