

Семененко Юрій Олександрович, к.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, +38(068)129-03-44, semenenko_jo@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9422-3528

*Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050*

Середа Олександр Григорович, д.т.н., професор кафедри електричних апаратів, +38(050)605-19-70, o.g.sereda@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-5243-3828

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

Середа Олена Геннадіївна, к.т.н., доцент кафедри електричних апаратів, korolelgn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4658-9554

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, o.semenenko@khai.edu, ORCID ID: 0009-0001-8425-562X

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
вул. Вадима Манька, 17, м. Харків, Україна, 61070*

АНАЛІЗ ПРИЧИН НЕСЕЛЕКТИВНОЇ ДІЇ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ

Анотація. Стаття присвячена актуальній проблемі неселективної дії релейного захисту при однофазних замиканнях на землю, які на сьогодні залишаються найбільш розповсюдженим порушенням роботи розподільних електромереж напругою 6-35 кВ з ізольованим режимом нейтралі. Характерною особливістю таких електромереж є передача електроенергії через повітряні лінії, які є найбільш вразливими через відносно слабку ізоляцію, що і спричиняє високий відсоток їх аварійності. Варіативність топології електромереж напругою 6-35 кВ, розгалужена структура ліній електропередачі та значна їх протяжність, складний рельєф розташування, непостійний характер навантажень та малі значення струмів при однофазних замиканнях суттєво ускладнюють задачу фіксації як самого факту замикання, так і локалізації його місця виникнення. Наслідком малих ємнісних струмів при однофазних замиканнях на землю в мережах напругою 6-35 кВ з ізольованим режимом нейтралі є дія релейного захисту на сигнал без відключення пошкодженої лінії. Якщо дотримуватися рекомендацій відключати лінію з однофазним замиканням на землю якнайшвидше, процес пошуку місця пошкодження та його локалізації може тривати довше нормованого. Предметом проведених досліджень є аналіз причин неселективної дії існуючих захистів електромереж 6-35 кВ при однофазних замиканнях на землю.

Ключові слова: електропостачання, енергоефективність, однофазне замикання на землю, дистанційний захист, обрив фази, дугове замикання, режим нейтралі, струмовий захист, розподільна електромережа, умовна оптимізація параметрів, цільова функція.

Semenenko Yuriy, PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, +38(068)129-03-44, semenenko_jo@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9422-3528

Ukrainian State University of Railway Transport

7, Feuerbach Square, Kharkiv, Ukraine, 61050

Sereda Oleksandr, Doctor of Science, Professor of the Department of Electrical Appliances, +38(050)605-19-70, o.g.sereda@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-5243-3828

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2, Kirpychova, St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Sereda Olena, PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Appliances, korolelgn@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4658-9554

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2, Kirpychova, St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Semenenko Olha, Assistant of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Systems, o.semenenko@khai.edu, ORCID ID: 0009-0001-8425-562X

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

17, Vadyma Manko, St., Kharkiv, Ukraine, 61070

ANALYSIS OF THE NON-SELECTIVE ACTION PROTECTION CAUSES IN MEDIUM VOLTAGE POWER GRIDS AT GROUND SINGLE-PHASE FAULT

Abstract. The article is devoted to the urgent non-selective action problem of relay single-phase earth faults protection which today remain the most common malfunction of distribution power grids with a voltage of 6-35 kV with an isolated neutral mode. A characteristic feature of such power grids is the transmission of electricity through overhead lines, which are the most vulnerable due to relatively weak insulation, which causes a high percentage of their failures. The variability of the power grids with a voltage of 6-35 kV topology, the branched structure of power transmission lines and their significant length, the complex relief of the location, the unstable nature of loads and small values of currents during single-phase faults significantly complicate the task of fixing both the fact of the fault itself and the localization of its place of occurrence. The consequence of small capacitive currents during single-phase ground faults in networks with a voltage of 6-35 kV with an isolated neutral mode is the action of relay protection on the signal without disconnecting the damaged line. If you follow the recommendations to disconnect the line with a single-phase ground fault as soon as possible the process of finding the location of the damage and its localization may last longer than normal. The subject of the research is the analysis of the reasons for the non-selective action of existing protections of 6-35 kV electrical networks during single-phase ground faults.

Keywords: electricity supply, energy efficiency, single-phase earth fault, distance protection, phase failure, arc fault, neutral mode, current protection, distribution network, conditional optimization of parameters, objective function.

Вступ. Аварійні режими електромереж призводять до різкого порушення якості електричної енергії у всій системі електропостачання. Аварійними режимами в мережах напругою 6(10)–35 кВ є двофазні короткі замикання (КЗ), двофазні КЗ на землю, трифазні КЗ, подвійні КЗ, обрив фазних проводів, а також однофазні замикання на землю (ОЗЗ) [1–4]. В аварійних режимах змінюються форми кривих струмів та напруг. Цей факт необхідно враховувати при проведенні розрахунків для аналізу роботи електроприймачів, а також при виборі уставок

спрацьовування апаратів релейного захисту [5]. Ймовірність появи аварійних режимів в електромережі величина випадкова [6, 7], обумовлена багатьма факторами. Відповідно до [4], найчастішим видом ушкоджень в електромережах з ізольованою нейтраллю напругою 6(10)-35 кВ є ОЗЗ. В мережах з ізольованою нейтраллю в нормальному режимі роботи жодна точка електричної мережі не з'єднана ані з заземлювальним пристроєм, ані з землею. У таких мережах пошкодження ізоляції однієї з фаз не змінює векторну діаграму лінійних напруги і не призводить до появи великих струмів. Змінюються тільки фазні напруги в мережі. Цим пояснюється особливість розгляду режиму роботи електромережі з ізольованою нейтраллю із фазою, що замкнулась на землю.

Постановка проблеми. Пошкодження ізоляції однієї з фаз щодо землі не є аварійним режимом в мережах з ізольованою нейтраллю. Проте наслідки таких ушкоджень можуть бути важкими. Тому їх необхідно розглядати поряд з режимами, які призводять до порушення якості напруги споживачів. Найрідше в сільській місцевості електроживлення споживачів здійснюється кабельними лініями електропередачі (ЛЕП). В кабельних лініях найнебезпечнішим видом ОЗЗ є замикання на землю через дугу (дугове замикання). В цьому випадку при кожному загоранні або погасанні дуги виникають перехідні процеси і, як наслідок, стрибки струму та імпульсні перенапруги. Дуга під час горіння випаровує струмопровідну жилу та ізоляційні матеріали, що може спричинити подвійне замикання на землю. У сільській місцевості переважно прокладають повітряні ЛЕП напругою 6-10 кВ, виконані неізольованими, найчастіше сталевалюмінієвими проводами марки АС. Причинами пошкодження ізоляції в таких мережах найчастіше є природне старіння ізоляції ліній та апаратури [4] (24% від загальної кількості ушкоджень). Старіння ізоляції суттєво прискорюється після розрахункового терміну служби електроустаткування. Для повітряних ліній електропередачі із залізобетонними опорами термін служби становить 30 років, з дерев'яними опорами – 25 років. Механічні пошкодження опор та ізоляції є причиною ОЗЗ в 11 % випадків. Помилкові дії оперативно-ремонтного персоналу при введенні ліній в експлуатацію після ремонту, при

виводі в ремонт, при умисному загрубленні блокувань, при неправильному налаштуванні становлять 9 %. Атмосферні перенапруги, що виникають за відсутності або виході з ладу відповідних пристроїв захисту від імпульсних перенапруг, є причиною ОЗЗ в 21 % випадків.

Метою роботи є аналіз причин неселективної дії релейного захисту електромереж середньої напруги при однофазних замиканнях на землю.

Виклад основного матеріалу дослідження.

На сьогодні можна виділити три класи захисту від ОЗЗ:

- індивідуальні, що використовують інформацію лише з одного приєднання;
- централізовані, що здійснюють збір інформації про струми з усієї секції;
- групові, що здійснюють обмін інформацією між апаратами РЗ суміжних секцій.

Індивідуальні захисти є найкращими, оскільки не вимагають значного обсягу монтажних робіт. Струм $3I_0$ і напруга $3U_0$ нульової послідовності (НП) надходять тільки з одного приєднання. Проте, обмежений обсяг інформації ускладнює алгоритми захисту. Централізовані захисти збирають інформацію про струми $3I_0$ з усіх приєднань секції. З цієї точки зору вони є найменш привабливими. Різне вторинне навантаження на трансформатори струму НП викликає значну похибку при вимірюванні струму, що і призводить до неселективної роботи захисту. З іншого боку, алгоритми централізованих пристроїв захисту відрізняються простотою і не потребують інформації щодо напруг. Групові захисти за своєю сутністю є підклас централізованих захистів. Вони здійснюють індивідуальний вимір інформації про електричні величини, що спостерігаються. Це знижує похибку вимірювання, з подальшим обміном інформації між пристроями.

Класифікація способів визначення місця пошкодження в мережах високої та надвисокої напруги подана на рис. 1. Усі вони виявляються малоприслужними для пошуку короткочасних замикань, що самоусуваються, або для пошуку місця замикання під навантаженням. Аналіз методів щодо визначення типу ушкодження та пошук рішень спрямованих на підвищення точності визначення місця ОЗЗ в розподільній мережі напругою 6(10)–35 кВ є предметом поданої статті.

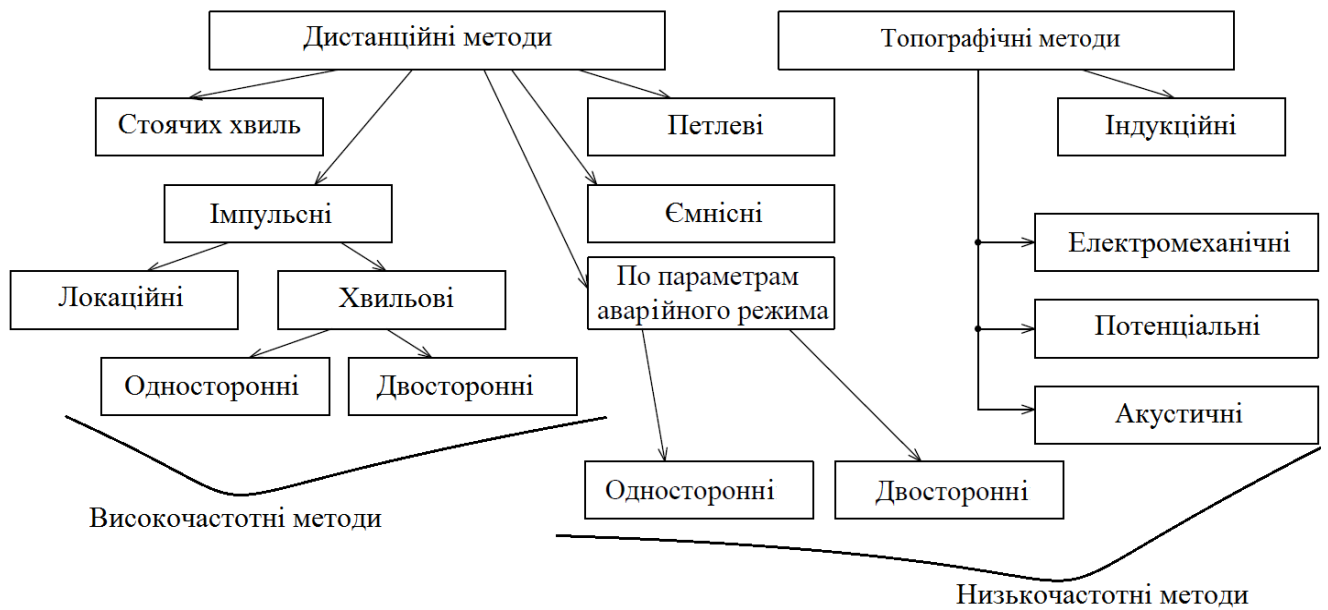


Рисунок 1 – Класифікація методів визначення місця пошкодження

Найпоширенішими в електротехнічних комплексах є пристрої захисту при ОЗЗ, що реагують на величину напруги НП. Вони дозволяють отримати лише неселективну сигналізацію появи замикання в одному з фідерів приєднання, що відходить від секції, і не можуть бути визнані придатними щодо експлуатаційних вимог. Наприклад, на рис. 2 подані дані щодо кількості ОЗЗ та часу пошуку пошкодженого приєднання у розподільних мережах електротехнічних комплексів напругою 6(10) кВ, згідно з яким час, необхідний виявлення пошкодженого приєднання становив від однієї до кількох годин.

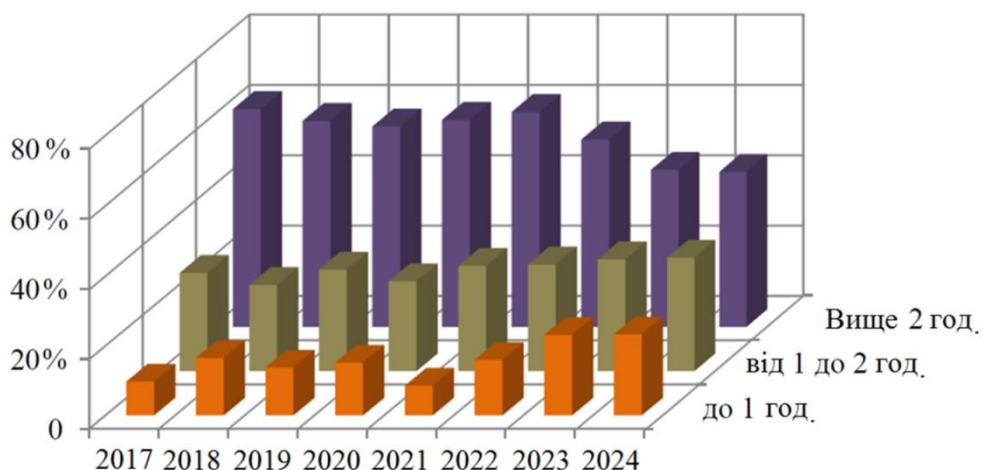


Рисунок 2 – Час пошуку пошкодженого приєднання до мережі у відсотках від загальної кількості ОЗЗ за період 2017-2024 рр.

Тривале існування в мережі ОЗЗ і виникнення комутаційних перехідних процесів, пов'язаних з оперативними перемиканнями відвідних ліній у 30-35 % є причиною переходу ОЗЗ в міжфазні КЗ з подальшими порушеннями електропостачання та виходом з ладу відповідального електрообладнання.

У розподільних мережах 6(10)–35 кВ з ізольованою і резистивно-заземленою нейтраллю поширеним є струмовий неспрямований захист НП, що реагує на величину струму НП при стійкому ОЗЗ. Однак стійкість функціонування цих пристроїв захисту залежить від конфігурації та однорідності розподільних мереж, що суттєво обмежує сферу їх застосування. Для забезпечення високої чутливості та селективної дії неспрямованих струмових захистів в умовах нестаціонарності і, як наслідок, непостійності параметрів і характеристик розподільних мереж напругою 6(10)–35 кВ, необхідно, щоб сумарний струм ОЗЗ перевищував власний струм НП будь-якого приєднання мережі у 8–10 разів.

Одним з найістотніших недоліків неспрямованих захистів при ОЗЗ є втрата стійкості функціонування при переривчастих замиканнях на землю. В такому режимі ОЗЗ струм НП носить нестабільний характер і може бути зафіксований колами захисту як сигнал ушкодження. Згідно з експлуатаційними даними та проведеними експериментальними дослідженнями було встановлено, що основною причиною низької селективності дії та порушення стійкості функціонування захистів при ОЗЗ, заснованих на контролі величини струму НП, що встановився, є неповнота замикання фази на землю. Режим неповного ОЗЗ супроводжується виникненням у місці замикання перехідного опору, який як параметр контуру НП, знижує значення напруг і, як наслідок, значення струмів НП контрольованих приєднань, що захищаються. Враховуючи те, що уставки на спрацьовування неспрямованих захистів обрані за умови металевих замикань (за відсутності перехідного опору в місці ОЗЗ), неповнота замикання фази на землю буде причиною непрацездатності цих захистів в умовах експлуатації.

Значення перехідного опору носить випадковий характер і залежить від декількох факторів [5–7]: опору середовища, через який відбувається контакт фази з землею (шар снігу, льоду, впалого листа тощо), опору кола протікання

«зворотного» струму однофазного замикання через ємності неушкоджених фаз, опору лінійного ізолятора, опору заземлювального пристрою опори тощо. Накопичений досвід експериментальних досліджень в цій галузі дозволяє встановити можливий діапазон зміни величини перехідного опору. Відповідно до [3] значення перехідного опору може досягати 5–7 кОм, в [4] зазначено, що його значення досягає 5 кОм і більше, згідно з [4] перехідний опір може сягати 10 кОм. До прикладу в Польщі та Канаді значення перехідного опору є нормованою величиною і становить відповідно 7,5 та 13,5 кОм [5, 6].

Перехідний опір є причиною непрацездатності не тільки неспрямованих струмових захистів при ОЗЗ, а й пристроїв захисту, що реагують на вищі гармонійні складові в струмі ОЗЗ. Проведений аналіз впливу неповноти замикання фази на землю на стійкість функціонування розглянутих захистів довів, що при ОЗЗ через перехідний опір у декілька Ом рівень вищих гармонік різко зменшується, що ускладнює забезпечення селективності та знижує чутливість дії захистів [4, 9]. Трохи кращими показниками у порівнянні з неспрямованими струмовими захистами при ОЗЗ мають спрямовані захисти, що визначають напрям потоку потужності НП в режимі сталого ОЗЗ. Проте, аналіз експлуатаційних можливостей, наприклад, пристрою захисту ЗЗП-1 свідчить про відсутність селективного виявлення пошкодженого приєднання у випадку неповних ОЗЗ через перехідні опори 600–700 Ом при граничній ємності розподільної мережі, яка дорівнює 6,5 мкФ [9]. Крім того, досвід експлуатації захистів ЗЗП-1 та ЗЗП-1М свідчить про те, що їх характерною ознакою є велика кількістю помилкових спрацьовувань в режимах дугових замикань на землю, що перемежуються. Принцип функціонування захисту при ОЗЗ, заснований на визначенні напрямку потужності НП в перехідному режимі при неповних замиканнях на землю, застосовується в реле сигналізації однофазних замикань на землю типу УСЗ-01 для мереж 6(10)–35 кВ. Встановлено, що при ОЗЗ через наявність перехідного опору захист виявився неспроможним селективно виявити пошкоджене приєднання у восьми випадках із вісімнадцяти. У трьох випадках взагалі зафіксовано відмову у функціонуванні [6]. На підставі проведених досліджень захисту УСЗ-01 була доопрацьована методика вибору уставок

спрацьовування з метою підвищення його чутливості, згідно з якою для спрацьовування захисту при ОЗЗ через перехідний опір в 1 кОм необхідно підвищити чутливість в 4 рази у порівнянні з металевим замиканням, а для стійкого функціонування при ОЗЗ з перехідним опором в 5 кОм – в 10–12 разів [6]. Проте, збільшення чутливості захисту УСЗ-01 суттєво погіршує його здатність протистояти перешкодам, які можуть спричинити чималу кількість помилкових спрацьовувань не тільки в аварійному режимі, а й у нормальному.

Для пристроїв захисту при ОЗЗ, що використовують як робочий сигнал «накладений» струм частотою 100 Гц і вище, характерним також є малий відсоток селективної дії в умовах замикання через перехідний опір внаслідок збільшення частки контрольованого струму, що протікає повз місце замикання через ємності неушкоджених фаз. Використання в захистах при ОЗЗ струму з частотою 25 Гц і нижче дозволило усунути ряд недоліків, властивих захистам з «накладеним» струмом частотою вищою за промислову, зокрема, вдалося забезпечити високу чутливість дії захисту в умовах неповних замикань на землю і підвищити перешкодостійкість захисту від вимірювальних елементів. Однак зазначений вид захисту не набув широкого поширення в розподільних мережах через складність відбудови від природних гармонійних складових у режимі дугових ОЗЗ, що перемежуються, при яких гармонійний спектр струму визначається параметрами мережі, режимом нейтралі, місцем ОЗЗ тощо [1, 7–9].

Пристрої централізованого захисту при ОЗЗ, виконані на відносному порівнянні амплітуд або середньоквадратичних значень струмів НП на фідерах, що відходять від збірних шин, функціонують не селективно внаслідок несинхронності або несинфазності контрольованих сигналів [10–12]. Іншим їх недоліком є помилкова дія в нормальному режимі роботи електромережі при появі на будь-якому вході вимірювального елемента сигналів перешкоди або струмів небалансу.

Захисти, що аналізують напругу НП $3U_0$, зустрічаються переважно на одиничних фідерах живлення напругою 35 кВ. Даний тип захисту зустрічається рідко і має велику кількість недоліків [2]. Однак, як зазначає автор, у напрузі НП присутні вищі гармоніки, що є позитивним аспектом і може бути використане для

створення перспективних захистів, рис. 3.

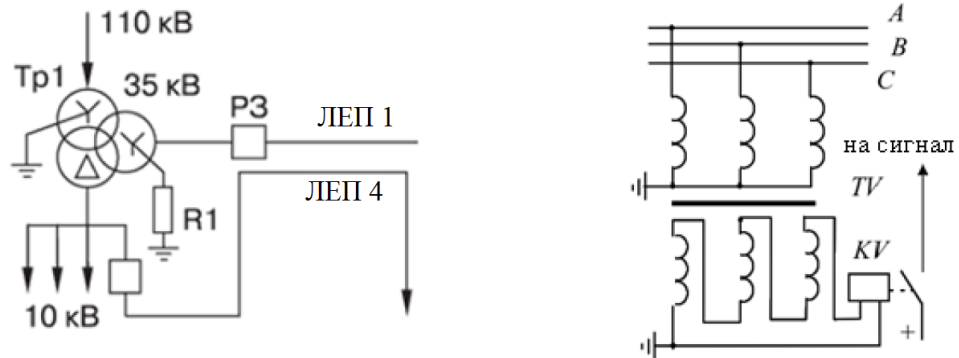


Рисунок 3 – Приклад захисту при ОЗЗ, що аналізує напругу НП

Принцип дії спрямованого струмового захисту НП, який аналізує значення $3I_0$, $3U_0$ й кута між ними, а також значення активної складової струму, пояснюється діаграмою поданою на рис. 4. Вочевидь, що спрямованому струмовому захисту НП притаманні більшість недоліків неспрямованого струмового захисту НП, а саме помилкові спрацьовування при дугових ОЗЗ, що і відзначається багатьма авторами, наприклад [2].

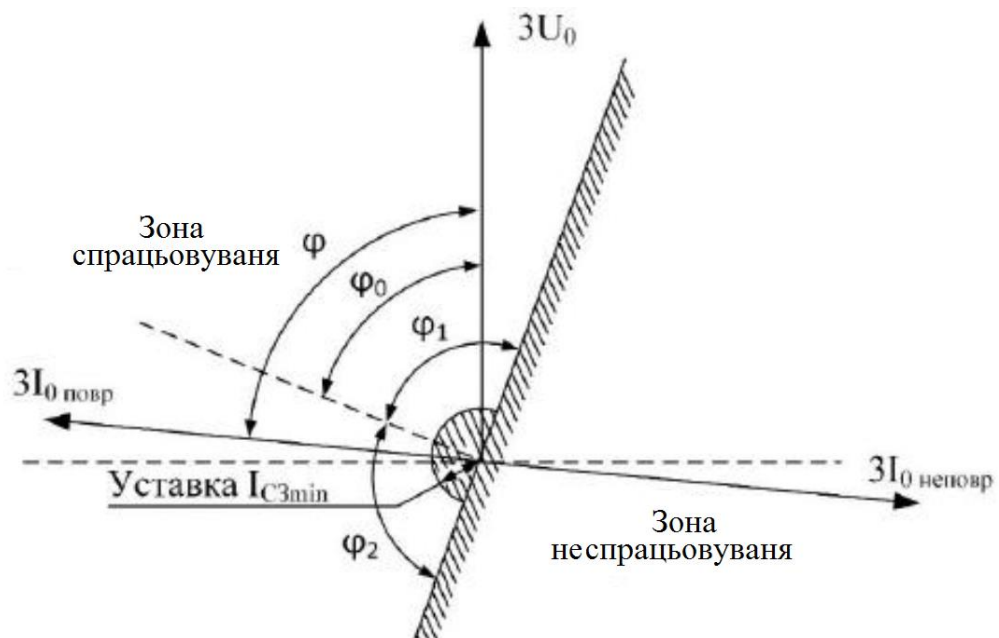


Рисунок 4 – Векторна діаграма спрямованого струмового захисту НП

Висновки: Бездугові металеві ОЗЗ з малим опором у місці замикання, тобто зі стійким гальванічним зв'язком пошкодженої фази із землею, майже

безпомилково виявляються спрямованими та неспрямованими струмовими захистами нульової послідовності внаслідок синусоїдальної форми струмів та напруг. Інші види ОЗЗ ідентифікуються захистами нульової послідовності або з низькою чутливістю, або з високим відсотком помилкових спрацьовувань. Метод аналізу параметрів перехідного процесу в нульовій послідовності, коли пошкоджений фідер має максимальну амплітуду струму в перехідному процесі, а на непошкоджених фідерах амплітуди струмів набагато менші, дозволяє фіксацію всіх видів ОЗЗ незалежно від режиму нейтралі, що є його беззаперечною перевагою.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Alsumaidae YAM, Yaw CT, Koh SP, Tiong SK, Chen CP, Ali K. Review of Mediumvoltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. *Energies*, 2022; 15(18):6762. <https://doi.org/10.3390/en15186762>.
2. Wei K, Zhang J, He Y, Yao G, Zhang Y. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. *Energies*. Vol. 13. No.18, Sep., 2020. pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/en13184724>.
3. Guo MF, Yang NC, You LX. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2018; 99:706–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.013>.
4. Серета О. Г. Теоретичні основи розвитку цифрових технологій в системах автоматизації, діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.09.03 / Олександр Григорійович Серета; [наук. консультант Шевченко С. Ю.]; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків : 2021. 344 с.
5. Li J.; Wang G.; Zeng D.; Li H. High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, 2020. 19. 105910.
6. Liu K.; Zhang S.; Li B.; Zhang C.; Liu B.; Jin H.; Zhao J. Faulty Feeder Identification Based on Data Analysis and Similarity Comparison for Flexible Grounding System in Electric Distribution Networks. *Sensors*, 2021. 21. 154.
7. ShaoW.; Bai J.; Cheng Y.; Zhang Z.; Li N. Research on a Faulty Line Selection Method Based on the Zero-Sequence Disturbance Power of Resonant Grounded Distribution Networks. *Energies*, 2019. 12. 846.
8. Ефективне використання незалежних розчеплювачів струмообмежувальних автоматичних вимикачів / О. Г. Серета. *Електротехніка і електромеханіка*, 2004. № 3. С. 56–60.
9. Швидкодійна система захисту потужних тиристорних перетворювачів на основі струмообмежувальних автоматичних вимикачів / А. Ю. Бару, В. П. Богатирьов, Ю. Л. Шинднес, О. Г. Серета. *Електротехніка і електромеханіка*, 2002. № 2. С. 15–17.
10. Здатність металокерамічних контактів струмообмежувальних автоматичних вимикачів комутувати граничні струми короткого замикання / О. Г. Серета. *Електротехніка і електромеханіка*, 2005. № 3. С. 45–47.
11. Спосіб захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів: пат. 119874 Україна: МПК (2019.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 3/13 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 13655; заявл. 30.12.2016; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.
12. Спосіб захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів

однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень: пат. 113596 Україна: МПК (2016.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, H02H 7/10 (2006.01), H02H 3/16 (2006.01), H02M 1/32 (2007.01), G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 00564; заявл. 25.01.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

REFERENCES:

1. Alsumaidae YAM, Yaw CT, Koh SP, Tiong SK, Chen CP, Ali K. Review of Mediumvoltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. *Energies*, 2022. 15(18):6762. <https://doi.org/10.3390/en15186762>.
2. Wei K, Zhang J, He Y, Yao G, Zhang Y. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. *Energies*. Vol. 13. No.18. Sep., 2020, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/en13184724>.
3. Guo MF, Yang NC, You LX. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2018. 99:706–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.013>.
4. Sereda O. H. Theoretical foundations of the development of digital technologies in automation, diagnostics, control and protection systems of electrical complexes: DIS. ... Doctor of Technical Sciences: 05.09.03 / Oleksandr Hryhoriiovych Sereda; [scientific consultant Shevchenko S. Y.]; National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Kharkiv : 2021. 344 p.
5. Li J.; Wang G.; Zeng D.; Li H. High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, 2020. 19. 105910.
6. Liu K.; Zhang S.; Li B.; Zhang C.; Liu B.; Jin H.; Zhao J. Faulty Feeder Identification Based on Data Analysis and Similarity Comparison for Flexible Grounding System in Electric Distribution Networks. *Sensors*, 2021. 21. 154.
7. ShaoW.; Bai J.; Cheng Y.; Zhang Z.; Li N. Research on a Faulty Line Selection Method Based on the Zero-Sequence Disturbance Power of Resonant Grounded Distribution Networks. *Energies*, 2019. 12. 846.
8. Effective use of independent trip units of current-limiting circuit breakers / O. H. Sereda. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2004. № 3. PP. 56-60.
9. High-speed protection system for powerful thyristor converters based on current-limiting circuit breakers / A. Y. Baru, V. P. Bogatyriov, Yu. L. Shyndels, O. H. Sereda. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2002. № 2. PP. 15–17.
10. Ability of cermet contacts of current-limiting circuit breakers to switch limiting short-circuit currents / O. H. Sereda. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2005. № 3. PP. 45-47.
11. Method of protecting an electrical network with a distributed load from a break in the neutral conductor, taking into account nonlinear distortions of phase currents: PAT. 119874 Ukraine: MPK (2019.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 3/13 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 13655; declared 30.12.2016; published 27.08.2019, Bull. № 16.
12. Method of protecting the neutral conductor from overload currents and single-phase short-circuit currents in electrical networks with nonlinear types of loads: PAT. 113596 Ukraine: MPK (2016.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, H02H 7/10 (2006.01), H02H 3/16 (2006.01), H02M 1/32 (2007.01), G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 00564; declared 25.01.2016; published 10.02.2017, Bull. № 3.

Стаття надійшла до редакції: 22.08.2025; рецензування: 30.08.2025;

прийнята до публікації 03.09.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 22.08.2025; revised on 30.08.2025; and accepted for publication on 03.09.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.