

ПЕРЕДМОВА

Мета цього навчального посібника – допомогти студентам спеціальності “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” у вивченні навчальної дисципліни “Електромагнітні перехідні процеси”.

Сучасна електроенергетична система (ЕЕС) – це сукупність електричних станцій та електричних мереж, призначена виробляти, пересилати, перетворювати параметри та розподіляти електричну енергію для електроспоживачів. Системи оснащені відповідними пристроями захисту, автоматики та керування. Струми короткого замикання (КЗ) для таких систем розраховують на цифрових обчислювальних машинах (ЦОМ). Це потребує розробки та доведення до алгоритмічної формалізації математичних моделей елементів ЕЕС, а в деяких випадках – створення на їхній основі відповідних розрахункових схем.

Поряд з основними теоретичними відомостями, що розкривають суть електромагнітних перехідних процесів, у посібнику подано методи розрахунку струмів КЗ, які ґрунтуються на сучасних досягненнях обчислювальної техніки й математики. Певна увага приділяється застосуванню практичних методів, які дають змогу набуту досвіду розрахунку струмів КЗ у простих колах, не втрачаючи при цьому розуміння фізичної суті процесів.

Наведені в посібнику алгоритми показують, що розрахунки струмів КЗ можна завжди формалізувати, звівши їх до послідовного виконання низки операцій з обов’язковою перевіркою здобутих на кожному етапі результатів обчислень. Такий підхід допоможе чітко й логічно формулювати конкретні задачі й алгоритми їх розв’язування.

Враховуючи характер цього видання, посилань на першоджерела в тексті не робилося. Наведений перелік літератури неповний і розрахований переважно на можливості студентів.

ВСТУП

Усталений режим ЕЕС упродовж певного проміжку часу характеризується незмінним складом елементів і значеннями параметрів ЕЕС. Перехід ЕЕС від одного усталеного режиму до іншого, спричинений зміною її складу чи параметрів, називають процесом або перехідним процесом. Під час такого процесу змінюється електромагнітний стан ЕЕС і порушується баланс моментів на валах обертових електричних машин, що призводить до зміни їхньої швидкості обертання. Отже, перехідний процес супроводжується взаємопов'язаними змінами електромагнітного та механічного станів елементів ЕЕС. Через велику механічну інерцію валів обертових машин, на початковій стадії перехідного процесу проявляються переважно зміни електромагнітного стану ЕЕС, які й називають електромагнітними перехідними процесами. Дещо пізніше помітними стають також зміни електромеханічного стану елементів ЕЕС, які називають електромеханічними перехідними процесами. При цьому згасання вільних складових координат електромагнітних процесів відбувається набагато швидше, ніж згасання вільних складових координат електромеханічних перехідних процесів. Саме тому в більшості практичних задач електромагнітні й електромеханічні перехідні процеси розглядають окремо.

Електромагнітні перехідні процеси мають місце після виникнення КЗ та поздовжньої несиметрії, вмикання та вимикання окремих елементів ЕЕС чи її підсистем (однофазні КЗ), під час форсування збудження та гасіння магнітного поля синхронних машин тощо.

Нормальний режим ЕЕС найчастіше порушується виникненням КЗ – не передбаченим нормальними умовами роботи ЕЕС замиканням фаз між собою, а для мереж з уземленими нейтралями трансформаторів – замиканням однієї або кількох фаз на землю. Замикання однієї з фаз на землю в мережах з ізольованими нейтралями трансформаторів називають однофазним замиканням на землю (ОЗЗ).

У місці КЗ виникає перехідний опір, який складається з опорів електричної дуги й опорів інших елементів на шляху протікання

струму КЗ. У деяких випадках перехідний опір малий, ним можна знехтувати, і таке КЗ називають металевим.

В ЕЕС трифазного змінного струму розрізняють трифазне $K^{(3)}$ та несиметричні види КЗ. Симетричним є легше трифазне КЗ, тобто замикання між трьома фазами в одному місці ЕЕС. Під час трифазного КЗ умови роботи всіх трьох фаз однакові, тому струми та напруги в різних фазах відповідно однакові за значенням і зсунуті за фазою на кути ∓ 120 ел. град. (надалі $\mp 120^\circ$).

Всі інші види КЗ є несиметричними і характеризуються тим, що умови роботи однієї з фаз відмінні від умов роботи двох інших фаз та струми і напруги в різних фазах неоднакові за значенням і мають різні кути зсуву фаз. Види КЗ позначають так: $K^{(3)}$ – трифазне; $K^{(2)}$ – двофазне; $K^{(1)}$ – однофазне на землю; $K^{(1,1)}$ – двофазне на землю.

Іноді в процесі аварії один вид КЗ може перейти в інший. Наприклад, у кабельних мережах несиметричне КЗ часто переходить у трифазне.

Розрізняють прості та складні види пошкоджень. Простими називають КЗ, які виникають в одній точці електромережі, складними – одночасні виникнення КЗ у різних точках електромережі, одночасне виникнення КЗ та обривів фаз тощо. Наприклад, у електромережах з ізольованими нейтралями трансформаторів одночасне виникнення КЗ на землю різних фаз у різних місцях електромережі є складним пошкодженням. Ще одним прикладом складного виду пошкодження є виникнення в одному місці електромережі поздовжньо-поперечної несиметрії, коли біля опори лінії електропередачі обривається провід однієї з фаз, при цьому кінець однієї частини провода залишається закріпленим на опорі, а кінець іншої частини провода падає на землю, утворюючи однофазне КЗ.

Під час виникнення КЗ струми у вітках схеми, які утворюють з джерелами ЕРС короткозамкнені контури, значно зростають порівняно зі струмами нормального режиму. Одночасно знижується напруга в окремих вузлах ЕЕС, особливо в місці КЗ. Хоча місце КЗ протягом 0,05–5 с локалізується релейним захистом і вимикається

вимикачами, можливе серйозне пошкодження окремих елементів ЕЕС та порушення нормального режиму її роботи. Тому струми КЗ необхідно розраховувати, а результати розрахунків використовувати під час проектування та експлуатації ЕЕС і їхніх підсистем.

Причини виникнення КЗ:

1. Порушення ізоляції електричного обладнання та ліній електропередачі.
2. Помилкова дія обслуговуючого персоналу.
3. Падіння опор ліній електропередачі та обрив проводів.

Ізоляція порушується через її старіння, прямі удари блискавки, дії перенапруг, механічні пошкодження, проїзд під лініями електропередачі негабаритних механізмів, накиди на лінії сторонніх предметів, незадовільне обслуговування електрообладнання.

Помилкові дії обслуговуючого персоналу, які призводять до КЗ, зумовлені, здебільшого, порушенням ним правил техніки безпеки, правил технічної експлуатації та порядку оперативних перемикачів в електроустановках. Наприклад, вмикання під напругу електроустановки, у якій після завершення її ремонту помилково залишилися заземленими струмопровідні частини.

Падіння опор та обрив проводів ліній електропередачі пов'язані із зростанням механічного навантаження під час сильних вітрів, ожеледі, землетрусів тощо.

Поряд із КЗ, які мають випадковий характер, в ЕЕС можливі КЗ, пов'язані з певними технологічними режимами роботи електрообладнання, наприклад, робота короткозамикача; КЗ під час різних випробувань тощо.

Наслідки КЗ:

- термічне та механічне пошкодження обладнання;
- випадання із синхронізму генераторів, електричних станцій і підсистем;
- зниження продуктивності роботи електродвигунів і їх зупинка;
- перешкоди для ліній зв'язку;
- займання в електроустановках;
- виникнення системних аварій.

На практиці результати розрахунків струмів КЗ використовують для:

- вибору головних схем електричних з'єднань для електричних станцій і підстанцій;
- вибору електричних апаратів;
- проектування, налагодження та експлуатації пристроїв релейного захисту і автоматики;
- проектування заземлюючих пристроїв;
- виявлення впливу ліній електропередачі на лінії зв'язку;
- вибору розрядників;
- аналізу стійкості роботи системи;
- виявлення умов роботи споживачів під час аварій;
- вибору числа уземлених нейтралей трансформаторів та їх розташування;
- аналізу аварій;
- розробки методик проведення різних випробувань та оцінки їх припустимості.

У сучасних ЕЕС рівень струмів КЗ безперервно зростає. Очевидно, що для якісного планування розвитку ЕЕС необхідно знати, яких рівнів струмів КЗ можна очікувати в перспективі. Тому актуальними є прогнозування рівнів струмів КЗ, їх оптимізація та координація.

Прогнозування струмів КЗ на перспективу – це визначення їхніх значень, очікуваних з достатньою ймовірністю. Точність прогнозування залежить від якості вхідної інформації. Варто зазначити, що під час прогнозування рівнів струмів КЗ на віддалену перспективу вхідна інформація буде неповною.

Оптимізація рівнів струмів КЗ в ЕЕС зводиться до визначення найбільшого припустимого рівня струмів КЗ, який забезпечував би мінімум приведених затрат. Ця задача розв'язується разом із задачею оптимізації структури, параметрів і режиму ЕЕС.

Координація рівнів струмів КЗ полягає в узгодженні струмів КЗ з параметрами електрообладнання. Ця проблема виникла у зв'язку з тим, що ЕЕС інтенсивно розвиваються, зростає потужність

окремих агрегатів, електростанцій, густина мереж тощо. Це призводить до зростання рівня струмів КЗ. У той самий час електротехнічна промисловість відстає в розробці та випуску електрообладнання із підвищеними параметрами. В результаті параметри установленого в ЕЕС електрообладнання можуть не відповідати рівням струмів КЗ. Із цього положення можна вийти різними шляхами:

- освоєнням та постачанням в ЕЕС нового електрообладнання, параметри якого відповідали б рівням струмів КЗ;
- обмеженням струмів КЗ до значень, за яких у роботі може залишитись існуюче електрообладнання;
- одночасним обмеженням рівня струмів КЗ та використанням нового електрообладнання з кращими характеристиками.

ЗМІСТ

Передмова	7
Вступ	8
1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ	13
1.1. Порядок виконання розрахунку	13
1.2. Складання розрахункової схеми та вибір розрахункових умов.....	13
1.3. Складання схеми заміщення й обчислення параметрів її елементів.....	14
1.3.1. Основні припущення	14
1.3.2. Складання схеми заміщення	15
1.3.3. Визначення параметрів елементів схем заміщення в іменованих одиницях	18
1.3.4. Визначення параметрів елементів схем заміщень у відносних базових одиницях.....	24
1.3.5. Складання схем заміщення з трансформаторними зв'язками та визначення параметрів їхніх елементів	34
Запитання для самоперевірки.....	40
Задачі для самостійної роботи.....	41
2. РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ТА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	42
2.1. Схеми заміщення прямої послідовності трансформаторів та автотрансформаторів	42
2.2. Схеми заміщення нульової послідовності трансформаторів та автотрансформаторів	51
2.3. Реактори.....	56
2.4. Повітряні лінії електропередачі	58
2.4.1. Параметри лінії провід-земля	58
2.4.2. Погонні опори трифазної лінії.....	62
2.4.3. Погонні опори двох паралельних ліній без тросів	64
2.4.4. Вплив тросів на повздовжні параметри лінії	67
2.4.5. Схема заміщення нульової послідовності паралельних ліній і параметри її елементів	71

2.4.6. Розрахункова схема нульової послідовності паралельних ліній напруг різних класів	73
2.4.7. Реактивна провідність ліній електропередавання	75
2.5. Параметри кабельних ліній	77
2.6. Синхронні машини	78
2.7. Асинхронний двигун	81
2.8. Узагальнене навантаження	81
2.9. Система	82
Запитання для самоперевірки	82
Задачі для самостійної роботи	84
3. ТРИФАЗНЕ КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ	89
3.1. Перехідний процес у колі, що живиться від джерела напруги	89
3.2. Перехідний процес трифазного КЗ у колі, що живиться від генератора	95
3.3. Закономірність зміни в часі струму, напруги та ЕРС синхронного генератора	99
3.4. Вплив автоматичного регулювання збудження на струм КЗ	100
Запитання для самоперевірки	105
Задачі для самостійної роботи	106
4. РОЗРАХУНОК ПОЧАТКОВОГО ЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ КЗ	109
4.1. Загальні вказівки	109
4.2. Розрахунок струмів КЗ методом перетворення схеми	112
4.3. Еквівалентування схем електроенергетичних систем	119
4.4. Деякі методи формування матриць вузлових опорів і вузлових провідностей	122
4.4.1. Прямий метод формування матриці $\check{Y}_B$	122
4.4.2. Метод формування матриці $\check{Z}_B$ нагромадженням розрахункової схеми	123
4.5. Розрахунок струму КЗ методом вузлових напруг із використанням матриці вузлових імпедансів	130
4.6. Застосування принципу накладання	132

4.7. Розрахунок струму КЗ методом вузлових напруг із використанням матриці вузлових провідностей	134
4.8. Розрахунок струму КЗ методом вузлових напруг із застосуванням LU-перетворень Гауса	138
Запитання для самоперевірки.....	139
Задачі для самостійної роботи.....	140
5. ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ	
СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ.....	144
5.1. Загальні вказівки.....	144
5.2. Розрахунок аперіодичної складової й ударного струму КЗ	145
5.3. Потужність КЗ.....	148
5.4. Метод розрахункових кривих.....	149
5.5. Метод спрямлення характеристик	157
5.6. Метод кривих граничного часу	162
5.7. Розрахунок струмів КЗ у розподільчих мережах і системах електропостачання	166
5.7.1. Загальні положення	166
5.7.2. Розрахунок струму КЗ у мережах зі сталевими проводами	170
5.7.3. Нагрівання проводів струмом КЗ	172
Запитання для самоперевірки.....	173
Задачі для самостійної роботи.....	174
6. Несиметричні короткі замикання	179
6.1. Загальні вказівки.....	179
6.2. Утворення вищих гармонік	179
6.3. Застосування методу симетричних складових до розрахунку несиметричних КЗ.....	181
6.4. Однофазне КЗ на землю	188
6.5. Двофазне КЗ на землю	192
6.6. Двофазне КЗ	196
6.7. Правило еквівалентності прямої послідовності	198
6.8. Розподіл струмів і напруг під час несиметричного КЗ	200
6.9. Трансформація симетричних складових струмів і напруг	205
6.10. Порівняння струмів різних видів КЗ.....	212
6.11. Комплексні розрахункові схеми.....	215

6.12. Епюри напруг	216
6.13. Застосування практичних методів	
до розрахунку несиметричних КЗ.....	218
6.13.1. Розрахунок початкового значення періодичної	
складової струму КЗ.....	218
6.13.2. Розрахунок несиметричних КЗ методом спрямлення	220
6.13.3. Розрахунок несиметричних КЗ методом кривих	223
6.14. Просте замикання на землю.....	226
Запитання для самоперевірки	227
Задачі для самостійної роботи	229
Список літератури	233