

В.Ф. Сивокобиленко, В.А. Лисенко

МУЛЬТИЧАСТОТНИЙ МЕТОД ЗАХИСТУ ВІД ЗАМИКАНЬ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ В КОМПЕНСОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

За допомогою математичної моделі компенсованої електричної мережі виконано аналіз струмів і напруг нульової послідовності при замиканнях фази на землю і показано, що в них під час перехідного процесу виникають вищі гармонійні складові, які обумовлені розрядом ємностей ушкодженої фази, дозарядом ємностей неушкоджених фаз, а також зростанням струму реактора в нейтралі мережі. Показано, що незалежно від ступеня компенсації реактором ємнісного струму промислової частоти, реактивна потужність для гармонічних складових струмів і напруг з частотою в два рази і більше промислової, є додатною для ушкодженого присоединення і від'ємною для неушкоджених. Це прийнято за основу в розробленому методі захисту направленої дії, в якому при замиканнях фази на землю спочатку визначають похідні струмів і напруг нульової послідовності, що зменшує вплив аперіодичних складових і підсилює складові вищих гармонік, а потім за допомогою перетворення Фур'є знаходять комплексні значення для ряду найбільш впливових гармонічних складових, більших за першу. За допомогою отриманих складових струмів і напруг для кожної частоти знаходять реактивну потужність, і якщо їх сума перевищує задану, то спрацьовує вихідний орган захисту. Достовірність розробленого методу захисту підтверджено результатами математичного моделювання і перевіркою роботи дослідного зразка на лабораторному стенді. Бібл. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: електрична мережа, захист від замикань на землю, струм і напруга нульової послідовності, перетворення Фур'є, частотний спектр.

С помощью математической модели компенсированной электрической сети выполнен анализ токов и напряжений нулевой последовательности при замыканиях фазы на землю и показано, что у них во время переходного процесса возникают высшие гармонические составляющие, которые обусловлены разрядом емкостей поврежденной фазы, дозарядом емкостей неповрежденных фаз, а также ростом тока реактора в нейтрали сети. Показано, что независимо от степени компенсации реактором емкостного тока для промышленной частоты, реактивная мощность, рассчитанная для выделенных гармонических составляющих токов и напряжений с частотой в два раза и более промышленной, положительная для поврежденного присоединения и отрицательная для неповрежденных. Это принято за основу в разработанной защите направленного действия, в которой при замыканиях фазы на землю сначала определяют производные токов и напряжений нулевой последовательности, что уменьшает влияние аперіодических составляющих и усиливает гармонические составляющие, а затем с помощью преобразования Фурье находят комплексные значения для ряда наиболее влиятельных гармонических составляющих, больших первой. С помощью полученных составляющих токов и напряжений для каждой частоты находят реактивную мощность, и если их сумма превышает заданную, то срабатывает выходной орган защиты. Достоверность разработанной защиты подтверждена результатами математического моделирования и проверкой работы опытного образца на лабораторном стенде. Библ. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: электрическая сеть, защита от замыканий на землю, ток и напряжение нулевой последовательности, преобразования Фурье, частотный спектр.

Актуальність теми та її зв'язок з прикладними задачами. Електричні мережі напругою 6-10 кВ, що працюють в режимі незаземленої нейтралі є основою систем електропостачання промислових підприємств, електростанцій, міст. Зважаючи на велику протяжність і широку розповсюдженість таких мереж, актуальною є проблема захисту мереж від найбільш поширеного ушкодження ізоляції – однофазного замикання на землю. Значна частка замикань на землю є нестаціонарним і короткочасним процесом, який супроводжується електричною дугою. У таких випадках пристрій захисту від замикань на землю, що реагує на усталений струм і напругу в мережі, не здатен діяти правильно. Також застосування котушки Петерсена для компенсації ємнісного струму замикання на землю ускладнює роботу пристроїв захисту, оскільки суттєво зменшує струм однофазного замикання на землю в усталеному режимі.

Огляд публікацій і недоліки відомих рішень. Проблема аналізу перехідних процесів в мережах з незаземленою нейтраллю з метою створення ефективного алгоритму захисту від нестійких замикань на землю активно досліджується в Європі і в усьому світі [1-3]. Зокрема, в роботі [3] досліджується аперіодична складова перехідного процесу однофазного замикання на землю і аналізується її вплив на роботу

відомих методів захисту від таких замикань. Багато уваги приділяється особливостям математичного моделювання електричної дуги у місці пошкодження і методам класифікації різних видів пошкоджень [4, 5]. В роботі [6] досліджуються способи фільтрації сигналів давачів струму і напруги, а також приділяється увага тестуванню їх за допомогою реальних сигналів, записаних реєстратором на діючій підстанції. В роботі [7] розробляються методи ідентифікації однофазних замикань на землю і аналізується чутливість таких методів в умовах великих опорів у місці замикання. Досліджуються математичні моделі електричних мереж, які включають також і моделі пристроїв релейного захисту [8, 9]. Ведеться пошук оптимальних параметрів математичних методів обробки сигналів первинних давачів і уставок спрацювання систем захисту від однофазних замикань на землю [6, 10]. Також відомо про спроби використання для захисту від однофазних замикань на землю різних методів «чорної скриньки» типу нейронних мереж тощо, однак, на наш погляд, не вичерпаними є можливості більш простих підходів, серед яких найбільш привабливим є аналіз і використання складових різної частоти в струмах ($3i_0$) і напрузі ($3u_0$) нульової послідовності.

© В.Ф. Сивокобиленко, В.А. Лисенко

Мета досліджень. За допомогою математичної моделі вивчити гармонійний склад струмів і напруг нульової послідовності в компенсованих електричних мережах при замиканнях фази на землю і розробити метод селективного захисту шляхом використання гармонійних складових, які виникають у струмах і напрузі нульової послідовності в перехідних процесах.

Основний матеріал і отримані результати. У роботах [8, 9] для селективного захисту від замикань фази на землю запропоновано за допомогою частотних фільтрів виділяти зі струму нульової послідовності $3i_0$ і напруги нульової послідовності $3u_0$ складові однієї з частот, наприклад, 200 або 300 Гц і забезпечувати селективність роботи захисту за напрямком розрахункової реактивної потужності, вплив на яку реактора при вказаних частотах значно послаблюється. В даній роботі для підвищення чутливості захисту розглядається можливість використання одночасно струмів і напруг для декількох частот, знайдених за допомогою перетворення Фур'є.

Для дослідження гармонійного складу струмів $3i_0$ і напруги $3u_0$ нульової послідовності скористаємось математичною моделлю, яку описано в [8]. Застосуємо її, наприклад, для компенсованої електричної мережі, що складається з лінії електропередачі 110 кВ, понижувального трансформатора, який підключено до секції 6 кВ з трьома кабельними лініями, фазні ємності в кожній з яких становлять відповідно 3,8 і 12 мкФ. Нейтраль мережі заземлена через реактор з резонансною індуктивністю 0,142 Гн. Результати моделювання глухого і дугового однофазного замикання на землю (ОЗЗ) за різних режимів налаштування реактора показали, що струми $3i_0$ і напруга $3u_0$ на початку перехідного процесу містять у собі з різними сталими затухання аперіодичні і періодичні складові, які обумовлені розрядом ємностей ушкодженої фази, дозарядом ємностей неушкоджених фаз, а також зростанням струму реактора в нейтралі мережі. Тривалість цього перехідного процесу становить близько періоду промислової частоти (20 мс). Порівняння спектрів Фур'є для струмів $3i_0$ і напруг $3u_0$, а також для їх похідних $p(3i_0)$ і $p(3u_0)$, показало, що амплітуди гармонік і розрахункові значення реактивної потужності за допомогою похідних є майже на порядок більшими і їх доцільно використати для захисту. Характер зміни в часі похідних струму і напруги нульової послідовності при ОЗЗ показано на рис. 1. Операція диференціювання значно зменшує аперіодичні складові і підсилює складові більш високої частоти. Чисельний розрахунок ортогональних складових сигналів за допомогою похідних $p(3i_0)$ і $p(3u_0)$ виконується за (1) за трьома дискретними миттєвими значеннями струму (напруги) x_{n-2} , x_{n-1} , x_n для кроку розрахунку, наприклад, $h = 0,625$ мс і для частоти $\omega = 314$ с⁻¹.

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

Спектр Фур'є (рис. 2) був розрахований для даних, які приведені на рис. 1 і з яких було сформовано масив з $N = 32$ дискретними елементами упродовж часу 0,02 с.

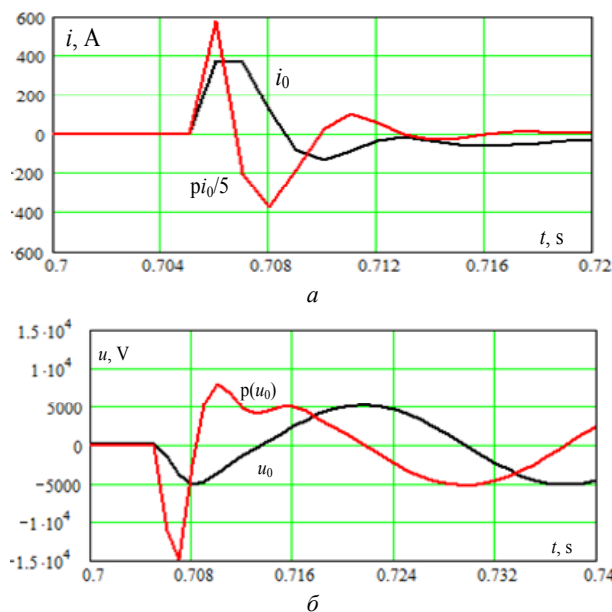


Рис. 1. Характер зміни в часі струму нульової послідовності та похідної цього струму (а), напруги нульової послідовності та похідної цієї напруги (б) при ОЗЗ

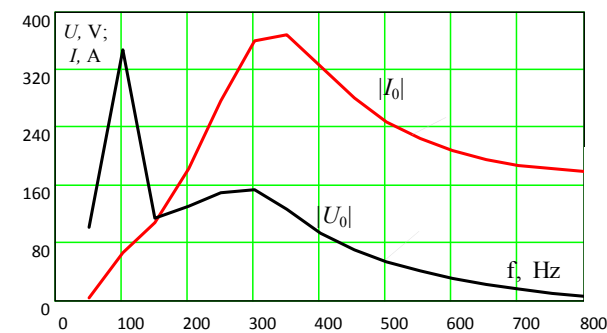


Рис. 2. Спектр Фур'є для похідних струму і напруги нульової послідовності при ОЗЗ

З числових даних, які отримано за допомогою функції $fft(y)$ пакету MathCAD і наведено на рис. 2, витікає, що найбільш впливові гармоніки знаходяться в діапазоні частот 150-500 Гц. Розрахунок для кожної k -тої гармоніки реактивних потужностей за допомогою комплексних значень струмів і напруг, що отримані за допомогою перетворення Фур'є, виконуються за виразами (2):

$$\begin{aligned} q_k &= i_{ak} \cdot u_{\beta k} - i_{\beta k} \cdot u_{ak}; \\ p(\vec{i}_0)_k &= i_{ak} - j i_{\beta k}; \\ p(\vec{u}_0)_k &= u_{ak} + j u_{\beta k}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результати розрахунку за допомогою перетворення Фур'є амплітуд струмів і напруг, реактивних і активних потужностей для гармонік кратних першій ($f_0 = 50$ Гц) в діапазоні від 1 до 9 наведені в табл. 1.

Дані (табл. 1) приведені для режиму резонансного налаштування реактора. Згідно з цими даними, для захисту доцільно використати гармоніки з кратністю 3, 4, 5, 6, для яких значення реактивної потужності є максимальними. Розрахунки для режимів перекомпенсації реактора показали, що реактивна потужність для гармонік 1, 2 може бути від'ємною і тому для захисту ці гармоніки використовувати небажано.

Таблиця 1
Результати розрахунку реактивних і активних потужностей та амплітуд гармонійних складових для похідних струмів і напруг

f/f_0	I, A	U, V	Q, kVA	P, kW
1	66,15	5196	226	-259
2	106,6	1715	182,8	3,058
3	181,3	1957	354,5	11,22
4	277,0	2234	618,8	6,941
5	360,0	2287	822,7	-37,46
6	367,4	1900	692	-95,31
7	324,0	1406	441	-11,32
8	280,0	1044	273	-104
9	246,0	796	177	-85,48

З урахуванням отриманих розрахункових даних розроблено метод селективного захисту, блок-схему алгоритму якого наведено на рис. 3 і в якій присутні: аналого-цифрові перетворювачі – ADC, блоки перетворення Фур'є – FFT, блоки визначення похідних d/dt , блоки перемноження – X, блок підсумовування – Σ , компаратори для порівняння з уставкою амплітуд напруги $3u_0$ для частоти 50 Гц і сумарної реактивної потужності Q_T для вибраних гармонік з уставкою U_T , логічні елементи OR, AND і вихідний орган Relay.

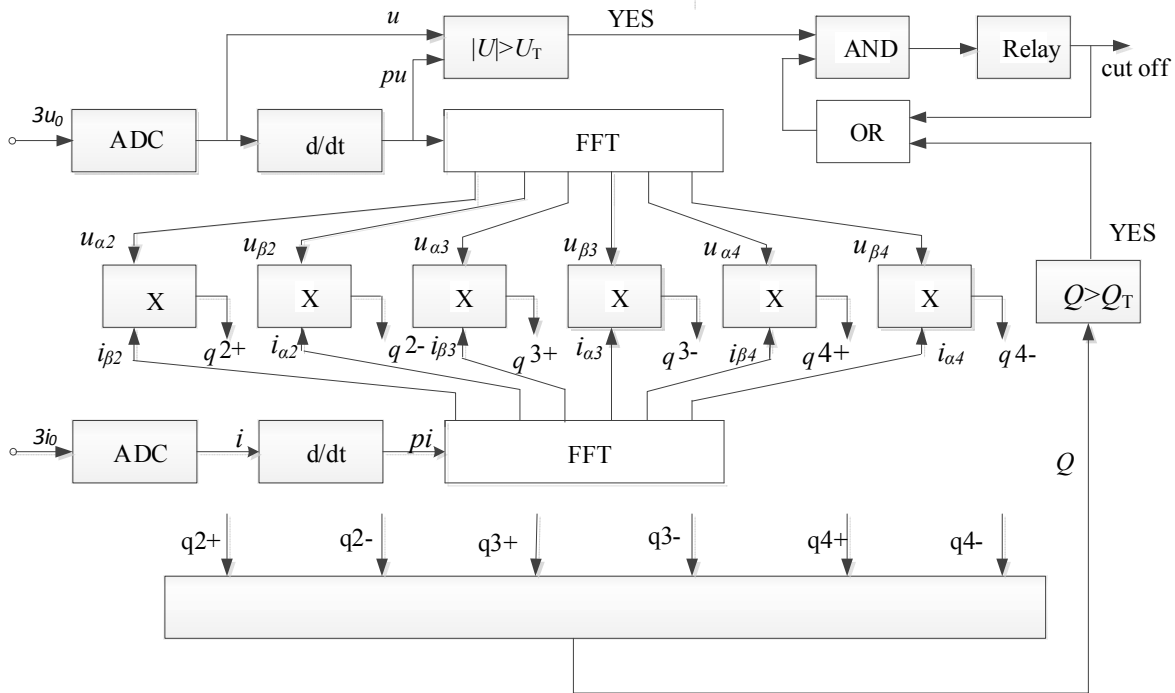


Рис. 3. Блок-схема мультичастотного методу селективного захисту від замикань фази на землю в компенсованих мережах

Пусковий орган захисту спрацьовує у випадку перевищення амплітудою напруги $3u_0$ уставки U_T , яка становить 10-15 % від номінальної. Амплітуда цієї напруги розраховується за ортогональними складовими, які отримують з блоків ADC і d/dt , а потім розраховують як $\sqrt{u_n^2 + (pu_n)^2}$.

Вхідні сигнали реле – струм $3i_0$ і напруга $3u_0$ після блоків ADC і диференціювання d/dt надходять до блоків перетворення Фур'є, в яких для заданих частот $f_2 - f_n$ розраховують комплексні значення гармонійних складових для струмів (синусні $i_{\beta 2}, i_{\beta 3}, \dots$ і косинусні $i_{\alpha 2}, i_{\alpha 3}, \dots$) і для напруг (синусні $u_{\beta 2}, u_{\beta 3}, \dots$ і косинусні $u_{\alpha 2}, u_{\alpha 3}, \dots$). На основі цих значень для кожної із частот у відповідних блоках перемноження X розраховують додатні (q^+) і від'ємні (q^-) значення реактивної потужності. Для кожної частоти їх знаходять як:

$$q^+ = u_{\beta} \cdot i_{\alpha}; \quad q^- = u_{\alpha} \cdot i_{\beta}; \quad q = q^+ - q^-.$$

У загальній математичній моделі компенсованої електричної системи і реле захисту програмний модуль для реалізації перетворення Фур'є і визначення сумарної реактивної потужності вищих гармонік f (з третьої по шосту) наведено на рис. 4.

$$\begin{aligned}
 Fur(FI, FU) := & \begin{cases} I \leftarrow FI \\ U \leftarrow FU \\ N \leftarrow rows(U) \\ \text{for } f \in 3..6 \\ \left| \begin{aligned} I_{co_f} &\leftarrow \sum_{n=1}^N I_n \cdot \cos\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{N} \cdot (N - n)\right] \\ I_{si_f} &\leftarrow \sum_{n=1}^N I_n \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{N} \cdot (N - n)\right] \\ U_{co_f} &\leftarrow \sum_{n=1}^N U_n \cdot \cos\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{N} \cdot (N - n)\right] \\ U_{si_f} &\leftarrow \sum_{n=1}^N U_n \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{N} \cdot (N - n)\right] \\ Q_f &\leftarrow \frac{2^2}{N^2} \cdot (I_{co_f} \cdot U_{si_f} - I_{si_f} \cdot U_{co_f}) \end{aligned} \right. \\ Q &\leftarrow \sum_{f=3}^6 Q_f \end{cases}
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Програмний модуль у пакеті MathCAD для реалізації перетворення Фур'є в реле захисту від ОЗЗ

Результати математичного моделювання методу захисту при ОЗЗ показали, що сумарна реактивна потужність гармонік залежить від миттєвого значення фазної напруги в момент виникнення замикання. Найбільше значення реактивної потужності має місце при досягненні фазною напругою (u_f) амплітудного значення (рис. 5,а,б), а найменше – при досягненні нульового значення (рис. 5,б,г). Ці значення потужності (рис. 5,в,г) відрізняються більш ніж на порядок, що необхідно враховувати, вибираючи значення уставки для компаратора Q_T .

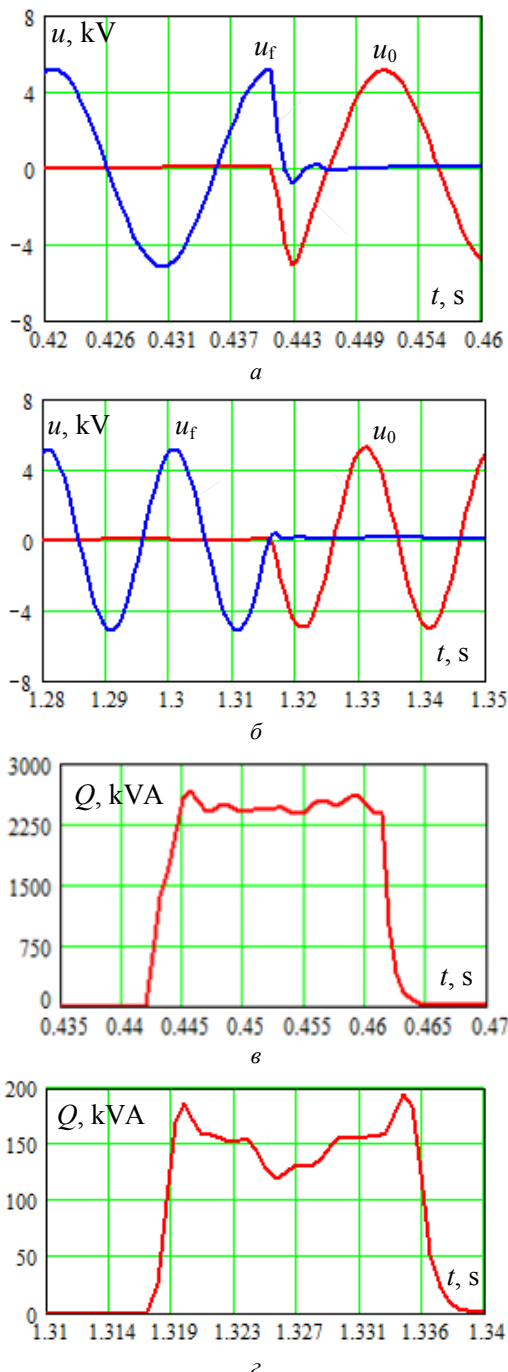


Рис. 5. Результати розрахунків реактивної потужності (в, г) при виникненні ОЗЗ при максимальному (а) і при мінімальному (б) значеннях фазної напруги

Результати математичного моделювання роботи реле при дугових замиканнях на землю, перше з яких виникло при амплітудному значенні фазної напруги, а

друге при нульовому, показані на рис. 6. Характер зміни напруги $3u_0$ – на рис. 6,а, струму $3i_0$ і його похідних $p(3i_0)$ – на рис.6,б, а контактів вихідного органу реле – на рис. 6,в. В обох випадках отримано чітку роботу реле захисту.

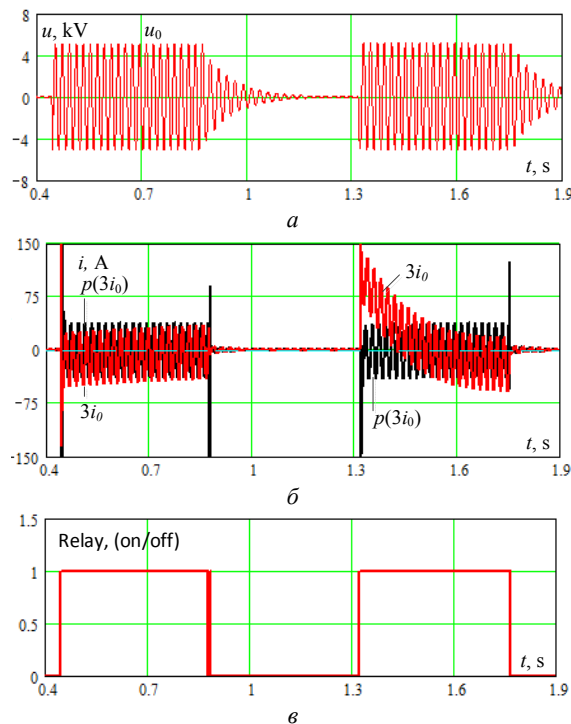


Рис. 6. Результати моделювання поведінки реле захисту при ОЗЗ з різними аперіодичними складовими в $3i_0$

Моделювання роботи реле захисту за умови п'ятикратної недокомпенсації і перекомпенсації ємнісного струму, а також при ОЗЗ в зоні і поза зоною захисту, підтвердило правильну і надійну роботу реле.

Дослідний зразок захисту за алгоритмом, наведеним на рис. 3, було реалізовано на базі мікроконтролера STM32F4Discovery. Задовільна його робота при ОЗЗ отримана на фізичній моделі компенсованої електричної мережі напругою 0,4 кВ, а також при подачі сигналів струму і напруги нульової послідовності, які були записані цифровими регістраторами в реальній мережі при ОЗЗ.

Результати моделювання і експериментів підтверджують можливість впровадження розробленого захисту в діючих електричних мережах.

Висновки.

1. Результатами математичного моделювання показано, що в компенсованих електричних мережах при замиканні фази на землю реактивна потужність ушкодженого приєднання, яку знайдено за допомогою гармонічних складових виділених зі струму і напруги нульової послідовності для частот, більших за 100-150 Гц, є додатною незалежно від ступеня компенсації ємнісного струму реактором, що може бути покладено в основу роботи селективного захисту.

2. Розроблено метод селективного захисту електричної мережі від замикань фази на землю, при використанні якого для зменшення впливу аперіодичних складових знаходять спочатку похідні струму і напруги нульової послідовності, а потім за допомогою перетворення Фур'є виділяють з них ряд гармонійних ортогональних складових, для кожної з яких розраховують реактивну

потужність і знаходять їх загальну суму, і якщо вона перевищує задану, то спрацьовує вихідний орган.

3. Достовірність розробленого методу селективного захисту підтверджено наведеними результатами математичного моделювання і перевіркою роботи дослі-дного зразка на лабораторному стенді та за допомо-гою натурних сигналів, які були записані цифровими реєстраторами при ОЗЗ на діючих підстанціях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Shafiq M., Kiitam I., Taklaja P., Kütt L., Kauhaniemi K., Palu I. Identification and location of PD defects in medium voltage underground power cables using high frequency current transformer // *IEEE Access*. – 2019. – vol.7. – pp. 103608-103618. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2930704](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930704).
2. Marciniak L. General earth fault protection for MV networks using wavelet decomposition and Bayesian criterion // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – vol.84. – p. 02007. doi: [10.1051/e3sconf/20198402007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198402007).
3. Habrych M. Comparative performance study of the Hall sensor based directional ground fault protection in MV mining network with ineffective earthing // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2016. – no.8. – pp. 251-254. doi: [10.15199/48.2016.08.65](https://doi.org/10.15199/48.2016.08.65).
4. Kavaskar S., Mohanty N.K. Detection of high impedance fault in distribution networks // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2019. – vol.10. – no.1. – pp. 5-13. doi: [10.1016/j.asej.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.04.006).
5. Torres V., Guardado J.L., Ruiz H.F., Maximov S. Modeling and detection of high impedance faults // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – vol.61. – pp. 163-172. doi: [10.1016/j.ijepes.2014.03.046](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.046).
6. Daqing Hou. Detection of high-impedance faults in power distribution systems // *2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*. – Clemson, SC. – 2007. – pp. 85-95. doi: [10.1109/PSAMP.2007.4740902](https://doi.org/10.1109/PSAMP.2007.4740902).
7. Marciniak L. Identyfikacja zwarć doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2015. – no.8. – pp. 185-189. doi: [10.15199/48.2015.08.45](https://doi.org/10.15199/48.2015.08.45).
8. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Mathematical modeling of new algorithms for single-phase earth faults protection in a compensated electrical network // *Problemele Energeticii Regionale*. – 2019. – no.1-2(41). – pp. 1-11. doi: [10.5281/zenodo.3239135](https://doi.org/10.5281/zenodo.3239135).
9. Сивокобыленко В.Ф., Лысенко В.А. Микропроцессорная селективная защита от замыканий фазы на землю в электрических сетях с катушкой Петерсена в нейтрали // *Технічна електродинаміка*. – 2019. – №2. – С. 54-62. doi: [10.15407/techned2019.02.054](https://doi.org/10.15407/techned2019.02.054).
10. Marciniak L. Określenie nastaw zabezpieczenia ziemnozwarciowego z falkowymi kryteriami działania // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2014. – no.6. – pp. 261-264. doi: [10.12915/pe.2014.06.52](https://doi.org/10.12915/pe.2014.06.52).

REFERENCES

1. Shafiq M., Kiitam I., Taklaja P., Kütt L., Kauhaniemi K., Palu I. Identification and location of PD defects in medium voltage underground power cables using high frequency current transformer. *IEEE Access*, 2019, vol.7, pp. 103608-103618. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2930704](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930704).
2. Marciniak L. General earth fault protection for MV networks using wavelet decomposition and Bayesian criterion. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol.84, p. 02007. doi: [10.1051/e3sconf/20198402007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198402007).
3. Habrych M. Comparative performance study of the Hall sensor based directional ground fault protection in MV mining network with ineffective earthing. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, no.8, pp. 251-254. doi: [10.15199/48.2016.08.65](https://doi.org/10.15199/48.2016.08.65).
4. Kavaskar S., Mohanty N.K. Detection of high impedance fault in distribution networks. *Ain Shams Engineering Journal*, 2019, vol.10, no.1, pp. 5-13. doi: [10.1016/j.asej.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.04.006).
5. Torres V., Guardado J.L., Ruiz H.F., Maximov S. Modeling and detection of high impedance faults. *International Journal of*

Electrical Power & Energy Systems, 2014, vol.61, pp. 163-172.

doi: [10.1016/j.ijepes.2014.03.046](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.046).

6. Daqing Hou. Detection of high-impedance faults in power distribution systems. *2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, Clemson, SC, 2007, pp. 85-95. doi: [10.1109/PSAMP.2007.4740902](https://doi.org/10.1109/PSAMP.2007.4740902).

7. Marciniak L. Identyfikacja zwarć doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, no.8, pp. 185-189. (Pol). doi: [10.15199/48.2015.08.45](https://doi.org/10.15199/48.2015.08.45).

8. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. Mathematical modeling of new algorithms for single-phase earth faults protection in a compensated electrical network. *Problemele Energeticii Regionale*, 2019, no.1-2(41), pp. 1-11. doi: [10.5281/zenodo.3239135](https://doi.org/10.5281/zenodo.3239135).

9. Syvokobylenko V.F., Lysenko V.A. 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. (Rus). doi: [10.15407/techned2019.02.054](https://doi.org/10.15407/techned2019.02.054).

10. Marciniak L. Określenie nastaw zabezpieczenia ziemnozwarciowego z falkowymi kryteriami działania. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, no.6, pp. 261-264. (Pol). doi: [10.12915/pe.2014.06.52](https://doi.org/10.12915/pe.2014.06.52).

Надійшла (received) 11.10.2019

Сивокобыленко Віталій Федорович¹, д.т.н., проф.,
Лусенко Віктор Анатолійович¹, к.т.н.,

¹Донецький національний технічний університет,
85300, Донецька обл., Покровськ, пл. Шибанкова, 2,
e-mail: svf1934@gmail.com, viktor.lysenko@donntu.edu.ua

V.F. Syvokobylenko¹, V.A. Lysenko¹

¹Donetsk National Technical University,

2, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300,
Ukraine.

Multifrequency protecting method against earth-faults of phase in the compensated electric networks.

Introduction. A significant proportion of earth faults in 6 - 35 kV networks is a transient and short-lived process, which is followed by an electric arc. **Problem.** In such cases, earth-fault protection that responds to steady-state current and voltage is not able to operate properly. Also, the use of the Petersen coil to compensate for the capacitive earth fault current complicates the protection function because it significantly reduces the single phase earth fault current in steady state. **Purpose.** To develop selective single-phase earth faults protection algorithm using harmonic components that occur in zero-sequence currents and voltage in the transient process. **Method.** A mathematical model of the power supply system is applied to study the frequency components of currents and voltage of zero sequence in compensated electrical networks with phase-to-earth faults, and a mathematical model is used to test the operation of the developed protection algorithm. The **results** showed that, the reactive power for harmonic components of the frequency greater than 100 Hz, which are separated from the current and voltage of zero sequence in compensated electrical networks on the damaged feeder, is positive regardless of the degree of compensation of the capacitive current. That may be the basis of the principle of directional protection. **Originality.** Phase-to-earth fault selective protection algorithm has been developed. In that algorithm, first derivatives of currents and voltages of zero sequence are found, to reduce the influence of aperiodic components. And then, by using of the Fourier transform, a number of harmonic orthogonal components are extracted from them. Reactive power is calculated for each of frequency component and their total sum is found. If that sum excess of threshold, the relay will make a decision. The reliability of the developed protection algorithm is confirmed by the results of mathematical modeling and verification of the test sample at the laboratory stand and by means of field signals that were recorded by digital loggers at the substations. References 10, table 1, figures 6.

Key words: electrical network, earth fault protection, zero sequence current and voltage, Fourier transform, frequency spectrum.