В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (докт. техн. наук, проф.), **В.А. ЛИСЕНКО** (канд. техн. наук)

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
svf1934@gmail.com, viktor.lysenko@donntu.edu.ua

ВИЩІ ГАРМОНІКИ СТРУМУ І НАПРУГИ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ ЯК ДЖЕРЕЛО ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

Однофазні замикання на землю в мережах з незаземленою нейтраллю є розповсюдженим явищем і відноситься до більш широкого класу високоімпедансних ушкоджень. Проблема захисту від таких ушкоджень є достатньо складною і активно досліджується у всьому світі протягом останніх десятиліть. В даній статті запропоновано для спрямованого захисту використати інформацію, що міститься у високочастотних складових струму і напруги нульової послідовності під час перехідного процесу ушкодження ізоляції. Розглянуто спосіб виділення високочастотних складових за допомогою перетворення Фур'є. Розглянуто можливість застосування котушки Петерсена в мережі, а також ймовірне відхилення від резонансного налаштування котушки Петерсена. Принцип дії захисту заснований на визначенні напряму сумарної реактивної потужності вищих гармонік струмів і напруг нульової послідовності і чисельно знайдених їх похідних. Результати математичного моделювання показали, що при замиканні фази на землю протягом періоду фундаментальної частоти через перезаряд ємностей фаз у струмах і напругах нульової послідовності виникають вищі гармоніки. Потужності гармонік з другої по десяту порівнянні з потужністю першої гармоніки і їх можна використовувати для роботи захисту. Отримано позитивні результати роботи запропонованого способу захисту при математичному моделюванні і при випробуваннях на лабораторному стенді.

Ключові слова: *однофазне замикання на землю, релейний захист, незаземлена нейтраль, котушка Петерсена, перетворення Фур'є, високочастотні складові.*

Проблема і стан питання.

Електричні мережі середньої напруги (6-35 кВ) широко застосовуються в більшості країн світу для електропостачання промислових, міських і сільськогосподарських споживачів. На відміну від мереж напругою 110-750 кВ, що працюють з ефективно заземленою нейтраллю, в таких мережах використовують режим ізольованої або резонансно заземленої через котушку Петерсена (дугогасний реактор) нейтралі. Це дозволяє підвищити надійність електропостачання споживачів за рахунок деіонізації електричного розряду однофазного замикання на землю, що призводить до ліквідації замикання, або створення умов, які уможливають продовження роботи мережі протягом 2-4 і більше годин за наявності стійкого замикання. При однофазному замиканні на землю через місце замикання протікають порівняно невеликі ємнісні струми фазних провідників на землю, при цьому міжфазні напруги залишаються практично незмінними, напруги на непошкоджених фазах по відношенню до землі зростають до лінійних, а на пошкодженій фазі знижуються до нуля. Однофазні замикання на землю в мережах з незаземленою ефективно нейтраллю є окремим випадком більш широкого класу ушкоджень систем електропостачання, який називається High Impedance Faults (HIFs) (високоімпедансні ушкодження). До таких ушкоджень відноситься, наприклад, руйнування одного з фазних ізоляторів повітряної лінії, або падіння одного фазного провідника на землю (в мережах з незаземленою ефективно нейтраллю). За своїм характером однофазні замикання на землю можуть бути стійкими (як правило, утвореними контактом між металевими провідниками) або нестійкими (утвореними електричною дугою або іншими нестаціонарними процесами). Нестійкі замикання становлять найбільшу небезпеку, оскільки можуть призводити до пожеж, до появи перенапруг в мережі, до утворення міжфазних коротких замикань.

Для виявлення однофазних замикань на землю в даний час застосовують захист, заснований на використанні напруг і струмів нульової послідовності фундаментальної частоти (50 Гц) або гармонійних складових більш високих частот. Однак, існуючі пристрої струмового захисту не забезпечують надійну і селективну роботу при дугових однофазних замиканнях на землю в мережах з будь-яким режимом роботи нейтралі, а також в мережах з котушкою Петерсена при роботі в режимі перекомпенсації. Тому актуальним є вдосконалення систем захисту від однофазних замикань на землю. Шляхи вирішення цього завдання обговорюються в статті.

Огляд публікацій і недоліки відомих рішень. У всьому світі неабиякий інтерес приділяється дослідженню високоімпедансних ушкоджень в електричних системах, найбільш поширеним видом яких є однофазні замикання на землю в мережах з незаземленою ефективно нейтраллю. Кількість публікацій на цю тему є настільки великою, що регулярно з'являються оглядові статті [1, 2]. Високоімпедансні ушкодження можуть виникати як в результаті раптової дії зовнішніх факторів, так і в результаті зносу ізоляції, або поступового погіршення її якості. Виходячи з цього, привабливо виглядає можливість діагностики стану ізоляції за допомогою автоматичних пристроїв, які

б поєднували функції прогнозування ушкоджень і релейного захисту від таких ушкоджень [3]. Оскільки високоімпедансні ушкодження створюють потенційно пожежонебезпечну ситуацію, досліджуються можливості виявлення ознак спалаху в місці замикання [4].

Перспективними виглядають намагання використати вже напрацьовані методи і засоби цифрової обробки сигналів, які останніми роками забезпечили вражаюче зростання потужності засобів зв'язку, зокрема інтернет-зв'язку. Пропонується використовувати величезний масив напрацьованих щодо частотної фільтрації сигналів [5], корисною також виявляється хвилькова теорія, або теорія вейвлетів [6]. В [7] пропонується для виявлення високоімпедансних ушкоджень використовувати фазори першої і третьої гармонік струму фідера.

Взагалі, проблема захисту від високоімпедансних ушкоджень виявилась досить складною в результаті великого розмаїття особливостей конструкції електричних мереж, навантажень, погодних умов, ландшафтів тощо. В результаті, захист від високоімпедансних ушкоджень став певним випробувальним майданчиком для практичного застосування нових математичних методів і викликом для дослідників щодо розв'язання ще не вирішених проблемних завдань, які мають практичне значення.

Все це спонукає науковців тестувати й інші, більш складні, математичні методи аналізу сигналів. Зокрема, в [8] пропонується використовувати морфологічний градієнтний фільтр, який був розроблений для обробки зображень. В [9] поряд з методом головних компонент (PCA) використано генетичний алгоритм, в [10] для вирішення задачі пропонується використати машину підтримуючих векторів (SVM).

Якщо в складі авторів статті є не тільки науковці, але і співробітники електротехнічних підприємств (наприклад АБВ), то їх підходи до вирішення проблеми є більш консервативними. Наприклад в [11] для виявлення пошкодженого фідера пропонується порівнювати фази струмів фундаментальної частоти в перехідному процесі.

На нашу думку, найбільш перспективним є подальший розвиток викладеного в [12] підходу, заснованого на визначенні напрямку реактивної потужності вищих гармонійних складових у струмах і напругах, що виникають у перехідному процесі, з якого починається стійке або нестійке (дугове) замикання фази на землю.

Мета досліджень. Розробка захисту від однофазних замикань на землю спрямованої дії для електричних мереж напругою 6-35 кВ, заснованого на використанні вищих гармонік у струмах і напругах нульової послідовності, що виділяються за допомогою перетворення Фур'є. Напрямок дії захисту визначається за знаком реактивної потужності, що обчислюється як сума потужностей для всіх використовуваних гармонік.

Результати досліджень. Однією з характерних особливостей електричних мереж з ізольованою або компенсованою нейтраллю є те, що при однофазному замиканні на землю через порушення попереднього симетричного режиму виникає перехідний процес, в якому відбувається розряд ємностей пошкодженої фази і дозаряд до лінійної напруги ємностей здорових фаз. При цьому в струмах і напрузі нульової послідовності з'являються складові не тільки фундаментальної частоти, а й більш високих частот. Якщо за допомогою перетворення Фур'є виділити гармонічні складові, то це дозволить використовувати їх для селективного захисту від однофазних замикань на землю. Алгоритм захисту можна побудувати на визначенні знака реактивної потужності для високочастотних складових. Через великий опір котушки Петерсена для струмів вищих гармонік вони протікають в пошкодженому фідері в напрямку від шин, тоді як в непошкоджених фідерах до шин.

Відома аналітична залежність (1) для дискретного перетворення Фур'є (ДПФ- DFT) дозволяє з масиву відліків сигналу в часі виділити комплексні гармоніки сигналу, частота кожної з яких в k раз більша за першу:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \cdot \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \left[\cos(\frac{2\pi}{N} n \cdot k) - j \sin(\frac{2\pi}{N} n \cdot k) \right]. \quad (1)$$

Для захисту будемо використовувати вхідні сигнали у вигляді масивів розмірністю N з дискретних значень напруг і струмів нульової послідовності, записаних за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП-ADC) протягом періоду основної частоти f_1 з частотою дискретизації f_d . Крім того, нами запропоновано також використовувати вищі гармоніки, що містяться в похідних ($p=d/dt$) від струмів і напруг, що, як буде показано далі, дозволяє підвищити чутливість захисту в 7-10 разів. Для чисельного визначення похідних використовуємо три миттєві значення струму (напруги), крок розрахунку h і частоту першої гармоніки $\omega_1=2\pi f_1$:

$$px_n = \frac{d}{dt}(x_n) = \frac{1}{2\omega_1 h} (3x_n - 4x_{n-1} + x_{n-2}). \quad (2)$$

З урахуванням (2) вхідні сигнали струмів і напруг представимо тепер комплексними, такими що складаються з ортогональних складових:

$$u(t_n) = u_n + j \cdot pu_n; \quad i(t_n) = i_n + j \cdot pi_n. \quad (3)$$

Застосувавши перетворення Фур'є (1) для кожної зі складових у (3), отримаємо косинусні і синусні складові, які можуть бути як дійсними, так і уявними. Суму дійсних з них позначимо $u_x(k)$ для напруг і $i_x(k)$ для струмів, а суму уявних відповідно $u_y(k)$ і $i_y(k)$. Вирази (4) - (7) для цих складових мають вигляд:

$$u_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[u_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - pu_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right]; \quad (4)$$

$$u_y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[u_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + pu_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right]; \quad (5)$$

$$i_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[i_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - pi_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right]; \quad (6)$$

$$i_y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[i_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + pi_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right]. \quad (7)$$

Реактивну потужність для комплексних гармонік струму і напруги і їх амплітудні значення знаходимо як

$$Q_k = u_y(k) \cdot i_x(k) - u_x(k) \cdot i_y(k); \quad (8)$$

$$Au(k) = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}; \quad Ai(k) = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}. \quad (9)$$

Після визначення струмів і напруг нульової послідовності і їх похідних, за допомогою перетворення Фур'є (DFT) визначають спектральний склад гармонійних складових і реактивну потужність вищих гармонік. Пристрій захисту від однофазних замикань на землю, який підключається до трансформаторів струму і напруги нульової послідовності, моделюється спільно із загальною моделлю мережі згідно з розробленим алгоритмом роботи захисту.

Блок-схему реле цифрового захисту від однофазних замикань на землю, в якій реалізуються співвідношення (1) - (8) для визначення реактивної потужності гармоніки, показано на рис.1. Вона складається з аналого-цифрових перетворювачів сигналів (ADC), блоків диференціювання (d/dt), підсумовування (Σ), добутку ($\times$) і дискретного перетворення Фур'є (DFT). Вхідні сигнали струму і напруги після ADC надходять як безпосередньо, так і після блоків похідних, на відповідні блоки DFT. За допомогою вихідних сигналів останніх після блоків сумування і блоків добутку знаходиться реактивна потужність для гармоніки. Потім цикл повторюється для всіх інших врахованих гармонік і знаходиться їх загальна сума. Якщо загальна сума потужностей гармонік перевищує порогове значення, надходить сигнал про роботу захисту.

Рисунок 1 – Блок-схема частини реле для визначення реактивної потужності гармоніки

Для дослідження перехідних процесів і аналізу роботи захисту при однофазних замиканнях на землю скористаємося математичною моделлю типової системи електропостачання напругою 6 кВ, принципову заступну схему якої показано на рис.2.

Схема містить трифазний трансформатор, що живить систему (вітки 10-12), від збірних шин відходять три кабельні лінії (фідери F1-F3, гілки 1-9), котушки Петерсена в нейтралі мережі (вітка 13). Кожна фаза (вітка) складається з активного опору, індуктивності і ємності, паралельно якій підключено опір ізоляції.

Для заданої схеми формують топологічну матрицю з'єднань вузли-гілки, вектори-стовпці параметрів віток, фазних ЕРС джерела живлення, ЕРС протидії, що створюються індуктивностями і ємностями віток.

Рисунок 2 – Принципова заступна схема системи електропостачання напругою 6 кВ

Невідомі струми індуктивностей і напруги ємностей на кожному кроці розрахунку знаходимо методом вузлових напруг. Для забезпечення чисельної стійкості математичної моделі диференціальні рівняння віток вирішуються неявним методом другого порядку, для чого їх подають як різниці рівняння. Більш докладний опис моделі наведено в [13].

Для з'ясування характеру розподілу струмів, напруг і реактивної потужності в мережі при однофазних замиканнях на землю для гармонійних складових різної частоти було виконано відповідні розрахунки, в яких фазні ємності на землю фідерів F1-F3 було прийнято відповідно рівними 6, 4 і 2 мкФ, резонансна індуктивність котушки Петерсена $L_R = 0,282$ Гн (вітка 13), опір ізоляції фаз на землю 1 МОм. Струм усталеного однофазного замикання на землю становить 41,12 А.

Однофазне замикання на землю моделювалося на фазі А гілки 1 через опір від 1 до 1000 Ом. Для компенсованої мережі індуктивність котушки Петерсена приймалася $0,3L_R$, L_R і $3L_R$. При моделюванні частота мережі приймалася рівною 50 Гц, частота дискретизації 2000 Гц, кількість дискретних точок за період $N = 40$, крок розрахунку 500 мкс.

Результати моделювання однофазних замикань на землю показали, що як початкові значення струмів, напруг і потужності, так і характер перехідного процесу істотно залежать від початкового миттєвого значення напруги на пошкодженій фазі. Найменш інтенсивний характер зміни струмів, напруг і їх похідних має місце при близькій до нуля миттєвій напрузі (рис.3), тоді як при амплітудному значенні цієї напруги зазначені величини (рис.3б) майже на порядок зростають.

Рисунок 3 – Характер зміни напруг, струмів і їх похідних при однофазному замиканні на землю при $u \approx 0$ (а) і при $u = U_{max}$ (б)

Для забезпечення достатньої чутливості захисту від однофазних замикань на землю в різних режимах мережі необхідно зробити вибір найбільш значущих вищих гармонік. Відповідні розрахунки амплітудних значень для струмів, напруг і реактивної потужності для 15 перших гармонік було виконано для резонансного налаштування котушки Петерсена і для різної початкової миттєвої напруги. Результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення амплітуд гармонійних складових струмів A_i , напруг A_u і реактивної потужності Q в досліді з різними миттєвими напругами в момент замикання фази на землю

Гармоніка	Дослід замикання при $u \approx 0$			Дослід замикання при $u = U_{\max}$			Дослід замикання при $u = 0,5U_{\max}$		
	A_u, V	A_i, A	Q, kVA	A_u, V	A_i, A	Q, kVA	A_u, V	A_i, A	Q, kVA
№1	8466	50.68	-323.2	5570	34.04	-1299	5438	34.75	-58.37
№2	1801	26.11	31.3	4968	36.01	176.00	5103	36.76	184.50
№3	1576	23.94	33.4	1907	62.28	118.50	1961	64,17	125.60
№4	1191	20.86	24.8	3061	83.47	253.80	3150	85.80	268.40
№5	678.0	20.39	10.6	2267	113.6	256.90	2334	117,0	272.40
№6	150,7	23,94	2.6	2825	142.9	399.80	2907	147	423.20
№7	348.0	26.28	6.8	2360	163.3	384.60	2431	168	408.00
№8	492,1	23.31	10.9	2078	165.1	337.30	2137	170	357.00
№9	398,5	17.69	6.7	1684	152.6	256.80	1736	157	272.50
№10	218,5	13.80	1.0	1204	139.3	162.40	1237	143	171.80
№11	85,93	12.72	-1.07	1103	126.6	139.60	1137	130	148.30
№12	137,6	12.45	0.02	727.9	118.6	81.83	747	122	86.52
№13	194,9	11.38	1.65	774.2	111.0	85.95	798	114	91.28
№14	200.0	9.42	1.88	450.9	106.7	44.71	462	109	47.23
№15	166.0	7.57	0.72	555.7	101.8	56.55	573	105	60.08

З даних табл. 1 випливає, що при однофазних замиканнях на землю під час перехідного процесу протягом періоду першої гармоніки (20 мс) реактивні потужності вищих гармонік пошкодженого фідера додатні, а непошкоджених від'ємні, що дозволяє цю властивість використовувати для захисту спрямованої дії. Найбільші значення амплітуд струмів, напруги і потужності мають місце при напрузі в момент замикання $u = u_{\max}$. При цьому амплітуди струмів деяких гармонік перевищують значення першої. Потужності гармонік вище восьмої істотно знижуються і тому для захисту можна прийняти суму потужностей тільки гармонік з другої по восьму. Порогове значення потужності слід вибирати з режиму однофазного замикання на землю за умови, коли сумарна потужність гармонік є мінімальною.

З метою врахування впливу величини індуктивності котушки Петерсена на перехідний процес і поведінку захисту було виконано розрахунки перехідних процесів однофазних замикань на землю за умови резонансного налаштування котушки Петерсена, при недо- і перекомпенсації. Результати розрахунків наведено в таблиці 2. З даних таблиці 2 випливає, що найменше значення потужності має місце при перекомпенсації. Однак, селективність дії захисту забезпечується в усіх випадках. Для випадку ізольованої нейтралі потужності значно зростають.

Таблиця 2 – Сумарна реактивна потужність (kVA) вищих гармонік при однофазних замиканнях на землю з різними значеннями початкової напруги та індуктивності котушки Петерсена.

L	$0,3L_R$	L_R	$3L_R$	$2000L_R$
$u = 0$	95	100	160	220
$u = 0,5U_{\max}$	560	1000	1500	3600
$u = U_{\max}$	1330	2000	3100	2670

Характер зміни сумарної потужності вищих гармонік при однофазному замиканні на землю показано на рис.4.

Рисунок 4 – Характер зміни реактивної потужності, струму і напруги нульової послідовності при однофазному замиканні на землю

Логічна частина алгоритму захисту містить блокуючий орган, який дозволяє роботу, тільки якщо величина напруги нульової послідовності перевищує 10-15% номінальної фазної напруги, а струм складає більше 10-15% ємнісного струму замикання на землю пошкодженого приєднання. Команда на спрацювання вихідного органу захисту подається, якщо перевищення порогового значення потужності спостерігається не менше, ніж на 3-5 кроках розрахунку поспіль.

Для прикладу на рис.5 наведено результат роботи захисту при багаторазових замиканнях фази на землю з різними значеннями аперіодичних складових у струмі нульової послідовності. У всіх випадках бачимо чітку роботу вихідного органу захисту.

Рисунок 5 – Результати роботи захисту при нестійкому однофазному замиканні на землю з різними значеннями аперіодичних складових у струмі

Результатами математичного моделювання алгоритму захисту і випробувань лабораторного зразка на стенді підтверджено працездатність захисту, що дозволяє рекомендувати його застосування в електричних мережах напругою 6-35 кВ.

Висновки.

1. Розроблено спрямований захист від однофазних замикань на землю в електричних мережах напругою 6-35 кВ, що працюють з ізольованою або заземленою через котушку Петерсена нейтраллю. Напрямок дії захисту визначають за знаком сумарної реактивної потужності вищих гармонік, отриманих за допомогою дискретного перетворення Фур'є струмів і напруг нульової послідовності і чисельно знайдених їх похідних.
2. Показано, що використання вищих гармонік у похідних від струмів і напруг забезпечує підвищення чутливості захисту приблизно в 10 раз, що дозволяє виявляти замикання на землю через опір до 1000 Ω .
3. Розроблено алгоритм і лабораторний зразок пристрою для захисту від стійких і дугових однофазних замикань на землю, для якого отримано позитивні результати роботи при математичному моделюванні і при випробуваннях на стенді.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. J. Mora-Flórez, G. Morales-España, S. Pérez-Londoño "Classification methodology and feature selection to assist fault location in power distribution systems," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 2008(44).
- [2] D. M. Soomro, A. Tawafan, F. I. Jabbar "Methods in Single Phase to Ground Faults on Power Distribution Systems" *Journal of Engineering and Applied Sciences* 14(7): October 2019 10058-10066 DOI: 10.36478/jeasci.2019.10058.10066.
- [3] Aizenberg, I.; Belardi, R.; Bindi, M.; Grasso, F.; Manetti, S.; Luchetta, A.; Piccirilli, M.C. "Failure Prevention and Malfunction Localization in Underground Medium Voltage Cables," *Energies* 2021, 14, 85. <https://dx.doi.org/10.3390/en14010085/>
- [4] S. Kandanaarachchi, N. Anantharama and M. A. Muñoz, "Early Detection of Vegetation Ignition Due to Powerline Faults," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 3, pp. 1324-1334, June 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3006553.
- [5] Solovev D. B. "Selection of Digital Filter for Microprocessor Protection Relays" *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 8, No. 3, June 2018, pp. 1498~1512, DOI: 10.11591/ijece.v8i3.pp1498-1512.
- [6] А. М. Мисриханов "Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике," *Автоматика и телемеханика*, 2006, выпуск 5, с. 5–23.
- [7] M. G. M. Zanjani, H. K. Kargar and M. G. M. Zanjani, "High impedance fault detection of distribution network by phasor measurement units," *2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution*, 2012, pp. 1-5.
- [8] K. Sekar, N.K. Mohanty "A fuzzy rule base approach for High Impedance Fault detection in distribution system using Morphology Gradient filter," *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 32 (2020) 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.12.001>.

- [9] M.-R. Haghifam; A.-R. Sedighi; O.P. Malik "Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection" IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution Volume 153, Issue 3, May 2006, p. 359 – 367 DOI: 10.1049/ip-gtd:20045224.
- [10] M. Sarwar, F. Mehmood, M. Abid, A. Q. Khan, Sufi T. Gul, A. S. Khan "High impedance fault detection and isolation in power distribution networks using support vector machines," / Journal of King Saud University – Engineering Sciences 32 (2020) 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.07.001>
- [11] P. Balcerek, M. Fulczyk, E. Rosolowski, J. Izykowski and P. Pierz, "New algorithm for determination of faulty feeder in distribution network," 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), 2012, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2012.0019.
- [12] В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Лисенко "Удосконалення захисту від замикань на землю в розподільних мережах," Технічна електродинаміка 2020(5), с. 54–61, DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.054>.
- [13] В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Лисенко "Микропроцессорная селективная защита от замыканий фазы на землях электрических сетях с катушкой петерсена в нейтрале," Технічна електродинаміка 2019(2), с. 54–62, doi:10.15407/techned2019.02.054.

REFERENCES

- [1] J. J. Mora-Flórez, G. Morales-España, S. Pérez-Londoño "Classification methodology and feature selection to assist fault location in power distribution systems," Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia 2008(44).
- [2] D. M. Soomro, A. Tawafan, F. I. Jabbar "Methods in Single Phase to Ground Faults on Power Distribution Systems" Journal of Engineering and Applied Sciences 14(7): October 2019 10058-10066 DOI: 10.36478/jeasci.2019.10058.10066.
- [3] Aizenberg, I.; Belardi, R.; Bindi, M.; Grasso, F.; Manetti, S.; Luchetta, A.; Piccirilli, M.C. "Failure Prevention and Malfunction Localization in Underground Medium Voltage Cables," Energies 2021, 14, 85. <https://dx.doi.org/10.3390/en14010085/>
- [4] S. Kandanaarachchi, N. Anantharama and M. A. Muñoz, "Early Detection of Vegetation Ignition Due to Powerline Faults," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 3, pp. 1324-1334, June 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3006553.
- [5] Solovev D. B. "Selection of Digital Filter for Microprocessor Protection Relays" International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 8, No. 3, June 2018, pp. 1498~1512, DOI: 10.11591/ijece.v8i3.pp1498-1512.
- [6] A. M., Misrikhanov "Primenenye metodov veivlet-preobrazovaniia v elektroenerhetike, " Avtomatika i telemekhanika, 2006, issue 5, p. 5-23.(Rus).
- [7] M. G. M. Zanjani, H. K. Kargar and M. G. M. Zanjani, "High impedance fault detection of distribution network by phasor measurement units," 2012 Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution, 2012, pp. 1-5.
- [8] K. Sekar, N.K. Mohanty "A fuzzy rule base approach for High Impedance Fault detection in distribution system using Morphology Gradient filter," Journal of King Saud University – Engineering Sciences 32 (2020) 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.12.001>.
- [9] M.-R. Haghifam; A.-R. Sedighi; O.P. Malik "Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high-impedance fault detection" IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution Volume 153, Issue 3, May 2006, p. 359 – 367 DOI: 10.1049/ip-gtd:20045224.
- [10] M. Sarwar, F. Mehmood, M. Abid, A. Q. Khan, Sufi T. Gul, A. S. Khan "High impedance fault detection and isolation in power distribution networks using support vector machines," / Journal of King Saud University – Engineering Sciences 32 (2020) 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.07.001>
- [11] P. Balcerek, M. Fulczyk, E. Rosolowski, J. Izykowski and P. Pierz, "New algorithm for determination of faulty feeder in distribution network," 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), 2012, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2012.0019.
- [12] V.F. Syvokobylenko, V.A. Lysenko "Earth fault protection improvement on distribution networks" Technical Electrodynamics, 2020(5), pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.054> (Ukr).
- [13] V.F. Syvokobylenko, V.A. Lysenko "Microprocessor selective protection from the phase to the earth fault in electric networks with petersen coil in neutral," Technical Electrodynamics 2019. No 2. Pp. 54-62. doi:10.15407/techned2019.02.054. (Ukr).

Надійшла до редколегії 19.03.2021

Рецензент: д.т.н. Нікіфоров А. П.

V.F. SYVOKOBYLENKO, V.A. LYSENKO
Donetsk National Technical University

Higher harmonics of zero sequence current and voltage as a source of information for single-phase earth fault protection. Single-phase earth faults in networks with ungrounded neutral are common and belong to a wider class of high-impedance damage. The problem of protection against such damage is quite complex and has been actively studied around the world in recent decades. In this article, it is proposed to use the information contained in the high-frequency components of the current and voltage of the zero-sequence during the transient process of insulation damage for targeted

protection. The method of selection of high-frequency components is considered. The possibility of using a Petersen coil in the network is considered, as well as the probable deviation from the resonant tuning of the Petersen coil. The peculiarities of the transient process depending on the instantaneous voltage at the moment of a short circuit are investigated. Simulation of single-phase short circuits with different active resistance in the short circuit place is carried out. The spectral composition of zero-sequence currents and voltages during the transient process is analyzed. The dependence of the power of high-frequency components on the quality of Petersen coil tuning, instantaneous voltage at the time of short circuit, and active resistance at the time of short circuit is investigated. The principle of protection is based on determining the direction of the total reactive power of the higher harmonics of currents and voltages of zero sequence and the numerically found derivatives. The results of mathematical modeling showed that at the moment when the phase is closed to the ground, due to the recharging of the capacitance of the phase conductors in currents and voltages of zero sequence, higher harmonics occur. The power of the harmonics from the second to the tenth can be compared with the power of the first harmonic and they should be used for protection. Positive results of work of the offered way of protection at mathematical modeling and at tests on a laboratory stand are received.

Key words: *single-phase earth fault, relay protection, ungrounded neutral, Petersen coil, Fourier transform, high-frequency components.*