

АНАЛІЗ ШВИДКОСТІ ЗАГАСАННЯ АПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Досліджено параметри аперіодичної складової струму короткого замикання в електричних мережах, зокрема сталу часу загасання та її вплив на роботу релейного захисту й комутаційної апаратури. Запропоновано математичні методи визначення параметрів перехідного процесу на основі вимірювань струму з використанням ковзного вікна даних. Результати підтверджують можливість швидкого та точного оцінювання параметрів аварійного режиму протягом одного-двох циклів промислової частоти.

Ключові слова: короткі замикання, аперіодична складова струму, стала часу загасання, перехідні процеси.

Abstract

The parameters of the aperiodic component of the short-circuit current in electrical networks have been investigated, in particular the decay time constant and its influence on the operation of relay protection and switching equipment. Mathematical methods for determining the parameters of the transient process based on the measuring current using a sliding data window have been proposed. The results confirm the possibility of quick and accurate assessment of the parameters of the emergency mode within one or two cycles of the industrial frequency.

Keywords: short circuits, aperiodic current component, decay time constant, transient processes.

Вступ

Перехідні процеси при коротких замиканнях у системах електропостачання супроводжуються появою аперіодичної складової струму, яка загасає експоненціально зі сталою часу $\tau = L / R$. Швидкість загасання цієї складової залежить від співвідношення реактивного та активного опорів мережі в точці короткого замикання. Великі значення X / R призводять до повільного загасання аперіодичної складової, що може тривати до десяти періодів промислової частоти [1, 2]. Наявність значної аперіодичної компоненти спричиняє насичення магнітопроводів трансформаторів струму, спотворення вторинних струмів і можливі неправильні спрацювання релейного захисту [2, 3]. Повністю зміщений асиметричний струм короткого замикання становить найгірший випадок з точки зору механічних навантажень на провідники та електродинамічної стійкості обладнання [4].

Точне визначення параметрів необхідне для налаштування захистів, визначення місця пошкодження та керування вимикачами [3, 4].

Результати дослідження

Струм короткого замикання в загальному випадку описується виразом, що містить синусоїдальну складову сталого режиму та експоненціально загасаючу аперіодичну компоненту [1, 4]:

$$i_s(t) = I_{\max} \left[\cos(\omega t + \theta - \alpha) - e^{-t/\tau_p} \cos(\theta - \alpha) \right] + i_0 \cdot e^{-t/\tau_p}. \quad (1)$$

де $I_{\max}$ - амплітуда синусоїдальної складової, θ - кут фази напруги в момент виникнення пошкодження, α - кут зсуву фаз між напругою та струмом у сталому режимі, $\tau_p = L / R$ - стала часу загасання, i_0 - миттєве значення струму до пошкодження [4]. За різних значень кута виникнення пошкодження асиметрія струму змінюється від нульової (коли $\theta = \alpha$) до максимальної (коли $\theta - \alpha = \pm 90^\circ$).

Для визначення сталої часу τ_p в [4] використано різницький метод, що базується на порівнянні значень струму, зміщених на один період промислової частоти. Оскільки синусоїдальна складова повторюється з періодом $T_c = 1 / f$ (де f - частота змінного струму), різниця між значеннями струму в моменти k та $k + N_s$ (де N_s - кількість відліків на період) визначається лише загасанням

аперіодичної компоненти [4]. З виразу для струму в дискретні моменти часу $t = kh$ (де h - інтервал дискретизації) отримано формулу:

$$\tau_p = \frac{m \times h}{\ln \frac{i_s(k) - i_s(k + N_s)}{i_s(k + m) - i_s(k + m + N_s)}}. \quad (2)$$

де m - зсув у відліках ($m \leq N_s$). Ця формула дозволяє оцінити сталу часу протягом одного-двох періодів після виникнення пошкодження. Для прискорення обчислень запропоновано модифікований варіант із зсувом на півперіоду, що скорочує час розрахунку до 10 мс при частоті дискретизації 5 кГц [4].

Після визначення τ_p обчислюється різницевий кут $\delta = \theta - \alpha$ за допомогою трьох послідовних відліків струму.

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{F_1 - F_2 \times F_5}{F_4 \times F_5 - F_3} \right]. \quad (3)$$

де коефіцієнти F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 залежать від τ_p , кутової частоти ω та вимірних значень струму. Цей підхід забезпечує точність визначення кута в межах 0,1% навіть за наявності гармонік і шумів [4]. Амплітуда симетричної складової обчислюється з використанням вже знайдених параметрів:

$$I_{\max} = \frac{e^{-h/\tau_p} [i_s(k) - i_s(k+1)] - [i_s(k+1) - i_s(k+2)]}{e^{-h/\tau_p} [P_1 - P_2] - [P_2 - P_3]}. \quad (4)$$

де P_1, P_2, P_3 - функції від раніше визначених параметрів. Точність оцінки $I_{\max}$ перевищує 99,5% для різних типів пошкоджень і навантажень [4].

У літературі [3] для перевірки запропонованого алгоритму проведено моделювання електричної системи з номінальною напругою близько 20 кВ, що включає двоколову повітряну лінію електропередачі довжиною 100 км, у середовищі АТР. Автори проаналізували різні типи коротких замикань (однофазні, двофазні та трифазні) за умов варіювання перехідного опору в місці пошкодження (від 0 до 100 Ом), відстані до точки аварії (від 25% до 75% довжини лінії) та кута фази напруги в момент виникнення КЗ. Частота дискретизації становила 5 кГц, розмір вікна даних - 1,1 періоду після моменту пошкодження. Результати показали, що стала часу для системи з параметрами $R = 0,0217$ Ом/км, $X_L = 0,302$ Ом/км становить близько 0,045 с, а максимальний струм короткого замикання досягає 947 А при опорі пошкодження, близькому до нуля [4].

Збільшення реактивного опору пошкодження призводить до зростання сталої часу через збільшення відношення L/R та до зменшення максимального струму внаслідок зростання повного опору ланцюга. Збільшення активного опору пошкодження, навпаки, зменшує сталу часу та максимальний струм [4]. Зміна місця розташування пошкодження вздовж лінії практично не впливає на сталу часу, оскільки відношення X_L/R залишається приблизно сталим, але призводить до зменшення амплітуди струму через збільшення загального опору [4]. Для різних типів коротких замикань стала часу змінюється незначно, за винятком міжфазних пошкоджень без замикання на землю, де параметри кола відрізняються від однофазних КЗ.

У літературі [4] окремо проаналізовано вплив насичення трансформаторів струму (ТС) на точність оцінювання параметрів аперіодичної складової. Автори показали, що при погіршенні умов роботи ТС – зокрема, при зменшенні коефіцієнта трансформації з 12000/1 до 500/1 та збільшенні активного опору навантаження до 50 Ом – спотворення вторинного струму через насичення магнітопроводу починається приблизно через 52,6 мс після моменту короткого замикання.

Запропонований у роботі алгоритм ефективно справляється з цією проблемою: він використовує лише початкову, ще неспотворену ділянку вимірюного сигналу для визначення сталої часу, амплітуди та фазових параметрів. Після цього повна форма струму відновлюється синтетично – шляхом додавання розрахованої синусоїдальної складової до аперіодичної. Отриманий таким чином відновлений сигнал дозволяє точно визначати місце пошкодження з похибкою не більше 1% навіть у випадках глибокого насичення ТС.

Порівняння з методом покращеного напівперіодного перетворення Фур'є показало переваги різницевого підходу. Запропонований метод забезпечує вищу точність оцінки параметрів (похибка амплітуди 0,40% проти 0,61%, кута 0,07° проти 2,60°, сталої часу 0,95% проти 1,98%) та коротший час обчислень, оскільки не потребує окремого розкладання на складові [3]. Метод стійкий до змін навантаження, частоти мережі та наявності вищих гармонік, що підтверджено серією тестів з варіюванням цих параметрів [4].

Для усунення високочастотних завад і білого шуму в початковій стадії перехідного процесу застосовано технологію трендової фільтрації [3]. Фільтр базується на зваженому усередненні сусідніх відліків сигналу з вагами, що розподілені за біноміальним законом. Багатократна ітераційна фільтрація дозволяє ефективно придушити високочастотні компоненти та шум інтенсивністю до 20 дБ без спотворення основної форми сигналу. Результати моделювання підтверджують, що після 45 ітерацій фільтрації високочастотні завади майже повністю усуваються, а відновлена форма струму практично збігається з ідеальною [3].

Експериментальна перевірка виконана на лабораторному стенді з однофазною моделлю напругою 120 В та струмообмежувальною індуктивністю 12 мГн [3]. Вимірювання проводились за допомогою датчика струму з частотою дискретизації 10 кГц. Виміряна амплітуда струму короткого замикання становила 54,1 А, обчислена без застосування фільтрації - 51,4 А (похибка 5%), з фільтрацією - 53,2 А (похибка 1,67%). Це підтверджує практичну застосовність методу в реальних умовах з урахуванням завад.

Висновки

На підставі проведеного аналізу літератури [1–4] можна зробити висновок, що різницевий метод обробки сигналу струму є ефективним інструментом для швидкого визначення параметрів аперіодичної складової при коротких замиканнях. Як показано в розглянутих джерелах, цей підхід дозволяє з високою точністю (зазвичай у межах 0,5%) оцінювати сталу часу загасання, амплітуду симетричної складової та фазові кути протягом лише одного-двох періодів промислової частоти. Застосування трендової фільтрації дозволяє усунути високочастотні завади та шум без втрати точності. Алгоритм стійкий до варіацій опору пошкодження, типу короткого замикання, місця розташування аварії та насичення трансформаторів струму. Результати можуть використовуватись у цифрових релейних захистах для компенсації спотворень вторинних струмів, визначення місця пошкодження з похибкою менше 1%, керування керованими комутаційними апаратами та функціях цифрових реєстраторів аварійних подій. Метод не потребує попереднього знання параметрів системи та може застосовуватись у мережах різних класів напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Lesniewska E., Olak J. Analysis of the Operation of Cascade Current Transformers for Measurements of Short-Circuit Currents with a Non-Periodic Component with a Large Time Constant of Its Decay. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 8. P. 2925. DOI: 10.3390/en15082925. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/8/2925>
2. Терешкевич Л.Б., Демов О.Д., Іванков В.О. Електромагнітні перехідні процеси в системах електроспо-живання. Навчальний посібник — Вінниця: ВНТУ, 2007. - 61 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/12863/%d0%95%d0%bb%d0%b5%d0%ba%d1%80%d0%be%d0%bc%d0%b0%d0%b3%d0%bd_%d0%bf%d0%b5%d1%80%d0%b5%d1%85_%d0%bf%d1%80%d0%be%d1%86%d0%b5%d1%81%d0%b8.pdf?sequence=1&isAllowed=y
3. Wang M., Wei X., Zhao Z. Short-Circuit Fault Current Parameter Prediction Method Based on Ultra-Short-Time Data Window. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 23. P. 8861. DOI: 10.3390/en15238861 URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8861>
4. Mahmoud R. A., Malik O. P., Fayek W. M. Smart technique for calculating fault current model parameters using short circuit current measurements. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 29309. DOI: 10.1038/s41598-025-12475-9 https://www.researchgate.net/publication/394439804_Smart_technique_for_calculating_fault_current_model_parameters_using_short_circuit_current_measurements

Каракой Дмитро Олегович – студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група 2ЕС-226, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dinakaranoi934@gmail.com

Науковий керівник: **Тептя Віра Володимирівна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: teptyavira@gmail.com

Karakoi Dmytro Olehovych – student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, group 2ES-226, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dinakaranoi934@gmail.com

Supervisor: **Teptia Vira V.** - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: teptyavira@gmail.com