

РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ В ПРОГРАМІ «SIMULINK»

А. А. Савельєв

Державний університет «Одеська політехніка»

Анотація. В роботі розроблена інформаційна система керування значенням куту зсуву векторів напруги і струмів різних ланцюгів дволанцюгової керованої повітряної лінії електропередачі. Запропонована система керування використовується для регулювання хвильового опору, значення якого в дволанцюгових лініях залежить також і від значення куту зсуву векторів. Основним завданням даної системи є підтримка роботи ліній електропередачі у режимі узгодженого навантаження, коли значення хвильового опору лінії дорівнює значенню опору навантаження. Впровадження такої системи розглядалося на прикладі використання дволанцюгових керованих силових високовольтних ліній з використанням пристроїв Flexible Alternative Current Transmission Systems, які дозволяють змінювати значення вторинних параметрів ліній електропередачі виходячи з необхідних завдань та параметрів навантаження в мережі. Розроблені принципові та функціональні схеми для системи керування роботи фазоповоротного пристрою з використанням мостів тиристорних комутаторів, які дозволяють змінювати значення куту зсуву векторів напруги та струмів на вході та на виході пристрою у діапазоні $\pm 60^\circ$ з кроком 4° , усього ступенів регулювання положень тиристорних комутаторів - 31. Розроблена математична (імітаційна) модель інформаційної системи керування в програмному середовищі Matlab&Simulink для дволанцюгової лінії. Наведено опис та формули для розрахунку основних параметрів елементів цієї моделі. Проведено моделювання системи керування в різних режимах роботи, тобто в різних положеннях ступенів регулювання. Результати моделювання представлені у вигляді діаграм струмів та напруги. Завдяки результатам проведеного моделювання вдалося підтвердити працездатність розробленої інформаційної системи керування, змінюючи режими роботи, отримувати значення куту зсуву в діапазоні $0 - 120^\circ$.

Ключові слова: електроенергія, підвищення енергоефективності, керовані повітряні лінії електропередачі змінного струму, втрати в лініях електропередачі, хвильовий опір, режим узгодженого навантаження, режим узгодженого навантаження, інформаційна система керування, регулювання під навантаженням; Flexible AC Transmission Systems, пристрої FACTS, Smart Grid.

Вступ

У системах електропостачання (СЕП) одним з найактуальніших завдань, відповідно до існуючих проблем, які наведені в джерелі [1] є зменшення втрат при передачі та розподілі електроенергії.

В роботі [2] виконано аналіз структури втрат у лініях передачі та основні способи їх зменшення. Згідно з проведеним оглядом літератури впливає, що такий вид втрат, як втрати за рахунок неузгодженості навантаження з лінією, випадав із розгляду вчених і недостатньо досліджений.

В роботі [3] виконалось дослідження впливу узгодженого навантаження на коефіцієнт корисної дії ліній електропередачі та отримано доказ зменшення втрат при передачі електроенергії за рахунок підтримання лінії СЕП в режимі узгодженого навантаження.

Зміна кута θ досягається за рахунок використання пристроїв технології FACTS [4]. Завдяки

цим пристроям електрична мережа з пасивного пристрою транспортування та розподілу електроенергії перетворюється на активний об'єкт, який оснащений сучасними швидкодіючими пристроями силової електроніки, призначеними для управління процесами в електроенергетичній системі в режимі реального часу

У статті [5] авторами аналізуються проблеми систем електропостачання які можливо вирішити завдяки використанню пристроїв FACTS. Автори приходять до висновку, що FACTS, можуть забезпечити швидку компенсацію реактивної потужності та швидку керовану передачу активної потужності. Пристрої є ключовими складовими технології Smart Grid, і використовуються для покращення надійності енергосистем та забезпечення якості електроенергії у відповідності вимогам сьогодення.

У роботі [6] автори розглядають можливість роботи ПЛЕП в режимі узгодженого навантаження і виконують розрахунки параметрів реальних ліній Об'єднаної енергосистеми України. За результатами розрахунків приходять до ви-

сновку, що впровадження та підтримка роботи лінії в режимі узгодженого навантаження дає максимальне значення ККД лінії при передачі електроенергії.

Керовані повітряні лінії електропередачі (КПЛЛЕП) - це система з двох ланцюгів, в яких зближені однойменні фази та існує посилений електромагнітний зв'язок. Між векторами напруги фаз двох ланцюгів існує фазний зсув, який змінюється в залежності від режиму роботи в даній ПЛЕП [7].

Дослідження керованих ліній електропередачі проводилася великим авторським колективом під керівництвом академіка Віталія Постолатія в Інституті Енергетики Республіки Молдова. Були розроблені та випробувані схеми для різних класів напруги ЛЕП та виведені теоретичні основи керованих силових високовольтних ліній.

В роботі [8] викладено параметри, характеристики і техніко-економічні показники КПЛЛЕП, також наведено схеми та описи конструкцій КПЛЛЕП.

У книзі [9] представлені методи підвищення пропускної спроможності ПЛЕП і управління потоками потужності, засоби регулювання напруги, підвищення статичної та динамічної стійкості СЕП рахунок використання технології FACTS.

Основна принципова відмінність КПЛЛЕП від звичайних дволанцюгових полягає в максимальному зближенні трифазних ланцюгів [10]. Завдяки чому досягається збільшений електромагнітний вплив ланцюгів, а зміна кутового зсуву θ , завдяки фазоповоротним пристроям (ФПП) трифазних систем напруги одного ланцюга по відношенню до іншого визначає знак цього впливу на еквівалентні параметри фаз. Наявність значного та регульованого електромагнітного взаємного впливу ланцюгів створює ефект міжланкової самокомпенсації параметрів лінії, завдяки якому досягається збільшення пропускної спроможності кожного ланцюга та лінії в цілому, а також нові властивості регульованих параметрів ПЛЕП.

ФПП є корисним засобом управління потоком активної потужності, що підтверджується практичним досвідом, отриманим від Meeden PST у Нідерландах. В роботі [11] автори провели моделювання цифрового симулятора реального часу ілюструє можливість регулювання активної потужності, яка передається по лінії.

Основною перевагою КПЛЛЕП (принципова схема якої наведена на Рис. 1.) є можливість створення фазового зсуву між векторами напруги та струмів. Він може бути регульованим як

безперервно, так і дискретно, або фіксованим, що становить, наприклад, 120° або 180° .

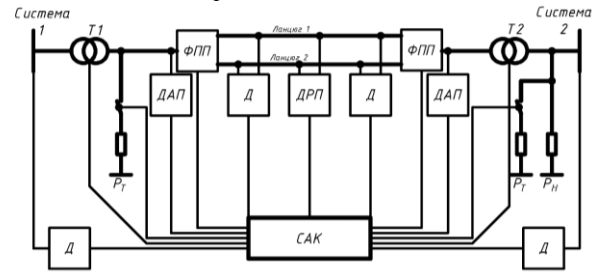


Рис. 1 – Принципова схема КПЛЛЕП

Трансформатори Т1 і Т2 забезпечують глибоке регулювання напруги U_{A1} , U_{B1} , U_{C1} , які виходять із системи 1. Потім за допомогою ФПП перетворюється на дві нові трифазні системи U_{A2} , U_{B2} , U_{C2} - Для другої, які зсунуті один щодо одного на кут θ . Наприкінці КПЛЛЕП з допомогою іншого ФПП цих двох систем утворюється система напруги U_{AK} , U_{BK} , U_{CK} . До лінії підключаються компенсуючі пристрої, реактори, конденсатори, джерела активної та реактивної потужності (ДАП і ДРП), гальмові опори (R_T). Управління режимами електропередачі здійснюється інформаційною системою керування (ІСК) і завдяки датчикам (Д), які вимірюють і фіксують параметри мережі в певний проміжок часу.

Таке управління режимами роботи УСВЛ забезпечує зміну фазового зсуву кута θ .

До загальних недоліків існуючих моделей і варіантів виконання систем управління ФПП належить мала швидкодія системи управління ФПП при змінах у значеннях навантажень ліній, у нормальному та аварійних режимах роботи. Цей недолік можна усунути шляхом введення в існуючі ЛЕП системи моніторингу та управління ФПП.

Перша система дозволить у реальному часі отримувати дані про параметри навантаження та параметри ЛЕП, а також обчислювати оптимальні значення кута θ , для максимального ККД при електропередачі. А друга - власне змінювати параметри, виходячи з необхідних значень.

У цій роботі проводитиметься аналіз можливості впровадження інформаційних технологій у систему регулювання параметрами ПЛЕП, для створення автономної системи управління ПЛЕП. Основними завданнями даної системи є швидкодія, точність і автономність у прийнятті рішення щодо регулювання кута θ .

Таким чином, метою даної роботи є розроблення системи автоматичного керування значенням кута зсуву для дволанцюгових КПЛЛЕП. Ця система дозволить підвищити ефективності використання ліній передачі електричної енергії за

рахунок роботи ліній у режимі узгодженого навантаження.

1. Принципова схема ФПП з ТК

В роботі [12] розглядаються декілька варіантів існуючих схем ФПП. Після огляду схем дається критичний аналіз особливостей моделювання кожної схеми. Автори приходять до думки, що найбільш універсальною моделлю є схема представлена на Рис.2., її перевага в порівнянні з іншими моделями полягає в універсальності та відносній простоті під час моделювання.

ФПП містить два трансформатори: серієсний (послідовний) (СТ) та шунтовий (регулюючий) (ШТ), а також тиристорний комутатор (ТК), який вмикається між ШТ та СТ. Кожна фаза ТК містить чотири послідовно з'єднаних мостових тиристорних комутаторів (МТК). Кожен тиристорний міст складається з чотирьох двонаправлених тиристорних ключів, які називаються плечима (вентильми). Тиристорні мости здійснюють комутацію вторинної обмотки ШТ.

В загальному виді система буде мати наступний вигляд:

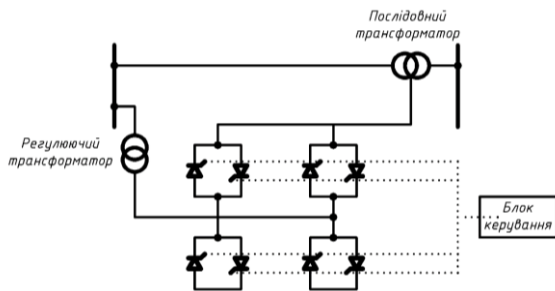


Рис. 2. Схема ФПП з ТК

Мостові схеми тиристорних вентилів ТК всіх секцій вторинної обмотки ШТ фази, які з'єднані послідовно, своїми високовольтними виводами підключені до первинних обмоток СТ, які з'єднані у трикутник. Таким чином, фазовий зсув напруги $\theta_{\text{ФПП}}$ на виході пристрою по відношенню до напруги на вході пристрою формується при підключенні різного числа шунтових секцій обмоток до вентильних обмоток відповідної фази СТ за допомогою МТК. Побічні обмотки кожної фази ШТ мають різні за величиною значення діючих напруги, які співвідносяться як 1:2:4:8.

Вольтододаткова напруга, яка з'являється в ПЛЕП від ФПП характеризуються зміною кута регулювання $\theta_{\text{ФПП}}$ між вхідною і вихідною напругою ФПП. Дискретне регулювання кута $\theta_{\text{ФПП}}$ визначається обраним номером поточного ступеню регулювання N_{sr} . Ступені регулювання можуть приймати кінцеве число значень залежно

від кількості шунтових обмоток, введених у первинний ланцюг СТ.

ТК у процесі регулювання фазового кута включає певним способом вентильні обмотки ШТ до вентильних обмоток СТ.

Номер ступеня регулювання N_{sr} визначається за формулою

$$N_{\text{sr}} = \theta_{\text{ФПП}} \frac{N_{\text{sr.max}}}{\theta_{\text{ФПП.max}}} \quad (1)$$

Де $\theta_{\text{ФПП}}$ – поточне значення кута регулювання

$N_{\text{sr.max}}$ – максимальна кількість ступенів регулювання

$\theta_{\text{ФПП.max}}$ – максимальне значення кута регулювання

Таблиця 1

Режими роботи тиристорних мостів (фази А) при різних ступенях регулювання для $\theta_{\text{ФПП.max}} = 60^\circ$.

c	$\theta_{\text{ФПП}}$	МТК1	МТК2	МТК3	МТК4
15	60	01	01	01	01
14	56	11	01	01	01
13	52	01	11	01	01
12	48	11	11	01	01
11	44	01	01	11	01
10	40	11	01	11	01
9	36	01	11	11	01
8	32	11	11	11	01
7	28	01	01	01	11
6	24	11	01	01	11
5	20	01	11	01	11
4	16	11	11	01	11
3	12	01	01	11	11
2	8	11	01	11	11
1	4	01	11	11	11
0	0	11	11	11	11
-1	-4	10	11	11	11
-2	-8	11	10	11	11
-3	-12	10	10	11	11
-4	-16	11	11	10	11
-5	-20	10	11	10	11
-6	-24	11	10	10	11
-7	-28	10	10	10	11
-8	-32	11	11	11	10
-9	-36	10	11	11	10
-10	-40	11	10	11	10
-11	-44	10	10	11	10
-12	-48	11	11	10	10
-13	-52	10	11	10	10
-14	-56	11	10	10	10
-15	-60	10	10	10	10

Кожен тиристорний міст у складі ТК може бути в одному з трьох режимів:

1. режим 11: відключення вторинної (вентильної) обмотки ШТ від первинної обмотки СТ ФПП, включені 3 і 4 тиристорний ключ;
2. режим 01: погоджене включення вторинної обмотки ШТ, включені 2 та 3 тиристорний ключ;
3. режим 10: зустрічне включення вторинної обмотки ШТ, включені 1 та 4 тиристорний ключ.

У таблиці 1 показані режими роботи тиристорних мостів за різних ступенів регулювання від -15 до +15 з діапазоном регулювання кута $\theta_{\text{ФПП}}$ від -60° до $+60^\circ$.

МТК змінного струму складається з чотирьох двонаправлених ключів, кожен з яких представляє зустрічно-паралельно включені тиристри.

Двостороння провідність тиристорних ключів досягається за рахунок зустрічно-паралельного включення елементів. У кожний момент часу для виключення виникнення короткого замикання у стані, коли по тиристорі проводиться струм, можуть знаходитись не більше одного ключа з верхнього та нижнього плечей моста.

2. Функціональна схема дволанцюгової КПЛП

ІСК ФПП можна розділити на 2 підсистеми:

1) Підсистема регулювання, діагностики, автоматики ФПП.

2) Підсистема керування МТК.

Підсистема регулювання, діагностики, автоматики ФПП складається з:

- Системи вимірювальних пристроїв – які збираються інформацію про параметри ПЛЕП та навантаження, а також передають їх передають її до Головним блоком керування (ГБК).

- Блоку аналізу параметрів ПЛЕП – отримує значення параметрів мережі від ГБК, виконує аналіз.

- Блоку зберігання інформації о параметрах ПЛЕП – виконує роль частини бази даних, зберігає інформацію про параметри СЕП.

- Блоку зберігання інформації про поточний стан ТК – отримує інформацію про стан на блоці керування ТК від ГБК та відправляє її на наступному, а також виконує роль частини бази даних, зберігає інформацію про сигнали керу-

вання відповідно до параметрів СЕП у певний проміжок часу.

- Головного блоку керування - формує рішення про характер сигналу керування ТК на підставі отриманих даних від Блоку аналізу параметрів ПЛЕП та Блоку зберігання інформації про поточний стан ТК. А саме про необхідність збільшення значення Z_{CE} шляхом збільшення значення кута $\theta_{\text{ФПП}}$; або зменшення значення Z_{CE} шляхом зменшення значення кута $\theta_{\text{ФПП}}$.

- Допоміжного блоку керування (ДБК) - виконує ті ж самі функції щодо блоку керування ТК, але отримує інформацію щодо зміни значення кута θ , від ГБК.

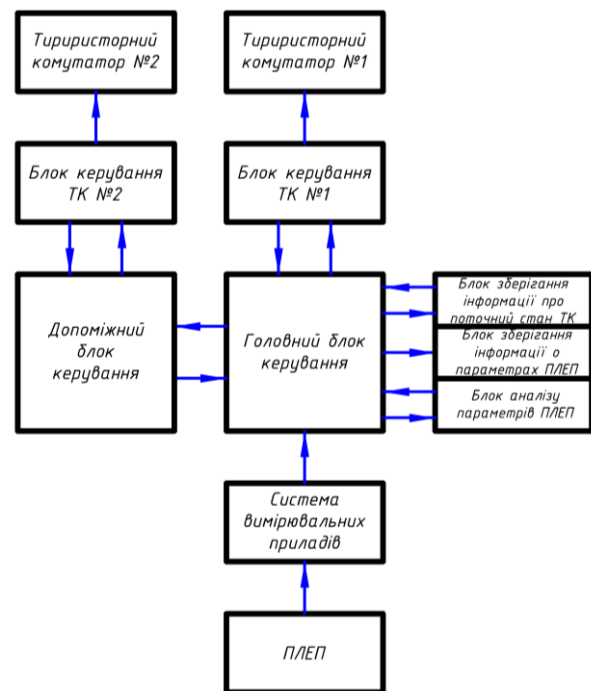


Рис. 3. Загальна функціональна схема системи керування двох ФПП

Підсистема управління та діагностики ТК формує сигнали управління вентилями, та складається з блоку керування ТК та самого ТК. Данна підсистема співпрацює з ГБК отримує сигнали для керування ступені регулювання, формує логічних сигналів керування вентилями у статичному режимі роботи напівпровідникового комутатора ФПП та дає зворотній зв'язок про поточну ступінь регулювання до ГБК.

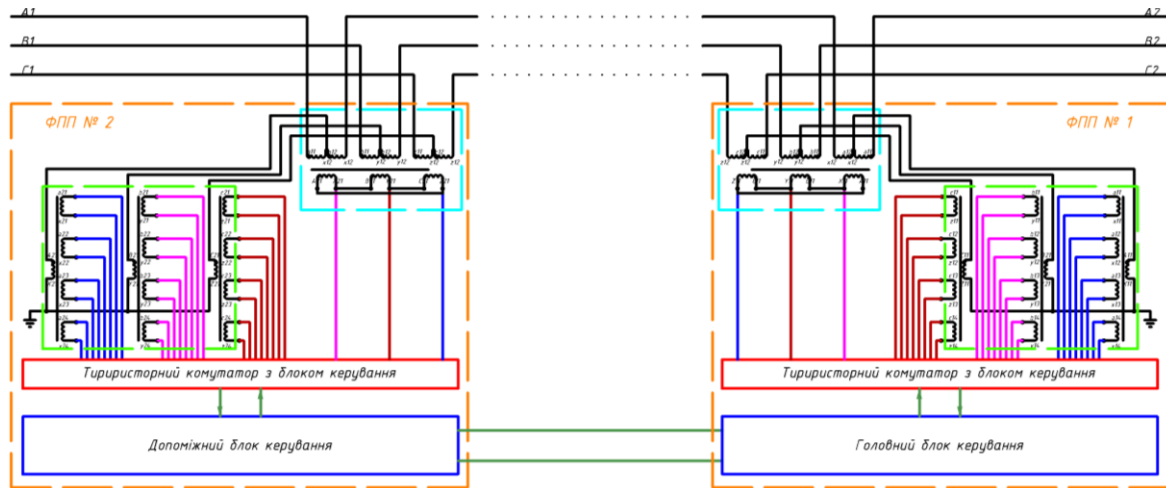


Рис. 4. Загальна принципова схема одного ланцюга КПЛЕП з двома ФПП та системою їх керування

Таблиця 2

Параметри навантаження лінії ПЛ-110 кВ «Ананьїв – Троїцьке»

Найменування	Тип провідника	Довжина, м	Навантаження, о 3 години		Навантаження, о 10 години		Навантаження, о 13 години		Навантаження, о 22 години	
			P, MWt	Q, MVA _r	P, MWt	Q, MVA _r	P, MWt	Q, MVA _r	P, MWt	Q, MVA _r
Влітку										
Ананьїв - Троїцьке	АС-185	31900	2,50	-7,50	0,60	3,50	4,00	-0,60	8,50	-5,90
Взимку										
Ананьїв - Троїцьке	АС-185	31900	13,10	-3,70	0,10	2,30	1,10	-2,40	4,60	-1,70

3. Модель ІСК в программі Matlab&Simulink

Для підтвердження працездатності системи керування дволанцюговою КПЛЕП для зміни значення кута зсуву векторів напруги та струмів одного ланцюга відносно іншого була розроблена імітаційна модель в пакеті програмного забезпечення Matlab&Simulink.

Далі в розділі наводиться приклад розрахунку та вибору основних параметрів СТ (послідовний), ШТ (паралельний) та ПЛЕП необхідних для проведення моделювання в Matlab&Simulink.

Для прикладу обрано лінію 110 кВ «Ананьїв – Троїцьке» довжиною 31,9 км значення навантаження «3 година взимку». Основні параметри та дані о навантаження влітку та взимку наведені в таблиці 2.

3.1. Розрахунок параметрів послідовного трансформатора

Вибір трансформатору виконується за номінальною потужністю та номінальною напругою в мережі, наступними формулами

$$S_{\text{номлт}} \geq S_{\text{р.н}}; \quad (2)$$

Де $S_{\text{р.н}}$ – розрахункова повна потужність, визначається так

$$S_{\text{р.н}} = \sqrt{P_{\text{р.н}}^2 + Q_{\text{р.н}}^2}; \quad (3)$$

Де $P_{\text{р.н}}$ – розрахункова активна потужність, $Q_{\text{р.н}}$ – розрахункова реактивна потужність.

$$U_{\text{номлт}} \geq U_{\text{номлм}}; \quad (4)$$

Де $U_{\text{номлм}}$ – номінальна напруга в мережі, $U_{\text{номлм}} = 110 \text{ kV}$.

Значення потужностей беруться з таблиці 2. Тоді за формулою (3)

$$S_{\text{р.н}} = \sqrt{13,1^2 + (-3,7)^2} = 13,61 \text{ MVA}. \quad (5)$$

Попередньо обирається трансформатор ТДТНЖ-25000/110 з $S_{\text{номлт}} = 25 \text{ MVA}$, $U_{\text{номлт}} = 115 \text{ kV}$. Його каталожні дані наведені в таблиці 3

Таблиця 3

Каталожні дані трансформатор ТДНЖ-25000/110

Тип	$S_{\text{номлт}}$, MVA	$U_{\text{вн}}$, kV	$U_{\text{нн}}$, kV	$u_{\text{кз.вн}}$, %	$u_{\text{кз.нн}}$, %	$\Delta P_{\text{кз}}$, kWt	$P_{\text{хх}}$, kWt	$I_{\text{хх}}$, %
ТДНЖ-25000/110	25	115	27,5	10,5	6,75	140	28,5	0,9

В розробленій імітаційній моделі на схемі СТ (рис. 5) має основні параметри (рис. 6.) необхідні для запуску моделювання:

1. Nominal power and frequency - Номінальна потужність і частота;
2. Winding nominal voltages - Номінальні напруги обмоток;
3. Winding resistances – Активний опір обмоток;
4. Winding leakage inductances - Індуктивності розсіювання обмоток;
5. Magnetization resistance - Опір намагнічування;
6. Magnetization inductance - Індуктивність намагнічування.

Параметри перших двох пунктів беруться з каталожних даних, наступні 4 необхідно розрахувати додатково.

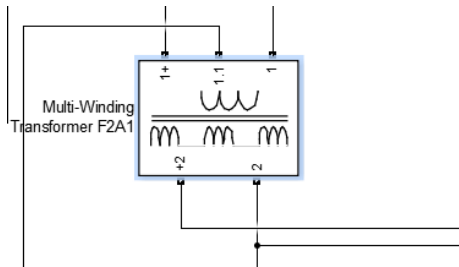


Рис. 5. Модель послідовного трансформатора в програмі Matlab&Simulink.

Активний опір обмоток визначається за формулою

$$R_{т.обм} = \frac{\Delta P_{КЗ} U_{НОМЛТ}^2}{S_{НОМЛТ}^2} \text{ Ohm.} \quad (6)$$

Тоді для первинної ВН та вторинної НН обмотки:

$$R_{т.ВН} = \frac{140 \cdot 115^2 \cdot 10^9}{25^2 \cdot 10^{12}} = 2,9624 \text{ Ohm.} \quad (7)$$

$$R_{т.НН} = \frac{140 \cdot 27,5^2 \cdot 10^9}{25^2 \cdot 10^{12}} = 0,1694 \text{ Ohm.} \quad (8)$$

Для визначення індуктивності розсіювання обмоток спочатку треба розрахувати повний та реактивний опір.

Повний опір обмоток визначається так:

$$Z_{т.обм} = \frac{10 u_{КЗ,обм}^2(\%) U_{НОМЛТ}^2}{S_{НОМЛТ}} \text{ Ohm;} \quad (9)$$

Тоді для первинної ВН та вторинної НН обмотки:

$$Z_{т.ВН} = \frac{10 \cdot 10,5 \cdot 115^2}{25000} = 55,545 \text{ Ohm.} \quad (10)$$

$$Z_{т.НН} = \frac{10 \cdot 6,75 \cdot 27,5^2}{25000} = 2,042 \text{ Ohm.} \quad (11)$$

Реактивний опір обмоток визначається як

$$X_{т.обм} = \sqrt{Z_{т.обм}^2 - R_{т.обм}^2} \text{ Ohm;} \quad (12)$$

Тоді для первинної ВН та вторинної НН обмотки:

$$X_{т.ВН} = \sqrt{55,545^2 - 2,9624^2} = 55,466 \text{ Ohm.} \quad (13)$$

$$X_{т.НН} = \sqrt{2,042^2 - 0,1694^2} = 2,0348 \text{ Ohm.} \quad (14)$$

Індуктивності розсіювання обмоток визначається за формулами

$$L_{т.обм} = \frac{X_{т.обм}}{2\pi f} \text{ H;} \quad (15)$$

Тоді для первинної ВН та вторинної НН обмотки:

$$L_{т.ВН} = \frac{55,466}{2\pi \cdot 50} = 0,1766 \text{ H;} \quad (16)$$

$$L_{т.НН} = \frac{2,0348}{2\pi \cdot 50} = 0,0064 \text{ H.} \quad (17)$$

Для розрахунку опору та індуктивності намагнічування спочатку треба розрахувати повний, активний та реактивний опір контуру намагнічування трансформатора, а також струм холостого ходу трансформатора.

Значення струму холостого ходу трансформатора визначається наступним чином

$$I_{т.ХХ} = \frac{I_{XX} I_{НОМЛТ}}{100} \text{ A;} \quad (18)$$

Де $I_{НОМЛТ}$ – номінальний струм трансформатора, визначається як

$$I_{НОМЛТ} = \frac{S_{НОМЛТ}}{U_{НОМЛТ.ВН}} \text{ A;} \quad (19)$$

За формулами (19) та (18) відповідно

$$I_{НОМЛТ} = \frac{25000}{115} = 217,39 \text{ A.} \quad (20)$$

$$I_{т.ХХ} = \frac{0,7 \cdot 217,39}{100} = 1,52 \text{ A} \quad (21)$$

Повний опір холостого ходу трансформатора визначається так:

$$Z_{т.ХХ} = Z_{т.ВН} + Z_{М} \text{ Ohm;} \quad (22)$$

$$Z_{М} = Z_{т.ХХ} - Z_{т.ВН} \text{ Ohm;} \quad (23)$$

$$Z_{т.ХХ} = \frac{U_{НОМЛТ.ВН}}{I_{т.ХХ}} \text{ Ohm.} \quad (24)$$

За формулами (24) та (23) відповідно

$$Z_{т.ХХ} = \frac{115000}{1,52} = 75571 \text{ Ohm.} \quad (25)$$

$$Z_{М} = Z_{т.ХХ} - Z_{т.ВН} \text{ Ohm;} \quad (26)$$

$$Z_M 75571 - 55 = 75515 \text{ Ohm}. \quad (27)$$

Значення втрат холостого ходу трансформатора визначається за формулою

$$P_{T.XX} = I_{T.XX}^2 (R_{T.BH} + R_M) Wt; \quad (28)$$

Звідки

$$R_M = \frac{P_{T.XX}}{I_{T.XX}^2} - R_{T.BH} \text{ Ohm}; \quad (29)$$

$$R_M = \frac{28500}{1,52^2} - 2,9624 = 12304 \text{ Ohm}. \quad (30)$$

Реактивний опір контуру намагнічування трансформатора визначається так:

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} \text{ Ohm}; \quad (31)$$

$$X_M = \sqrt{75515^2 - 12304^2} = 74451 \text{ Ohm}. \quad (32)$$

Індуктивності намагнічування визначається як

$$L_M = \frac{X_M}{2\pi f} \text{ H}; \quad (34)$$

$$L_M = \frac{74451}{2\pi * 50} = 237 \text{ H}. \quad (35)$$

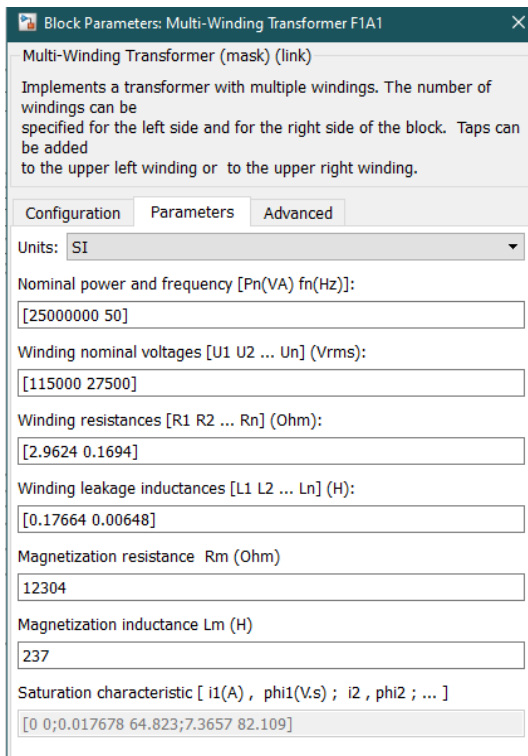


Рис. 6. Параметри послідовного трансформатору в програмі Matlab&Simulink.

3.2. Розрахунок параметрів регулюючого трансформатору

Вибір трансформатору виконується аналогічно послідовному, за формулами (2-5).

Попередньо обирається трансформатор ТДТН-25000/110 з $S_{НОМЛТ} = 25 \text{ MVA}$, $U_{НОМЛТ} = 115 \text{ kV}$. Його каталожні дані наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Каталожні дані трансформатор ТДТН-25000/110

Тип	$S_{НОМЛТ}$, MVA	$U_{ВН}$, kV	$U_{НН}$, kV	$u_{кз.ВН}$, %	$u_{кз.НН}$, %	$\Delta P_{кз}$, kWt	$P_{ХХ}$, kWt	$I_{ХХ}$, %
ТДТН-25000/110	25	115	11	10,5	6,75	130	21	0,31

ШТ має на вторинній обмотці 4 секції. Секції вторинної обмотки кожної фази ШТ мають різні за величиною значення діючих напруги, що співвідносяться як 1:2:4:8. Тобто на напруги мають наступні значення

$$U_{НН1} = 1375 \text{ V},$$

$$U_{НН2} = 2 * 1375 = 2750 \text{ V},$$

$$U_{НН3} = 4 * 1375 = 5500 \text{ V},$$

$$U_{НН4} = 8 * 1375 = 11000 \text{ V},$$

В розробленій імітаційній моделі на схемі ШТ (рис. 6.) має основні параметри (рис. 7.) аналогічні до СТ.

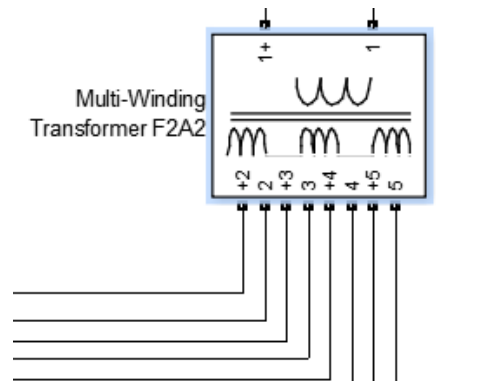


Рис. 6. – Модель регулюючого трансформатору в програмі Matlab&Simulink.

Основні параметри ШТ визначаються аналогічно розрахунку параметрів для СТ за формулами (6-35).

$$R_{T.BH} = \frac{130 * 115^2 * 10^9}{25^2 * 10^{12}} = 2,75 \text{ Ohm};$$

$$R_{T.НН1} = \frac{130 * 1,37^2 * 10^9}{25^2 * 10^{12}} = 0,0063 \text{ Ohm};$$

$$R_{T.НН2} = \frac{130 * 2,75^2 * 10^9}{25^2 * 10^{12}} = 0,0252 \text{ Ohm};$$

$$R_{T.НН3} = \frac{130 * 5,5^2 * 10^9}{25^2 * 10^{12}} = 0,1007 \text{ Ohm};$$

$$R_{\tau.HH4} = \frac{130 * 11^2 * 10^9}{25^2 * 10^{12}} = 0,4027 \text{ Ohm};$$

$$Z_{\tau.BH} = \frac{10 * 10,75 * 115^2}{25000} = 56,87 \text{ Ohm};$$

$$Z_{\tau.HH1} = \frac{10 * 6,75 * 1,37^2}{6250} = 0,0204 \text{ Ohm};$$

$$Z_{\tau.HH2} = \frac{10 * 6,75 * 2,75^2}{6250} = 0,0817 \text{ Ohm};$$

$$Z_{\tau.HH3} = \frac{10 * 6,75 * 5,5^2}{6250} = 0,3267 \text{ Ohm};$$

$$Z_{\tau.HH4} = \frac{10 * 6,75 * 11^2}{6250} = 1,3068 \text{ Ohm};$$

$$X_{\tau.BH} = \sqrt{56,87^2 - 2,75^2} = 56,8 \text{ Ohm};$$

$$X_{\tau.HH1} = \sqrt{0,0204^2 - 0,0063^2} = 0,0194 \text{ Ohm};$$

$$X_{\tau.HH2} = \sqrt{0,0817^2 - 0,0252^2} = 0,0777 \text{ Ohm};$$

$$X_{\tau.HH3} = \sqrt{0,3267^2 - 0,1007^2} = 0,3108 \text{ Ohm};$$

$$X_{\tau.HH4} = \sqrt{1,3068^2 - 0,4027^2} = 1,2432 \text{ Ohm};$$

$$L_{\tau.BH} = \frac{56,8}{2\pi * 50} = 0,1811 \text{ H};$$

$$L_{\tau.HH1} = \frac{0,0194}{2\pi * 50} = 0,000065 \text{ H};$$

$$L_{\tau.HH2} = \frac{0,0777}{2\pi * 50} = 0,00026 \text{ H};$$

$$L_{\tau.HH3} = \frac{0,3108}{2\pi * 50} = 0,00104 \text{ H};$$

$$L_{\tau.HH4} = \frac{1,2432}{2\pi * 50} = 0,0042 \text{ H};$$

$$I_{\text{НОМ.Т}} = \frac{25000}{115} = 217,39 \text{ A};$$

$$I_{\tau.XX} = \frac{0,31 * 217,39}{100} = 0,67 \text{ A};$$

$$Z_{\tau.XX} = \frac{115000}{0,67} = 170645 \text{ Ohm};$$

$$Z_M = 170645 - 56 = 170588 \text{ Ohm};$$

$$R_M = \frac{21000}{1,52^2} - 2,75 = 46236 \text{ Ohm};$$

$$X_M = \sqrt{170588^2 - 46236^2} = 164202 \text{ Ohm};$$

$$L_M = \frac{164202}{2\pi * 50} = 522 \text{ H}.$$

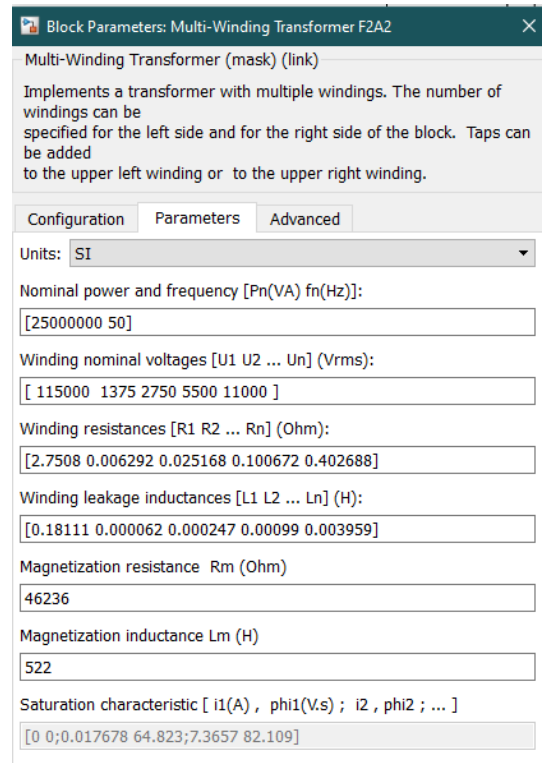


Рис. 7. Параметри регулюючого трансформатору в програмі Matlab&Simulink.

3.3. Мостові схеми тиристорних вентилів ТК

Мостові схеми тиристорних вентилів ТК (наведені на рисунку 1) в розробленій імітаційній моделі на схемі показані в рисунку 8, виділено червоним кольором. Регулювання режимами (наведені в таблиці 1) в моделі виконується за допомогою блоку «Pulse Generator» (виконує роль блоку керування ТК). 4 штуки «Pulse Generator» забезпечують керування окремою парою тиристорів

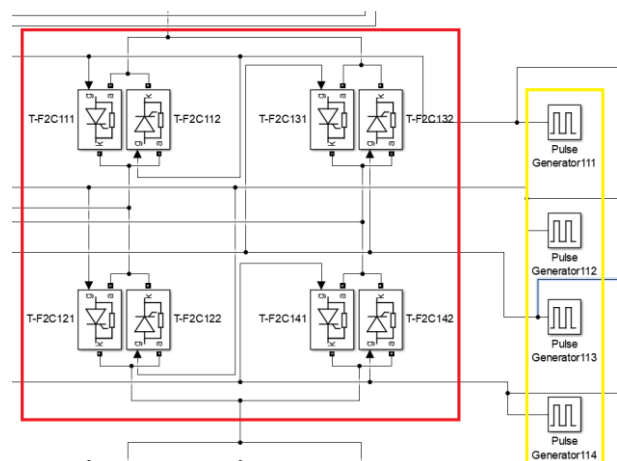


Рис. 8 Модель МТК в програмі Matlab&Simulink.

3.4. Розрахунок навантаження та параметрів ПЛЕП

Блок «three-phase series RLC load» (Рис. 9) використовується для позначення навантаження. Значення взяті з таблиці 2.

За допомогою блоку «three-phase series RLC branch» (Рис. 10) виконано модель ПЛЕП.

Даний блок має параметри: Resistance – опір, та Inductance – індуктивність.

Питомий активний та реактивний опір для проводу АС-185 складають $r_0=0,162 \text{ Ohm/km}$, $x_0=0,386 \text{ Ohm/km}$. Тоді опір проводу визначаються за формулами

$$R_{\text{л}} = r_0 l = 0,162 * 31,9 = 5,17 \text{ Ohm};$$

$$X_{\text{л}} = x_0 l = 0,386 * 31,9 = 12,317 \text{ Ohm};$$

$$L_{\text{л}} = \frac{X_{\text{л}}}{2\pi * f} = \frac{12,317}{2\pi * 50} = 0,039 \text{ H}.$$

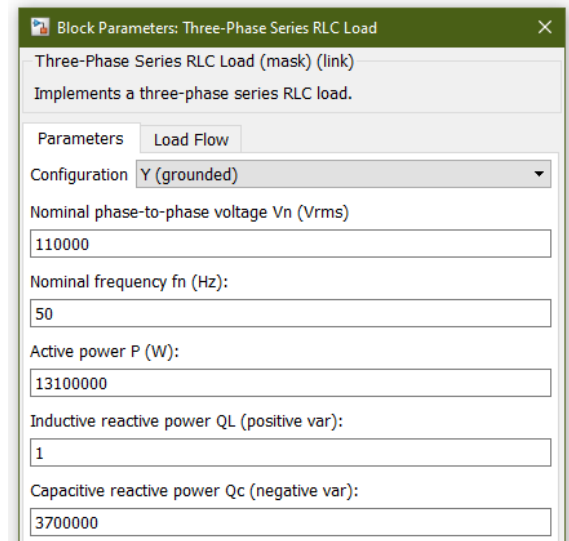
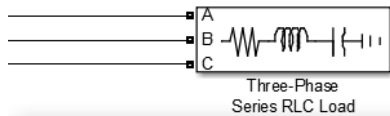
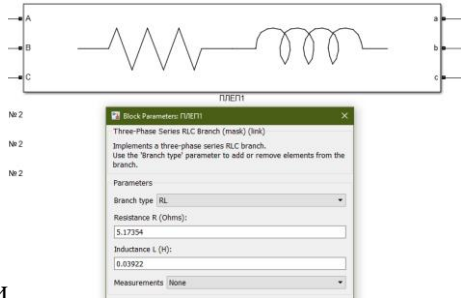


Рис. 9 – Блок для моделювання навантаження в програмі Matlab&Simulink, та його основні параметри



ри

Рис. 10 – Модель ПЛЕП в програмі Matlab&Simulink, та її основні параметри

На рисунку 11 наведено повну схему одного з ФПП системою керування за допомогою блоку «Pulse Generator». 16 штук забезпечують один з 31 можливого режиму роботу від -15 до +15 ступені, а також зміну куту зсуву векторів напруги та струму між вхідними та вихідними контактами ФПП на -60 та +60.

4. Результати моделювання

Моделювання проводилось для двох режимів:

1) Зсув між векторами напруги та струмів між ланцюгами складає 0° .

2) Зсув між векторами напруги та струмів між ланцюгами – 120° , зсув на зажимах ФПП в першому ланцюзі $+60^\circ$, ступінь регулювання $+15$, режим роботи МТК - 01, а на другому – 60° , ступінь -15 , режим МТК– 10.

Результати моделювання представлені на діаграмах.

1) Зсув між векторами напруги та струмів між ланцюгами 0° .

На першому етапі були зняті характеристики напруги (Рис. 12. та Рис. 13.) на кожному з ФПП та значення струмів (Рис. 14. та Рис. 15.). В даному режимі, коли ступінь регулювання поставлена в 0 положення, кут зсуву між векторами напруги та струмів дорівнює 0°

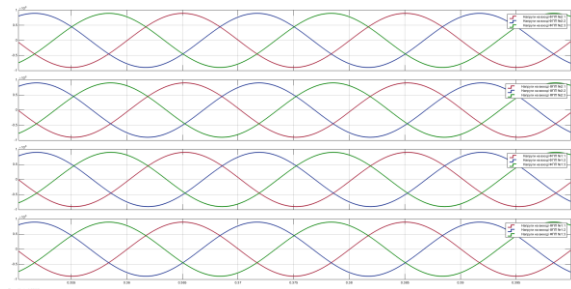


Рис. 12. Діаграма напруги на ФПП № 1 та № 2

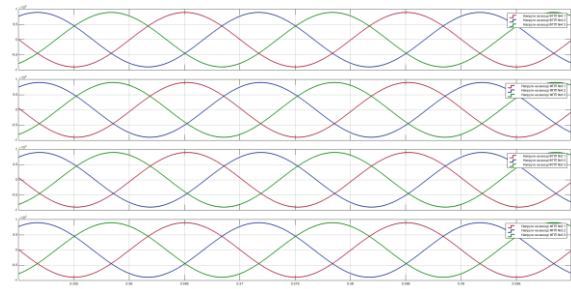


Рис. 13. Діаграма напруги на ФПП № 3 та № 4

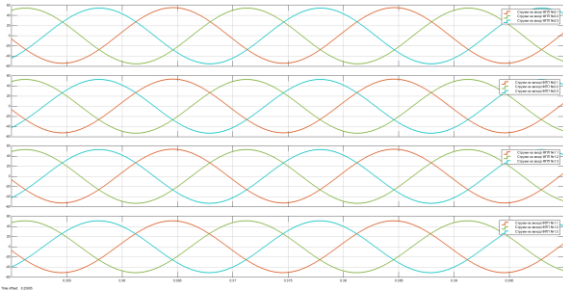


Рис. 14. Діаграма струмів на ФПП № 1 та № 2

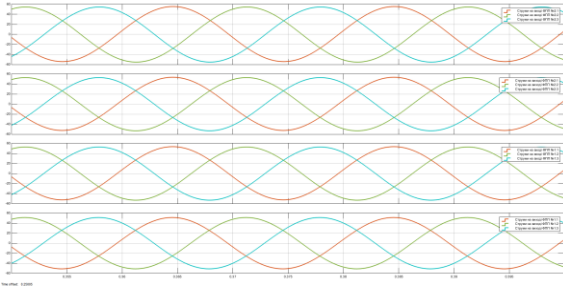


Рис. 15. Діаграма струмів на ФПП № 3 та № 4

На другому етапі були зняті характеристики напруги (Рис. 16.) та значення струмів (Рис. 17.), на початку та в кінці лінії – графіки № 1 та № 4, а також значення на виходах ФПП № 2 та № 4 – графіки № 2 та № 3.

Саме останні два графіка найбільш інформативні для аналізу кута зсуву між векторами напруги та струмів, але в даному режимі, коли ступінь регулювання поставлена в 0 положення значення куту дорівнює 0° .

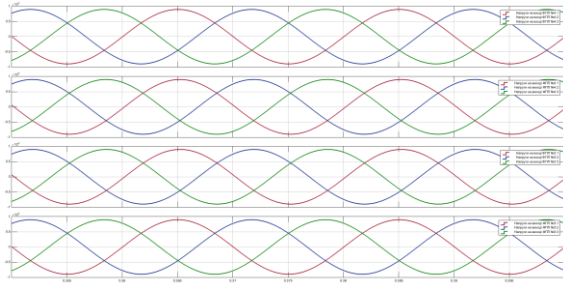


Рис. 16. Діаграма напруги в ПЛЕП № 1 та № 2

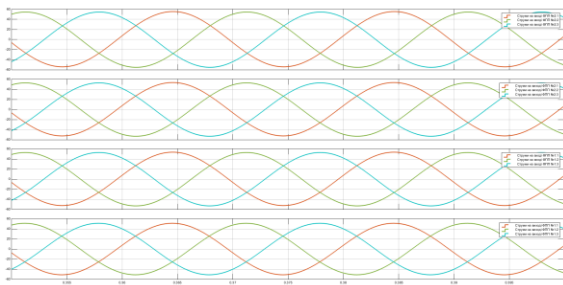


Рис. 17. Діаграма струмів в ПЛЕП № 1 та № 2

2) Зсув між векторами напруги та струмів між ланцюгами – 120° .

На третьому етапі були зняті характеристики напруги (Рис. 18. та Рис. 20.) на кожному з ФПП та значення струмів (Рис. 19. та Рис. 21.).

В даному режимі роботи ступінь регулювання МТК ФПП № 1 та № 2 була обрана в режим +15, вдалося отримати кут зсуву між векторами вхідних та вихідних напруги та струмів значенням $+60^\circ$.

Результати представлені на Рис. 18, Рис 19.: 1-й графік – значення на вході ФПП № 1, 2-й графік – значення на виході ФПП № 1, 3-й графік – значення на вході ФПП № 2, 4-й графік – значення на виході ФПП № 2.

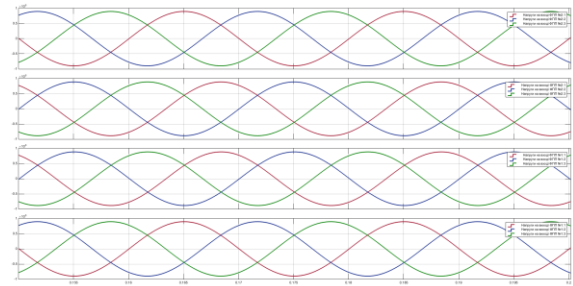


Рис. 18. Діаграма напруги на ФПП № 1 та № 2

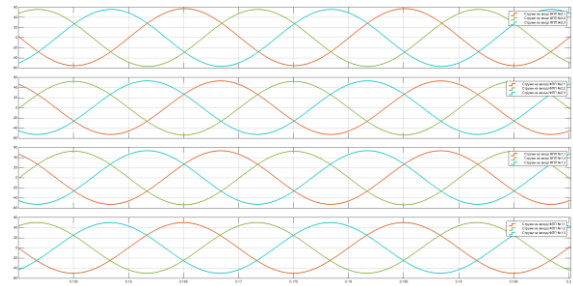


Рис. 19. Діаграма струмів на ФПП № 1 та № 2

Ступінь регулювання МТК ФПП № 3 та № 4 була обрана в режим -15, вдалося отримати кут зсуву -60° .

Результати представлені на Рис. 20, Рис 21.: 1-й графік – значення на вході ФПП № 3, 2-й графік – значення на виході ФПП № 3, 3-й графік – значення на вході ФПП № 4, 4-й графік – значення на виході ФПП № 4.

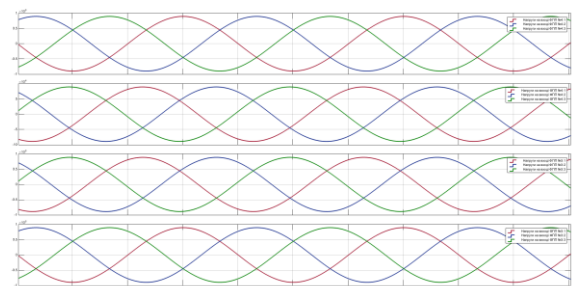


Рис. 20. Діаграма напруги на ФПП № 3 та № 4

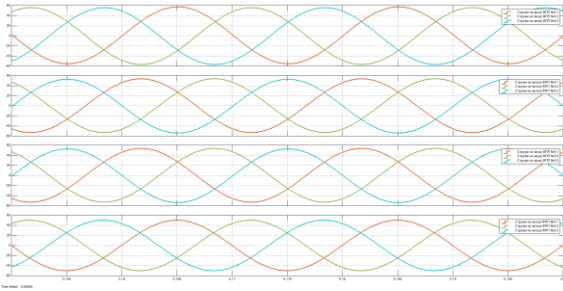


Рис. 21. Діаграма струмів на ФПП № 3 та № 4

На останньому етапі були зняті характеристики напруги (Рис. 22.) та значення струмів (Рис. 23.), на початку та в кінці лінії – графіки № 1 та № 4, а також значення на виходах ФПП № 2 та № 4 – графіки № 2 та № 3.

В даному режимі роботи вдалося отримати значення куту зсуву між векторами струмів та напруги двох ланцюгів, яке дорівнює 120° .

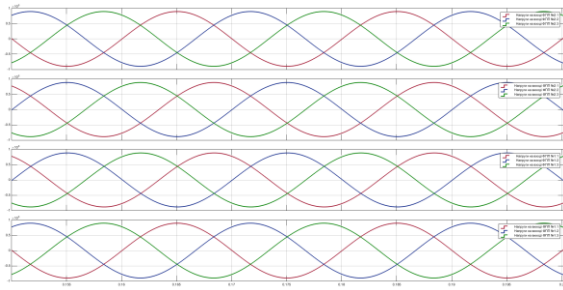


Рис. 22. Діаграма напруги в ПЛЕП № 1 та № 2

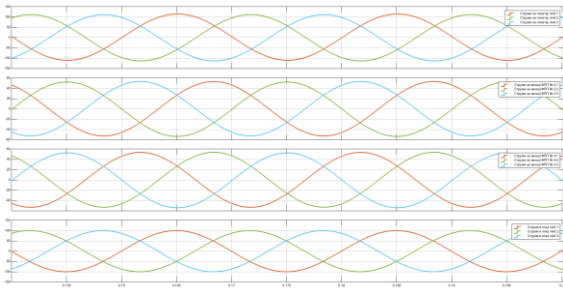


Рис. 23. Діаграма струмів в ПЛЕП № 1 та № 2

Моделювання в програмі Matlab&Simulink підтвердило можливість за допомогою ІСК отримати зсув $\theta = 120^\circ$ між векторами напруги та струмів двох ланцюгів.

Висновки

1. Розроблені принципові та функціональні схеми для ІСК окремим ФПП, яка реалізовано за рахунок використання тиристорних комутаторів. Наведені режими роботи МТК за різних ступенів регулювання від -15 до $+15$ з діапазоном регулювання кута $\theta_{\text{ФПП}}$ від -60° до $+60^\circ$. Такі мости складається з чотирьох двонаправлених ключів, кожен з яких представляє зустрічно-паралельно включені тиристори.

2. Сформовані однолінійна та загальна принципова схеми дволанцюгової КПЛЛЕП. Для функціонування такої системи необхідно по 2 шт. ФПП на кожному з ланцюгів лінії (на початку та в кінці).. Для отримання швидкодії та через неможливість виконати провідниковий зв'язок між ГБК першого та ДБК другого ФПП виникає необхідність використовувати інформаційні технології, наприклад IoT.

3. Була розроблена в програмі Matlab&Simulink модель дволанцюгової КПЛЛЕП класом напруги 110 кВ. Проведене моделювання цієї системи для двох режимів роботи кута зсуву векторів напруги та струмів двох ланцюгів КПЛЛЕП, $\theta = 0^\circ$ та $\theta = 120^\circ$. Результати моделювання доказали працездатність розробленої системи, та можливість керувати значенням куту θ дискретно в діапазоні $0-120^\circ$.

Список використаної літератури

1. Dspace.nbu.gov.ua. 2022. Проблеми розвитку енергетики України (Інформаційне повідомлення). [online] Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/1947>
2. Savieliev, A., Ways and methods of improving the efficiency of overhead power line. Computational Problems of Electrical Engineering, 11(2), pp.18-25. 2021 doi: 10.23939/jcpee2021.02.018
3. Maevsky, D., Maevskaya, E., Savieliev, A., Semenyug, A. and Horokholynskiy, S., 2018. Coefficient of efficiency of coupled electric power transmission lines. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2018 doi: 10.1109/TCSET.2018.8336215
4. Library.e.abb.com. 2021. Доступ за посиланням: https://library.e.abb.com/public/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/FACTS_%20eng.%20ABB%20Rview.pdf
5. Tyll, H. and Schettler, F., 2009. Power system problems solved by FACTS devices. 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition,
6. Maevsky D., Besarab O., Maevskaya E., Berzan V. and Savieliev A., 2020. Ways and Reserves of Increasing the Efficiency of Electric Power Transmission Lines. IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. 2020. pp. 618-622. doi: 10.1109/tcset49122.2020.235506
7. Postolaty V., Bykova E., Suslov V., Timashova L., Shakaryan Y. and Kareva S., 2016. Controlled Compact High Voltage Power Lines, Problemele energeticii regionale, no. 30, 2016.

8. Postolaty V., Bykova E., Suslov V., Timashova L., Shakaryan Y., and Kareva S. 2012. Controlled compact ac transmission lines. International conference "Energy of Moldova, Regional aspects of development", 2012.

9. Постолатій, В., 2017. Високовольтні лінії електропередачі, що керуються самокомпенсованими (Серія: Керовані електропередачі змінного струму підвищеної пропускної спроможності). 1st ed. Ch.: Tipogr. A.Ş.M: Інститут енергетики АНМ.

10. Postolaty V., Bykova E., Timashova L. and Shakaryan Y. 2017. Main principles of creation and characteristics of controlled self-compensating electric transmission lines, *Electrotechnic and Computer Systems*, no. 25(101), 2017.

11. Verboomen, J., Van Hertem, D., Schavemaker, P., Kling, W. and Belmans, R., 2005. Phase shifting transformers: principles and applications. 2005 International Conference on Future Power Systems.

12. Okon, T. and Wilkosz, K., 2016. Phase shifter models for steady state analysis. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE),

[1256fda003b4d42/FACTS %20eng.%20ABB%20Review.pdf](https://doi.org/10.1109/FACTS%20eng.%20ABB%20Review.pdf)

5. Tyll, H. and Schettler, F., 2009. Power system problems solved by FACTS devices. 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition.

6. Maevsky D., Besarab O., Maevskaya E., Berzan V. and Savieliev A., 2020. Ways and Reserves of Increasing the Efficiency of Electric Power Transmission Lines. IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. 2020. pp. 618-622. doi: 10.1109/tcset49122.2020.235506

7. Postolaty V., Bykova E., Suslov V., Timashova L., Shakaryan Y. and Kareva S., 2016. Controlled Compact High Voltage Power Lines, *Problemele energeticii regionale*, no. 30, 2016.

8. Postolaty V., Bykova E., Suslov V., Timashova L., Shakaryan Y., and Kareva S. 2012. Controlled compact ac transmission lines. International conference "Energy of Moldova, Regional aspects of development", 2012.

9. Postolaty, V., 2017. Self-compensating controlled high-voltage power transmission lines (Series: Controlled alternating current power transmissions of increased throughput). 1st ed. Ch.: Tipogr. A.Ş.M., Institute of Energy of the Academy of Sciences.

10. Postolaty V., Bykova E., Timashova L. and Shakaryan Y. 2017. Main principles of creation and characteristics of controlled self-compensating electric transmission lines, *Electrotechnic and Computer Systems*, no. 25(101), 2017.

11. Verboomen, J., Van Hertem, D., Schavemaker, P., Kling, W. and Belmans, R., 2005. Phase shifting transformers: principles and applications. 2005 International Conference on Future Power Systems.

12. Okon, T. and Wilkosz, K., 2016. Phase shifter models for steady state analysis. 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE).

References

1. Dspace.nbu.gov.ua. 2022. Problems of energy development of Ukraine (Informative notice). [online] Available at:

<http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/1947>

2. Savieliev, A., Ways and methods of improving the efficiency of overhead power line. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 11(2), pp.18-25. 2021 doi: 10.23939/jcpee2021.02.018

3. Maevsky, D., Maevskaya, E., Savieliev, A., Semenyug, A. and Horokholynskyi, S., 2018. Coefficient of efficiency of coupled electric power transmission lines. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2018 doi: 10.1109/TCSET.2018.8336215

4. Library.e.abb.com. 2021. Available at: <https://library.e.abb.com/public/b0f2c8c94b48a6bcc>

DEVELOPMENT AND SIMULATION OF THE INFORMATION SYSTEM FOR CONTROLLING THE PARAMETERS OF OVERHEAD POWER LINES IN SIMULINK

A. A. Savieliev

Odessa Polytechnic National University

Abstract. The work developed an information system for controlling the value of the shift angle of the voltage and current vectors of various circuits of a two-circuit controlled overhead power line. The proposed control system is used to adjust the wave resistance, the value of which in two-circuit lines also depends on value of the shift angle. The main task of this system is to support the operation of power transmission lines in the matched load mode, when the value of the wave resistance of the line is equal to the value of the load resistance. The implementation of such a system was considered on the example of the use of two-circuit

controlled high-voltage power lines using Flexible Alternative Current Transmission Systems devices. These devices allow to change the values of the secondary parameters of power transmission lines based on the required tasks and load parameters in the network. The principle and functional schemes for the control system of the operation of the phase-shifting device using switches of thyristor switches have been developed. These switches allow to change the value of the shift angle of the voltage and current vectors at the input and output of the device in the range of $\pm 60^\circ$ with a step of 4° , all the stages of adjusting the positions of the thyristor switches - 31. A mathematical (simulation) model of the information control system was developed in the Matlab Simulink software environment for a two-circuit controlled overhead power line with 4 phase-shifting devices. The description and formulas for calculating the main parameters of the elements of this model are given. Modeling of the control system in different operating modes, i.e. in different positions of the adjustment steps, was carried out. The simulation results are presented in the form of current and voltage diagrams. Based on the results of the conducted simulation, it was possible to confirm the performance of the developed information control system, by changing the operating modes, to obtain values of the shear angle in the range of 0 - 120° .

Keywords: electricity, energy efficiency improvement, controlled AC overhead transmission lines, losses in power transmission lines, wave resistance, unmatched load mod, matched load mode, information-controlling system, regulation under load, Flexible AC Transmission Systems, FACTS devices, Smart Grid.

Отримано 02.06.2022



Савельєв Артем Андрійович, Державний університет «Одеська політехніка», студент, асистент кафедри електромеханічної інженерії. Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, mail: savieliev.a.a@opu.ua, тел. +380954167098

Saveliev Artem, Odessa Polytechnic State University, PhD student, assistant of the Department of Electromechanical Engineering. Prosp. Shevchenko, 1, Odesa, Ukraine, mail:savieliev.a.a@opu.ua, тел. +380954167098