

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Буяльський Віталій Петрович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Модернізація лінії високих напруг з використанням FACTS

(тема роботи)

пристроїв

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Буяльський В. П.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Пінкін Анатолій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Буяльський В. П. Модернізація лінії високих напруг з використанням FACTS. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Робота присвячена обґрунтуванню використання компактних керованих самокомпенсуючих повітряних ліній.

У роботі розглянута класифікація та проведений аналіз принципів будови повітряних ліній нового покоління і ефективність їх використання.

Ключові слова: повітряна лінія, пропускна здатність, керовані самокомпенсуючі високовольтні лінії електропередачі.

ABSTRACT

Bookalsky V.P. Modernization of high voltage line using FACTS. Qualifying work for the master's degree in specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The work is devoted to the substantiation of the use of compact controlled air lines.

The paper discusses the classification and analyzed the principles of the structure of the new generation air lines and the effectiveness of their use.

Keywords: air line, bandwidth, managed self-compensation high-voltage transmission lines.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 4 |
| РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПРИНЦИПИ БУДОВИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ | 6 |
| 1.1. Сучасна класифікація ліній електропередачі змінного струму та пристроїв та пристроїв регулювання транспортування електроенергії. | 6 |
| 1.2. Методика вибору пристроїв регулювання FACTS та їх технічні характеристики. | 9 |
| Висновки по розділу 1 | 14 |
| РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ САМОКОМПЕСУЮЧИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ | 15 |
| 2.1. Сутність використання засобів регулювання пропускнуої можливості керованих ліній електропередачі. | 15 |
| 2.2. Фізична сутність процесів які відбуваються в КСПЛ. | 17 |
| Висновки по розділу 2 | 22 |
| РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ ПЛ З FACTS ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ | 23 |
| 3.1. Конструктивне виконання електричних мереж з КСПЛ | 23 |
| 3.2. Перевірка трансформаторів на перевантаження | 29 |
| Висновки по розділу 3 | 34 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 35 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 36 |

ВСТУП

В даний час спостерігається значне зростання використання електричної енергії у промисловості та соціальній сферах, що спонукає до подальшого збільшення виробництва електроенергії, розвитку систем електроенергетики, будівництва нових джерел генерації, розподільних, транспортних і міжсистемних ліній електропередачі.

Основними об'єктами електромереж в першу чергу відносяться повітряні лінії електропередачі (ПЛ) до яких висуваються нові вимоги в сенсі підвищення ефективності їх роботи, зменшення капітальних витрат на будівництво, зниження експлуатаційних витрат, зменшення екологічного впливу на навколишнє середовище.

На сьогоднішній день найважливішими завданнями в даній сфері стають:

- максимальне збільшення пропускної спроможності ПЛ;
- підвищення керованості і стійкості енергосистем;
- побудова керованих енергетичних об'єднань, які працюють паралельно та забезпечують умови енергетичної та екологічної безпеки та зменшують земельних угідь які відчужуються під енергетичні об'єкти.

Вирішення цих завдань є частиною проблеми створення активно-адаптивних електричних мереж, з метою забезпечення в реальному масштабі часу надійного і економічно оптимального функціонування електроенергетичних систем в будь-яких (нормальних, перед аварійних, аварійних і після аварійних) режимах, а також надійного забезпечення споживачів максимально дешевою електроенергією заданої якості.

Для успішного вирішення зазначених завдань і досягнення поставлених цілей можуть бути запропоновані керовані електропередачі змінного струму підвищеної пропускної здатності, які представляють собою комплекс технічних рішень, що передбачають застосування одно ланцюгових і багато ланцюгових ПЛ нового покоління (компактних ПЛ і керованих самокомпенсуючих ПЛ) в поєднанні з сучасними засобами регулювання.

Метою даної кваліфікаційної роботи є виклад основних методичних підходів до обґрунтування і вибору найбільш доцільних варіантів повітряних ліній електропередачі, їх техніко-економічних показників, а також ряду істотних відмінностей і переваг в порівнянні з ПЛ традиційного виконання.

Предметом дослідження є ПЛ нового покоління різного класу напруги. Конкретна ж ілюстрація методичних підходів проведена на прикладі ПЛ напругою 220 кВ які і являються **об'єктом дослідження**.

Виконані до теперішнього часу науково-дослідні роботи [1-6] дозволяють сформулювати відповідно основні **методичні підходи** до вибору ПЛ нового покоління.

РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПРИНЦИПИ БУДОВИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

На сучасному етапі розвитку електроенергетичних систем актуальним є вирішення таких основних проблем:

- підвищення пропускної спроможності і керованості магістральних і розподільчих ліній електропередачі та систем в цілому;
- підвищення економічних показників електроенергетичних систем;
- зменшення відчужуваних площ під лінії електропередачі та виконання всіх вимог щодо обмеження екологічного впливу ПЛ.

Для вирішення цих проблем доцільним видається розвиток електричних мереж 110-500 кВ на базі сучасних технічних рішень, як в області конструкцій ліній електропередачі, так і регулюючого обладнання і систем управління [1-4].

Створення компактних ПЛ, оснащених пристроями FACTS (гнучких ліній електропередачі змінного струму) , в тому числі засобами фазового управління – компактних керованих ПЛ - є одним з найбільш ефективних засобів транспортування електроенергії. Компактні ПЛ, з поліпшеними порівняно з ПЛ традиційної конструкції техніко економічними показниками, дозволяють знизити витрати на транспорт електричної енергії в розрахунок на одиницю переданої потужності за рахунок підвищення пропускної здатності електричної мережі, ефективного використання пристроїв регулювання, скорочення площ земель які відводяться під ПЛ.

1.1 Сучасна класифікація ліній електропередачі змінного струму та пристроїв та пристроїв регулювання транспортування електроенергії

При виконанні кваліфікаційної роботи була виконана класифікація ПЛ різних типів, що дозволяє провести їх зіставлення і визначити області застосування.

На рис. 1.1 представлені різні типи ліній електричних мереж змінного струму в одноланцюговому (рис.1.2) і двохланцюговому (рис.1.3) виконанні.



Рисунок 1.1. Класифікація ПЛ змінного струму

Для порівняння компактних керованих ПЛ з традиційними лініями електропередачі інших типів прийняті наступні допущення:

- при виборі проводів приймається однакова щільність струму ($A / \text{мм}^2$);
- максимальна напруженість електричного поля (E_m) на поверхні проводів (в тому числі на складових розщеплених фаз) не перевищує заданої величини по відношенню до початкової напруженості поля корони (E_n), $E_m \leq 0,9E_n$;

Крім зазначених пристроїв компенсації в разі виникнення потреби регулювання по величині і напрямку потоку потужності в складно замкнутій мережі потрібна установка пристроїв фазового регулювання – фазо поворотних пристроїв (ФПП), які можуть бути також трансформаторного типу (ФППТ). Їх встановлена потужність повинна бути розрахована на повну прохідну потужність повітряної лінії.

Компактні керовані ПЛ відрізняються від звичайних тим, що підвищена пропускна здатність у них досягається за рахунок компактної конструкції і фазового зсуву між векторами напруги зближених фаз, який для

одноланцюгових трифазних ПЛ буде дорівнює 120° , а для двоколових ПЛ може складати $\theta = 120^\circ$, $\theta = 180^\circ$, і займати проміжні регульовані значення в межах $\theta = 0 \div 120^\circ$ (180°).

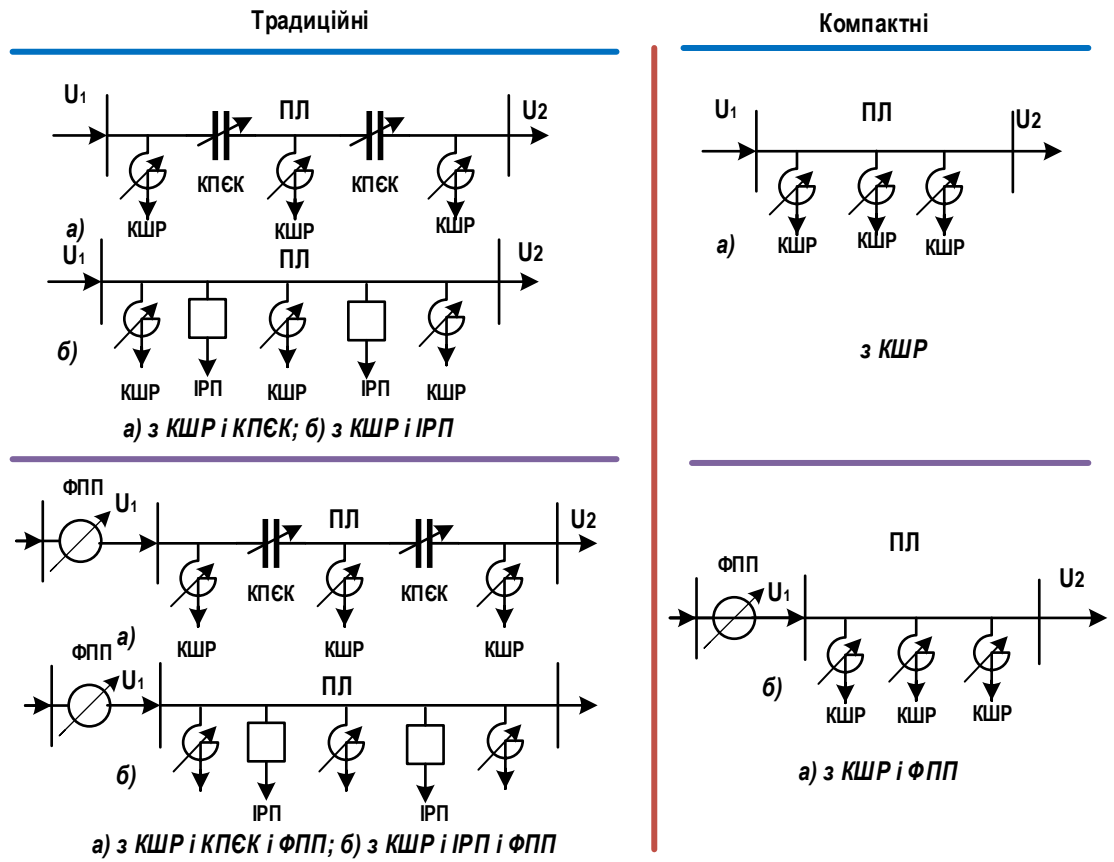


Рисунок 1.2. Однолінійні одноланцюгові схеми ПЛ

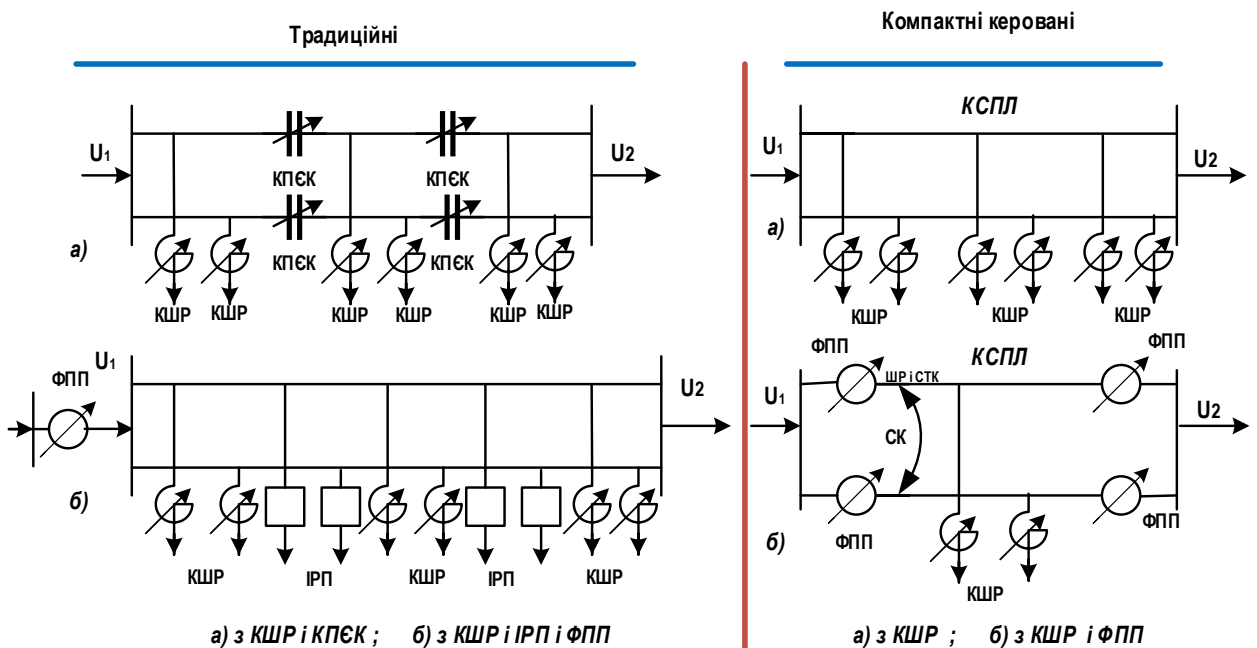


Рисунок 1.2. Однолінійні дволанцюгові схеми ПЛ

Обов'язковими елементами лінії електропередачі нового покоління є пристрої регулювання, які належать до категорії FACTS. На рис. 1.4 зображена класифікація пристроїв FACTS, їх загальні технічні характеристики і функціональні можливості дані в таблиці 1.1, а орієнтовні вартісні показники - на рис. 1.5 (на період 2019р.).

1.2 Методика вибору пристроїв регулювання FACTS та їх технічні характеристики

Вибір пристрою FACTS для ПЛ, наприклад 220 кВ, буде визначена тими задачами, які покладені на ПЛ даного класу напруги. ПЛ нового покоління напруги 220 кВ в енергосистемах можуть виконувати різні функції:

- служити в якості міжсистемних зв'язків для здійснення обмінних перетоків потужності між енергосистемами які працюють автономно;
- в складно замкнутій системі здійснювати передачу заданої потужності між її вузлами та виконувати функції внутрісистемних ліній;
- передавати вироблену потужність електростанцій в енергосистему;
- як радіальні ПЛ, використовуватися для електропостачання віддалених великих споживачів;
- у великих містах і густо населених житлових районах виконувати функції глибоких вводів.

Застосування ПЛ нового покоління, у кожному з розглянутих випадків, вимагає враховувати конкретні вимоги до передачі напруги того або іншого класу та існуючі загально-технічні обмеження (по допустимим відхиленням напруги, по короні, акустичним шумах і радіоперешкодах, а також за рівнем напруженості поля під ПЛ біля поверхні землі і ін.)

В кожному з перерахованих вище випадків при застосуванні ПЛ нового покоління вибір пристроїв FACTS, їх потужність і характеристики визначається з урахуванням конкретних вимог.



Рисунок 1.4. Класифікація пристроїв FACTS

Наприклад, при здійсненні обмінних перетоків потужності - застосування пристроїв FACTS в ПЛ нового покоління для міжсистемних зв'язків повинно забезпечити:

- якщо існуюча пропускна здатність ПЛ недостатня, збільшити пропускну її здатність до заданого рівня. Дане завдання може бути досягнуто за допомогою наступних типових пристроїв FACTS: керованих пристроїв поздовжньої компенсації (КППК); батареї статичних конденсаторів (БСК); синхронних компенсаторів (СК); ССК - статичних компенсаторів (ССК); статичних компенсаторів реактивної потужності (СТАТКОМ); фазорегулюючих пристроїв (ФРП);

- регулювання напруги до заданого рівня в прилеглих до лінії вузлах, досягається:

для підвищення напруги в вузлах - СТК, СТАТКОМ, СК; при необхідності обмеження напруги - установкою шунтуючих реакторів (ШР), керованих шунтуючих реакторів (КШР), СК, СТАТКОМ, реакторних груп (ВРГ).

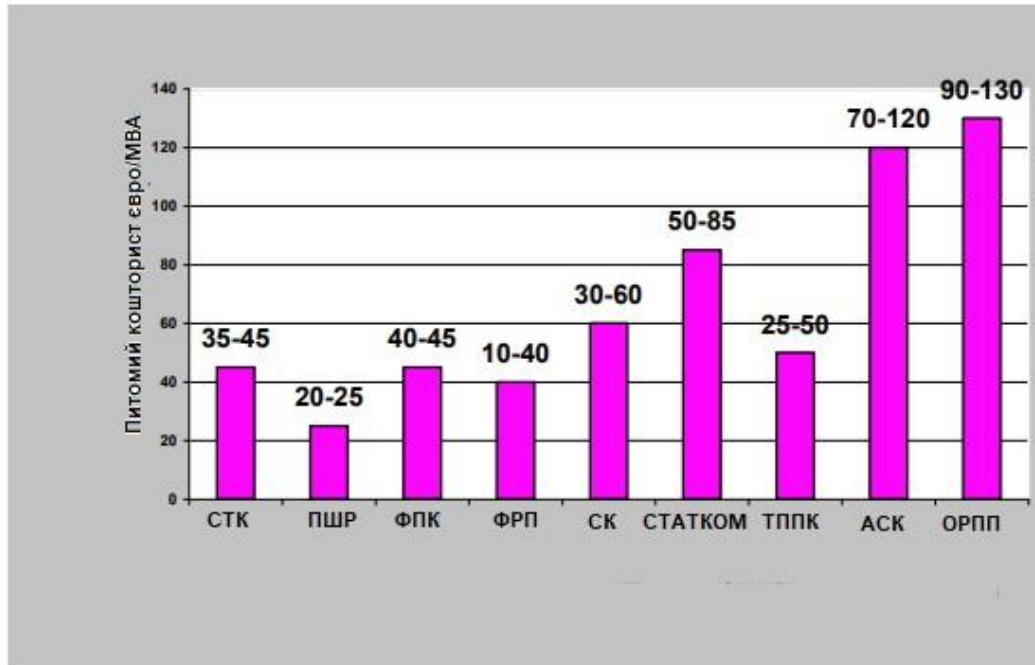


Рисунок 1.5. Пристрої компенсації та управління FACTS

При використанні ПЛ 220 кВ в якості міжсистемних зв'язків, крім пристроїв, зазначених вище, необхідна установка: фазорегулювальних пристроїв (ФРП); об'єднаних регуляторів потоку потужності (ОРПП); вставок постійного струму (ВПС); комбінованих пристроїв ППК і ФРП (ППК-ФРТ; асинхронізованих компенсаторів (АСК).

В інших випадках застосування ПЛ нового покоління необхідна відповідна комбінація пристроїв FACTS, перерахованих вище.

Таблиця 1.1– Технічні характеристики і області застосування пристроїв FACTS різних типів

| № п/п | Назва пристрою | Характеристика пристрою | Область використання |
|-------|------------------------|---|---|
| 1 | Шунтуючий реактор (ШР) | Нерегульовані масляні шунтуючі реактори | Застосовується для ступеневого регулювання реактивної потужності, зниження рівнів комутаційної перенапруги, гасіння дуги в паузі ОАПВ |

| | | | |
|---|--|--|---|
| 2 | Керований шунтуючий реактор з підмагнічуванням постійним струмом (КШР) | Виконується на основі спеціального трансформатора з масляним охолодженням, в складі КШР на загальному осерді міститься обмотка мережевого реактора, компенсуюча обмотка, обмотка управління, і поза баком з КШР – тиристорний пристрій випрямлення і фільтрації. Швидкість дії КШР визначається ступенем форсування і розфорсування підмагнічування постійним струмом і потужності випрямного пристрою | КШР призначені для плавного регулювання напруги або реактивної потужності при потужностях, які протікають по лініях електропередачі, що не перевищують номінальну, КШР можуть встановлюватися як на лініях електропередачі (лінійні КШР), так і на шинах підстанції, вони не призначені для забезпечення стійкості роботи електричних мереж. Основна область застосування – розподільні мережі. Можливим варіантом використання, коли паралельно КШР підключається конденсаторна батарея (БСК). |
| 3 | Реакторні групи, комутотовані вимикачі (ВРГ) | Реактори ступінчатого регулювання підключаються до третинної обмотки авто – трансформаторів (трансформаторів) за допомогою вакуумних вимикачів з числом комутацій 5000 - 10000, з часом включення / відключення вимикача $\Delta t = 0,02-0,12$ с | Застосовуються для компенсації зарядної потужності в лініях електропередачі та вузлах навантаження для підтримки напруги в визначених межах в сталих режимах. ВРГ призначені для ступеневого регулювання напруги (реактивної потужності) при потужності, що протікає по лінії електропередачі, що не перевищує номінальну. Визначена область застосування це розподільні мережі. Можливим варіантом використання, коли конденсаторні батареї (БСК) підключаються паралельно ВРГ |
| 4 | Синхронні компенсатори (СК) | Являються комплексом в складі синхронної машини і збудника. Відомі модифікації СК з безщітковим збудженням. СК здатні забезпечити регулювання реактивної потужності в межах 100% видачі і 30-50% споживання. Мають високу перевантажувальну здатність (2-3 кратну перевантаженню по струму протягом 30 с) | Застосовується СК для регулювання напруги і розширення меж статичної та динамічної стійкості, збільшення пропускної здатності електропередачі. Застосовуються в будь-яких електричних мережах. |
| 5 | Статистичні тиристорні компенсатори (СТК) | СТК складається з реактора повітряного охолодження і тиристорного вентиля повітряного або водяного охолодження, утворюють тиристорні групи (ТРГ) з плавним регулюванням кута запалювання тиристорів. Паралельно з ТРГ підключається конденсаторна батарея | Забезпечують регулювання напруги (реактивної потужності) при потужності в лінії електропередачі як вище так і нижче номінальної. Призначені вони також для і величини збільшення потужності переданої по лініях електропередачі та підвищення стійкості. Можливою областю застосування являються розподільні і магістральні мережі, а також міжсистемні зв'язки для цілей глибокого |

| | | | |
|---|--|--|---|
| | | (КБ), а іноді і фільтрокомпенсуючі ланцюга (ФКЛ). Підключається СТК до мережі ВН через третинну обмотку НН автотрансформатора або через блоковий підвищувальний трансформатор. Мінімальна величина постійної часу регулювання реактивної потужності становить $\tau_{p\Sigma} = 0,01-0,03$ с | регулювання реактивної потужності і забезпечення стійкості. В мало потужних мережах вони не ефективні. |
| 6 | Статистичний компенсатор реактивної потужності на базі перетворювача напруги (СТАТКОМ) | Складається з перетворювача напруги, виконаного на силових транзисторах, для забезпечення генерації та споживання реактивної потужності в діапазоні $\pm 100\%$ встановленої потужності пристрою, без додаткових силових реакторів і конденсаторних батарей. Підключається до мережі ВН через третинну обмотку НН автотрансформатора або через окремий підвищувальний трансформатор НН / ВН | Застосовується для стабілізації напруги, збільшення пропускної спроможності електропередавальної лінії, зниження коливальності напруги, підвищення стійкості перехідних процесів в електричних ланцюгах, зменшення демпфінгних коливань в енергосистемі. Область застосувань: в будь-яких електричних мережах, особливо ефективні мережах малої потужності. |
| 7 | Фазоповоротні пристрої (ФПП) | Пристрій, який перемикає за допомогою вимикачів або тиристорних ключів отпайки трансформатора, що забезпечує регулювання фази вхідної напруги по відношенню до вихідної | Застосовується для оптимізації в сталих режимах потоків потужності по паралельним ЛЕП, підвищення пропускної можливості. може застосовуватися для підвищення статичної та динамічної стійкості енергосистем. |
| 8 | Асинхронізовані компенсатори (АСК) | Комплексом, який складається з асинхронних електричних машин змінного струму та статичних перетворювачів частоти. Містить на роторі дві і більше обмотки збудження, завдяки чому забезпечується можливість регулювання реактивної потужності в межах $\pm 100\%$ коливання. Забезпечує також можливість регулювання не тільки величини, але і фази вектора напруги в енергосистемі. АСК мають високу перевантажувальну здатність (двох – трьох | Застосовуються для регулювання напруги і підвищення меж статичної та динамічної стійкості, збільшення пропускної здатності лінії електропередачі, поліпшення демпфірування енергосистеми. Застосовуються в будь-яких електричних мережах, особливо ефективні в мало потужних мережах |

| | | | |
|----|---|--|---|
| | | кратне перевантаження) по струму протягом 300 сек. Можлива робота зі змінною частотою обертання з маховиком на валу з метою підвищення меж динамічних характеристик енергосистем | |
| 9 | Батарея статичних конденсаторів (БСК) | Пристрій ємнісного типу для паралельного підключення до лінії електропередачі | Для збільшення пропускної спроможності лінії електропередачі поверх присутньої потужності, і регулювання рівня напруги |
| 10 | Керовані пристрої подовжньої компенсації (КППК, ТППК) | Тиристорно-керовані пристрої подовжньої компенсації | Ємнісна подовжня компенсація для збільшення пропускної здатності ПЛ понад значення номінальної потужності, регулювання параметрів режимів і підвищення динамічної стійкості |
| 11 | Об'єднані регулятори потоку потужності (ОРПП) | Пристрої, що забезпечують зміну фази напруги на виході по відношенню до входу | Дозволяють здійснювати регулювання величини переданої по ПЛ потужності |

Висновки по першому питанню

Лінії електропередачі нового покоління (компактні одноланцюгові, дволанцюгові, багатоланцюгові, а також УСПЛ) забезпечують при однаких умовах істотно більшу в порівнянні з ПЛ звичайного типу пропускну здатність, завдяки поліпшеним параметрами і збільшеною номінальною потужністю лінії.

Природно вважати, що застосування пристроїв типу FACTS на ПЛ нового покоління для подальшого підвищення пропускної спроможності понад їх існуючого значення, буде більш ефективним, ніж на ПЛ традиційних типів.

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ САМОКОМПЕСУЮЧИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

2.1 Сутність використання засобів регулювання пропускної можливості керованих ліній електропередачі

Збільшення пропускної здатності ПЛ при зближенні фаз впливає із залежності величини межі переданої потужності від основних параметрів лінії.

Максимальна величина переданої потужності визначається виразом:

$$P = \frac{|U_1| |U_2|}{Z_{xв} \cdot \sin \alpha_0 \cdot l} \cdot \sin \delta, \quad (2.1)$$

де, - U_1, U_2 – вектори напруги прикладеної відповідно на початку і в кінці повітряної лінії;

δ - кут зсуву векторів напруги початку і кінця лінії;

$Z_{xв}$ - хвильовий опір лінії який визначається виразом (Ом):

$$Z_{xв} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}, \quad (2.2)$$

де $x_0 = \omega L_0$, - питомий індуктивний опір проводів (фаз) лінії (Ом / км);

$b_0 = \omega C_0$ - питома ємнісна провідність проводів (фаз) лінії (См / км);

r_0 - питомий активний опір проводів (фаз) лінії (Ом / км);

g_0 - активна поперечна провідність проводів (фаз) лінії (См / км), яка визначається виразом:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{кор.ср}}{U_{ном}^2},$$

де $\Delta P_{кор.ср}$ – середньо річні втрати на корону;

$\alpha_0 \cdot l$ – хвильова довжина лінії електропередачі (в електричних градусах), де l – довжина лінії (км), α_0 – коефіцієнт зміни фази (елек. град./км) і визначається виразом:

$$\alpha_0 = \omega \sqrt{L_0 C_0} \left(1 + \frac{r_0^2}{8x_0^2} \right). \quad (2.3)$$

З виразу (2.1) випливає, що при інших рівних умовах величина переданої по ПЛ потужності залежить від значення хвильового опору ($Z_{xв}$), який в свою чергу (2.2) визначається питомими параметрами (r_0, x_0, g_0, b_0).

Питомий активний опір фази r_0 для обраної марки проводу залишається незалежною величиною. При відсутності втрат на корону може бути прийнято, що $g_0 = 0$.

Таким чином головними параметрами, від яких залежить хвильовий опір ПЛ є питомий індуктивний опір x_0 і питома поперечна провідність b_0 .

Аналіз факторів, від яких залежать значення x_0 і b_0 , показує, що головними із них є відстані між фазами, параметри розщеплених фаз (радіус проводів r_{np} , число складових - n , еквівалентний радіус розщеплення фази), а також конфігурації розташування фази $r_{ек}$, і загальні габарити опор ПЛ.

Для традиційних одноланцюгових ПЛ залежності зазначених параметрів визначаються наступними виразами:

$$x_0 = 0,1445 \lg \frac{D}{r_{ек}} + \frac{0,0157}{n}; \quad (2.4)$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \left(\frac{D}{r_{ек}} \right)}. \quad (2.5)$$

Із визначених формул видно, що для створення компактних одноланцюгових ПЛ слід йти по шляху зменшення відстаней між фазами D і збільшення еквівалентного радіуса розщеплення фази $r_{ек}$.

Для двоколових ПЛ крім зазначених факторів основними які впливають є - відстань між ланцюгами і кутовий зсув між системами векторів напруги фаз ланцюгів.

У аналізованих випадках компактних двоколових ПЛ передбачається необхідно передбачити виконання зближення ланцюгів проводів у вигляді зближення окремих фаз одного ланцюга з фазою іншого ланцюга, в результаті чого КСПЛ буде представляти собою три пари зближених фаз, при цьому кожна пара містить одну фазу першого ланцюга і одну фазу другого ланцюга, між якими встановлюється кутовий зсув векторів напруги (θ) який фіксується в межах $0^\circ - 120^\circ (180^\circ)$ або регульований в межах $0 \div 120^\circ (180^\circ)$.

Основна принципова відмінність компактних керованих ПЛ від звичайних двоколових ліній полягає в максимально можливому зближенні трифазних ланцюгів, завдяки чому досягається збільшений електромагнітне вплив ланцюгів, а зміна кутового зсуву трифазних систем напруги одного ланцюга по відношенню до інших визначає знак цього впливу на еквівалентні параметри фаз. Наявність значного і регульованого електромагнітного взаємного впливу кіл створює ефект між ланцюгової самокомпенсації параметрів лінії, завдяки якому досягається збільшення пропускної спроможності кожної ланцюга і лінії в цілому, а також нові властивості регульованих параметрів повітряної лінії.

Такі повітряні лінії називаються компактними самокомпенсуючими (КСПЛ).

2.2 Фізична сутність процесів які відбуваються в КСПЛ

Керовані самокомпенсуючі високовольтні лінії електропередачі (КСПЛ) являє собою багатопровідну багатоланцюгову лінію змінного струму. Для опису процесів, що відбуваються в них, проведення розрахунків режимів і вибору основних технічних рішень для них застосовні існуючі основи теорії електропередачі змінного струму. Разом з тим КСПЛ мають свої особливості і

відмінності, що спонукало виконання для них додаткових розробок нових методик розрахунку і нових підходів до вибору основних схем, конструкції і апаратного оснащення.

Відомо, що основні технічні характеристики багатопровідних ліній електропередач визначаються параметрами електромагнітного поля, утвореного навколо провідників в просторі, займаному лінією електропередачі.

З теоретичних основ електротехніки [7] відомо, що векторні величини - напруженість електричного поля (E) і магнітного (H) визначають щільність потоку потужності в електромагнітному полі (Π), так званий вектор Пойтінга:

$$\dot{\Pi} = \dot{E} \times \dot{H} . \quad (2.6)$$

Грунтуючись на загальній теорії електромагнітного поля [7] в роботі [8] був отриманий вираз сумарного потоку потужності багатопровідної лінії для самого загального випадку, котрий має наступний вигляд:

$$-\Pi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sigma_{inp} E_{inc}^2 \pi r_0^2 l - j \frac{\omega l}{\varepsilon \varepsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i^2 \ln \frac{R_1}{r_0} + j \frac{\omega l \mu \mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i^2 \ln \frac{R_1}{r_0} = P_{\theta\Sigma} - jQ_{C\Sigma} + jQ_{L\Sigma} , \quad (2.7)$$

де: E_{inc} - поздовжня складова напруженості електричного поля всередині i -го проводу; σ_{inp} - питома електрична провідність проводу; r_0 - радіус проводу; l - довжина лінії електропередачі; ω - кутова частота, рад/с; ωl - швидкість поширення електромагнітної хвилі, м/с, тут l - розмірність м/рад; ε_0 електрична постійна; ε - відносна електрична проникність середовища; μ_0 - магнітна постійна; μ - відносна магнітна проникність; q_i - заряд i -го проводу; R_1 - радіус деякого циліндра, поверхня якого обмежує обсяг простору навколо проводу, в якому відбувається зміна енергії поля; I_i - струм в i -тому проводі; n - число проводів (фаз) лінії електропередачі; $P_{\theta\Sigma}$ - сумарні теплові втрати в проводах лінії; $Q_{C\Sigma}$ - сумарна потужність електричного поля лінії; $Q_{L\Sigma}$ - сумарна потужність магнітного поля лінії. Потужності магнітного і електричного полів мають зворотні знаки, що свідчить про їх обмінний характер.

Для нормального режиму роботи мережі при номінальній потужності має бути виконуватись рівність [9]:

$$|-jQ_{C\Sigma}| = |+Q_{L\Sigma}| . \quad (2.8)$$

Використовуючи вираз (2.7) при виконанні умови (2.8) можна знайти вираз для діючої номінальної потужності лінії:

$$P_H = v \cdot U \sum_{i=1}^n q_i \cdot \cos(\gamma_i - \alpha_i) , \quad (2.9)$$

де v - швидкість поширення електромагнітної хвилі;

$U = U_i$ - напруга фазного проводу;

γ_i, α_i - аргументи напруги (U_i) і струму (I_i).

Приведені вирази (2.7, 2.9) показують, яким чином сумарний потік вектора потужності лінії залежить від різних факторів конструктивного і режимного характеру. Вони дозволяють виявити які параметри найбільш впливають і виконувати оптимізаційні розрахунки, здійснювати вибір конфігурацій розташування фаз, конструкції і кутових зсувів векторів напруги, прикладених до фаз, що в комплексі може забезпечити максимум функції (P_H), з урахуванням відповідних заданих обмежень. Наведені вирази дозволяють також визначати узагальнені характеристики ліній різного типу і проводити відповідні їх порівняння.

На підставі досліджень і аналізу факторів, що впливають встановлено, що для забезпечення максимальної величини натуральної потужності лінії, необхідно максимально збільшити сумарний електричний заряд всіх фаз лінії. Це можливо при зближенні фаз лінії і встановленні між прикладеними до них векторами напруги максимального кутового зсуву (θ). Разом з тим, при малих навантаженнях лінії доцільно забезпечити режим, при якому зарядна потужність лінії мінімальна. Цю умову можна виконати, якщо здійснити регулювання величини сумарного заряду лінії в сторону зменшення його величини. Для цього необхідно зменшити (в межі до 0) кутовий зсув між векторами напруги сусідніх фаз.

Параметри фаз ланцюгів традиційних ПЛ характеризуються особистими значеннями до яких відносяться x_0 , b_0 , та Z_{C0} .

Після зближення фаз (компактні ПЛ) появляються взаємні складові вище перерахованих параметрів: x_{0M} , b_{0M} , та Z_{CM} . В даному випадку результуючі параметри фаз ланцюгів ПЛ визначаються еквівалентними значеннями:

$$X_{0ек}^{\&} = x_0 + x_{0M} e^{j\theta}; \quad (2.10)$$

$$B_{0ек}^{\&} = b_0 - b_{0M} e^{j\theta}; \quad (2.11)$$

$$Z_{Сек}^{\&} = Z_{C0} + Z_{CM} e^{j\theta}. \quad (2.12)$$

При $\theta = 0^0$ кожна із фаз лінії буде характеризуватися параметрами:

$$X_{0ек}^{\&} = x_0 + x_{0M}; \quad (2.13)$$

$$B_{0ек}^{\&} = b_0 - b_{0M}; \quad (2.14)$$

$$Z_{Сек}^{\&} = Z_{C0} + Z_{CM}. \quad (2.15)$$

При $\theta = 180^0$ кожна із фаз лінії буде характеризуватися наступними параметрами:

$$X_{0ек}^{\&} = x_0 - x_{0M}; \quad (2.16)$$

$$B_{0ек}^{\&} = b_0 + b_{0M}; \quad (2.17)$$

$$Z_{Сек}^{\&} = Z_{C0} + Z_{CM}. \quad (2.18)$$

Принциповим є наступне питання, наскільки можна зближувати фази, у одноколових компактних ПЛ і двоколових КСПЛ. При зближенні фаз використовувана між ними відстань повинна бути не менше допустимої за умовами діелектричної міцності проміжків «Фаза-фаза» з урахуванням максимальної робочої напруги, грозової і комутаційної перенапруги. На рис. 2.1 показані мінімально допустимі згідно вимогам нормативних документів відстані між фазами ПЛ напругою 110-500 кВ.

З наведених даних випливає, що при створенні компактних ПЛ відстані між фазами можуть бути в 2 - 3 рази меншими в порівнянні з прийнятими сьогодні на ПЛ традиційної конструкції.

При цьому важливо приймати такі конфігурації розташування фаз на опорах, щоб заземлені елементи опор (траверси, стійки, арматура) були розташовані поза межами простору між зближеними фазами.

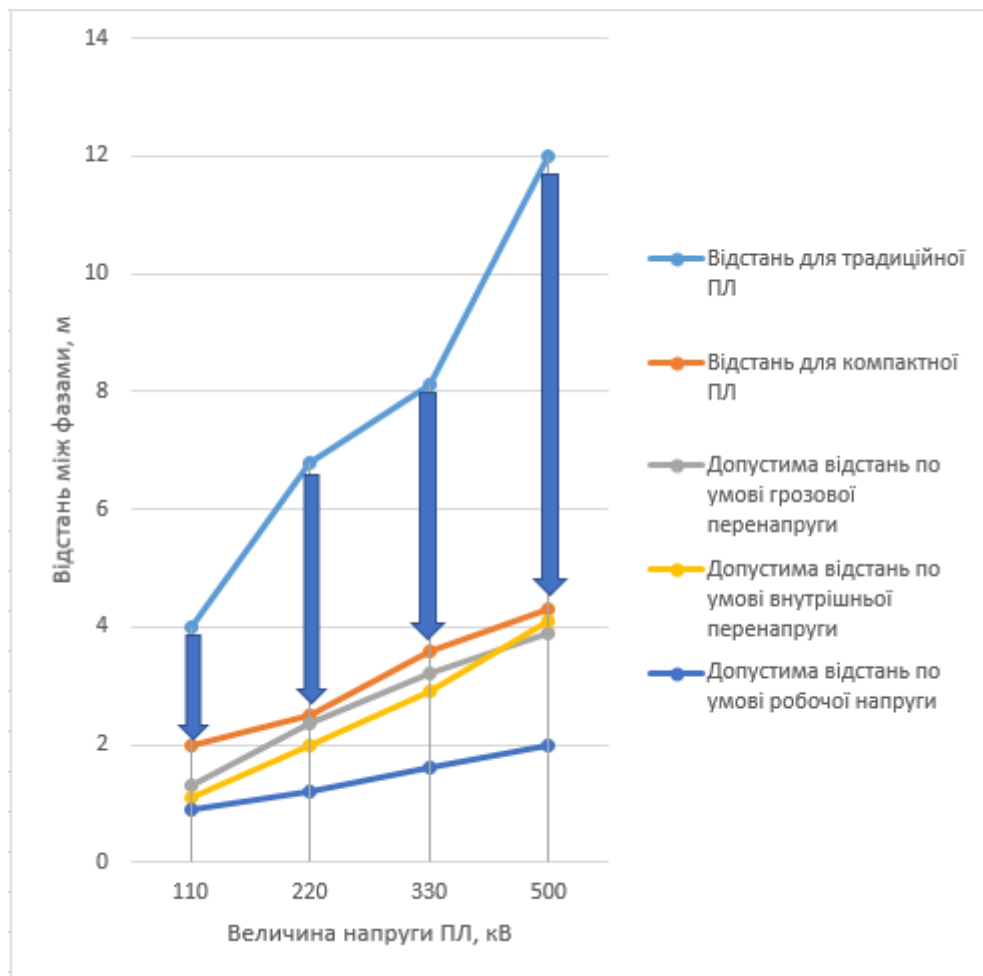


Рисунок 2.1. Мініміально допустимі відстані між фазами проводів ПЛ

Іншою важливою вимогою є те, щоб при виборі мініміально допустимих відстаней між фазами в прольотах передбачалася установка ізоляційних елементів (міжфазних розпірок), які фіксують відстань між фазами і перешкоджають подальшому зближенню фаз при впливі несприятливих атмосферних чинників.

Висновки по другому розділу

Доцільно вважати, що застосування пристроїв типу FACTS на ПЛ нового покоління для подальшого підвищення пропускної спроможності понад їх діючого значення, буде більш ефективним, ніж на ПЛ традиційних типів.

Доказом цього може служити, наприклад, такий критерій, як коефіцієнт ефективності застосування пристроїв FACTS ємнісного типу для збільшення пропускної здатності ПЛ різного виконання, виражений у вигляді показника:

$$K_{ПС} = \frac{P_{\Sigma} - P_{ном}}{Q_{КП}} ,$$

де: P_{Σ} - сумарна величина переданої по лінії потужності, яка досягнута з участю використання пристроїв FACTS;

$P_{ном}$ - величина діючої номінальної потужності лінії;

$Q_{КП}$ - потужність компенсуючих пристроїв FACTS ємнісного типу.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ ПЛ З FACTS ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ

Із проведеного в попередніх розділах аналізу видно, для підвищення пропускної здатності і поліпшення керованості ліній необхідно змінити не тільки їх конструкцію, але і схеми і способи управління. Весь комплекс нових технічних рішень, сформульованих на підставі цих результатів, знайшов своє втілення в запропонованих КСПЛ, які відрізняються від звичайних ліній по своєму виконанню і принципом дії [5-6].

3.1 Конструктивне виконання електричних мереж з КСПЛ

Аналіз характеристик трифазних ліній електропередачі звичайної конструкції показує, що тільки відносно невелика частина (не більше 5-10%) поперечного перетину коридору, обмеженого висотою і шириною опори, бере участь в процесі передачі електричної енергії. Інша частина (90-95%) поперечного перерізу практично не використовується, однак необхідна з урахуванням вимог дотримання відповідних габаритів з безпеки і обмежень, пов'язаних з діелектричної міцністю ізоляційних проміжків при максимальному відхиленні проводів від їх вихідного положення при впливі несприятливих атмосферних факторів - в основному вітру та ожеледиці, а також при виникненні грозових і внутрішніх перенапруг. Вимушений в зв'язку з цим вибір великих міжфазних відстаней при традиційних конструкціях ЛЕП супроводжується збільшенням матеріальних витрат, вартості лінії, ширини земельних смуг відчуження під будівництво, а головне - погіршенням електричних параметрів лінії - збільшенням поздовжнього індуктивного опору (X_L), зниженням величини робочої електричної ємності (C_p), збільшенням хвильового опору ($Z_{xв}$), а в результаті - зниженням величини передаваної номінальної потужності (P_H) і відповідно пропускну спроможність ліній електропередачі (P_M).

Виконані дослідження і проведений аналіз показали, що реально є можливість значного поліпшення технічних і економічних показників ліній електропередачі змінного струму, яке пропонується реалізувати шляхом створення керованих багатоланцюгових (а зокрема - двоколових) самокомпенсуючих високовольтних ліній електропередачі змінного струму (КСПЛ).

Дослідження КСПЛ показали, що, завдяки новим технічним рішенням, вони дозволяють значно (в 2-4 рази) підвищити щільність потоку потужності в просторі, обмеженому висотою і шириною опори, а також підвищити ефективність використання земельних смуг відчуження під будівництво ліній, що сприятливо позначається на поліпшенні їх економічних показників.

Головні принципові відмінності КСПЛ від звичайних багатоланцюгових (і зокрема двоколових) трифазних ЛЕП полягає в тому, що в КСПЛ істотно змінені параметри електричного (E) і магнітного (H) полів всередині простору між фазами, причому ця зміна здійснено таким чином, щоб домогтися найбільшого ефекту зі збільшення пропускної здатності лінії електропередачі в цілому (P_m) і створення умов щодо її регулювання в процесі зміни величини переданої потужності (P), для забезпечення мінімальних втрат (ΔP_{min}), відстеження обмежень за рівнями напруги вздовж лінії (U_l) і оптимізації параметрів режимів електропередачі і прилеглих енергосистем.

Для одноколових компактних ПЛ можуть бути прийняті конструкції опор з розташуванням всіх трьох фаз у вікні опори. При цьому всі заземлені елементи опори винесені за межі простору між фазами, що дозволяє приймати відстані між фазами, мінімально допустимими, з урахуванням зазначених вище вимог. Для двоколових компактних ПЛ конструкції опор повинні створювати можливість зближувати фази різних ланцюгів. На рис. 3.1 показаний варіант дволанцюгової опори компактної ПЛ 220 кВ [7]. На рис. 3.2 показаний варіант дволанцюгової ПЛ 220 кВ традиційної конструкції.

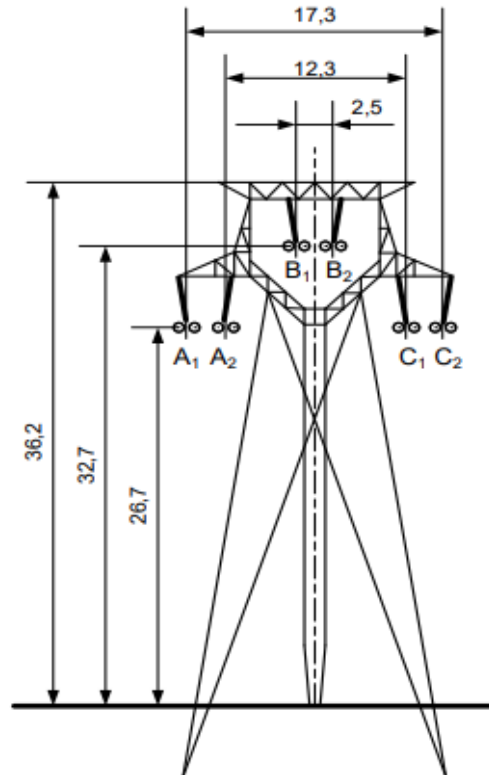


Рисунок 3.1. Опора компактної ПЛ 220 кВ типу «Чайка»

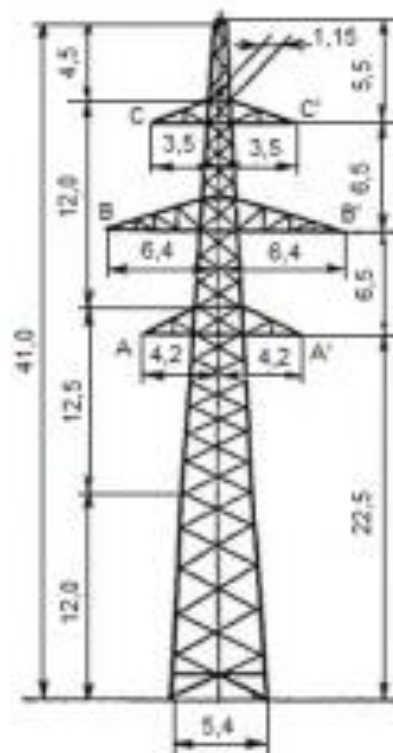


Рисунок 3.2. Опора ПЛ 220 кВ традиційного типу

При аналізі наведених опор можна помітити, що висота опори компактної дволанцюгової ПЛ 220 кВ на 5 м менше, ніж висота традиційної, а відстань від нижньої траверси до землі на 4 м більше. Останнє дозволяє використовувати на компактній ПЛ 220 кВ відповідно великі габаритні прольоти, що є резервом для додаткового зниження капітальних витрат. На рис. 3.3а показана розроблена опора для дволанцюгової компактної КСПЛ на напругу 500 кВ, а на рис. 3.3б - схеми різних режимів її роботи. Основні параметри КСПЛ 500 кВ в різних режимах роботи приведені в таблиці 3.1.

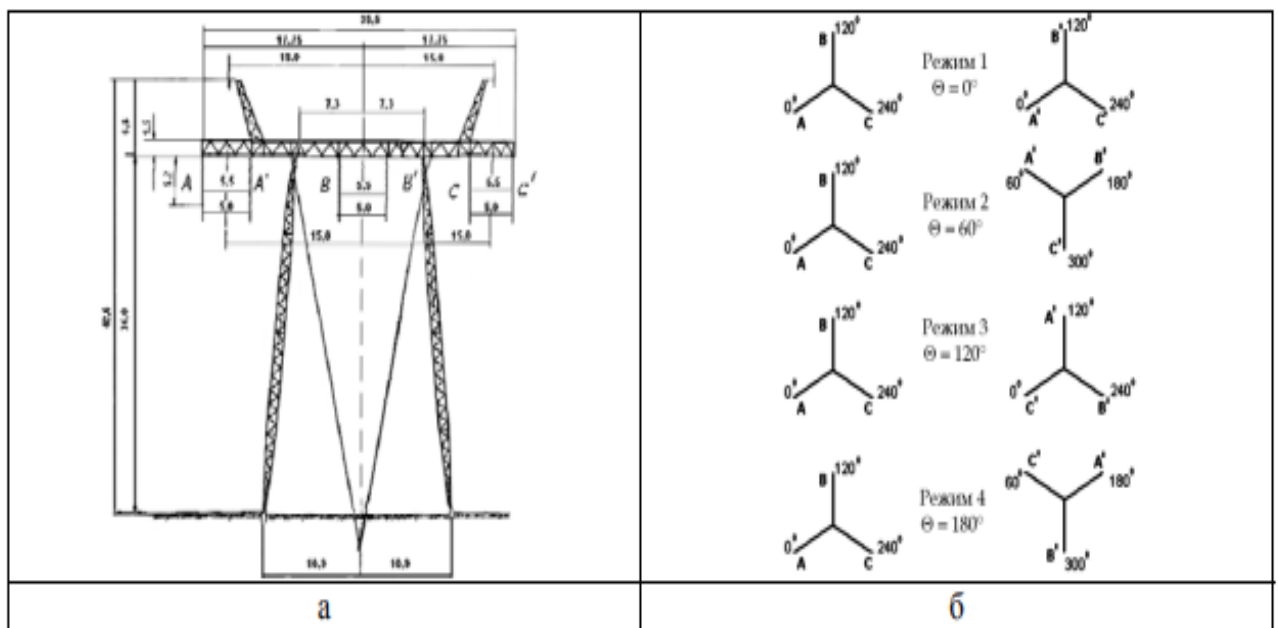


Рисунок 3.3. Опора для дволанцюгової компактної КСПЛ на напругу 500 кВ

Регулювання параметрів режимів електропередачі нової конструкції – з поліпшеними технічними граничними характеристиками при такому підході має новий фізичний зміст на відміну від відомих способів компенсації або регулювання параметрів в окремих вузлах ліній і систем, так як є регулюванням власне еквівалентних параметрів самої лінії на всій її довжині

При встановленні між системами векторів напруги ланцюгів кутового зсуву, рівного $\theta = 180^\circ$, лінія володіє мінімальним поздовжнім індуктивним опором, максимальною робочою ємністю, найбільшою величиною

передаваної потужності i , відповідно, пропускною спроможністю. Такий режим лінії необхідний при передачі граничних величин потужності. розроблені і описані нижче варіанти двоколових КСПЛ в режимі при $\theta = 180^\circ$ мають на 20-50 % величину переданої потужності більшою, ніж звичайна дволанцюгова ВЛ того ж класу напруги. При цьому робота КСПЛ в режимі при $\theta = 0^\circ$ супроводжується зниженням величини пропускної здатності на 10-20% для даної конструкції лінії, завдяки збільшенню поздовжнього індуктивного опору (X_L), зменшення величини робочої ємності (C_p), а, відповідно, зарядної (Q_3) і переданої (P_H) потужності лінії. Цей режим може бути використаний для забезпечення найбільш ефективної роботи електропередачі при малих навантаженнях або в режимі холостого ходу.

Таблиця 3.1

Основні параметри КСПЛ 500 кВ в різних режимах роботи

| Варіант | Провід | Відстань між фазами зближених проводів, м | Радіус провода, м | Радіус розчеплення м | Режим | Хвильовий опір одного ланцюга Ом | Діюча потужність в ланцюгу МВт |
|---------|---------------|---|-------------------|----------------------|-------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 5 х АС 240/39 | 4,0 | 0,0108 | 0,3403 | 1 | 337 | 816,7 |
| | | | | | 2 | 257,4 | 1068 |
| | | | | | 3 | 187,7 | 1463 |
| | | | | | 4 | 179 | 1606 |
| 2 | 6 х АС 240/56 | 4,0 | 0,0112 | 0,4 | 1 | 322,2 | 854,9 |
| | | | | | 2 | 240,9 | 1142,6 |
| | | | | | 3 | 172,6 | 1594,2 |
| | | | | | 4 | 156,5 | 1758,2 |
| 3 | 6 х АС 240/56 | 4,0 | 0,0112 | 0,5 | 1 | 310,7 | 886 |
| | | | | | 2 | 220,1 | 1205 |
| | | | | | 3 | 169 | 1706,9 |
| | | | | | 4 | 145,4 | 1889 |

Діапазон зміни кута $\theta = 0 \div 180^\circ$ характеризується проміжними значеннями параметрів лінії - її зарядної і натуральної потужності і пропускної здатності.

Для збільшення глибини і діапазону регулювання технічних характеристик КСПЛ, або надання їм додаткових якостей для них можуть бути використані практично всі засоби регулювання і компенсації, які

застосовуються в сучасній практиці для звичайної лінії електропередачі змінного струму.

Ефективним і оригінальним є спосіб установки засобів поперечної компенсації між фазами різних ланцюгів, рис.3.4, відповідно реакторів або батарей конденсаторів на регульовану різницю між векторами напруги цих фаз, яка має місце при зміні між ними кута зсуву (θ).

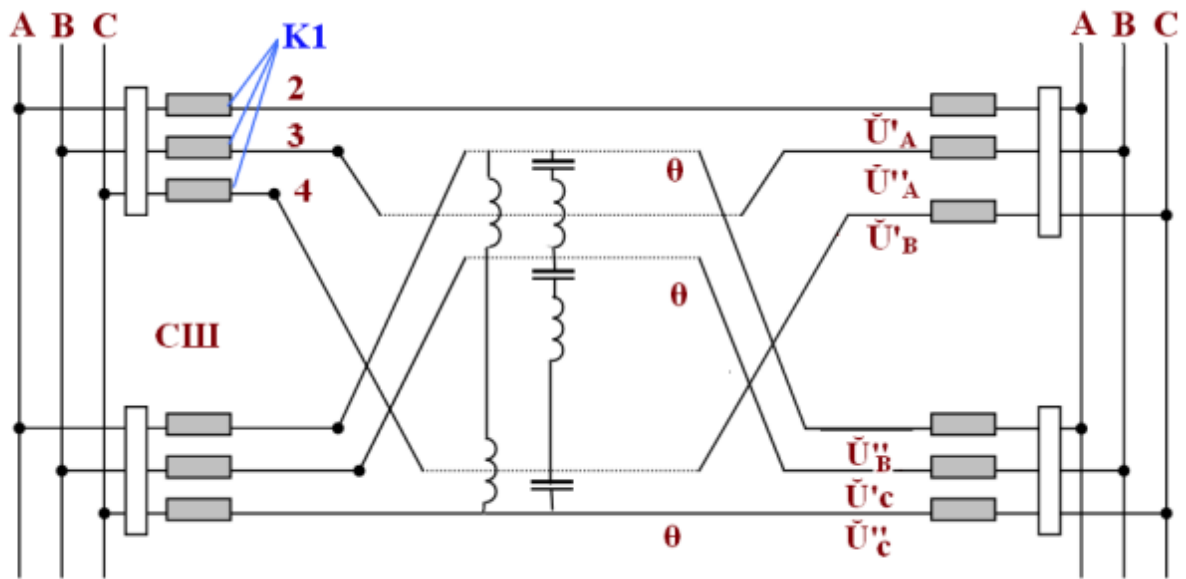


Рисунок 3.4. Принципова електрична схема дволанцюговий КСПЛ з можливістю регулювання в широких межах кутового зсуву між системами векторів напруги ланцюгів і містить компенсуючі пристрої між фазами

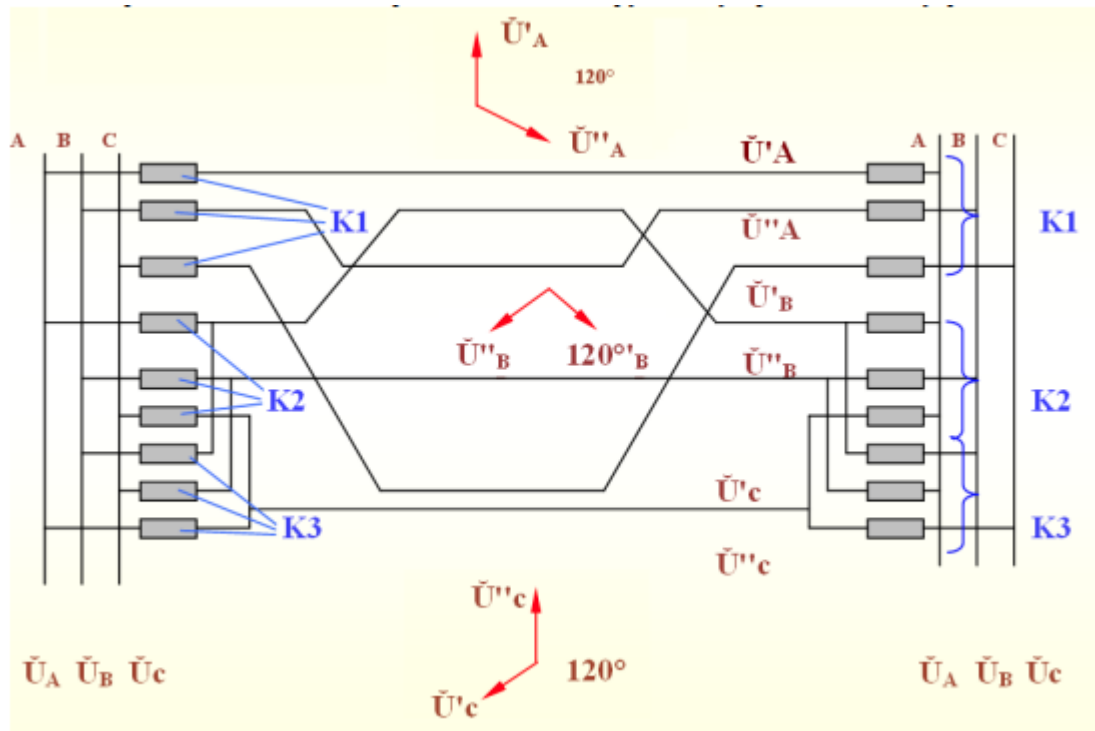


Рисунок 3.5. Принципова схема КСПЛ з дискретним регулюванням кутового зсуву між системами векторів напруги ланцюгів $0 \dots 120$ ел. град.

Розроблені електричні схеми КСПЛ можуть мати різний вигляд. Для самого загального випадку може бути рекомендована схема, показана на рис. 3.4. У такій схемі КСПЛ передбачається установка фазорегулюючих пристроїв по кінцях лінії і компенсуючих пристроїв в проміжних точках.

На практиці знаходять застосування схеми КСПЛ з дискретним регулюванням кута (θ) між системами напруги ланцюгів - 120° і 0° (рис.3.5), шляхом відповідної комутації фаз одного з ланцюгів в місцях приєднання лінії до підстанцій. На КСПЛ можливо також застосування пофазного управління.

3.2 Аналіз ефективності використання компактних керованих ПЛ в енергосистемах

Характерною особливістю отриманих результатів досліджень різних авторів [10,11] є те, що при граничному зближенні фаз як одноланцюгових компактних ПЛ, так і в двоколових КСПЛ при досягненні допустимої величини напруженості електричного поля на поверхні проводів розщеплених фаз величина натуральної потужності в розрахунку на один трифазний ланцюг

різниться незначно. Однак у порівнянні з ПЛ традиційної конструкції величина переданої потужності компактних ПЛ значно більше в розрахунку на одну ланцюг.

У таблиці 3.2 наведені дані розрахунків основних електричних параметрів і характеристик традиційних ПЛ і КСПЛ напругою 110 кВ.

Дволанцюгова компактна КСПЛ напругою 110 кВ, як видно з таблиці 3.2, перевершує дволанцюгову ПЛ традиційної конструкції в 1,3 рази по величині переданої потужності. Ще більш значного збільшення переданої потужності, а відповідно і пропускної здатності, вдається досягти для компактних ПЛ напругою 220 кВ. це наочно показано на рис. 3.6. Із діаграми видно, що одноланцюгові і дволанцюгова компактні ПЛ 220 кВ майже в 2 рази перевершують по переданій потужності ПЛ 220 кВ традиційної конструкції в розрахунку на один ланцюг.

Таблиця 3.2.

Основні електричні параметри і характеристики ПЛ 110 кВ різних типів

| Назва параметра | Традиційна дволанцюгова ПЛ 110 кВ | Дволанцюгова КСПЛ-110 кВ (АС-150/34) | |
|--|-----------------------------------|--------------------------------------|-------|
| Передана потужність $P_{\text{НОМ}}$, МВт | 55,6 | 74,4 | 1,34* |
| Передана потужність на один ланцюг $P_{\text{Л}}$, МВт | 27,8 | 37,2 | 1,34* |
| Ширина полоси відчуження : $L_{\text{к}}$, м | 67 | 67 | 1* |
| Сумарний перетин активної частини проводів : S_{Al} = мм ² | 900 | 900 | 1* |
| $P_{\text{н}} / L_{\text{к}}$, МВт/м | 0,83 | 1,11 | 1,34* |
| $P_{\text{н}} / S_{\text{Al}}$, МВт/мм ² | 0,0617 | 0,0826 | 1,34* |

Слід відмітити, що в свою чергу одноланцюгові компактні ПЛ 500 кВ забезпечують величину переданої потужності в 1,3 - 1,4 рази більшу, ніж одноланцюгові ПЛ 500 кВ традиційної конструкції, а дволанцюгова компактні КСПЛ 500 кВ в 1,5 - 1,6 рази більшу потужність, в розрахунку на один ланцюг по відношенню до ПЛ традиційної конструкції.



Рисунок 3.6. Передавана потужність ПЛ 220 кВ різних типів

Таке значне збільшення переданої потужності компактних ПЛ досягається за рахунок відповідного поліпшення первинних параметрів ПЛ, зниження питомої індуктивного опору, збільшення питомої ємнісний провідності і зниження хвильового опору.

Для цієї мети можливе використання пристроїв компенсації ємнісного характеру, це пристрої поздовжньої компенсації (ППК), та пристрої ємнісної поперечної компенсації джерел реактивної потужності. Однак, всі вони є досить дорогими, і їх застосування значно збільшує витрати на спорудження лінії електропередачі.

Компактні дволанцюгові КСПЛ мають у своєму розпорядженні додаткові можливості по зниженню питомих витрат за рахунок використання керованих шунтуючих реакторів (КШР), які застосовуються на ПЛ будь конструкції для компенсації надлишкової зарядної потужності.

Компактні дволанцюгові КСПЛ вигідно відрізняються від інших тим, що при малих навантаженнях або холостому ході вони можуть бути переведені в

режим при $\theta = 0^\circ$, при якому між трифазними системами векторів напруги ланцюгів відсутнє кутове зрушення. Цей режим характеризується тим, що зарядна потужність лінії менша, ніж зарядна потужність ПЛ традиційної конструкції.

Залежність величини зарядної потужності КСПЛ від зміни кута θ в межах $0 \div 120^\circ$ (180°) дозволяє регулювати величину генерованої лінією зарядної потужності відповідно до необхідного режиму лінії по напрузі, при меншій встановленій потужності КШР, ніж на ПЛ традиційної конструкції. З урахуванням цих особливостей компактних керованих двоколових КСПЛ були виконані розрахунки витрат на КШР і побудовані графіки залежності економії питомих капітальних витрат для КСПЛ.

Показники розрахункової питомої економії капітальних витрат, створюваної завдяки використанню компактних керованих ПЛ різних класів напруги в порівнянні з ПЛ традиційної конструкції, наведені на графіках на рис. 3.7. Економія капітальних вкладень, завдяки можливого впровадження компактних двоколових КСПЛ оцінюється на рівні від 2,7 тис. дол./ км для 110 кВ до 212 тис. дол. / км для 500 кВ.

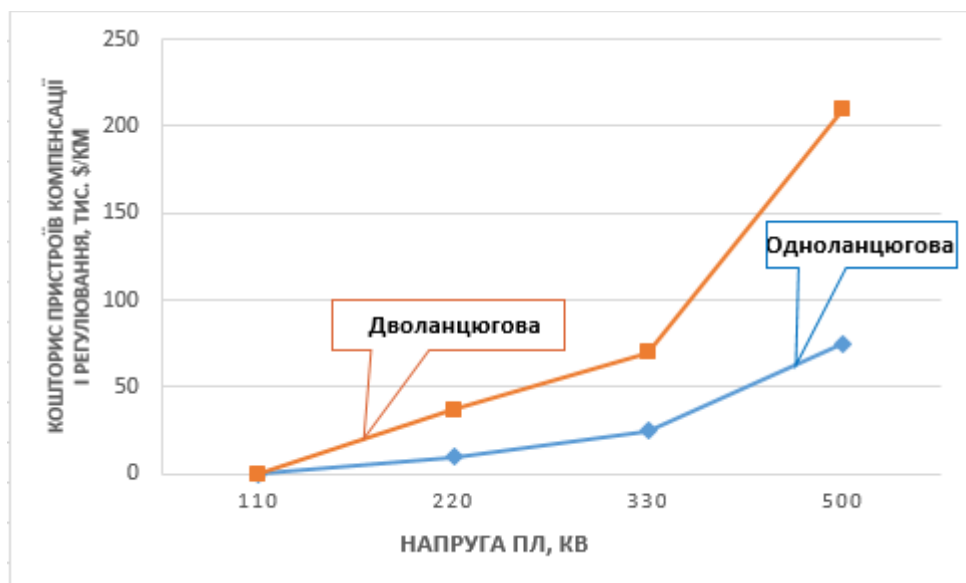


Рисунок 3.7. Вартість пристроїв компенсації і регулювання параметрів традиційних ПЛ, які забезпечують величину переданої потужності, що дорівнює переданій потужності компактних ПЛ того ж класу напруги.

Ефективність застосування КСПЛ 220 кВ довжиною 427 км з використанням опор, зображених на рис. 3.1 детально проаналізована в [10]. Проведено порівняння з ПЛ традиційної конструкції (рис. 3.2) для різних значень переданої потужності.

Виконані розрахунки показали, що для розглянутої мережі варіант споруди дволанцюгової компактної КСПЛ 220 кВ при передачі потужності понад 300 МВт за критерієм мінімуму сумарних дисконтованих витрат є більш ефективним в порівнянні з варіантом споруди дволанцюгової ПЛ в традиційному виконанні (рис. 3.8). При зниженні переданої потужності нижче 300 МВт ефективніше стає варіант традиційної ПЛ. Рівень витрат на компенсацію втрат в енергосистемі, при застосуванні ПЛ 220 кВ традиційної конструкції значно вище, ніж при застосуванні КСПЛ 220 кВ.



Рисунок 3.8. Затрати для різних варіантів виконання ПЛ 220 кВ

Висновки по третьому розділу

Застосування компактних керованих ПЛ дозволяє по відношенню до ПЛ традиційного виконання забезпечити в розрахунку на 1 МВт натуральної потужності:

- економію капітальних вкладень до 37% для ПЛ 220 кВ і до 33% для ПЛ 500 кВ;

- скорочення площ земельних угідь, відчужуваних під повітряні лінії, складає до 36% для ПЛ 220 кВ і до 52% для ПЛ 500 кВ.

Потужність і вартість пристроїв регулювання при забезпеченні заданої пропускної здатності значно менший, ніж для ПЛ традиційної конструкції.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОК

1. Керовані самокомпенсуючі високовольтні лінії електропередачі (КСПЛ) мають ряд переваг і можуть бути успішно використані для транспортування електроенергії як на далекі і наддалекі відстані, так і застосовані в розподільчих електромережах

2. У порівнянні зі звичайними ЛЕП змінного струму КСПЛ забезпечують за інших рівних умов:

- збільшення значення переданої потужності на 20-50%;
- підвищення щільності сумарного потоку потужності в поперечному перерізі лінії в 2-4 рази;
- зниження величини напруженості електричного і магнітного полів в просторі, що оточує лінію і поблизу поверхні землі;
- економію капітальних і приведених витрат на 10-30% в розрахунку на одиницю переданої потужності;
- створюють сприятливі можливості для системостворюючого регулювання перетоків потужності і зниження сумарних втрат в енергосистемі.

3. Виконані дослідження і проектні розробки, досвід будівництва варіантів КСПЛ і проведені експериментальні роботи підтверджують реальні можливості широкого застосування КСПЛ в енергосистемах для вирішення проблем транспортування електроенергії, поліпшення параметрів режимів енергосистем та отримання значного економічного ефекту.

ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока (flexible AC Transmission system, FACTS). Составитель д.т.н. профессор Ю.Г. Шакарян, ОАО «ВНИИЭ», 41 с.
2. Solovieff I.I. An Investigation of a special circuit for long transmission of electric power. Канд. дисс., США, 1933, -156 с.
3. Ракушев Н.Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током по разомкнутым линиям. – М.: ГЭИ, 1957, -160 с.
4. Постолатий В.М. Исследование управляемых полуразомкнутых электропередач переменного тока. Автореф. канд. дисс. –М., 1968, -28 с.
5. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Постолатий В.М. и др. основные принципы создания и технические характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи, - Электричество, 1977, № 12, с. 37-44.
6. Postolaty V.M.,Bykova E.V.,Suslov V.M.,Shakaryan Y.G.,Timashova L.V.,Kareva S.N. [Efficiency of the Compact Controlled High - Voltage Power Lines] Efektivnosti compactnih upravliaemihvisokovolitnih linii electropredachi. Problemele Energeticii Regionale №3 (29), p.1-17. 2015
7. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия. 1969. – 352 с.
8. Постолатий В.М. Теоретические основы и принципы создания управляемых самокомпенсирующихся линий электропередач. Дис. на соиск. уч. ст. д.т.н., Кишинев, 1987. 529 с
9. Г.Н. Александров. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. 412 с.
10. В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Эффективность применения управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий электропередачи и фазорегулирующих устройств трансформаторного типа. Электричество, 2010 г., №2, стр. 7-14.