

## КОМПЕНСАЦІЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ РОЗМИКАННЯМ ТРАНЗИТІВ 110 кВ

**Клюшник О. С., магістрант, Кацадзе Т. Л., к.т.н., доц.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж і систем*

**Вступ.** Електроенергетичні системи складаються з електричних мереж різних класів номінальної напруги, які складаються з повітряних або кабельних ліній електропередавання, виконаних проводами різного типу з різним взаємним розташуванням фазних проводів у просторі тощо. Перелічені чинники визначають неоднорідність електричних мереж електроенергетичних систем [1, 2, 5]. Параметри розрахункової схеми різних класів номінальної напруги повітряного або кабельного виконання характеризуються різним співвідношенням між індуктивним та активним опорам ділянок схеми, тобто різними значеннями тангенсів імпедансних кутів. Це визначає неоптимальний перерозподіл потоків потужності між паралельними ділянками таким чином, що ділянки вищих класів номінальної напруги (з більшим значенням тангенсу імпедансного кута) розвантажуються, а ділянки нижчих класів номінальної напруги (з меншим значенням тангенсу імпедансного кута) перевантажуються у порівнянні з поточкорозподілом в однорідній електричній мережі.

Неоднорідність електричної системи призводить до таких негативних явищ, як: зниження якості електроенергії, додаткове завантаження ліній електропередачі (ЛЕП) розподільних електромереж, а також зниження пропускної здатності системи в цілому. Неоднорідність є конструктивним параметром ЕС, тому негативно впливає на її режими на протязі всього часу функціонування системи. Через неоднорідність електричних мереж електроенергетичної системи спостерігаються додаткові перетоки потужностей між електричними мережами, які зумовлюють додаткові втрати потужності та погіршують техніко-економічні показники роботи електроенергетичної системи [1, 2, 5]. В Україні втрати в електричних мережах сягають 12-14 %, а за іншими статистичними даними до 18 %. Результати попередніх досліджень показали, що шляхом комплексної оптимізації режиму електричних мереж 110 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи можна досягти зменшення втрат потужності у максимальному режимі на 17,37% (на 6,71 МВт), а електроенергії в ЕЕС на (3...5)% [3, с.28-31]. Дослідження впливу неоднорідності на рівень втрат електроенергії є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить контролювати та оцінювати додаткові втрати в електричних мережах.

Компенсація неоднорідності електричних мереж може бути досягнута наступними шляхами:

1. Включенням в контури мережі пристроїв поздовжньої компенсації (ППК) у вигляді батарей статичних конденсаторів або груп реакторів.
2. Включенням в контури мережі поздовжньо-поперечних вольтододаткових трансформаторів.
3. Розмиканням контурів замкнутої мережі.

В даній статті розглядається можливість компенсації неоднорідності в електричних мережах шляхом розмиканням транзитів 110 кВ на прикладі існуючої електричної мережі - Південної енергосистеми України, яка характеризується складно замкненими транзитами 110-150 кВ, що викликають додаткові втрати.

Об'єкт дослідження – розподільні електричні мережі напругою 110-150 кВ.

Предмет дослідження – зниження втрат потужності через неоднорідність мереж.

**Мета роботи.** Зменшення додаткових втрат електроенергії шляхом компенсації неоднорідності електричних мереж розмиканням транзитів 110 кВ. Для досягнення мети було проведено розрахунок мережі 110 кВ. Завданням дослідження є:

- 1) Огляд матеріалів щодо способів компенсації неоднорідності.
- 2) Порівняння способів компенсації неоднорідності та обґрунтування обраного.
- 3) Оптимізація режиму електричної мережі шляхом розмикання контурів.

**Матеріали і результати дослідження.** До мереж з високим ступенем неоднорідності відносяться змішані кабельно-повітряні мережі однієї напруги і мережі з трансформаторними зв'язками, якщо останні входять до складу замкнутих контурів. Ступінь неоднорідності електричних мереж, особливо районних, безперервно росте через появу все більшої кількості мереж підвищеної напруги, які накладаються на замкнені мережі менших напруг.

Зіставляючи природній поточкорозподіл з економічним, для мережі з чутливим впливом неоднорідності отримаємо, що перехід від першого до другого завжди призводить до зниження втрат активної потужності і розвантаження по струму мережі з пониженою відносною реактивністю.

Рівні напруги при переході до економічного струморозподілу можуть і підвищитись і понизитись, в залежності від засобів, з допомогою яких відбувається перехід. Зазвичай є бажаним підвищення рівня напруги, що і враховується під час вибору засобів оптимізації струморозподілу.

Економічний струморозподіл більший за природній, відрізняється від струморозподілу в х-схемі мережі. Тому, втрати реактивної потужності при переході до економічного струморозподілу зростають. Вказане зростання може частково чи повністю бути компенсованим за рахунок підвищення рівня напруги.

Оптимізація природнього струморозподілу може бути досягнена такими способами:

- 1) включенням в контури мережі поздовжньо-поперечних вольтододаткових трансформаторів, е.р.с. яких повинна бути близька до зрівноваженої. При відповідному виборі місць установки ВДТ в мережі одночасно поліпшується режим напруг;

- 2) включенням в контури мережі установок поздовжньої компенсації (УПК) у вигляді батарей статичних конденсаторів або груп реакторів. В результаті включення УПК повністю або частково компенсується неоднорідність мережі. Розглядаючи УПК як свого роду вольтододатковий

пристрій, можна стверджувати, що його е.р.с. (ємності або індуктивності) повинна бути близька до зрівноваженої.

Ємнісні УПК встановлюються в гілки з підвищеною індуктивністю. Навантаження таких гілок зростає. Через зниження результуючих реактивних опорів зменшуються втрати реактивної потужності. При цьому підвищуються рівні напруг за точками включення конденсаторів.

Індуктивні УПК дають протилежний ефект. Вони призводять до зростання втрат реактивної потужності і зниження рівнів напруг. Установка реакторів може бути виправдана тільки в кабельних лініях змішаних мереж, особливо при наявності необхідності зниження струмів короткого замикання;

3) розмиканням контурів мережі і переходом на розімкнену схему. Для наочності розглянемо спочатку ідеалізований випадок. Нехай при економічному струморозподілу в кожному контурі мережі є лінія, що не несе навантаження. Очевидно, що після відключення таких ліній струморозподіл в отриманій розімкнутій мережі буде повністю збігатися з економічним струморозподілом в замкнутій, а в місцях розрізів виникнуть різниці потенціалів, рівні зрівноважувальним е.р.с. У реальних мережах зазвичай всі лінії в якійсь мірі навантажені. Однак, розмиканням мережі в правильно обраних точках в багатьох випадках можна отримати досить сприятливі результати: знижуються втрати активної потужності і поліпшується режим напруг в частинах мережі, що розвантажуються. Деяке зниження напруг в частинах мережі, що довантажуються, зазвичай вдається компенсувати перестановкою відгалужень силових трансформаторів та іншими заходами з регулювання напруги. Зазначимо, що розмикання може знадобитися не для всіх, а тільки для частини контурів, що роблять найбільший вплив на результуючий ефект неоднорідності. Розмиканню в першу чергу підлягають контури, для яких зрівноважувальна економічна е.р.с. має найбільше значення.

Оптимізація роботи неоднорідних мереж з допомогою ВДТ чи УПК є доцільною при порівняно простих схемах з невеликою кількістю замкнутих контурів, а для більш складних схем – у тих випадках, коли виконання основної частини мережі забезпечує допустиму неоднорідність і високий результуючий ефект створює обмежена кількість гілок, які відрізняються по виконанню (зв'язки підвищеної напруги, кабельні вставки в повітряних мережах та ін.).

В розвинених мережах з великою кількістю неоднорідних контурів розмикання останніх виявляється основним способом оптимізації. Така ситуація має місце у багатьох міських та сільських мережах напругою 6 (10) кВ. Питання про розмикання районних мереж потребує додаткових досліджень. Тут, окрім оптимізації режиму, розмикання мережі може призвести до суттєвого зменшення струмів короткого замикання.

Методи покращення струморозподілу, що наведені вище, як правило, не забезпечують струморозподіл, який би строго відповідав r-схемі мережі. Для створення останнього довелося б встановлювати ВДТ у всіх контурах мережі чи УПК майже на всіх ділянках мережі. Розмикання довелося б проводити не по лініям, а по шинам підстанцій в точках струморозподілу при строго визначеному відношенні навантажень між розімкненими шинами. В

результаті, дискретність параметрів ВДТ і УПК неминуче призведе до відхилень струморозподілу від економічного. Допустимість таких відхилень струморозподілу обумовлена вже відміченою стійкістю економічних рішень. Графіки залежностей мінімізуючих економічних функцій (втрати потужності і енергії, приведені витрати) від відповідних аргументів (відношення навантажень гілок, додаткова е.р.с., компенсуючий опір) поблизу екстремальних точок проходять полого. Тому, наприклад, навіть, значні відхилення розподілу струмів між паралельними гілками від оптимального призводять до порівняно помірному зростанню сумарних втрат активної потужності. Так, для двох гілок з однаковими активними опорами оптимальним буде розподіл навантаження порівну. При відносному відхиленні навантаження кожної гілки, рівному  $\alpha$ , від оптимального відносні втрати потужності зростуть на  $\alpha^2$ , тобто, при відхиленні навантаження на 10...15% втрати зростуть на 1...2,25%.

При проектній постановці задачі ціль оптимізаційних розрахунків електричних мереж полягає в виборі типу оптимізаційних пристроїв, їх розташування, параметрів і ступеня використання в граничних режимах роботи мережі. При експлуатаційній постановці обмежується визначенням бажаного ступеня використання існуючих пристроїв при режимах, що прогноуються найближчим часом.

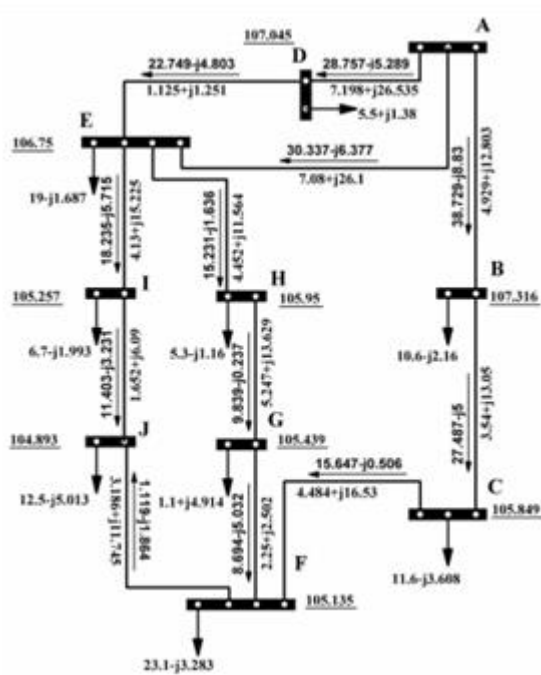
Стійкість економічних рішень дозволяє користуватися наближеними методами оптимізаційних розрахунків. Вважається допустимим виконувати такі розрахунки в потужностях за номінальними напругами. В місцевих мережах можна відмовитись від врахування в балансі втрат потужностей, а в районних – обмежитись першим наближенням, визначаючи втрати потужності за номінальною напругою і основним струморозподілом [1].

Оптимізацією режиму роботи неоднорідних мереж шляхом розмикання контурів в багатьох випадках можна отримати досить гарні результати: знижуються втрати активної потужності і покращується режим напруг в розвантажених частинах схеми. Розглянемо це на конкретному прикладі.

Розглянемо схему Південної енергосистеми України 110 кВ. Схема характеризується великою кількістю замкнених неоднорідних контурів, що визначають додаткові втрати, неекономічність режиму та ін. Оптимізацію даної схеми Південної енергосистеми України 110 кВ наведено на рис. 1-2.

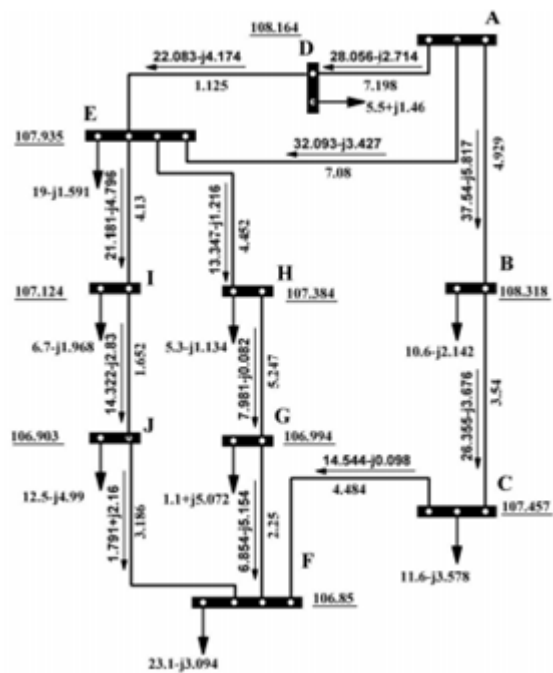
В природному поточкорозподілі потоки потужності пропорційні комплексним опорам ділянок мережі. Розрахунок поточкорозподілу потужностей здійснили за даними навантаженнями підстанцій. Отримані під час розрахунку природного поточкорозподілу результати вказують на те, що дана замкнена мережа неоднорідна (співвідношення активних і реактивних опорів різні) [6, 7].

Струморозподіл, за якого у мережі спостерігаються мінімальні втрати активної потужності, називають економічним струмо- (потоко-) розподілом. Економічний струморозподіл у мережі визначили шляхом моделювання усталеного режиму в г-схемі, тобто у схемі, яка містить тільки активні опори [6, 7].



Втрати потужності в мережі:  
 $\Delta S_{\Sigma} = 2,423 + j15,04 \text{ MVA}$

Рисунок 1 – Результуюча схема природнього поточкорозподілу потужностей в електричній мережі



Втрати потужності в мережі:  
 $\Delta S_{\Sigma} = 2,288 + j23,542 \text{ MVA}$

Рисунок 2 – Результуюча схема економічного поточкорозподілу потужностей в електричній мережі

Порівнюючи результати розрахунків, очевидним є відмінність природнього поточкорозподілу від економічного. Втрати при економічному поточкорозподілі зменшились. Виникає необхідність знизити втрати активної потужності в замкненій неоднорідній мережі. Для цього виконуємо оптимізацію режиму, основна задача якої полягає в наближенні природнього поточкорозподілу до економічного.

Для цього визначаємо контур з найбільшим значенням абсолютної величини економічної зрівнювальної ЕРС. За розрахунками отримали такі результати:  $E_{зр1} = 0,439 \text{ кВ}$ ,  $E_{зр2} = 1,436 \text{ кВ}$ ,  $E_{зр3} = 0,602 \text{ кВ}$ .

Рішення щодо розмикання другого контуру є цілком обґрунтоване, то ж розімкнемо цей контур, відключивши найменш завантажену ділянку контуру з найбільшою економічною зрівнювальною ЕРС. Всього проведено 12 дослідів з розмиканням контурів шляхом відключення ділянок. Результати розрахунків мережі зводимо до табл.1 для більш наочного порівняння результатів.

Порівнюючи результати розмикання, очевидно, що для кращої оптимізації необхідно розімкнути два контури, що відповідають 10 варіанту розмикання контурів E-H-G-F1-F2-J-I-E та A-B-C-F4-F1-G-H-E-A за допомогою розімкнення секційного вимикача F (секції F1, F2 та F4). Даний варіант дає найбільше зменшення втрат активної потужності (1,422 МВт). Напряга та струм при даній оптимізації режиму роботи електричної мережі не виходить за межі допустимих значень [7].

Таблиця 1 – Порівняння результатів

Метод оптимізації	$\Delta P_{\Sigma}$ , МВт	$\Delta Q_{\Sigma}$ , МВАр	$U_{\max}$ , кВ	$U_{\min}$ , кВ
Природний поточкорозподіл	2,423	$j15,004$	107,316	104,893
Економічний поточкорозподіл	2,228	$j23,542$	108,318	106,85
Розмикання контурів				
1 варіант (J-F)	7,242	$j11,657$	109,84	105,13
2 варіант (G-F)	2,4	$j24,674$	109,262	106,549
3 варіант (G-H)	2,417	$j20,116$	108,994	107,62
4 варіант (J1-J2)	2,619	$j19,615$	109,103	107,616
5 варіант (F1-F2)	2,123	$j20,458$	109,125	108,456
6 варіант (F1-F3)	2,145	$j20,015$	109,48	106,986
7 варіант (F1-F4)	1,673	$j21,108$	110	108,421
8 варіант (C-F)	2,553	$j18,578$	110	107,555
9 варіант (E1-E2)	2,385	$j19,505$	109,06	107,528
10 варіант (F1-F2+F1-F4)	1,422	$j19,716$	110	109,316
11 варіант (E1-E2+ F1-F2+F1-F4)	2,865	$j17,273$	113,641	103,369
12 варіант (D-E+F1-F2+F1-F4)	3,479	$j13,944$	110,892	104,112

### Висновки.

1. Електричні мережі характеризуються високим ступенем неоднорідності, що визначає застосування спеціальних заходів, спрямованих на компенсацію неоднорідності, зменшення втрат потужності та підвищення пропускної здатності електричної мережі. До мереж з високим ступенем неоднорідності відносяться змішані кабельно-повітряні мережі однієї напруги і мережі з трансформаторними зв'язками, якщо останні входять до складу замкнутих контурів. Ступінь неоднорідності електричних мереж, особливо районних, безперервно росте через появу все більшої кількості мереж підвищеної напруги, які накладаються на замкнені мережі менших напруг.

Оптимізація природнього струморозподілу може бути досягнена такими способами:

1) включенням в контури мережі поздовжньо-поперечних вольтододаткових трансформаторів, е.р.с. яких повинна бути близька до зрівноваженої. При відповідному виборі місць установки ВДТ в мережі одночасно поліпшується режим напруг;

2) включенням в контури мережі установок поздовжньої компенсації (УПК) у вигляді батарей статичних конденсаторів або груп реакторів. В результаті включення УПК повністю або частково компенсується неоднорідність мережі.

3) розмиканням контурів мережі і переходом на розімкнену схему. Для наочності розглянемо спочатку ідеалізований випадок. В результаті розмикання мережі в правильно обраних точках в багатьох випадках можна отримати досить сприятливі результати: знижуються втрати активної потужності і поліпшується режим напруг в частинах мережі, що розвантажуються.

Зазначимо, що розмикання може знадобитися не для всіх, а тільки для частини контурів, що роблять найбільший вплив на результуючий ефект неоднорідності. Розмиканню в першу чергу підлягають контури, для яких зрівноважувальна економічна е.р.с. має найбільше значення.

2. В розвинених мережах з великою кількістю неоднорідних контурів розмикання останніх виявляється основним способом оптимізації. Такий ситуація має місце у багатьох міських та сільських мережах напругою 6 (10) кВ. Питання про розмикання районних мереж потребує додаткових досліджень. Тут, окрім оптимізації режиму, розмикання мережі може призвести до суттєвого зменшення струмів короткого замикання.

Стійкість економічних рішень дозволяє користуватися наближеними методами оптимізаційних розрахунків. Вважається допустимим виконувати такі розрахунки в потужностях за номінальними напругами. В місцевих мережах можна відмовитись від врахування в балансі втрат потужностей, а в районних – обмежитись першим наближенням, визначаючи втрати потужності за номінальною напругою і основним струморозподілом [1].

3. Розглянутий в даній роботі метод компенсації неоднорідності в електричних мережах шляхом розмиканням транзитів 110 кВ на прикладі існуючої електричної мережі - Південної енергосистеми України показав можливість зменшення втрат активної потужності в порівнянні з природним потекорозподілом на 41%, що в активній потужності складає 1,001 МВт.

#### Перелік посилань

1. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.

2. Кацадзе Т.Л. Прийняття рішень щодо раціонального регулювання режимів неоднорідних електричних мереж [Електронний ресурс] / Т.Л. Кацадзе // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 1. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/461/459>

3. Оптимізація електроенергетичних систем з неоднорідними електричними мережами на основі принципу найменшої дії [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : Спец.05.14.02 електричні станції мережі і системи / В. В. Кулик ; Міністерство науки і освіти України ВНТУ. - Вінниця, 2015. - 320 с.

4. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, А. В. Килимчук, О. Є. Рубаненко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - 2013. - № 5. - С. 194-200. Електронний ресурс. Режим доступу:

[http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu\\_tekh\\_2013\\_5\\_38](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2013_5_38).

5. Сулейманов В. М. Електричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с. – ISBN 978-966-622-300-8.

6. Електричні системи та мережі. Методичні вказівки до вивчення курсу та самостійної роботи на тему «Неоднорідна замкнена електрична мережа і оптимізація її режимів» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ Укл.: к.т.н., доц. А.П.Свіридов, ст.викл. Т.В.Величко. - Кропивницький: ЦНТУ, 2018 – 54 с.

7. Ключник О.С. Секціонування мережі 110 кВ за допомогою реклоузерів/ О.С. Ключник, Т.Л. Кацадзе // Дипломний проект. – 2020. – 77 с.