МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**ЗЄЛЄНОВ ЄГОР АНДРІЙОВИЧ**

УДК 621.311

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Застосування сучасних пристроїв релейного захисту і автоматики в міських електричних мережах**

(тема роботи)

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\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім’я, по батькові)

к.і.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання

Житомир – 2023

**АНОТАЦІЯ**

Зєлєнов Є.А. Застосування сучасних пристров релейного захисту і автоматики в міських електричних мережах. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В роботі проведений аналіз стану системи релейного захисту міських електричних мереж. Здійснено порівняльний аналіз електромеханічних та мікропроцесорних реле.

Обґрунтовано параметри системи енергопостачання. Здійснено визначення значення струмів короткого замикання у всіх місцях (за схемою) установки захисту (місцях контролю струму захистів) у максимальному та мінімальному режимах роботи електричної системи при ушкодженнях у розрахункових точках. Наведено використання мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики на базі «Діамант».

**Ключові слова:** релейний захист,мікропроцесорніпристрої, електричні мережі.

**ABSTRACT**

Zelenov E.A. Construction of current devices for relay protection and automation in local electrical networks. Qualification work for obtaining Master's Degree in specialty 141 - Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The work of carrying out an analysis of the relay protection system of the electrical circuits. A regular analysis of electromechanical and microprocessor relays has been completed.

The parameters of the energy supply system have been adjusted. The value of short-circuit currents has been determined in all places (behind the circuit) of the protection system installation (in places for controlling the flow of protection) in the maximum and minimum operating modes of the electrical system with care at the breakpoints. The installation of microprocessor devices for relay protection and automation based on “Diamant” has been carried out.

Key words: relay protection, microprocessor devices, electrical connections.

**ЗМІСТ**

|  |  |
| --- | --- |
| ВСТУП | 4 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ МІСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ | 7 |
| * 1. Аналіз структури та особливості конструктивного виконання міських електричних мереж | 7 |
| * 1. Пристрої релейного захисту та автоматики, що застосовуються в міських електричних мереж | 10 |
| * 1. Захист основного обладнання РП, ТП, живлення та розподільних ліній електропередачі | 13 |
| * 1. Висновки по розділу 1 | 14 |
| РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ | 15 |
| 2.1. Порівняльний аналіз електромеханічних та мікропроцесорних реле | 15 |
| 2.2. Мікропроцесорні засоби релейного захисту | 15 |
| 2.3. Мікропроцесорний релейний захист для інтелектуальної мережі | 18 |
| 2.4. Висновки по розділу 2 | 19 |
| РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИБРАНИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ | 20 |
| 3.1. Обґрунтування параметрів системи енергопостачання | 20 |
| 3.2. Струми короткого замикання | 21 |
| 3.3. Обґрунтування використання мікропроцесорних пристроїв РЗА на базі «Діамант» | 34 |
| 3.4. Висновки по розділу 3 | 37 |
| ВИСНОВКИ | 38 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 39 |

**ВСТУП**

У релейному захисті протягом останнього десятиліття стало широко застосовуватися мікропроцесорна техніка. Це обумовлено суттєвими перевагами мікропроцесорного захисту порівняно з електромеханічними та електронними. Принципи побудови та алгоритми мікропроцесорного захисту багато в чому відрізняються від застосовуваних в електромеханічних та електронних захистах через суттєву різницю технічної основи та способів обробки інформації.

Нові можливості мікропроцесорної техніки дозволяють реалізувати низку функцій, які неможливо було здійснити раніше.

Живлення споживачів, що знаходяться на території міст, здійснюють спеціальні електричні мережі. Вони мають свої характерні особливості та особливо повно дані особливості проявляють себе при споруджені електричних мереж мегаполісів. В даний час мережі формують спеціальні системи електропостачання міст.

Система електропостачання міста складається з електричних мереж різних напруг. Дані мережі розташовуються на території міста та забезпечують безперебійне електропостачання споживачів електричної енергії. Мережі напругою 35 – 110 кВ і вище відносяться до мереж, а напругою 0,4 та 6 – 10 кВ до розподільчих мереж. У систему електропостачання міста входять електричні мережі 35 – 110 кВ для електропостачання великих споживачів. Вони у свою чергу пов'язані з мережами 220 – 330 кВ енергосистеми. Живлення більшості споживачів здійснюється розподільчою мережею напругою 6 – 10 кВ, а для живлення побутових споживачів використовується напруга 0.4 кВ.

Безперервне зростання енергоспоживання міст потребує постійного розвитку та покращення електричних мереж. Це сприяє зростанню та розгалуженості електричної мережі. Що тягне за собою зростаючу кількість аварій внаслідок дій зовнішніх та внутрішніх факторів, таких як погодні явища, старіння обладнання та невірні дії оперативного персоналу. Внаслідок аварій, відбувається порушення нормальної роботи частини або всієї міської мережі, що супроводжуються недовідпуском електричної енергії споживачам та зниженням її якості, що спричиняє собою матеріальні збитки у вигляді недовідпустки продукції або руйнування основного устаткування. Для ліквідації більшості аварій та недопущення їх розвитку необхідне швидке відключення пошкодженої ділянки електричної мережі за допомогою пристроїв релейного захисту.

За весь час розвитку релейного захисту алгоритми їх роботи не змінилися, змінювалась лише елементна база та методи реалізації захисту.

Пристрої на мікропроцесорній основі мають свої особливості. Вони компактні, а спеціальне програмне забезпечення реалізує роботу логіки даних пристроїв. Конструктивно їх виконують із одного чи кількох мікропроцесорів, вихідних реле, вимірювальних перетворювачів та дискретних входів. Такий варіант виконання дозволив розподілити в одному корпусі різні види захистів і зв'язати їх на програмному рівні, що дозволило зменшити витрати на матеріали для їх виготовлення та встановлення.

Конструкція цифрових захистів дозволяє уніфікувати дані пристрої та випускати їх з однотипним програмним забезпеченням. Це спрощує їх подальшу експлуатацію на об'єктах електропостачання великою кількістю мікропроцесорних захистів із різними функціями. За допомогою програмного забезпечення можна задавати та змінювати існуючі уставки та налаштування, а також змінювати функції захисту без зміни до схем. Всі повідомлення про роботу пристрою в нормальних та аварійних режимах, крім того осцилограми записуються за допомогою вбудованого реєстратора аварійних та експлуатаційних подій. Завдяки цьому можна проводити більш точний аналіз роботи захистів та аварійних ситуацій.

Оскільки міська мережа дуже широка та розгалужена, то при розрахунку уставок захисту виникають проблеми. Вони полягають у тому, що ланцюг від джерела до місця пошкодження складається з безлічі елементів і швидкодія релейного захисту впирається у конструктивні особливості самого реле, що у свою чергу тягне за собою неминуче збільшення часу знаходження електроустановок під великим струмом у разі аварії.

Мікропроцесорні пристрої релейного захисту більш досконалі у плані швидкодії та дозволяють більш точно відбудувати ступені селективності, що знижує час знаходження обладнання під великим струмом.

Актуальність роботи полягає в тому, що спостерігається тенденція до поступового витіснення електромеханічних реле та переходу на більш сучасні пристрої захисту.

Це пов'язано з тим, що випуск електромеханічних реле практично зупинено, а реле, що перебувають в експлуатації, вже морально і фізично застаріли і з кожним роком відсоток аварій через неправильні дій електромеханічного релейного захисту лише зростатиме.

**Отже, метою дослідження** є особливості застосування сучасних пристроїв захисту і автоматики в міських електричних мережах.

**Об'єктом дослідження** є ділянка міської електричної мережі, що знаходиться в обслуговуванні АТ «ЖИТОМИРОБЛЕНЕРГО». Дана ділянка включає в себе 2 підстанції з вищою напругою 110 кВ, кілька розподільчих пунктів та трансформаторних підстанцій із вищою напругою 10 кВ.

**Предметом дослідження** є пристрої релейного захисту та автоматики, що перебувають у експлуатації у міських електричних мережах.

**Публікації**:

**Зєлєнов Є.А.** Мікропроцесорні засоби релейного захисту. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С.132-135.

**Зєлєнов Є.А.** Мікропроцесорний релейний захист для інтелектуальної мережі. матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Інженерні процеси та системи». 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. с.142-145.

**Зєлєнов Є.А.** Пристрої релейного захисту та автоматики, що застосовуються в міських електричних мереж. Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 224-227.

**Обсяг та структура роботи.** Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 40 сторінкці машинописного тексту, містить 21 таблицю, 10 рисунків, списку використаних джерел з 15 найменувань.

**РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ МІСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

**1.1 Аналіз структури та особливості конструктивного виконання міських електричних мереж**

«Забезпечення безперебійної роботи споживачів електроенергії (СЕ) пов'язане з підвищенням технічного рівня та надійності пристроїв релейного захисту та автоматики (РЗА), впровадження комплексної автоматизації управління електротехнологічними процесами, що характеризуються єдністю та безперервністю режимом роботи, на основі широкого використання новітніх досягнень науки та техніки. Релейний захист систем розподілу електроенергії монтуються автономними пристроями, які реагують на різноманітні пошкодження і відключають СЕ від решти непошкодженої частини живлячих елементів електроенергетичної системи (ЕЕС). До основних вимог РЗА відносяться: надійність, швидкість спрацьовування, селективність та чутливість релейного захисту». [4]

Пристрої РЗ використовуються з метою забезпечення можливого найменшого часу відключення короткого замикання (КЗ) для збереження безперебійної роботи непошкодженої частини ЕЕС (забезпечення сталої роботи електричної системи та електроустановок споживачів, можливість відновлення нормальної роботи пристроїв автоматичного повторного включення (АПВ) та включення резерву (АВР), самозапуску електродвигунів та ін.) та обмеження області і ступеня пошкодження.

При розрахунку параметрів релейного захисту системи електропостачання поділяються на шість рівнів [2].

«УР1 – окремі електроприймачі, пристрій (верстат) з багаторуховим електроприводом або група електроприймачів, зв'язаних технологічно та територіально та утворюють єдиний виріб, що характеризується паспортною потужністю.

УР2 – щити розподільні напругою до 1 кВ змінного струму та до 1,5 кВ постійного струму, щити управління, розподільні шафи, озподільні пристрої, складання, шинопроводи та магістралі.

УР3 – щити низької напруги трансформаторної підстанції 10(6)/0,4 кВ.

УР4 – шини розподільної підстанції (РП) 10(6) кВ.

УР5 – шини головної знижувальної підстанції (ГПП) 10(6) кВ.

УР6 – межі розділу підприємства та енергосистеми 110, 150, 220 кВ. Рівень пов'язаний лініями електропередач, які приєднані до джерел живлення енергосистеми: районних та вузлових підстанцій енергосистеми, розподільних пристроїв (РП) ТЕЦ, ТЕС, ГЕС, АЕС». [5]

Системи електропостачання міста його структура, схеми та параметри формуються з урахуванням природних умов району, технічних характеристик електроенергетичної системи, технологічного складу покупців електроенергії, генерального проєкту забудови та формування міста.

Систему електропостачання мають розвивати як за трансформаторної потужності підстанцій та пропускної можливості ліній електропередач, так і за напругами мереж живлення.

Електричні мережі повинні будуватись з урахуванням максимального оснащення економічності, необхідної надійності електропостачання, дотримання певних норм якості електроенергії, надійності обслуговування та потенціалу майбутнього розширення і розвитку.

Електричні мережі напругою 110 кВ і вище є джерелом живлення міст і складаються, як правило, з теплоелектроцентралей та понижуючих вузлових підстанції, електроенергетичних систем у тому числі кільцевих мереж з основними підстанціями, лініями та підстанціями глибокого введення.

Головна понижувальна підстанція (ГПП) і підстанція глибокого вводу (ПГВ) та РП у містах використовуються як пункти прийому та перетворення електричної енергії. ГПП, як і ПГВ здійснюють прийом та перетворення електричної енергії від джерел живлення на високому класі напруги 110-220 кВ. Для живлення енергоємних ділянок міста будуються ПГВ.

Використання напруги 35 кВ підвищує капіталовкладення і втрати у мережах. В результаті в системах електропостачання міста, що проектуються відмовляються від його використання. Переважною системою електропостачання міських мереж є 110/10 кВ чи 220/10 кВ.

Мережі 110 і 220 кВ будуються у вигляді дволанцюгового кільця, навколо міста та виконують роль збірних шин. Кабельні лінії 110 кВ виконують глибокі введення в райони із щільною забудовою. При відключення різних елементів мережі пропускна здатність кільця 110 кВ повинна гарантувати перетікання потужності в нормальному та після аварійному режимах. Для розподілу потужності в кільці необхідно чергувати приєднання центрів живлення до мережі 110 кВ та підстанцій 110/10 кВ.

Дана схема надає можливість подальшого розширення без кардинальних змін.

Для збереження архітектурно-естетичного вигляду, а також при невеликих території та обмежених умова міської забудови встановлюють підстанції закритого типу.

Одним із головних питань при побудові схеми електропостачання міста представляється найменша кількість трансформацій, це означає що число перетворень між електропостачальною та споживчою мережами має бути мінімальним.

Схема електропостачання міста має забезпечувати можливість поетапного її розвитку При конструюванні системи електропостачання міста потрібно використовувати легкі схеми як живильних, так і розподільних мереж. Підстанції необхідно розміщувати у центрах електричних навантажень споживачів.

Для більшості міст система напруг 110/10 кВ та 220/10 кВ є найбільш доцільною, а для найбільших міст система 330/110/10 кВ.

***Електропостачальні мережі***

«Мережі 110 кВ та вище великих міст мають бути пов'язані по мережі зовнішнього електропостачання з двома чи більше незалежними джерелами живлення енергосистеми через різноманітні опорні підстанції. Дана підстанція, одержує електроенергію від джерела живлення та розподіляє її по кільцевої або магістральної мережі та ПГВ. Лінії зв'язку кільцевої мережі з ОПС енергосистеми повинні вибудовуватися різними трасами». [8]

У мережах 110 кВ рекомендоване з'єднання однієї лінії електропередачі з двостороннім живленням, як правило, трьох або більше підстанцій за умови збереження живлення споживачів при аварійному відключення будь-якої ділянки лінії. «При проєктуванні схеми електропостачальних мереж великих міст додатково до кільцевої магістральної мережі напругою 110 кВ та вище з двостороннім живленням міста необхідно враховувати спорудження ПГВ напругою 110 кВ та вище для живлення окремих районів міста, що не охоплюються кільцевою мережею позначеної напруги. Залежно від районних умов живлення ПГВ може враховуватися від різних секцій шин однієї чи різних ОПС, а також відгалуженнями від кільцевої мережі з двостороннім живленням. ПГВ потрібно виконувати двотрансформаторними з підключенням за схемою блоків лінія – трансформатор». [8]

При розробці електропостачальних мереж необхідно враховувати обмеження транзитних перетоків через міську систему електропостачання.

***Живильні та розподільчі мережі 10 кВ***

Напруга 10 кВ прийнята як основна середня напруга живлення та розподільних міських електричних мереж. Живлячі мережі складаються з ліній електропередач від шин 10 кВ опорних підстанцій або підстанцій глибокого введення до шин 10 кВ розподільчих пунктів та зв'язків між розподільчими пунктами. Шини 10 кВ опорних підстанцій або підстанцій глибокого введення називають центрами живлення. Завдання живлячих електричних мереж – це концентрована передача потужності на розподільні пункти до районів, віддалених від центрів живлення зазначених підстанцій. Розподільні пункти здійснюють прийом електричної енергії від центрів живлення та її розподіл на напрузі 10 кВ.

Розподільча мережа 10 кВ це поєднання радіальних, кільцевих і променевих (магістральних) схем живлення міських розподільчих підстанцій.

Для електропостачання споживачів першої категорії рекомендовано наступні схеми електропостачання: радіальна, двопроменева з одностороннім живленням, двопроменева з двостороннім живленням.

Поєднання петлевих та кільцевих схем 10 кВ вважається головним принципом формування розподільчої мережі 10 кВ для електроприймачів другої категорії, це забезпечує двостороннє живлення кожної трансформаторної підстанції, та петлевих схем 0,4 кВ. Для електропостачання ділянок міста з електроприймачами першої та другої категорій рекомендовано використання на напрузі 10 кВ комбінованої петльової двопроменевої схеми із двостороннім живленням.

«Поєднання петлевих ліній 10 кВ та радіальних ліній 0.4 кВ до споживачів є головним принципом формування розподільчої мережі 10 кВ для електроприймачів третьої категорії. Для електропостачання споживачів з електроприймачами третьої категорії рекомендовано використання однотрансформаторних підстанцій, що живляться за петлевими схемами» [8].

Петльові схеми 0.4 кВ у поєднанні з петлевими схемами 10 кВ рекомендуються до застосування електроприймачів другої категорії. При цьому лінії 0.4 кВ можуть з'єднуватися з однією або декількома ТП.

Живлення електроприймачів третьої категорії рекомендовано здійснювати лінією з одностороннім живленням.

Розподільні мережі 0.4 кВ необхідно виконувати з глухо заземленою нейтраллю.

**1.2. Пристрої релейного захисту та автоматики, що застосовуються в міських електричних мереж**

В даний час на об'єктах електроенергетики м. Житомира можна зустріти досить різноманітний парк пристроїв релейного захисту та автоматики. Основну їх масу складають електромеханічні реле, далі йдуть мікропроцесорні і зовсім небагато електростатичні. Такий різновид пов'язаний з тим, що виконувалася часткова реконструкція підстанції та не було можливості заміни устаткування, що вийшло з ладу, на аналогічне.

Релейний захист – це невід'ємна частина будь-якої енергосистеми.

Основним завданням системи захисту є швидке відновлення несправності, так щоб непошкоджені частини система могли продовжити функціонування.

***Електромеханічні реле***

Процес роботи електромеханічного реле заснований на переміщенні механічних елементів під дією електричного струму, що проходить по обмотках реле.

«Електромагнітна енергія в реле перетворюється на механічну енергію, яка здійснює переміщення рухомої частини. В основному використовується кутове переміщення. За допомогою таких електромеханічних систем можна створювати реле з однією або декількома діючими електричними величинами. У реле з однією діючою величиною відбувається порівняння крутного моменту із заданим протидіючим моментом, як правило, створюється пружиною, до них відносяться вимірювальні та логічні реле. Необхідно також враховувати момент, що визначається тертям, який теж запобігає спрацюванню реле, але на відміну від останнього заважає її поверненню». [9]

***Електростатичне реле***

Напівпровідникова елементна база використовується для виконання всіх багатофункціональних елементів та органів релейного захисту. Її зовнішньою характерною рисою є відсутність рухливих елементів та контактів.

Важливе значення при використанні напівпровідникових схем надається здійсненню логічної частини, тому що вимірювальні органи не мають контактів, які б мали можливість реалізовувати логічні операції. Першими стали застосовуватися діодні схеми порівняння. Далі з'явилися діодно-транзисторні та транзисторні захисту, але від них відмовилися. Потім почали впроваджувати інтегральну мікроелектроніку, модернізація якої розпочалася в 60-х роках.

Інтегральні мікросхеми є мікроелектронні вироби, що виробляють деякі функції перетворення і обробки сигналів та мають високу щільність пов'язаних елементів у кристалі.

Залежно від завдання інтегральні схеми поділяються на аналогові та цифрові.

***Мікропроцесорні реле***

Більше трьох десятиліть тому почали виробляти та використовувати для виконання функцій захисту енергооб'єктів; мікропроцесорні пристрої.

«За даний час було покращено структуру їх апаратної частини, значно підвищено експлуатаційні характеристики. Мікропроцесорний релейний захист замінює аналогову та електромеханічну, так як даному процесу сприяє ряд переваг, які мають сучасні мікропроцесорні пристрої РЗА:

- проведення самодіагностики (автоматичного контролю справності окремих модулів та апарату в цілому з індикацією стану та блокуванням виходів пристрою при його несправності) та перевірки первинного обладнання;

- автоматична реєстрація режимів, подій та аварійних процесів, що дає змогу зменшити час на з'ясування причин аварій;

- полегшення розрахунку уставок, збільшення їх точності та достовірності вимірювань, зменшення ступенів селективності, що зменшить час дії захисту та можливість неабиякого пошкодження обладнання;

- мала споживана потужність у ланцюгах живлення та вимірювання (в основному, немає потреби перевірки точності трансформаторів струму та напруги);

- можливість об'єднання пристроїв РЗА у складі АСУ з забезпеченням дистанційної зміни уставок, контролю режиму роботи енергооб'єкта та стану самого УРЗ, передачі аварійних процесів на АРМ;

- «виконання нових функцій та робочих можливостей (облік ресурсу можливості вимикача, зберігання декількох комплектів конфігурації та уставок, відновлення форми кривої струму при насиченні трансформаторів струму тощо)». [6]

***Види пошкоджень***

Особливо важкими видами пошкоджень енергосистеми є короткі замикання. Найнебезпечнішими та руйнівними вважаються трифазні КЗ. При розрахунку струмів КЗ використовують зумовлені припущення.

Як правило не враховують перехідний опір у місці КЗ та активну складову внутрішнього опору генератора, а опору всіх трьох фаз вважають однаковими. З урахуванням цих припущень трифазне КЗ вважається симетричним. Мінімальну небезпеку становлять двофазні КЗ. При даному виді КЗ струм у непошкодженій фазі майже відсутній, а у пошкоджених фазах струми рівні за значенням. «У мережах з компенсованою або ізольованою нейтраллю ОЗЗ короткими не вважаються так як провідність в місці пошкодження не шунтує джерело живлення та як правило не потребують швидкого вимкнення. Такий ненормальний режим роботи мережі називають однофазним замиканням на землю (ОЗЗ)». [15]

***Несправності***

Під час обслуговування пристроїв релейного захисту для кожного типу реле трапляються специфічні несправності. Основні несправності, що зустрічаються у електромеханічних реле це нагар контактів через що, не відбувається їх замикання, несправність ізоляції реле, спрацювання зворотних пружин та механічної частини через що відбувається неправильне або хибне спрацьовування релейного захисту (залипання механічної частини) та відмова роботи реле через температуру навколишнього середовища.

Для реле прямої дії найпоширенішими проблемами є несправність ізоляції та відмова роботи приводу в якому вони встановлені. Пов'язано це з тим, що котушки реле встановлені в нижній частині приводу і мастильний матеріал потрапляє в котушки і згодом на нього осідає пил і тим самим блокує нормальний хід якоря зі штоком. Крім цього, відбувається нерівномірне ослаблення кріплення в ході чого відбувається перекіс котушки та застрягання штока у ній.

Для мікропроцесорних та електростатичних пристроїв основними несправностями є вигоряння портів, порушення ізоляції або повна поломка в основному через низьку температуру навколишнього повітря.

**1.3. Захист основного обладнання РП, ТП, живлення та розподільних ліній електропередачі**

РЗА міських електричних мереж повинно реалізовуватися з врахуванням вимог ПУЕ. Захист основного обладнання реалізовується на змінному оперативному струмі.

Пристрої релейного захисту повинні працювати за простими та надійними схемами із найменшою кількістю апаратури.

При паралельній роботі живильних ліній на приймальних кінцях повинен використовуватися максимальний струмовий спрямований захист. На радіальних лініях 10 кВ з одностороннім живленням для захисту від багатофазних замикань має встановлюватися максимальний струмовий захист. Для захисту повітряних та кабельно-повітряних ліній необхідно встановити двоступінчастий струмовий захист, де струмове відсічення – це перший ступінь, а другий – максимальний струмовий захист із витримкою часу. Пристрій автоматичного повторного включення необхідно встановлювати на повітряних та змішаних лініях. Захист фідерів від замикань на землю має реалізуватися з дією на сигнал. На лініях 10 кВ рекомендується встановлювати покажчики протікання струмів КЗ.

У розподільчих мережах 10 кВ рекомендується виконувати телемеханізацію для забезпечення контролю за станом основного обладнання та навантаження по лініях 10 кВ ЦП та РП. В якості каналів зв'язку телемеханіки рекомендується застосувати міські телефонні мережі, радіоканали, високочастотні та інші канали зв'язку. Телемеханіка повинні гарантувати можливість об'єднаної роботи з комп'ютерною технікою.

На трансформаторах рекомендується встановлювати диференціальний струмовий, максимальний струмовий і газовий захист.

Проходження струмів КЗ електричної мережі викликає перевантаження елементів та супроводжується протіканням по електрообладнанню та струмопровідним частинам підвищених струмів, викликаючи їх перегрів та швидке старіння ізоляції. Для житлових та громадських будинків основною характеристикою захисту є швидкість дії апарату захисту.

В електричних мережах житлових та громадських будинків необхідно встановлювати захист від струмів КЗ, що гарантує найменший час відключення та вибірковості дії.

Захист елементів електричних мереж та електроустановок житлових та громадських будинків напругою до 1 кВ виконуються за допомогою запобіжників, автоматичних вимикачів та пристроїв захисного відключення. Кожен апарат має як свої переваги, і недоліки.

Вставки захисних апаратів на лініях, що відходять від ТП, повинні прийматися за допустимими ПУЕ струмами навантаження для кабелів або струмів післяаварійного навантаження. Вставки апаратів захисту для ліній, що взаєморезервуються повинні вибиратися з врахуванням їхнього післяаварійного навантаження.

* 1. **Висновки по розділу 1**

В даному розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз структури та особливості побудови і конструктивного виконання міських електричних мереж.

Розглянуто пристрої релейного захисту та автоматики, що застосовуються у міських електричних мережах.

**РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ**

**2.1 Порівняльний аналіз електромеханічних та мікропроцесорних реле**

Новий мікропроцесорний захист дає нові можливості: самодіагностика та адаптація до зміни режимів; сумісність з існуючими захистами та можливість розширення функцій; швидке переналаштування параметрів спрацьовування; зменшення обсягів монтажних та налагоджувальних робіт; дистанційний зв'язок та ін.

Одним із самих спірних моментів є термін служби тих та інших захистів. За тривалістю експлуатації, пристрої РЗА на електромеханічній елементній базі мають повний термін служби 25 років, перевищивши більш ніж в два рази термін служби 12 років встановлено технічними умовами. В той час, коли середній термін служби мікропроцесорної РЗА 10 років.

Електромеханічні реле, як і раніше, є найбільш поширеним реле майже у всіх країнах світу, проте за останні 15-20 років відбулося широке поширення мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Даний перехід від електромеханічних реле до числових ретрансляторів може бути виправданий великою гнучкістю і такими характеристиками як:

* багатофункціональність;
* компактність;
* зв'язок;
* зменшений обсяг.

Мікропроцесорні блоки на підставі аналізу двох параметрів видають та запам'ятовують ще декілька додаткових даних, наприклад: причина відключення, час, струм і тривалість аварійної ситуації, векторна діаграма напруг і струмів лінії в момент вимкнення, дата відключення. Але остаточне завдання даних пристроїв – це подати сигнал на вимкнення при аварії в мережі.

**2.2 Мікропроцесорні засоби релейного захисту**

Інтенсивний розвиток цифрової техніки обумовлений широким розповсюдженням її на всі рівні автоматизації енергооб’єктів як в енергетиці, так і у всіх інших галузях промисловості.

В даний час мікропроцесорні пристрої автоматики РЗА (рис. 2.1) становлять основний напрямок розвитку релейного захисту. Окрім основної функції, аварійного відключення енергетичних систем, пристрої мають додаткову функцію з реєстрації аварійних ситуацій.

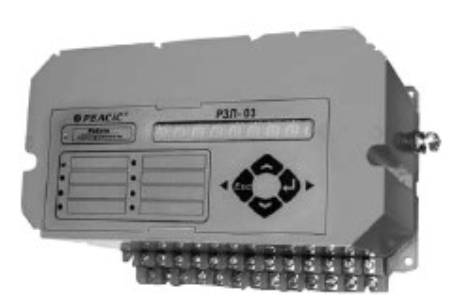


Рисунок 2.1. Мікропроцесорний пристрій релейного захисту автоматики

В деяких типах пристроїв введено додаткові режими захисту, наприклад, функція випереджального вимкнення синхронного електродвигуна при втраті стійкості та функція резервування відмови захисту та вимикача.

В таблиц 2.1. наведені переваги і недоліки мікропроцесорних пристроях релейного захисту та автоматики

Таблиця 2.1. Переваги та недоліки МУП РЗА

|  |  |
| --- | --- |
| Переваги | Недоліки |
| Зменшення експлуатаційних витрат завдяки самодіагностиці, автоматичній реєстрації режимів та подій. | Велика вартість пристрою у порівнянні з електромеханічним, що в даних умовах відіграє істотну роль. |
| Зменшення часу на з'ясування причин  аварій за рахунок реєстрації та запису | Перехід на МПУ РЗА вимагає перенавчання обслуговуючого персоналу. |
| Можливість діагностики не тільки пристроїв РЗА, а й первинного устаткування. | При включенні живлення (наприклад, після перерви в енергопостачанні) системі на МПУ потрібен час на  перезавантаження. |

Продовження таблиці 2.1.

|  |  |
| --- | --- |
| Переваги | Недоліки |
| Зниження споживання по ланцюгах оперативного постійного струму та напруги. |  |
| Зменшення витрат на будівництво, монтаж та габаритні розміри, економія на кабелях, скорочення витрат на апаратів захисту і керування. |  |
| Поліпшення контролю за станом обладнання та роботою пристроїв РЗА |  |

Необхідно також зазначити, що МПУ РЗА потребують порівняно з захистами на електромеханічних реле та інтегральних мікросхемах, конфігурування, ранжирування та параметрування.

«Розробляються та інші типи мікропроцесорних пристроїв, що дозволять реалізовувати комплексне обладнання електричних станцій, підстанцій, промислових підприємств та інших енергооб'єктів всіх рівнів напруги від 0,4 кВ пристроями релейного захисту та комплексами АСУТП. Ті, що базуються на нових досягненнях інформаційних технологій вони повністю відповідають особливим вимогам енергетики, доступні в обслуговуванні та легко впроваджуються в автоматизовані системи релейного захисту управління та контролю підстанцій та електричної частини станцій будь-якого рівня». [10]

Цифрові мікропроцесорні комплекси є інтелектуальні технічні засоби «Вони мають важливі позитивні властивості, які відсутні у аналогових пристроїв:

- багатофункціональність та малі розміри: Одне таке цифрове вимірювальне реле замінює кілька аналогових;

- дистанційні зміни та перевірка вставок з пульта управління оператора;

- адаптація до режимів енергетичної системи - автоматичне коригування вставок РЗА при зміні схеми та режиму роботи;

- безперервна самодіагностика та висока апаратна надійність;

- запам'ятовування параметрів аварійних режимів;

- передача дистанційно інформаці оператору про стан та спрацьовування пристроїв РЗА». [11]

# В основному впроваджуються пристрої таких фірм: ТОВ «АББ Автоматизація», «SIEMENS» (Німеччина), «Schneider Electric» (Франція), які пристосували пристрої до умов української енергосистеми, компанія «Rza Sistems», МПП«Іва», «Нептун», «Хартрон», ВО «Київприлад» (Україна).

**2.3 Мікропроцесорний релейний захист для інтелектуальної мережі**

Захист енергосистеми в електроенергетиці спрямований на відключення несправної частини електричної мережі від неушкодженої системи живлення.

Селективність захисту включає в себе оптимальний вибір часу для будь-яких струмів замикання, щоб скоротити поширення зон пошкоджень до мінімуму після усунення несправностей.

Інтелектуальні мережі з масивним розподільчим генератором відновлюваних джерел, які не стабільні до потужності, вони генерують двонаправлений потік потужності, який може викликати зміни напрямку та величини струмів короткого замикання. В даних умовах головними наслідками є: втрата селективності; випадання генератора із основної мережі; наявність електромеханічних перехідних процесів та динамічна нестабільність.

Несподівана втрата живлення зазвичай тягне за собою те, що ізольований генератор продовжує подавати локальне навантаження.

Крім того, генератор може генерувати підвищену напругу в певних вузлах мережі, що створює проблеми у підтримці номінальної напруги в допустимих межах, іноді також у вузлах, обладнаних трансформаторами з пристроями РПН, які, як правило, здатні регулювати напругу в діапазоні ±10%.

Наявність як генератора, так і нелінійних навантажень також створює проблеми з якістю електроенергії, особливо коли реле призначені для роботи з основною частотою струму короткого замикання

Необхідно також розглянути ще одну проблему, пов'язану із захистом інтелектуальних мереж, а саме автоматичну реконфігурацію мережі після усунення несправного сегмента лінії, що є необхідною умовою відновлення електричних служб. Реконфігурація мережі здійснюється за допомогою дистанційно керованих АПВ та автоматичних вимикачів, які, як правило, належним чином керуються системою SCADA або найкраще системою управління розподілом (СУР) для швидких дій щодо відновлення, спрямованих на скорочення розширення зони ушкоджень.

«Для запобігання змінам, що стосуються конфігурації та умов роботи інтелектуальної мережі, можна застосовувати процедури адаптивного захисту, які потребують ієрархічної конфігурації ліній зв'язку (переважно оптоволокно) для обміну інформацією з мережевими комп'ютерами та іншими інтелектуальними пристроями». [12]

У поєднанні з новими завданнями, пов'язаними з необхідністю захисту навколишнього середовища та одночасним забезпеченням необхідної енергії, скоро безліч нових технологій змінять традиційні основи електророзподілу, у тому числі системи захисту електроживлення.

Деякі з технологій, необхідні для впровадження інтелектуальних мереж вже доступні на ринку.

Базові системи ДКЗД (диспетчерський контроль та збір даних) фактично еволюціонували у бік СУР (система управління розподілом), а геопросторові інформаційні системи (ГІС) можуть бути інтегровані із системами управління аварійними ситуаціями (СУАС). Нові вдосконалені датчики дозволяють проводити точні оцінки продуктивності мережі у реальному часі.

**2.4. Висновки по розділу 2**

В даному розділі розглянуто мікропроцесорні блоки релейного захисту кількох виробників.

Зроблено порівняння функціоналу мікропроцесорних блоків релейного захисту.

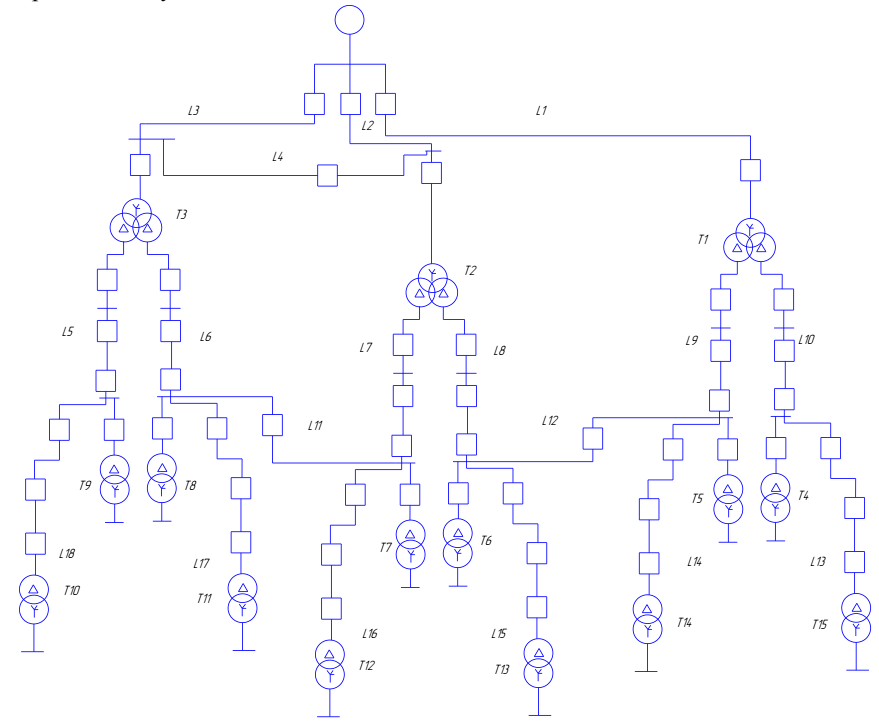
**РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИБРАНИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ**

**3.1. Обґрунтування параметрів системи енергопостачання**

Об'єктом дослідження є ділянка міської електричної мережі що знаходиться в обслуговуванні АТ «ЖИТОМИРОБЛЕНЕРНО». Предметом дослідження є пристрої релейного захисту та автоматики, що перебувають у експлуатації у міських електричних мережах.

Принципова схема ділянки електричної мережі представлена рис. 3.1.

Параметри силових трансформаторів та ліній електропередач представлені у табл. 3.1. та 3.2.

Рисунок 3.1 – Принципова схема електропостачання міської електричної мережі

Таблиця 3.1 – Параметри силових трансформаторів

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Значення параметру | | | | | | | |
| Потужність трансформаторів, МВ·А | Т 1 | Т 2 | Т 3 | Т 4 | Т 5 | Т 6 | Т 7 | Т 8 |
| 40000 | 40000 | 40000 | 25000 | 0, 63 | 0, 63 | 0, 63 | 0, 63 | 0, 4 |
|  | Т 9 | Т 10 | Т 11 | Т 12 | Т 13 | Т 14 | Т 15 |  |
|  | 0, 4 | 0, 63 | 0,4 | 0, 25 | 0, 3 | 0,4 | 0, 25 |  |

Таблиця 3.2 – Параметри лінії електропередач

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Значення параметру | | | | | | | | |
| Довжина лінії, км | Л1 | Л2 | Л3 | Л4 | Л5 | Л6 | Л7 | Л8 | Л9 |
| 40 | 40 | 35 | 35 | 20 | 16 | 14 | 3.24 | 3.24 | 2.48 |
| Л 10 | Л 11 | Л 12 | Л 13 | Л 14 | Л 15 | Л 16 | Л 17 | Л 18 |
| 2.48 | 0.88 | 1.14 | 1.34 | 1.25 | 0.96 | 2.18 | 1.54 | 1, 94 |

Дослідження нормальних режимів роботи міської електричної мережі (рис. 3.1) необхідно зробити з метою знаходження максимальних значень робочих струмів у місцях встановлення релейного захисту.

Так як в мережі одне джерело живлення, і вона не має ділянок з замкнутим кільцем, то захист необхідно монтувати на початку контрольованих об'єктів із боку джерела живлення.

Максимальне значення робочого струму в лініях визначається на основі наступних умов:

- живлення всіх елементів аналізованої електричної мережі здійснюється по лініях Л1, Л2 та Л3, а лінія Л4 знаходиться у гарячому резерві;

- всі трансформатори 110/10 кВ працюють з номінальним навантаженням.

Максимальний робочий струм у лініях – це максимальний робочий струм трансформаторів Т1, Т2 та Т3. Коефіцієнт допустимого навантаження трансформаторів допускається до 40% від номінальної потужності.

Максимальний робочий струм у лініях 10 кВ, так само виникає під час роботи трансформаторів із перевантаженням.

**3.2.Струми короткого замикання**

Необхідно визначити значення струмів короткого замикання у всіх місцях (за схемою) установки захисту (місцях контролю струму захистів) у максимальному та мінімальному режимах роботи електричної системи при ушкодженнях у розрахункових точках. За розрахункові точки приймаються шини всіх підстанцій, місця приєднань трансформаторів та затискачі обмоток 0.4 кВ даних трансформаторів. «Розрахунок коротких замикань на шинах з номінальною напругою вище 1000 В ведеться у відносних одиницях, але з боку нижче 1000 В в одиницях. Схему, що має трансформаторні зв'язки, замінюють еквівалентною електричнозв'язаною схемою, параметри якої наведені до єдиного ступеня напруги та єдиної базисної потужності. Перед початком основних розрахунків струмів короткого замикання необхідно скласти еквівалентну схему заміщення та розрахувати її параметри за типовими формулами». [8]

Параметри схеми знаходиться за стандартними типовими формулами для відповідного елемента ланцюга. Для цього розрахунку приймемо SБ рівним 1000 МВА.

Розрахунок параметрів системи:

. (3.1)

Розрахунок параметрів трансформатора Т1:

. (3.2)

Розрахунок параметрів кабельних і повітряних ліній:

(3.3)

За формулами 3.1 – 3.3 проведемо розрахунок параметрів схеми заміщення.

Для системи:

.

Для трансорматорів:

.

Для ліній електропередач:

.

Інші результати розрахунків еквівалентного опору ліній занесемо до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати розрахунків еквівалентного опору ліній

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Х | C | Т1 | Т2 | Т3 | Л 1 | Л 2 | Л 3 | Л 4 | Л 5 | Л 6 | Л 6 |
| 0.125 | 5 | 5 | 8 | 1.168 | 1.168 | 1.314 | 0.439 | 1.55 | 1.55 | 2.26 |
| Л 8 | Л 9 | Л 10 | Л 11 | Л 12 | Л 13 | Л 14 | Л 15 | Л 16 | Л 17 | Л 18 |
| 2.26 | 1.732 | 1.732 | 0.614 | 0.785 | 0.953 | 0.885 | 0.698 | 1.554 | 1.095 | 1, 412 |

Далі знайдемо еквівалентний опір для кожної точки КЗ рис. 3.2

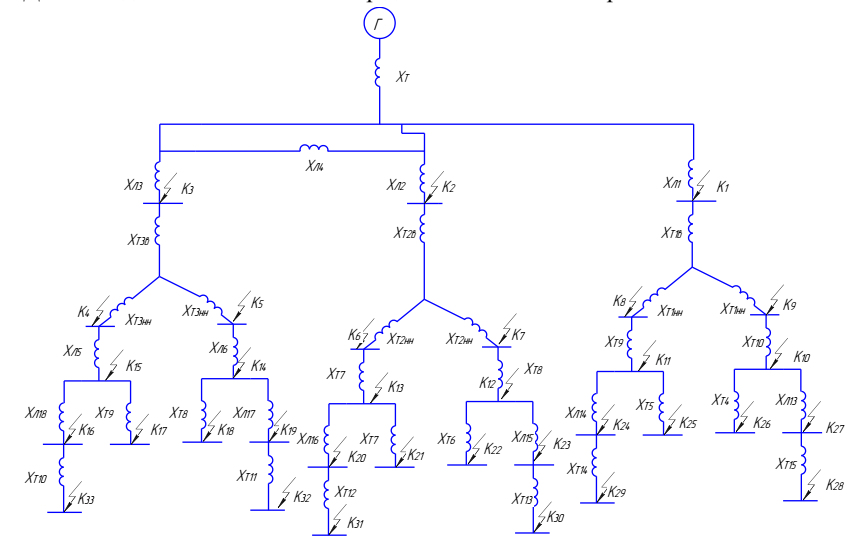


Рисунок 3.2. Еквівалентна схема електричної мережі із зазначенням точок КЗ

Еквівалентний опір рівний:

, (3.4)

.

Інші результати розрахунків занесемо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунків еквівалентного опору

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Х | C | Т1 | Т2 | Т3 | Л 1 | Л 2 | Л 3 | Л 4 | Л 5 | Л 6 | Л 6 |
| 1.293 | 1.293 | 1.439 | 6.293 | 6.293 | 6.293 | 6.293 | 9.435 | 9.435 | 7.794 | 7.794 |
| Л 8 | Л 9 | Л 10 | Л 11 | Л 12 | Л 13 | Л 14 | Л 15 | Л 16 | Л 17 |  |
| 8.552 | 8.552 | 11.17 | 11.17 | 8.745 | 8.678 | 9.252 | 10.105 | 12.264 | 12.581 |  |

Точки КЗ з 16-21 та з 28-33 знаходяться на стороні 0.4 кВ. На цьому етапі розрахунки струмів КЗ ведуться в іменованих одиницях за типовими формулами.

Для трансформаторів необхідно визначити повний та активний опір і потім визначити реактивний:

, (3.5)

, (3.6)

, (3.7)

де приймаємо для ступеня 0,4 кВ.

Далі визначаємо опір трансформаторів для сторони 0,4кВ, результати заносимо в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. – Опори трансформаторів для сторони 0,4 кВ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Т 4 | Т 5 | Т 6 | Т 7 | Т 8 | Т 9 | Т 10 | Т 11 | Т12 | Т 13 | Т 14 | Т 15 |
|  | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.019 | 0.019 | 0.015 | 0.019 | 0.029 | 0.015 | 0.019 | 0.03 |
|  | 0.0077 | 0.0077 | 0.0077 | 0.0077 | 0.015 | 0.015 | 0.0077 | 0.015 | 0.028 | 0.0077 | 0.015 | 0.025 |
|  | 0.012 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.013 | 0.017 | 0.013 | 0.013 | 0.017 |

Крім цього, на стороні 0.4 кВ додаються опір автоматів, трансформаторів струму та контакторів:

Ом, Ом – опір автоматів;

Ом, Ом – опір трансформаторів струму;

Ом – опір контакторів.

Для визначення обчислених опорів до сторони 0.4 кВ необхідно помножити їх на .

Для розрахунку еквівалентного опору для точок КЗ необхідно визначити еквівалентний реактивний та активний опір і за ними знайти повний еквівалентний опір точки КЗ:

, Ом. (3.8)

, Ом. (3.9)

, Ом. (3.10)

Інші результати розрахунку еквівалентного опору занесемо в таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 - Опір трансформаторів з боку 0.4 кВ.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Z | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.033 | 0.033 | 0.028 | 0.033 | 0.044 | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.033 | 0.033 |
|  | 0.0243 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.03 | 0.03 | 0.024 | 0.03 | 0.04 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.03 | 0.03 |
| X | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.015 | 0.015 | 0.014 | 0.014 | 0.019 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.015 | 0.015 |

Решта результатів розрахунку еквівалентного опору наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Опори трансформатора для сторони 0,4 кВ.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Z | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.033 | 0.033 | 0.028 | 0.033 | 0.044 | 0.028 | 0.033 | 0.044 |
| R | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.024 | 0.03 | 0.03 | 0.024 | 0.03 | 0.04 | 0.024 | 0.03 | 0.04 |
| X | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.015 | 0.015 | 0.014 | 0.014 | 0.019 | 0.015 | 0.015 | 0.019 |

***Розрахунок струмів короткого замикання***

Розрахуємо струми трифазного короткого замикання.

Для сторін 110 і 10 кВ:

, (3.11)

де *ЕС* = 1,  *ХЕ* – еквівалентний опір ланцюга, далі точки короткого замикання. Для сторони 0,4 кВ:

, (3.12)

Для перетворення в іменовані одиниці необхідно отримане значення струму помножити на базовий струм кроку,отримаємо наступну формулу:

, (3.13)

де *UH*– номінальна напруга степеня.

Отже, формула знаходження струму замикання буде мати наступний вигляд:

, (3.14)

Розрахуємо струми трифазного короткого замикання на стороні 110 кВ. Базовий струм для сторони 110 кВ буде становити:

Трифазний струм замикання на стороні 110 кВ:

.

Базовий струм для сторони 110 кВ становить:

Трифазний струм замикання на стороні 10 кВ:

.

Решту результатів розрахунку трифазного струму короткого замикання на стороні 10 кВ наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку струму трифазного короткого замикання на стороні 10 кВ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ІК1 | ІК2 | ІК3 | ІК4 | ІК5 | ІК6 | ІК7 | ІК8 | ІК9 | ІК10 | ІК11 |
| 3.885 | 3.885 | 3.491 | 8.739 | 8.739 | 8.739 | 8.739 | 5.827 | 5.827 | 7.057 | 7.057 |
| ІК12 | ІК13 | ІК14 | ІК15 | ІК22 | ІК23 | ІК24 | ІК25 | ІК26 | ІК27 |  |
| 6.431 | 6.431 | 4.924 | 4.924 | 6.289 | 6.289 | 5.945 | 5.443 | 4.485 | 4.372 |  |

Трифазний струм короткого замикання на стороні 0,4 кВ:

Інші результати розрахунків трифазного струму короткого замикання на стороні 0,4 кВ наведені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9. – Результати розрахунків струму трифазного короткого замикання на стороні 0,4 кВ

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ІК16 | ІК17 | ІК18 | ІК19 | ІК20 | ІК21 |
| 8.694 | 8.6944 | 8.675 | 8.675 | 7.175 | 7.175 |
| ІК28 | ІК29 | ІК30 | ІК31 | ІК32 | ІК33 |
| 8.670 | 7.211 | 5.362 | 8.635 | 7.157 | 5.334 |

Знаходимо ударний струм короткого замикання за наступною формулою:

, (3.15)

где: *K*у=(1+ – ударний коефіцієнт, що визначається за кривими;

*Тк*- константа часу загасання аперіодичної складової струму короткого замикання;

– кут зсуву фаз напруги і періодична складова струму короткого замикання.

З метою введення в схему СЕС необхідних активних опорів, які можна знайти за «таблицею середніх коефіцієнтів *(X/*R*)CP*, далі знаходимо *R»* [8]:

, (3.16)

де *X* – реактивний опір елементу.

Активний опір елементів СЕС дорівнює:

Інші результати розрахунків активного опору наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати розрахунків активного опору

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| R | C | Т1 | Т2 | Т3 | Л 1 | Л 2 | Л 3 | Л 4 | Л 5 | Л 6 | Л 7 |
| 0.004 | 0.25 | 0.25 | 0.534 | 0.147 | 0.147 | 0.168 | 0.056 | 1.876 | 1.876 | 2.824 |
| Л 8 | Л 9 | Л 10 | Л 11 | Л 12 | Л 13 | Л 14 | Л 15 | Л 16 | Л 17 | Л 18 |
| 2.824 | 2.164 | 2.164 | 0.767 | 0.921 | 1.19 | 1.106 | 0.875 | 1.942 | 1.369 | 1.765 |

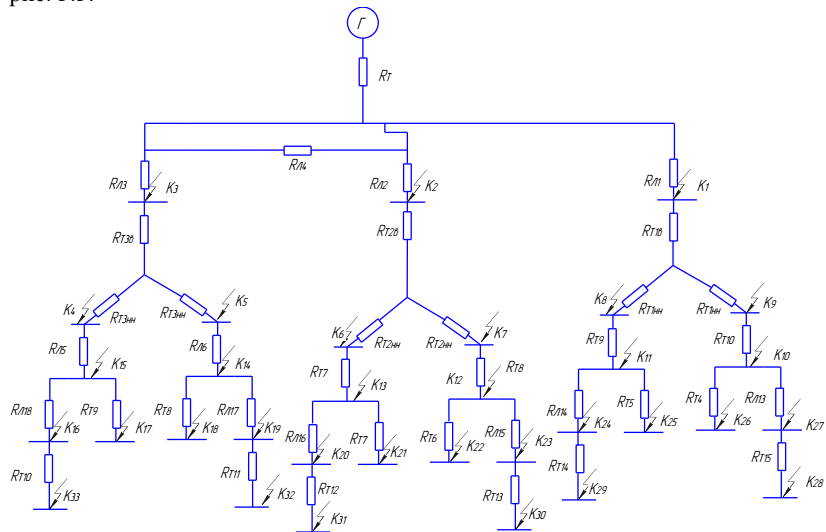
Визначимо еквівалентний опір для кожної точки короткого замикання рис. 3.3. 

Рисунок 3.3. – Схема заміщення для знаходження ударного струму короткого замикання

Еквівалентний опір мережі дорівнює:

, (3.17)

Решта результатів розрахунків еквівалентного опору наведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати розрахунків еквівалентного опору

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 | R11 |
| 0.150 | 0.150 | 0.169 | 0.41 | 0.41 | 0.41 | 0.41 | 0.703 | 0.703 | 2.276 | 2.276 |
| R12 | R13 | R14 | R15 | R22 | R23 | R24 | R25 | R26 | R27 |  |
| 3.224 | 3.224 | 2.866 | 2.866 | 3.466 | 3.382 | 4.099 | 5.165 | 4.234 | 4.63 |  |

За формулою визначаємо постійну часу загасання аперіодичної складової струму короткого замикання:

, (3.18)

де *X* і  *R -* активний і реактивний опір точки короткого замикання;

– кутова частота, що дорівнює 314 рад/с.

Константа часу загасання аперіодичної складової струму короткого замикання дорівнює:

Решта результатів розрахунків часу постійного загасання аперіодичної складової струму короткого замикання наведені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Результати розрахунків часу постійного загасання аперіодичної складової струму короткого замикання

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тк1 | Тк2 | Тк3 | Тк4 | Тк5 | Тк6 | Тк7 | Тк8 | Тк9 | Тк10 | Тк11 |
| 0.028 | 0.028 | 0.028 | 0.051 | 0.051 | 0.051 | 0.051 | 0.044 | 0.044 | 0.012 | 0.012 |
| Тк12 | Тк13 | Тк14 | Тк15 | Тк22 | Тк23 | Тк24 | Тк25 | Тк26 | Тк27 |  |
| 0.009 | 0.009 | 0.013 | 0.013 | 0.009 | 0.009 | 0.008 | 0.007 | 0.010 | 0.009 |  |

Скориставшись формулою, знаходимо коефіцієнт удару для точок короткого замикання:

, (3.19)

Коефіцієнт удару дорівнює:

.

Решта результатів розрахунків коефіцієнта занесені в таблицю 3.13.

Таблиця 3.13 – Результати розрахунків коефіцієнта удару

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ку1 | Ку2 | Ку3 | Ку4 | Ку5 | Ку6 | Ку7 | Ку8 | Ку9 | Ку10 | Ку11 |
| 1.695 | 1.695 | 1.693 | 1.820 | 1.820 | 1.820 | 1.820 | 1.793 | 1.793 | 1.401 | 1.401 |
| Ку12 | Ку13 | Ку14 | Ку15 | Ку22 | Ку23 | Ку24 | Ку25 | Ку26 | Ку27 |  |
| 1.307 | 1.307 | 1.448 | 1.448 | 1.289 | 1.295 | 1.250 | 1.202 | 1.339 | 1.316 |  |

Далі визначаємо ударний струм короткого замикання для розрахункових точок:

Решту результатів розрахунків струму удару короткого замикання заносимо в таблицю 3.14.

Таблиця 3.14 – Результати розрахунків струму удару короткого замикання

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Іуд1 | Іуд2 | Іуд3 | Іуд4 | Іуд5 | Іуд6 | Іуд7 | Іуд8 | Іуд9 | Іуд10 | Іуд11 |
| 9.309 | 9.309 | 8.355 | 22.48 | 22.48 | 22.48 | 22.48 | 14.763 | 14.763 | 13.969 | 13.969 |
| Іуд12 | Іуд13 | Іуд14 | Іуд15 | Іуд22 | Іуд23 | Іуд24 | Іуд25 | Іуд26 | Іуд27 |  |
| 11.879 | 11.879 | 10.075 | 10.075 | 11.457 | 11.60 | 10.499 | 9.243 | 8.487 | 8.129 |  |

Розрахуємо несиметричне коротке замикання. З даною метою побудуємо схему прямої оберненої і нульової послідовностей.

Схема прямої послідовності аналогічна схемі розрахунку трифазних струмів короткого замикання для сторони 110 кВ в даній точці.

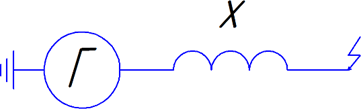


Рисунок 3.4 – Схема заміщення прямої послідовності для розрахунку струму несиметричного короткого замикання

, , , (3.20)

Щоб знайти опір зворотної послідовності, необхідно скласти діаграму зворотної послідовності. Вона подібна на діаграму прямолінійних послідовностей у згорнутому вигляді, але не містить джерел ЕРС.

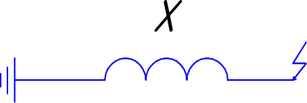


Рисунок 3.5 – Схеми заміщення зворотної послідовності для розрахунку струму однокінцевого короткого замикання

, , , (3.21)

Для визначення опору нульової послідовності необхідно скласти діаграму. Він складається з врахуванням способу з'єднання фаз частин трансформатора. Використовується на схемі в залежності від пристрою магнітопроводу і групи підключення обмоток. Параметри ліній моделюються зміною коефіцієнта d. Для двоконтурних ліній із заземленням коефіцієнт d дорівнює 4,7, а без заземлювального проводу – 5,5.



Рисунок 3.6 - Схема заміщення нульової послідовності для розрахунку струму однокінцевого короткого замикання

Знайдемо опори нульової послідовності:

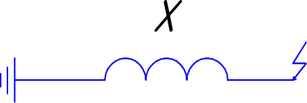


Рисунок 3.7 – Перетворення схеми заміщення нульової послідовності для розрахунку однокінцевого струму несиметричного короткого замикання

Після того, як сумарні опори всіх трьох ланцюгів послідовності визначені, необхідно почати обчислення струму несиметричного короткого замикання. Струми і напруги постійної, зворотної і нульової послідовностей пропорційні зі струмом прямої послідовності в точці несиметричного короткого замикання.

Для визначення струму постійної послідовності необхідно визначити трифазний струм короткого замикання в даній точці, віддалений від реальної точки короткого замикання додатковим опором, який знаходиться у вигляді результуючого опору зворотної і нульової послідовностей відповідно до виду короткого замикання, відносно точки ланцюга.

Виходячи з правила еквівалентності прямої послідовності, якщо не брати до уваги дугу в точці короткого замикання, тобто коротке замикання металеве, то струм постійної послідовності для спеціальної фази дорівнює:

, (3.22)

де додатковий опір шунта залежить від типу несиметричного короткого замикання. Знайдемо додатковий опір для однофазного короткого замикання:

Знайдемо додатковий опір для двофазного короткого замикання:

;

;

.

Знайдемо додатковий опір для двофазного замикання на землю:

;

;

.

Визначивши всі додаткові опори, знаходимо струм прямої послідовності:

Решту результатів розрахунків струму постійної послідовності наведено в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Результати розрахунків струму прямої послідовності

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ікз1 | Ікз1.1 | Ікз1.2 | Ікз2 | Ікз2.1 | Ікз2.2 |
| 0,192 | 0,192 | 0,157 | 0,388 | 0,388 | 0,349 |

Для визначення фазного струму в точці короткого замикання аварійної фази необхідно між собою перемножити струм спеціальної фази і коефіцієнт фази *m(n):*

, (3.22)

де фазний коефіцієнт знаходиться як:

для однофазного КЗ, при двофазному короткому замиканні і

при двофазному короткому замиканні до землі.

Визначимо величину фазного струму:

Інші результати розрахунків фазного струму наведені в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Результати розрахунку фазового струму

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ік1.1 | Ік1.1 | Ік1.2 | Ік2 | Ік2.1 | Ік2.2 | Ік1.1.1 | Ік1.1.2 | Ік1.1.3 |
| 0.575 | 0.575 | 0.468 | 0.671 | 0.671 | 0.603 | 0.709 | 0.709 | 0.629 |

Фазний струм в одиницях знаходять за формулою:

, (3.23)

Фазний струм в одиницях дорівнює:

Решту результатів розрахунків фазного струму в одиницях наведено в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Результати розрахунків фазного струму в одиницях

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ік1.1 | Ік1.1 | Ік1.2 | Ік2 | Ік2.1 | Ік2.2 | Ік1.1.1 | Ік1.1.2 | Ік1.1.3 |
| 2.892 | 2.892 | 2.354 | 3.365 | 3.365 | 3.025 | 3.554 | 3.554 | 3.152 |

Ударний струм короткого замикання знаходимо за формулою:

(3.24)

Ударний струм при короткому замиканні дорівнює:

Решту результатів розрахунків ударного струму короткого замикання наведено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Результати розрахунків ударного струму короткого замикання

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Іуд1 | Іуд1.1 | Іуд1.2 | Іуд2 | Іуд2.1 | Іуд2.2 | Іуд1.1.1 | Іуд1.1.2 | Іуд1.1.3 |
| 7.68 | 7.68 | 6.243 | 8.898 | 8.898 | 7.998 | 9.398 | 9.398 | 8.334 |

Розрахуємо простий струм короткого замикання

Замикання однієї фази на землю в системі з ізольованою нейтраллю, або в системі, заземленої через компенсуючий пристрій, називається простим. Однофазне коротке замикання в таких системах вважається простим, для нього z дорівнює z0∑=∞ тому живлення від генераторів неможливе рис. 3.8.

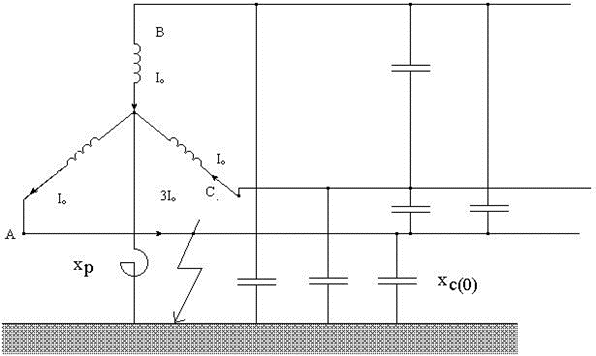


Рисунок 3.8 – Однофазне коротке замикання в мережі з компенсованою нейтраллю

Дані струми знаходяться з повної довжини всіх ліній, що електрично з'єднані з місцем простого короткого замикання:

Якщо струм простого короткого замикання більший межі для *UH*=10 кВ – *IКР* = 20 А, то при тривалій експлуатації мережі в такому режимі відбуватиметься негативний вплив на ізоляцію: може статися пробій і підгоряння ізоляції. Щоб не допустити такої ситуації, необхідно компенсувати струм, включивши дугогасну котушку реактора в нейтраль. В даному випадку струм простого короткого замикання не перевищуватиме критичного значення *IКР*, тому компенсація не потрібна.

Що стосується формули, то розрахуємо просте коротке замикання:

Решта результати нескладних розрахунків струму замикання наведені в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 - Результати простих розрахунків струму замикання

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ІКП10 | ІКП11 | ІКП12 | ІКП13 | ІКП14 | ІКП15 | ІКП22 | ІКП23 | ІКП24 | ІКП25 | ІКП26 | ІКП27 |
| 5.987 | 5.987 | 7.962 | 7.962 | 6.847 | 6.847 | 8.402 | 8.231 | 9.737 | 11.903 | 9.624 | 10.428 |

**3.3. Обґрунтування використання мікропроцесорних пристроїв РЗА на базі «Діамант»**

Вважливим видом електричної автоматики є релейний захист, без нього неможлива нормальна і надійна робота електричних мереж. За рахунок неї здійснюється постійний контроль за станом і режимом роботи всіх частин мережі та у разі виникнення порушення режиму роботи автоматика реагує.

«Приладний модуль РЗА «Діамант» (рис. 3.9) для класу напруги 6 – 35 кВ призначені для виконання функцій релейного захисту, автоматики, керування, вимірювань та сигналізації приєднань 6 – 35 кВ:

- повітряної лінії 6 – 10 кВ;

- повітряної лінії 35 кВ;

- кабельної лінії 6 – 35 кВ;

- асинхронного двигуна;

- синхронного двигуна;

- секційного вимикача;

- вимикача введення;

- трансформатора до 6,3 МВА;

- секціонуючого пункту мережі 6 – 10 кВ». [13]



Рисунок 3.9 – Мікропроцесорний пристрій «Діамант» систем управління, релейного захисту та автоматики

Функції захисту та автоматики, що виконуються мікропроцесорними пристроями РЗА 6 – 10 кВ та їх розподіл за модифікаціям наведено у таблиці 3.20. [13]

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Найменування функції | Модифікація ПМ РЗА | | | | |
| V010 | SV01 | L060 | M010 | M020 |
| **ЗАХИСТ** | | | | | |
| Струмова відсічка |  |  |  |  |  |
| Максимальний захист із пуском за напругою та частковими характеристиками |  |  |  |  |  |
| Максимальна струмова від затяжного пуску |  |  |  |  |  |
| Захист від частих пусків |  |  |  |  |  |
| Диференційне відсічення |  |  |  |  |  |
| Захист від обриву фаз |  |  |  |  |  |
| Дуговий захист |  |  |  |  |  |
| Захист від асинхронного режиму |  |  |  |  |  |
| Захист мінімальної частоти |  |  |  |  |  |
| Захист від несиметричних режимів |  |  |  |  |  |
| Захист від підвищення напруги |  |  |  |  |  |
| Захист від зниження напруги |  |  |  |  |  |
| Струмовий захист нульової послідовності (на правлений) |  |  |  |  |  |

До основних функцій мікропроцесорного пристрою належать:

- релейний захист;

- протиаварійна автоматика;

- електроавтоматика;

- управління вимикачем;

- контроль положення та справності ланцюгів управління вимикача;

- вимірювання електричних параметрів;

- сигналізація.

До додаткових:

- вимірювання діючих значень струмів і напруг;

- осцилографування і записом в енергонезалежну пам'ять;

- автоматична реєстрація параметрів аварійних подій;

- розрахунок ресурсу вимикача;

- визначення місця пошкодження;

- зв'язок з АСУ або ПК послідовним каналом.

Максимальний струмовий захист має три ступені:

- перший ступінь – струмове відсікання;

- другий і третій ступеня з пуском по напрузі та можливістю вибору типу часткової характеристики;

У максимально струмовому захисті передбачені такі типи часткової характеристики:

- незалежний;

- залежний (пологовий, крутий, лінійний).

У даному захисті передбачено змогу дії з прискоренням за умови включення вимикача на КЗ.

По запуску другого та третього ступенів максимально струмового захисту формується вихідний дискретний сигнал для блокування логічного захисту шин.

*Захист від замикань на землю*

Захист від замикань однієї фази на землю має два ступеня.

Передбачено змогу роботи кожного ступеня "на відключення" або "на сигнал" з витримкою часу.

Для втілення функції захисту від замикання на землю застосовується фільтр першої гармоніки із фільтрацією вищих гармонійних складових.

Передбачено такі типи пускових органів захисту:

- за струмом нульової послідовності 3I0 (ненаправлений захист);

- по струму нульової послідовності 3I0 (спрямований захист із змогою блокувати або вивести спрямування при обриванні вимірювальних ланцюгів 3U0);

- за напругою нульової послідовності 3U0.

Для здійснення спрямування знаходиться напрямок потужності нульової послідовності за величиною фазового кута між струмом 3I0 і напругою 3U0.

Зі спрацьовування захисту спрацьовує сигналізація.

*Захист від підвищення напруги на шинах*

Захист спрацьовує, якщо рівень хоча б однієї з лінійних напруг перевищує встановлений рівень.

Передбачена можливість роботи захисту "на вимкнення" або "на сигнал" із витримкою часу.

*Захист від зниження напруги на шинах*

Захист призначений для захисту приєднання від зниження напруги.

Захист спрацьовує, якщо рівень хоча б однієї з лінійних напруг менший встановленого рівня.

Передбачено змогу роботи захисту "на вимкнення" або "на сигнал" з витримкою часу.

*Логічний захист шин*

Сигнал логічного захисту шин модуля лінійного приєднання утворюється при перевищенні вхідним струмом уставки по струму першого або другого ступеня МСЗ (на вибір) та наявності на вході сигналу пуску захисту введення (або секційного вимикача).

Функція ЛЗШ реалізується у модулі введення (або СВ) за відсутності блокуючих сигналів від МСЗ лінійних модулів шляхом прискорення МСЗ введення.

Приладний модуль РЗА дає змогу реалізувати логічний захист шин від зовнішніх датчиків. В приладному модулі РЗА секційного вимикача розміено два входи логічного захисту, що дозволяє розірвати гальванічні ланцюги ЛЗШ двох секцій підстанцій.

ПМ РЗА "Діамант" вигідно відрізняється від зарубіжних аналогів:

- апаратна частина ПМ РЗА виконана на уніфікованій платформі, що дозволяє реалізувати захисту різного обладнання (наприклад, трансформатора та лінії) на однотипних приладах;

- велика функціональна наповненість ПМ РЗА відкриває нові можливості в забезпечення ближнього та далекого резервування з побудовою захисту та автоматики на різних принципах дії;

- наявність 16 аналогових входів, велика кількість дискретних входів та виходів (до 96), а також 6 силових виходів для безпосереднього впливу на соленоїди вимикачів, дозволяють без додаткової апаратури виконати на одному модулі "Діамант" захист та автоматику лінійного приєднання з двома вимикачами або триобмотувального трансформатора.

Для захисту та автоматики ліній 110-220 кВ електропередачі, що заходять на підстанцію, застосовуються ПМ РЗА "Діамант" модифікації L012, що забезпечує виконання таких основних функцій:

- 5-ти ступінчастого дистанційного захисту від міжфазних КЗ, 5-ти ступінчастого дистанційного захисту від однофазних КЗ, включених на суму струмів у ланцюгах секційного вимикача та силового трансформатора;

- 5-ти ступінчастого струмового захисту нульової послідовності;

- спеціального дистанційного захисту, включеного на трансформатори струму в ланцюзі силового трансформатора для резервування його захисту;

- автоматику управління секційним вимикачем та вимикачем у ланцюзі трансформатора;

- резервування відмови вимикача (РВВ) двох вимикачів;

- автоматичне повторне включення (АПВ) двох вимикачів;

- визначення місця пошкодження.

Вході роботи проведено порівняльний аналіз електромеханічних та мікропроцесорних РЗА. Показані переваги мікропроцесорних РЗА, а також недоліки. Але це вже минуле століття. На сьогодні в наше життя входить штучний інтелект, а це значно розширює технічні можливості РЗА на базі елементів штучного інтелекту. Пропоную напрямки модернізації сучасних РЗА:

1. Використовувати пристрої фіксування часу приходу електромагнітного фронту, який був сформований в ході аварійної ситуації (КЗ, обрив, різка зміна хвильового опору). Завдяки приймачу GPS визначається, з великою точністю, час приходу фронту е/м хвилі від місця аварії. Одночасно така фіксація проходить на всіх кінцевих пунктах (КП) ЛЕП. Знаючи час фіксації приходу е/м хвилі від місця аварії на кожному КП, відстані між кожним КП, швидкість розповсюдження е/м хвилі по лінії електропередачі знаходимо місце пошкодження лінії з точністю ±25м.
2. Елементи ЛЕП з часом змінюють свої технічні характеристики, що приводить до погіршення якості передачі електроенергії по ЛЕП та до значних втрат електроенергії, але це ще погіршує електромагніту сумісність. Для кожного виду пошкодження властивий свій електромагнітний спектр, який випромінюється в простір та передається ЛЕП, але завдяки якому можна характеризувати тип пошкодження. Знаючі електромагнітний спектр зафіксований у різних КП, використовуючи кореляційний метод знаходимо місце пошкодженого елемента ЛЕП.
3. Не завжди РЗА може визначити параметри електроживлення в аварійної ситуації. Пропоную метод діагностики технічного стану локаційним методом використовуючи патент наших житомирських винахідників (патент G01R31/08 G01R31/11). Основуючись на патенті можна знаходити місце пошкодження та діагностувати технічний стан ЛЕП, визначити ділянку ожеледиці на дротах.

**3.4. Висновок по розділу 3**

В даному розділі здійснено розрахунок струмів коротких замикань для ділянки міської електричної мережі в номінальному режимі роботи та обґрунтовано використання мікропроцесорних пристроїв РЗА на базі «Діамант».

**ВИСНОВОК**

Безперервне зростання енергоспоживання місто потребує постійного розвитку та покращення електричних мереж. Це тягне за собою неминуче зростання та розгалуженість електричної мережі, що призводить до зростання кількості аварій внаслідок дій зовнішніх та внутрішніх факторів, таких як погодні явища, старіння фондів та невірні дії оперативного персоналу. Внаслідок аварій, відбувається порушення нормальної роботи частини або всієї міської мережі, що супроводжуються недовідпустком електричної енергії споживачам та зниженням її якості, що спричиняє матеріальні збитки у вигляді не до виконання, або неякісного виготовлення продукції або руйнування основного устаткування.

Для ліквідації більшості аварій та недопущення їх розвитку необхідно швидко здійснювати відключення пошкодженої ділянки електричної мережі за допомогою пристроїв релейного захисту. За рахунок мікропроцесорних пристроїв РЗА здійснюється постійний контроль за станом і режимом роботи всіх частин мережі та у разі виникнення дефекту чи порушення режиму роботи відбувається швидке реагування.

З кожним роком кількість МП РЗА потроху збільшується в країні, приходячи на зміну старому електромеханічному захисту, і дана тенденція щороку зростає та позитивно впливає на роботу, надійність і безпеку енергетики в мережі міста.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Буличев, А.В. Релейний захист електроенергетичних систем: Навч. посібник / А.В. Буличев, В.К. Ванін, А.А. Наволочний, М.Г. Попов. - СПб.: Вироб-во Політехн. ун-та, 2008. 211 с

2. Грищук Ю.С. Мікропроесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. 280 с.

3. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики: навч. посібник / Махлін П.В., Костенко С.Ю., Кузьменко О.П. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с.

4. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2013. 533 с.

5. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист трансформаторів та автотрансформаторів: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 180 с.

6. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист ліній електропересилання: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 184 с

7. Кутін В. М. Релейний захист та системна автоматика : лабораторний практикум / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко. Вінниця: ВНТУ, 2018. 130 с.

8. Колісник, М.О. Надійність програмних засобів мікропроцесорних пристроїв управління систем телекомунікації: навч. посібник / М.О. Колісник, І.В. Піскачова. Харків: УкрДАЗТ, 2012. 167 с.

9. Мікропроцесорна техніка: Підручник / Ю.І. Якименко, Т.О. Терещенко, Є.І. Сокол та ін.. / За ред. Т.О. Терещенко – К.: Політехнік, 2003. 440 с.

10. Мікроконтролерні та робототехнічні системи: методичні рекомендації до вивчення курсу для студентів напрямку «Програмна інженерія» факультету інформаційних технологій УжНУ / Розробник: О.М. Левчук. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2016. 72 с.

11. Огляд сучасного стану релейного захисту електричних мереж./ Гулевський В. Б., Постол Ю. О., Добровенко І. Г. Мелітополь: Науковий вісник ТДАТУ. Вип. 12, Т.3., 2022. С. 28-29.

12. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярський, Е.В. Майструк, І.П. Козярський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с.

13. ПМ РЗА «Діамант» Релейний захист та протиаварійна автоматика. URL : http://hartron-inkor.com.

14. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Ч. 1. 250 с.

15. Яндульський О.С., Дмитренко О.О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндульського. К.: НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.