УДК 621.316.925 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2020.05.054

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

В.Ф. Сивокобиленко*, докт. техн. наук, **В.А. Лисенко**,** канд. техн. наук
Донецький національний технічний університет,
пл. Шибанкова, 2, Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна.
E:mail: svf1934@gmail.com; viktor.lysenko@donntu.edu.ua

Метою роботи є удосконалення захисту від однофазних замикань на землю для розподільних електричних мереж шляхом усунення вад відомих методів захисту. Для селективної дії захисту визначають напрям реактивної потужності за допомогою виділених зі струму і напруги нульової послідовності складових з частотою, вищою за 50 Гц. Задля цього використовують цифрові частотні фільтри. За допомогою математичної моделі виявлено можливість неселективної роботи такого алгоритму через вплив аперіодичних складових у струмах і напругах у перехідних процесах, а також недостатню чутливість захисту у разі замикання фази на землю через активні опори, більші за 10-20 Ом. Отримано залежності реактивної потужності від частоти сигналів, які виділяються фільтрами Гертцеля. Ці фільтри взято за основу, бо вони потребують менших обчислювальних витрат у порівнянні з дискретним перетворенням Фур'є. Запропоновано перед подачею струму і напруги нульової послідовності на частотні фільтри виконувати їхнє диференціювання, що послаблює вплив аперіодичних складових на фазові похибки реле та значно підсилює корисні сигнали. Задля підвищення чутливості реле у разі замикання фази на землю через активний опір до 100 Ом у схему реле включають фільтри Гертцеля (для струму і напруги) задля виділення складових для двох різних частот, а реактивну потужність знаходять як суму потужностей для першої і другої частоти. Чутливість удосконаленого алгоритму захисту у порівнянні з відомими алгоритмами захисту підвищено в 10-20 разів. Бібл. 13, рис. 6, табл. 2.

Ключові слова: замикання фази на землю, компенсована електрична мережа, селективний захист, алгоритм Гертцеля, струм і напруга нульової послідовності, реактивна потужність.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. Електричні мережі напругою 6-35 кВ із заземленою через індуктивну котушку (реактор) нейтраллю називають компенсованими. Вони є достатньо поширеними в електричних системах. Резонансно налаштувуючи реактор, можна зменшити струми замикання на землю, перенапруги та вірогідність виникнення міжфазних коротких замикань, що в цілому підвищує надійність електропостачання споживачів. Суттєвою вадою таких електричних мереж є те, що традиційні системи релейного захисту від однофазного замикання фази на землю (ОЗЗ) не забезпечують необхідної селективності і чутливості. Це пов'язано з тим, що в залежності від ступеня настройки реактора, в ушкодженому приєднанні напрямок реактивної потужності, яку контролюють пристрої захисту, може бути таким, як у неушкодженому. Задля вирішення цієї проблеми пропонуються різні методи, але в цілому вона ще не є вирішеною.

Огляд публікацій і недоліки відомих рішень. Питання захисту від однофазних замикань на землю досліджуються досить активно, кількість матеріалів на цю тему настільки велика, що час від часу з'являються роботи [1-3], які класифікують і допомагають розібратись у різноманітті відомих способів захисту. У роботі [4] показано, що в мережах 6-10 кВ за допомогою простих струмових і спрямованих захистів важко, а іноді і неможливо, забезпечити захист від ОЗЗ з необхідною чутливістю і селективністю. Це спонукає до перенесення уваги з усталеного режиму ОЗЗ на перехідні процеси, що виникають під час ОЗЗ. Додатковим аргументом є те, що струм нульової послідовності під час перехідного процесу значно перевищує такий струм усталеного режиму після ОЗЗ.

У статті [5] описано спосіб класифікації збурень у системах електропостачання, що будується на частотній фільтрації струмів і напруг за допомогою вейвлет-перетворення й подальшого використання машини опорних векторів (SVM) задля виділення суттєвих ознак явищ, що відбуваються в системі. У [6] ґрунтовно розглянуто більш загальні методи аналізу нестаціонарних процесів у нелінійних динамічних системах, якими є і електричні мережі в режимі нестійкого замикання на землю.

У [7] пропонується багаточастотне реле опору, оскільки воно на частоті живлення мережі не може працювати в мережах з резонансним заземленням нейтралі. У роботі [8] запропоновано реле

© Сивокобиленко В.Ф., Лисенко В.А., 2020
ORCID ID: * https://orcid.org/0000-0002-7720-0540 , ** https://orcid.org/0000-0002-6411-3114

селективного захисту з виділенням зі струму і напруги нульової послідовності за допомогою частотного фільтру складової з частотою вище за 50 Гц.

На наш погляд, перспективним є використання багаточастотного реле потужності. Оскільки джерелом таких частотних складових є перехідний процес ОЗЗ, то необхідними є відповідні дослідження перехідних процесів при ОЗЗ і розробка нових ефективних алгоритмів їхнього аналізу. Аналіз перехідних процесів під час ОЗЗ є необхідним як у первинних колах мережі, так і в колах захисту. Для цього потрібно розробити відповідні математичні моделі. Відомі публікації, в яких описано математичні моделі мереж 6-10 кВ [9] і моделі алгоритмів захисту [10]. Також в [11] було описано схожий алгоритм захисту з використанням задля виділення необхідних цифрових фільтрів другого порядку з нескінченними імпульсними характеристиками. Відомо про використання програми моделювання EMTP-ATP для аналізу перехідних процесів у електричних системах [12], однак, така програма не є широко доступною і не забезпечує, на наш погляд, необхідної гнучкості та прозорості моделей.

Проте, наші дослідження пристроїв захисту, в яких використовуються частотні складові вище 50 Гц [11], показали їхню недостатню чутливість у разі замикань фази на землю через активні опори порядку 10 Ом і більше, а також можливість їхньої неселективної роботи за наявності відносно великих значень аперіодичних складових у струмах і напругах нульової послідовності.

Мета досліджень. Удосконалення захисту від однофазних замикань на землю для розподільних електричних мереж 6-35 кВ за рахунок підвищення чутливості і селективності дії шляхом визначення напрямку сумарної реактивної потужності в контурі нульової послідовності для складових з частотами, вищими за 50 Гц.

Основний матеріал і отримані результати. Задля усунення указаних вище недоліків діючих захистів у роботі запропоновано методи удосконалення захистів, які полягають у зменшенні впливу аперіодичних складових у струмах і напругах нульової послідовності за допомогою попереднього знаходження їхніх похідних. Отримані похідні подають на смугові частотні фільтри для виділення з них струмів і напруг однієї з частот із діапазону 100-300 Гц, щодо яких і визначають реактивну потужність для початкового моменту виникнення ОЗЗ. За необхідності подальшого підвищення чутливості захисту використовують напрямок сумарної реактивної потужності, яку знаходять за допомогою фільтрів зі складовими двох різних частот, наприклад, 100 і 250 Гц. Для зменшення часу спрацювання реле ортогональні складові виділяють за допомогою частотних фільтрів, побудованих за алгоритмом Гертцеля, який потребує приблизно у два рази менше обчислювальних операцій у порівнянні з дискретним перетворенням Фур'є.

Блок-схему удосконаленого захисту наведено на рис. 1, сірим кольором виділено блоки, які додано до відомої схеми [11].

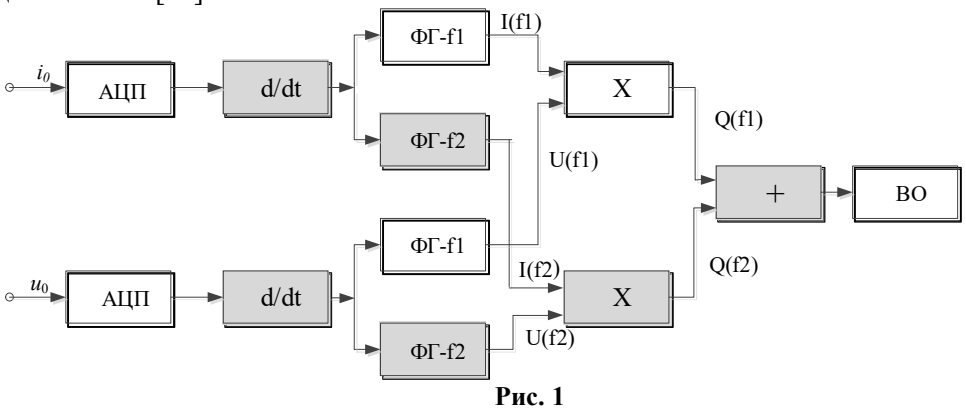


Рис. 1

Схема містить аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), що працюють з частотою 1600 відліків на секунду. На них подають струми і напруги нульової послідовності, які надходять від вимірювальних трансформаторів струму нульової послідовності і напруги нульової послідовності відповідно. Сигнали з виходів АЦП подають на блоки диференціювання d/dt, після чого вони надходять на фільтри Гертцеля (ФГ) задля виділення ортогональних складових струму і напруги з частотами f1 та f2. Реактивні потужності для частот Q(f1) і Q(f2) обчислюються у блоках добутку X за виразом

$$Q(f_N) = \mathrm{Re}\left[I(f_N)\right] \cdot \mathrm{Im}\left[U(f_N)\right] - \mathrm{Re}\left[U(f_N)\right] \cdot \mathrm{Im}\left[I(f_N)\right], \quad (1)$$

а після їхнього підсумовування вони надходять до виконавчого органу ВО, в якому за допомогою компаратора порівнюють сумарну реактивну потужність Q із заданою пороговою $Q_р$, і, якщо $Q>Q_р$, то реле захисту спрацьовує

$$Q = Q(f1) + Q(f2) > Qp\,. \tag{2}$$

Характерною особливістю даного захисту є те, що він реагує на частотні складові, вищі за частоту живлення мережі (50 Гц), які завжди присутні у струмі і напрузі нульової послідовності в момент замикання фази на землю, коли виникає перехідний процес у зв'язку із порушенням попереднього нормального режиму. При цьому тривалість вихідного сигналу спрацювання захисту у разі ОЗЗ складає приблизно 20-25мс, а амплітуда залежить від вибраної частоти для фільтрів Гертцеля.

Задля дослідження спектрального складу сигналів у струмах і напругах нульової послідовності на початку ОЗЗ та оцінки чутливості захисту за різних значень опору в місці замикання скористаємося методом математичного моделювання. Математична модель для схеми електропостачання заданої структури [11] складається з диференційних рівнянь для віток і вузлів схеми, рівнянь чисельного визначення похідних і рівнянь визначення ортогональних складових заданої частоти за допомогою алгоритму Гертцеля. Задля зменшення можливого підсилення завад у вхідних сигналах струму і напруги блоки диференціювання виконано на основі методу еквівалентних синусоїд [13], згідно з яким використовують інтегральне усереднення 3-5-х миттєвих значень сигналів, а похідну знаходять для центру інтервалу. Наприклад, за допомогою трьох дискретних значень струму (напруги) похідні визначають за виразом, у якому ω – кутова частота, h – крок розрахунку

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{2\cdot\omega\cdot h}(3\cdot i_n - 4\cdot i_{n-1} + i_{n-2})\,. \tag{3}$$

Ортогональні складові струмів і напруг для гармоніки k-го номера за допомогою алгоритму Гертцеля знаходять на кожному кроці розрахунків, використовуючи масив з N дискретних значень i_1, i_2,.., i_N струму (напруги) на періоді першої гармоніки частоти живлення мережі. Розрахунки проміжних значень проводять методом ітерацій, а на заключному кроці знаходять комплексне значення вихідного сигналу за виразами

$$x_1 = i_1;\quad x_2 = i_2 + \alpha\cdot i_1;\quad x_3 = i_3 + \alpha\cdot i_2 - i_1;\ \ldots.;\quad x_N = i_N + \alpha\cdot i_{N-1} - i_{N-2};$$
$$\alpha = 2\cdot\cos(2\cdot\frac{\pi}{N}\cdot k);\quad Xкінц = \frac{2}{N}\cdot\left[x_N\cdot\exp(j\cdot 2\cdot\frac{\pi}{N}\cdot k) - x_{N-1}\right]\,. \tag{4}$$

Дослідження процесів ОЗЗ і поведінку захисту розглянемо на прикладі типової схеми електропостачання напругою 6 кВ з компенсованою нейтраллю, принципову заступну схему якої наведено на рис. 2. Схема містить трансформатор, що живить мережу (вітки 13-15), три фідери F1-F3 з кабельними лініями (вітки 1-9), реактор (вітка 16), міжфазні ємності (вітки 10-12). Ємності фаз на землю для фідерів F1-F3 відповідно становлять 1, 8 і 12 мкФ, а опори ізоляції на землю RI1-RI9 – 1 МОм. Індуктивність реактора за резонансного налаштування становить 0,1463 Гн, а його активний опір – 0,1 Ом. За резонансного налаштування реактора і стійкого замикання на землю фази *A* фідера F1 (RI1=1 Ом) усталені значення струмів нульової послідовності фідерів і реактора, а також напруга і реактивна потужність фідера F1 становлять

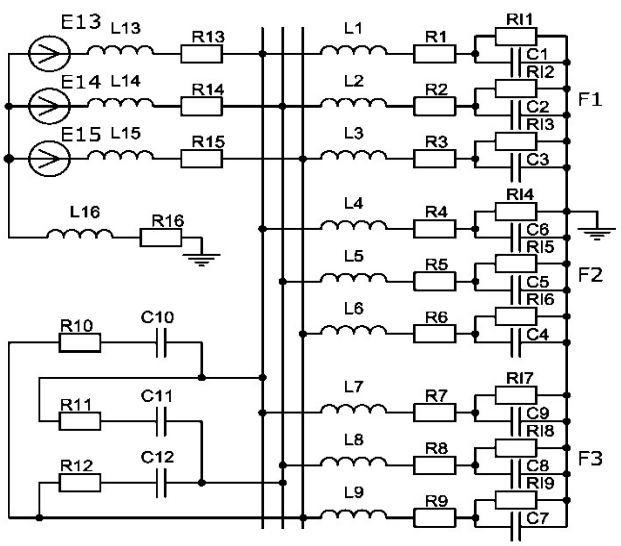


Рис. 2

$$I_{F1} = (0{,}577 - j10{,}339)A;$$
$$I_{F2} = (-0{,}018 - j27{,}448)A;$$
$$I_{F3} = (-0{,}134 - j41{,}264)A;$$
$$I_{reak} = (0{,}425 + j79{,}051)A;$$
$$U_0 = (-3637 - j4{,}254)B;$$
$$Q_0 = (-2055 - j37610)BA.$$

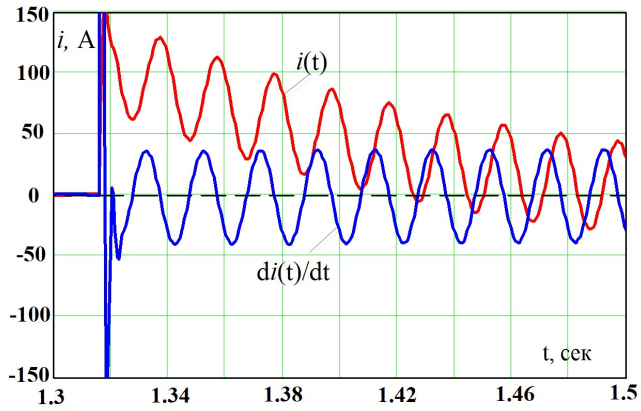


Рис. 3

Реактивні потужності для фідерів F2, F3 мають такий же напрямок, як в F1, тому селективність захисту на частоті f=50 Гц не забезпечується. Результати моделювання роботи алгоритму захисту за допомогою (3), (4) підтердили доцільність введення до блок-схеми реле (рис. 1) блоків диференціювання d/dt для струмів і напруг нульової послідовності. Завдяки цим блокам, як видно з рис. 3, на якому наведено результати математичного моделювання зміни в часі струму нульової послідовності при ОЗЗ через опір 1 Ом до і після проходження через блок диференціювання d/dt, значно зменшується вплив на роботу реле аперіодичних складових, які вносять похибки у розрахункові потужності через вплив на кутові співвідношення між струмом і напругою.

Крім того, вони зменшують час спрацювання і збільшують чутливість захисту, як це видно із результатів розрахунків реактивної потужності за ОЗЗ на фідері Ф1, наведених у табл. 1. Розрахунки проведено для частотних фільтрів Гертцеля (ФГ), налаштованих на виділення частотних складових від 50 до 350 Гц. За таких умов досліджувався як резонансний стан налаштування реактора, так і пере- і недокомпенсація. Наведено середні значення потужності, які обчислено за N=32 дискретних відліків.

Таблиця 1

Q, кВА	Q(50)	Q(100)	Q(150)	Q(175)	Q(200)	Q(250)	Q(300)	Q(350)	Блоки d/dt
0,5*Lrez	-119,0	41,77	37,88	35,29	34,84	30,22	19,18	10,23	є
1,0*Lrez	97,83	74,70	45,43	40,89	39,74	32,57	20,44	10,90	є
1,5*Lrez	166,7	79,71	46,71	41,01	38,89	30,61	18,49	9,512	є
0,5*Lrez	-211,4	3,367	2,033	1,749	1,142	0,587	0,215	0,055	немає
1,0*Lrez	30,0	19,35	5,06	3,73	2,24	1,1	0,487	0,214	немає
1.5*Lrez	111,1	24,75	6,0	4,218	2,528	1,208	0,542	0,252	немає

Як видно з табл. 1, задля забезпечення селективного захисту можуть бути використані частотні складові, частотою вище від 100 Гц, при цьому частоти необов'язково мають бути кратними частоті живлення мережі. Зі збільшенням частоти потужність зменшується, і тому високі частоти також використовувати не варто. З даних табл. 1 також можна бачити, що застосування блоків диференціювання збільшує потужності в 15-20 разів, що значно підвищує чутливість захисту.

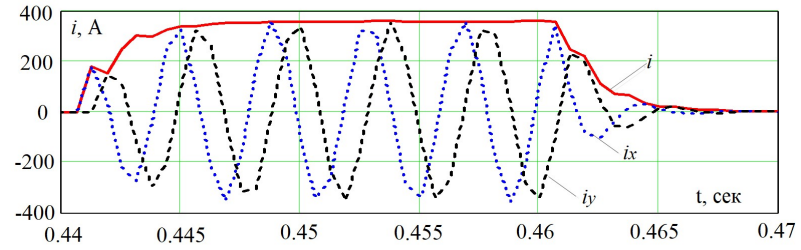
Розрахункові потужності (табл. 1) отримано за замиканням фази на землю через активний опір R=1 Ом. За більших значень цього опору потужність зменшується і за R=100 Ом, і за наявності блоків d/dt може бути недостатньою, як це видно з даних табл. 2.

Якщо порогове значення потужності прийняти, наприклад, 1 кВА, то чутливість захисту може буде недостатньою. У цьому випадку слід виконати захист за схемою на рис. 1, у якому потужність знаходять як суму потужностей, отриманих за допомогою фільтрів ФГ для двох різних частот, наприклад, для частот 150 і 200 Гц.

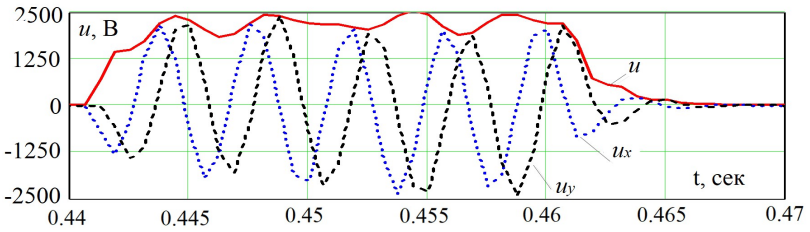
Таблиця 2

Q, кВА	Q(50)	Q(100)	Q(150)	Q(175)	Q(200)	Q(250)	Q(300)	Q(350)	Блоки d/dt
0,5*Lrez	-2,2	2,844	0,749	0,353	0,322	0,172	0,104	0,068	є
1,0*Lrez	8,88	3,8	0,988	0,461	0,437	0,24	0,151	0,102	є
1.5*Lrez	12,2	3,75	0,99	0,495	0,438	0,241	0,150	0,100	є

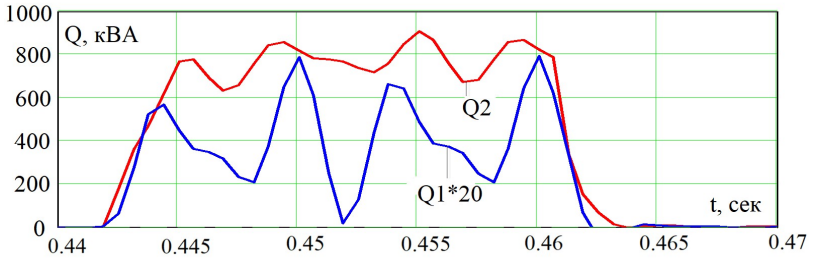
Для прикладу на рис. 4, *а*, *б*, *в* показано вихідні сигнали струму (*а*) і напруги (*б*) блоків ФГ для частоти 250 Гц та вихідний сигнал реактивної потужності (*в*) при ОЗЗ за відсутності блоків d/dt і за їхньої наявності.



а

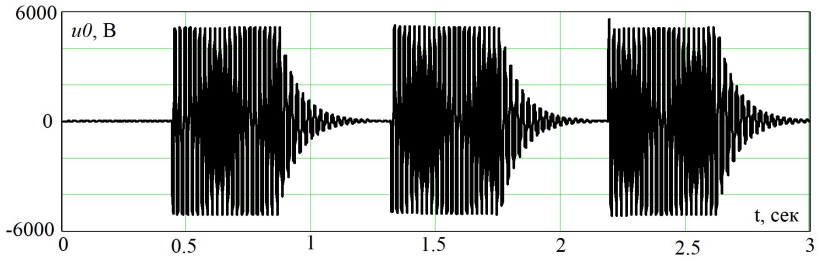


б

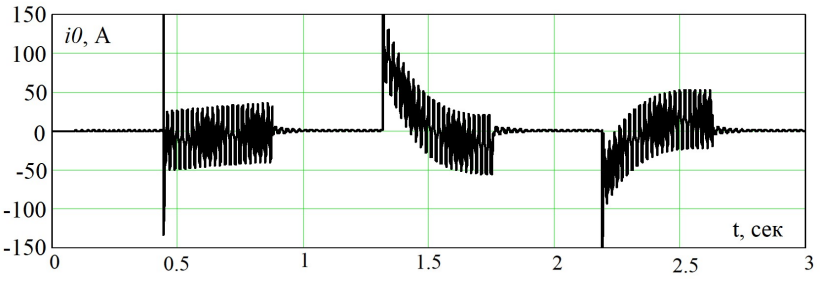


в

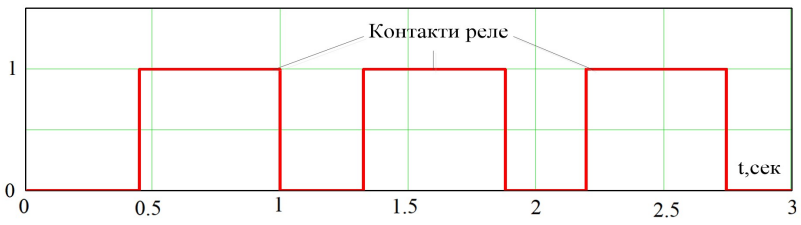
Рис. 4



а



б



в

Рис. 5

Як видно з рис. 4, *а*, корисний сигнал реактивної потужності діє безпосередньо після утворення ОЗЗ протягом t=0,022 с, і він (Q2) за наявності блоків d/dt більш ніж в 20 разів перевищує потужність Q1 за відсутності таких блоків. Наведені в табл.1 дані дають змогу виявити залежності реактивної потужності Q(k) від частоти, яку виділяють фільтри Гертцеля, і вибрати оптимальну комбінацію частот. На низьких частотах ступінь налаштування котушки Петерсена впливає на величину реактивної потужності, тому найменшою частотою, яку безпечно використовувати, на наш погляд, є частота 150 Гц.

На рис. 5, *а*, *б*, *в* наведено результати моделювання роботи захисту за нестійкого ОЗЗ на фідері F1. На рис. 5, *а* показано напругу, а на рис. 5, *б* – струм нульової послідовності, які подаються на вхід реле; на рис. 5, *в* – контакти ВО, який чітко спрацьовує незалежно від значення аперіодичної складової у струмі і напрузі нульової послідовності. На рис. 6 показано графік струму і напруги нульової послідовності в результаті моделювання однофазного замикання на землю, що отримано на фізичній моделі.

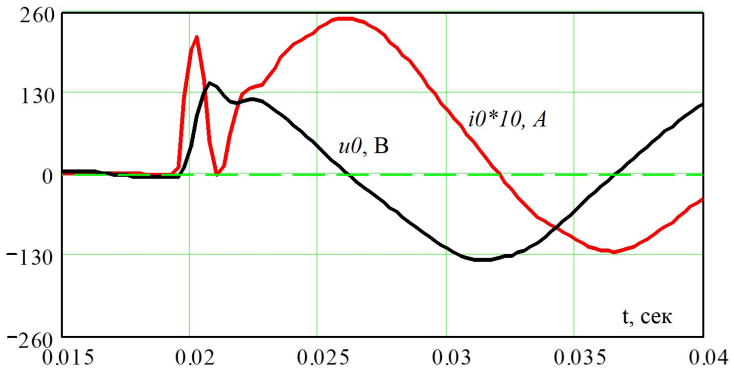


Рис. 6

Відомо [11], що на початку перехідного процесу при ОЗЗ (протягом 0,015 - 0,025 с) виникають вищі гармонійні складові в струмі і напрузі, а знайдена за їхньою допомогою реактивна потужність на ушкодженому приєднанні додатна, а на неушкодженому – від'ємна. При цьому, як показали дослідження, завдяки розряду-дозаряду ємностей фаз, імпульсна реактивна потужність у 5–8 разів перевищує потужність при ОЗЗ в усталеному режимі. Цю особливість використано в розробленому алгоритмі захисту під час вибору порогу спрацювання Q_p, значення якого вибирають як (0,1 – 0,15)Q_{min}, де $Q_{min}=U_{nom}\cdot I^c_{min}$ – реактивна потужність усталеного режиму фідера з мінімальним ємнісним струмом замикання фази на землю, коли на секції підключено тільки два фідери. Чутливість захисту буде складати більше шести, якщо активний опір в місці замикання не перевищуватиме 100 Ом.

Достовірність роботи розробленого алгоритму захисту підтверджена результатами математичного моделювання та дослідженнями на фізичній моделі напругою 0,4 кВ. Чутливість розробленого реле на порядок перевищує відомі розробки, і воно надійно спрацьовує у разі замикання фази на землю через опори до 100 Ом включно.

Висновки.

1. З'ясовано, що аперіодичні (такі, що експоненційно згасають) складові в контурі нульової послідовності можуть заважати селективній роботі захисту. Щоб запобігти цьому, в схему реле введено блоки, які виконують чисельне диференціювання сигналів струму і напруги і, таким чином, відфільтровують аперіодичні складові перехідного процесу однофазного замикання на землю.

2. Отримано залежність реактивної потужності від частоти в контурі нульової послідовності, яка дає змогу обрати для захисту оптимальні значення частоти.

3. Задля підвищення чутливості захисту у разі замикання через опори до 100 Ом включно запропоновано за допомогою цифрових частотних фільтрів Гертцеля виділяти зі струму і напруги нульової послідовності частотні складові для двох різних частот, реактивні потужності для яких додавати.

4. Працездатність розробленого алгоритму захисту підтверджено результатами математичного моделювання та дослідженнями на фізичній моделі.

1. Amin Ghaderi, Herbert L. Ginn, Hossein Ali Mohammadpour. High impedance fault detection. *Electric Power Systems Research.* 2017. Vol. 143. 2017. Pp. 376-388. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.021
2. Farughian A., Kumpulainen L., Kauhaniemi K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 154. Pp. 373-380. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006
3. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H. A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. Pp. 949-958. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021

4. Santos W.C., Lopes F.V., Brito N.S.D., Souza B.A. High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32. No 1. Pp. 23-32.
DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2548942
5. Hajibandeh N., Faghihi F., Ranjbar H., Kazari H. Classifications of disturbances using wavelet transform and support vector machine. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*. 2017. Vol. 25. Pp. 832-843. DOI: https://doi.org/10.3906/elk-1511-124
6. Xuan Z., Xie S., Sun Q. The Empirical Mode Decomposition Process of Non-stationary Signals. International Conference on *Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha City. 2010. Pp. 866-869.
DOI: https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2010.280
7. Altonen J., Wahlroos A., Vähäkuopus S. Application of Multi-Frequency Admittance-Based Fault Passage Indication in Practical Compensated Mv-Network. 24-th International Conference on *Electricity Distribution*. Glasgow, 2017. No 0967.
8. Ha H., Subramanian S. Transient earth fault detection on compensated earthed system. 22th International Conference and Exhibition on *Electricity Distribution*. Stockholm, 2013. No 0119.
DOI: https://doi.org/10.1049/cp.2013.0567
9. Кириленко О.В., Сегеда М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Математичне моделювання в електроенергетиці. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2013. 608 с.
10. Pitot F., Venkataraman k., Vassilevsky N., Teon C.P. Wattmetric earth fault protection – innovation for compensated distribution networks. 23rd International Conference on *Electricity Distribution*, Lyon, 2015. No 0963.
11. Сивокобиленко В.Ф., Лисенко В.А. Микропроцессорная селективная защита от замыканий фазы на землюв электрических сетях с катушкой петерсена в нейтрали. *Технічна електродинаміка.* 2019. № 2. С. 54-62.
DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.02.54
12. Michalik M., Rebizant W., Lukowicz M., Seung-Jae Lee, Sang-Hee Kang. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. No. 4. Pp. 1793-1802. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874581
13. Сивокобыленко В.Ф., Деркачёв С.В. Метод эквивалентных синусоид для цифровых измерительных органов релейной защиты. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація».* 2015. № 1(28). С. 215-221.

EARTH FAULT PROTECTION IMPROVEMENT ON DISTRIBUTION NETWORKS

V.F. Syvokobylenko, V.A. Lysenko
Donetsk National Technical University,
Shibankova sq., 2, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine.
E-mail: svf1934@gmail.com ; viktor.lysenko@donntu.edu.ua

The purpose of the article is to improve the single-phase earth fault protection for compensated electrical networks by eliminating the disadvantages of the known protection methods. The developed mathematical model revealed the possibility of non-selective protection operation due to the influence of aperiodic components in currents and voltages in transients. Insufficient sensitivity of protection at phase to earth faults due to active resistors greater than 10-20 ohms was also detected. The dependence of the reactive power on the frequency of the signals, isolated by the Hoertzel filters was obtained. These filters are taken as a basis because they require less computational cost than a discrete Fourier transform. It is suggested to perform differentiation before applying current and voltage of zero sequence to the frequency filters, which reduces the influence of aperiodic components on the phase errors of the relay and greatly enhances the useful signals. To increase the sensitivity of the relay when the phase is grounded through active resistance up to 100 Ohms, the relay circuit includes Hoertzel filters (for current and voltage) to select the components for two different frequencies (both higher than fundamental), and reactive power is found as the sum of power for the first and second frequencies. The sensitivity of enhanced protection algorithms compared to known algorithms is increased 10-20 times. References 13, figures 6, tables 2.

***Key words**:* phase-to-earth fault, compensated electrical network, selective protection, Hoertzel algorithm, zero-sequence current and voltage, reactive power.

1. Amin Ghaderi, Herbert L. Ginn, Hossein Ali Mohammadpour High impedance fault detection. *Electric Power Systems Research.* 2017. Vol. 143. Pp. 376-388. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.021
2. Farughian A., Kumpulainen L., Kauhaniemi K. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks. *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 154. Pp. 373-380. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006
3. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. Pp. 949-958. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021

4. Santos W.C., Lopes F.V., Brito N.S.D., Souza B.A. High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32. No 1. Pp. 23-32.
DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2548942

5. Hajibandeh N., Faghihi F., Ranjbar H., Kazari H. Classifications of disturbances using wavelet transform and support vector machine. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*. 2017. Vol. 25. Pp. 832-843. DOI: https://doi.org/10.3906/elk-1511-124

6. Xuan Z., Xie S., Sun Q. The Empirical Mode Decomposition Process of Non-stationary Signals. *2010* International Conference on *Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Changsha City, 2010. Pp. 866-869. DOI: https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2010.280

7. Altonen J., Wahlroos A., Vähäkuopus S. Application of Multi-Frequency Admittance-Based Fault Passage Indication in Practical Compensated Mv-Network. 24-th International Conference on *Electricity Distribution*. Glasgow, 2017. No 0967.

8. Ha H., Subramanian S. Transient earth fault detection on compensated earthed system. 22th International Conference and Exhibition on *Electricity Distribution.* Stockholm, 2013. No 0119.
DOI: https://doi.org/10.1049/cp.2013.0567

9. Kyrylenko O.V., Seheda M.S., Butkevych O.F., Mazur T.A. Mathematical modeling in power engineering. Lviv: Lvivska politekhnika, 2013. 608 p. (Ukr)

10. Pitot F., Venkataraman K., Vassilevsky N., Teon C.P. Wattmetric earth fault protection – innovation for compensated distribution networks 23rd International Conference on *Electricity Distribution*. Lyon, 2015. No 0963.

11. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Microprocessor selective protection from the phase to the earth fault in electric networks with petersen coil in neutral. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 2. Pp. 54-62. (Rus)
DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.02.54

12. Michalik M., Rebizant W., Lukowicz M., Seung-Jae Lee, Sang-Hee Kang. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006. Vol. 21. No 4. Pp. 1793-1802. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874581

13. Syvokobylenko V.F., Derkachev S.V. Equivalent sinusoids method for digital measuring devices of relay protection. *Zbirnyk naukovykh prats DonNTU. Seriia Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia*. 2015. No 1(28). Pp. 215-221. (Rus)

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

В.Ф. Сивокобыленко, докт. техн. наук**, В.А. Лысенко,** канд. техн. наук
Донецкий национальный технический ун-т,
пл. Шибанкова, 2, Покровск, Донецкая обл., 85300, Украина.
E:mail: svf1934@gmail.com ; viktor.lysenko@donntu.edu.ua

Целью работы является совершенствование защиты от однофазных замыканий на землю для распределительных электрических сетей путем устранения недостатков известных методов защиты. Для селективного действия защиты определяют направление реактивной мощности с помощью выделенных из тока и напряжения нулевой последовательности составляющих с частотой, выше 50 Гц. Для этого используют цифровые частотные фильтры. С помощью математической модели выявлена возможность неселективной работы такого алгоритма из-за влияния апериодических составляющих в токах и напряжениях в переходных процессах. Также обнаружена недостаточная чувствительность защиты при замыканиях фазы на землю через активные сопротивления, больше 10-20 Ом. Получены зависимости реактивной мощности от частоты сигналов, выделяемых фильтрами Гертцеля. Эти фильтры взяты за основу, потому что они требуют меньших вычислительных затрат по сравнению с дискретным преобразованием Фурье. Предложено перед подачей тока и напряжения нулевой последовательности на частотные фильтры выполнять их дифференцировки, что ослабляет влияние апериодических составляющих на фазовые погрешности реле и значительно усиливает полезные сигналы. Для повышения чувствительности реле при замыканиях фазы на землю через активное сопротивление до 100 Ом в схему реле включают фильтры Гертцеля (для тока и напряжения) для выделения составляющих для двух различных частот, а реактивную мощность находят как сумму мощностей для первой и второй частоты. Чувствительность усовершенствованного алгоритма защиты по сравнению с известными повышена в 10-20 раз. Библ. 13, рис. 6, табл. 2.

Ключевые слова: замыкание фазы на землю, компенсированная электрическая сеть, селективная защита, алгоритм Гертцеля, ток и напряжение нулевой последовательности, реактивная мощность.

Надійшла 17.02.2020
Остаточний варіант 26.06.2020