

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МИТТЄВИХ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТРИФАЗНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖ

В. І. Паньків, Є. М. Танкевич, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна,
e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

Розроблено математичні моделі миттєвих струмів короткого замикання (КЗ) трифазної несиметричної мережі з глухозаземленою нейтраллю для різних видів КЗ. На прикладах розрахунків значень повного струму КЗ показано доцільність урахування його навантажувальної складової. Сформульовано рекомендації щодо проведення розрахунків струмів КЗ за розробленими моделями для випадків металічних КЗ за наявності у фазних напругах вищих гармонік та КЗ з додатковим опором у місці пошкодження. Бібл. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: коротке замикання, миттєвий струм, модель, високовольтна мережа.

Моделювання струмів короткого замикання (КЗ) є одним із ключових питань теорії перехідних процесів у електроенергетичних системах (ЕЕС) [1-3]. Зазвичай, під час дослідження електромагнітних процесів у мережах і розрахунку вставок релейних захистів використовують однолінійні схеми заміщення ліній електропередачі, джерела живлення та навантаження. Регламентована в технічному звіті Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) [4] модель однофазного струму КЗ не враховує струми навантаження ліній електропередачі і справедлива лише за умов симетрії елементів системи в доаварійному трифазному режимі її роботи. Використання неадекватних моделей струму КЗ у разі проектування, побудови та аналізу роботи сучасних систем вимірювання, моніторингу та релейного захисту може стати за певних робочих умов причиною помилок у їх функціонуванні.

Метою роботи є вдосконалення математичних моделей струмів КЗ трифазних високовольтних мереж за різних видів КЗ та дослідження їх характеристик і параметрів.

Для прикладу розглянемо фрагмент спрощеної моделі високовольтної мережі з глухозаземленою нейтраллю, де знехтувано значеннями поперечних провідностей лінії електропередачі та силових трансформаторів (див. рис. 1). На рис. 1 зображено $\underline{Z}_{la}, \underline{Z}_{lb}, \underline{Z}_{lc}$ – еквівалентні параметри мережі до навантаження; $\underline{Z}_{na}, \underline{Z}_{nb}, \underline{Z}_{nc}$ – еквівалентні значення навантаження; $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ – миттєві фазні напруги основної частоти енергосистеми, які в доаварійному режимі описуються рівнянням:

$$u_k(t) = U_k \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta_k), \quad (1)$$

де $U_k, k \in a, b, c$ – діючі значення миттєвих фазних напруг, θ_k – їх кути.

Миттєві фазні струми доаварійного режиму (усталені фазні струми до появи КЗ) $i_k(t), k \in a, b, c$ описуються як

$$i_{ko}(t) = I_{ko} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{ko}), \quad (2)$$

де діючі значення струмів та їх кутів визначаються так:

$$I_{ko} = U_k / Z_{ko}; \quad \varphi_{ko} = \theta_k - \psi_{ko}; \quad \underline{Z}_{ko} = \underline{Z}_{lk} + \underline{Z}_{nk} = Z_{ko} e^{j\psi_{ko}}; \quad k \in a, b, c.$$

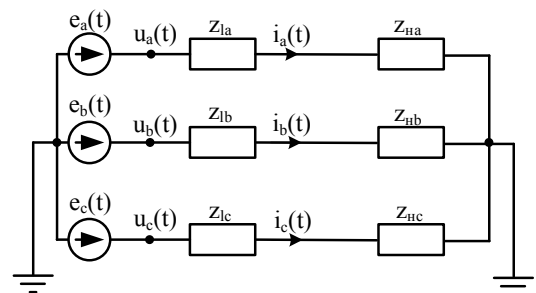


Рис. 1

Металічні КЗ. Використовуючи класичний метод розрахунку перехідних процесів у електричних колах, розглянемо режим однофазного КЗ. Для будь-якого однофазного КЗ ($k \in a, b, c$) розрахункова схема може бути зображена у вигляді рис. 2. Усталений струм у фазі після виникнення КЗ має вигляд

$$i_{ky}(t) = I_{ky} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{ky}),$$

де $I_{ky} = U_k / Z_{ky}$ – діюче значення миттєвого струму КЗ; φ_{ky} –

кут відповідного струму, який визначається як $\varphi_{ky} = \theta_k - \psi_{lk}$; $z_{lk} = Z_{lk} e^{j\psi_{lk}}$.

Повний струм КЗ фази А відповідно для такого режиму описується як сума усталеної та вільної складових струму КЗ:

$$i_k(t) = i_{ky}(t) + A e^{-t/T_{lk}},$$

де T_{lk} – стала часу вільної складової струму КЗ, яка визначається як $T_{lk} = L_{lk} / R_{lk}$ (L_{lk}, R_{lk} – значення індуктивності та опору від джерела живлення до місця КЗ, в розглянутому випадку – фазні індуктивність та опір лінії електропередачі); A – стала інтегрування, яка знаходиться відповідно до першого закону комутації (значення струму в індуктивному елементі в момент комутації рівне значенню струму безпосередньо до моменту комутації):

$$i_{kd}(0) = i_{ky}(0) + A e^{0/T_{lk}},$$

звідки, використовуючи (2), стала інтегрування описується як

$$A = I_{ka} \sqrt{2} \cos(\varphi_{ka}) - I_{ky} \sqrt{2} \cos(\varphi_{ky}).$$

Таким чином, повний струм металічного КЗ для основної частоти енергосистеми для будь-якої фази ($k \in a, b, c$) описується формулою:

$$i_k(t) = I_{ky} \sqrt{2} (\cos(\omega t + \varphi_{ky}) - \cos(\varphi_{ky}) e^{-t/T_{lk}}) + I_{kd} \sqrt{2} \cos(\varphi_{kd}) e^{-t/T_{lk}}. \quad (3)$$

Перша складова моделі (3) – це модель вхідного струму КЗ, яку зазвичай регламентують до використання у стандартах МЕК під час дослідження електромагнітних перехідних процесів у фазних трансформаторах струму. Друга складова – це навантажувальна складова струму КЗ, яка затухає зі сталою часу T_{lk} струму КЗ.

У випадку двофазних КЗ на землю та трифазних КЗ розрахункові схеми для фаз, задіяних в режимі КЗ, будуть аналогічними тим, які зображені на рис. 2, а самі повні струми КЗ відповідно описуватимуться також формулою (3). Слід зауважити, що у випадку несиметрії фазних опорів до місця КЗ ($z_{la} \neq z_{lb} \neq z_{lc}$) сталі часу T_{lk} будуть різними, і їх потрібно розраховувати для кожної фази індивідуально.

Для прикладу розрахуємо параметри моделей струмів трифазного КЗ з вхідними параметрами високовольтної мережі, зведеними в таблицю.

		Фаза А	Фаза В	Фаза С
Вхідні параметри мережі	z_l , Ом	$0.252 + j24.19$	$0.26 + j23.876$	$0.258 + j24.033$
	z_n , Ом	91.4	91.5	92
	u , кВ	$190.526 e^{j20}$	$190.526 e^{-j140}$	$190.526 e^{j100}$
Розраховані параметри моделі струму	I_{ϕ} , кА	2.01	2.009	1.998
	φ_{kd} , град	-34.785	-154.585	85.399
	I_y , кА	7.876	7.979	7.927
	φ_y , град	-109.403	130.624	10.615
	T_1 , с	0.306	0.292	0.297

У табл. також зведено розраховані параметри моделей фазних струмів за трифазного КЗ відповідно до формул, наведених вище. На рис. 3 зображено осцилограми миттєвих

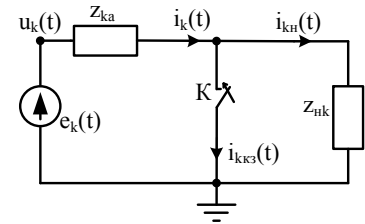


Рис. 2

струмів фаз за трифазного КЗ з розрахованими параметрами, де показано повний струм КЗ $i_k(t)$, $k \in a, b, c$ з урахуванням навантажувальної складової $i_n(t)$; струм КЗ $i'_{k3}(t)$, розрахований відповідно до технічного звіту МЕК [4], який не враховує вплив навантажувальної складової; аперіодична складова $i_a(t)$ та періодична складова (усталений струм після комутації) $i_n(t)$.

З рис. 3 видно, що для розглянутого випадку КЗ навантажувальна складова $i_n(t)$ практично відсутня тільки в струмі фази C , проте в струмах фаз A і B значення цієї складової є достатньо помітним, що вказує на доцільність її врахування під час моделювання перехідних процесів у електротехнічному обладнанні, де струм КЗ є вхідною величиною. Також з наведеного рисунка видно, що у фазі A навантажувальна складова струму КЗ збільшує сумарну аперіодичну складову струму КЗ, а у фазі B , навпаки, зменшує її.

Моделі миттєвих струмів міжфазних КЗ (КЗ, у яких відсутній дотик струмопровідних частин з землею) є значно складнішими в порівнянні з (3). Наприклад, для міжфазного КЗ будь-яких двох фаз розрахункова схема матиме вигляд рис. 4, де $u_{n1}(t)$, $u_{n2}(t)$ – миттєві напруги фаз, між якими відбулось КЗ; $u_{nn}(t)$ – миттєва напруга непошкодженої фази високовольтної мережі.

Усталені миттєві струми фаз після виникнення КЗ можна отримати шляхом розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} i_{n1y}(t) + i_{n2y}(t) + i_{nn}(t) = 0; \\ \underline{z}_{ln1} i_{n1y}(t) - (\underline{z}_{н.екв} + \underline{z}_{nn}) i_{nn}(t) = u_{n1}(t) - u_{nn}(t); \\ \underline{z}_{ln2} i_{n2y}(t) - (\underline{z}_{н.екв} + \underline{z}_{nn}) i_{nn}(t) = u_{n2}(t) - u_{nn}(t), \end{cases} \quad (4)$$

де $\underline{z}_{н.екв}$ – опір еквівалентного навантаження для непошкодженої фази, який розраховується як

$$\underline{z}_{н.екв} = \underline{z}_{nnn} + \frac{\underline{z}_{nn1} \cdot \underline{z}_{nn2}}{\underline{z}_{nn1} + \underline{z}_{nn2}},$$

де $\underline{z}_{nnn}$ – опір навантаження непошкодженої фази, $\underline{z}_{nn1}$ та $\underline{z}_{nn2}$ – опори навантажень пошкоджених фаз за міжфазного КЗ.

Усталені струми міжфазного КЗ будь-яких двох пошкоджених фаз матимуть вигляд:

$$i_{n1y}(t) = I_{n1y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{n1y}) - I_{n12y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{n12y}) - I_{n13y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{n13y});$$

$$i_{n2y}(t) = I_{n2y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{n2y}) - I_{n21y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{n21y}) - I_{n23y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{n23y}),$$

де діючі значення струмів та відповідні кути окремих складових миттєвих струмів розраховуються як

$$I_{n1y} = U_{n1} Y_1; \quad \varphi_{n1y} = \theta_{n1} + \psi_1;$$

$$I_{n12y} = U_{n2} Y_3; \quad \varphi_{n12y} = \theta_{n2} + \psi_3;$$

$$I_{n13y} = U_{nn} Y_4; \quad \varphi_{n13y} = \theta_{nn} + \psi_4;$$

$$I_{n22y} = U_{n2} Y_2; \quad \varphi_{n22y} = \theta_{n2} + \psi_2;$$

$$I_{n21y} = U_{n1} Y_3; \quad \varphi_{n21y} = \theta_{n1} + \psi_3;$$

$$I_{n23y} = U_{nn} Y_5; \quad \varphi_{n23y} = \theta_{nn} + \psi_5.$$

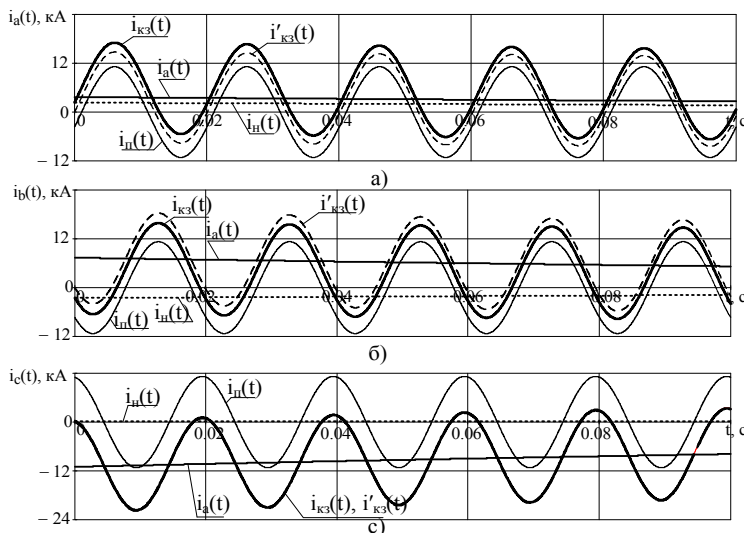


Рис. 3

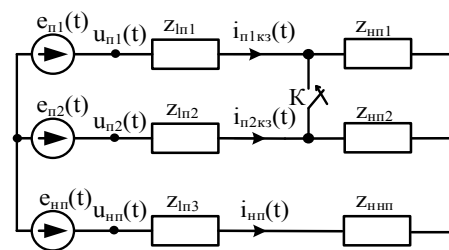


Рис. 4

Усталений струм непошкодженої фази після виникнення міжфазного КЗ матиме вигляд:

$$i_{nnu}(t) = I_{nn1y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{nn1y}) - I_{nn2y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{nn2y}) - I_{nn3y} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_{nn3y}),$$

де діючі значення та відповідні кути складових усталеного миттєвого струму непошкодженої фази розраховуються як

$$I_{nn1y} = U_{nn} Y_6; \varphi_{nn1y} = \theta_{nn} + \psi_6; I_{nn2y} = U_{n1} Y_4; \varphi_{nn2y} = \theta_{n1} + \psi_4; I_{nn3y} = U_{n2} Y_5; \varphi_{nn3y} = \theta_{n2} + \psi_5,$$

де Y_i та ψ_i – модуль та відповідний кут провідностей $\underline{y}_i$, $i \in 1, \dots, 6$, отриманих у процесі аналітичного розв'язування системи рівнянь (4):

$$\begin{aligned} \underline{y}_1 &= (\underline{z}_{н.екв} + \underline{z}_{nn} + \underline{z}_{n2}) / \underline{k}_y = Y_1 e^{j\psi_1}; \quad \underline{y}_2 = (\underline{z}_{н.екв} + \underline{z}_{nn} + \underline{z}_{n1}) / \underline{k}_y = Y_2 e^{j\psi_2}; \\ \underline{y}_3 &= (\underline{z}_{н.екв} + \underline{z}_{nn}) / \underline{k}_y = Y_3 e^{j\psi_3}; \quad \underline{y}_4 = \underline{z}_{n2} / \underline{k}_y = Y_4 e^{j\psi_4}; \quad \underline{y}_5 = \underline{z}_{n1} / \underline{k}_y = Y_5 e^{j\psi_5}; \\ \underline{y}_6 &= (\underline{z}_{n1} + \underline{z}_{n2}) / \underline{k}_y = Y_6 e^{j\psi_6}; \quad \underline{k}_y = \underline{z}_{ln1} \underline{z}_{ln2} + \underline{z}_{ln1} \underline{z}_{nn} + \underline{z}_{ln2} \underline{z}_{nn} + \underline{z}_{ln1} \underline{z}_{н.екв} + \underline{z}_{ln2} \underline{z}_{н.екв}. \end{aligned}$$

Моделі повних миттєвих струмів КЗ фаз за міжфазного КЗ мають вигляд:

$$\begin{aligned} i_{n1кз}(t) &= i_{n1y}(t) + A_1 e^{-t/T_1} = I_{n11y} \sqrt{2} (\cos(\omega t + \varphi_{n11y}) - \cos(\varphi_{n11y}) e^{-t/T_1}) + \\ &+ I_{n12y} \sqrt{2} (\cos(\varphi_{n12y}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{n12y})) + I_{n13y} \sqrt{2} (\cos(\varphi_{n13y}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{n13y})) + \\ &+ I_{n10} \sqrt{2} \cos(\varphi_{n10}) e^{-t/T_1}; \\ i_{n2кз}(t) &= i_{n2y}(t) + A_2 e^{-t/T_1} = I_{n22y} \sqrt{2} (\cos(\omega t + \varphi_{n22y}) - \cos(\varphi_{n22y}) e^{-t/T_1}) + \\ &+ I_{n21y} \sqrt{2} (\cos(\varphi_{n21y}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{n21y})) + I_{n23y} \sqrt{2} (\cos(\varphi_{n23y}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{n23y})) + \\ &+ I_{n20} \sqrt{2} \cos(\varphi_{n20}) e^{-t/T_1}; \\ i_{nn}(t) &= i_{nnu}(t) + A_3 e^{-t/T_1} = I_{nn1y} \sqrt{2} (\cos(\omega t + \varphi_{nn1y}) - \cos(\varphi_{nn1y}) e^{-t/T_1}) + \\ &+ I_{nn2y} \sqrt{2} (\cos(\varphi_{nn2y}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{nn2y})) + I_{nn3y} \sqrt{2} (\cos(\varphi_{nn3y}) e^{-t/T_1} - \cos(\omega t + \varphi_{nn3y})) + \\ &+ I_{nn0} \sqrt{2} \cos(\varphi_{nn0}) e^{-t/T_1}. \end{aligned}$$

Слід відмітити, що стала часу в розглянутому виді КЗ для всіх трьох фазних струмів є однією і тією ж T_1 . Аналітичне отримання формули для розрахунку цієї сталої часу з урахуванням несиметрії параметрів фазних навантажень та лінії електропередачі є надто громіздкою задачею. Проте, якщо прийняти параметри усіх фаз за однакові, тобто вважати електричну схему рис. 1 симетричною, то для даного виду КЗ, склавши характеристичне рівняння, легко можна отримати таке рівняння: $T_1 = L_l / R_l$. Це дозволяє зробити припущення, що за несиметрії параметрів мережі $T_1 \approx L_{n1} / R_{n1} \approx L_{n2} / R_{n2}$.

Для прикладу вхідних параметрів мережі, наведених в табл. 1, розрахуємо параметри моделей миттєвих струмів за міжфазного КЗ фаз В та С. Так як пошкодженими фазами є фази В і С, то $\underline{z}_{n1} = \underline{z}_{lb}$, $\underline{z}_{n2} = \underline{z}_{lc}$, $\underline{z}_{nn1} = \underline{z}_{nb}$, $\underline{z}_{nn2} = \underline{z}_{nc}$, $u_{n1}(t) = u_b(t)$, $u_{n2}(t) = u_c(t)$, а непошкодженою фазою є фаза А, то $\underline{z}_{nn} = \underline{z}_{na}$, $\underline{z}_{nnn} = \underline{z}_{nf}$, $u_{nn}(t) = u_a(t)$.

Значення розрахованих провідностей $\underline{y}_i$, $i \in 1, \dots, 6$, за таких параметрів мережі відповідно до вищенаведених формул рівні:

$$\begin{aligned} \underline{y}_1 &= 0.021 e^{-j84.812} \text{ См}, \quad \underline{y}_2 = 0.021 e^{-j84.87} \text{ См}, \quad \underline{y}_3 = 0.02 e^{-j94.126} \text{ См}, \quad \underline{y}_4 = 0.0035 e^{-j14.717} \text{ См}, \\ \underline{y}_5 &= 0.0035 e^{-j14.725} \text{ См}, \quad \underline{y}_6 = 0.007 e^{-j14.721} \text{ См}. \end{aligned}$$

Діючі значення та кути складових моделей фазних струмів відповідно до значень розрахованих провідностей рівні:

$$I_{n11y} = 4.079 \text{ кА}; \varphi_{n11y} = 135.188^\circ;$$

$$I_{n12y} = 3.901 \text{ кА}; \varphi_{n12y} = 5.874^\circ;$$

$$I_{n13y} = 671.512 \text{ А}; \varphi_{n13y} = -34.717^\circ;$$

$$I_{n22y} = 4.077 \text{ кА}; \varphi_{n22y} = 15.13^\circ;$$

$$I_{n21y} = 3.901 \text{ кА}; \varphi_{n21y} = 125.874^\circ;$$

$$I_{f23\phi} = 667.124 \text{ А}; \varphi_{f13y} = -34.725^\circ.$$

Значення параметрів доаварійних складових струмів кожної фази описані в таблиці. На рис. 5 зображено відповідні осцилограми миттєвих струмів фаз за розглянутого випадку міжфазного КЗ з відповідними розрахованими параметрами.

З рис. 5 видно, що аперіодична складова струму КЗ та його навантажувальна складова є повністю протилежними і практично однаковими для непошкодженої фази А. Струм, що протікає в цій фазі, є звичайним струмом, який живить еквівалентне навантаження $\underline{z}_{н.екв}$. Струми КЗ пошкоджених фаз В та С знаходяться в повній протифазі по відношенню один до одного, проте характеризуються різними амплітудними значеннями.

Вищі гармоніки в струмах КЗ. За наявності відомого певного частотного спектру фазних напруг $u_{k(m)}(t)$, $k \in a, b, c$; $m \in 2, \dots, M$, де m – номер гармоніки, та зважаючи на необхідність виконувати моделювання струмів металічних КЗ з урахуванням вищих гармонік, реактивні опори елементів мережі (рис. 1) слід перемножити на відповідний номер гармоніки m і виконати всі розрахунки з урахуванням перерахованих комплексних опорів досліджуваної мережі та значень напруг відповідної гармоніки.

Амплітудні значення напруги вищих гармонік у доаварійному режимі є значно меншими, ніж значення домінуючої складової основної частоти енергосистеми. Згідно з дослідженнями [5, 6] відносний рівень вмісту вищих гармонік у фазних напругах для мереж 110 кВ не перевищує 6.4 %, а для мереж 220 кВ – 7 %, а амплітуди гармонік зменшуються з ростом номеру гармоніки. З іншого боку, модуль перерахованого значення опору до місця КЗ, навпаки, зростатиме з ростом номеру m -ї гармоніки, що в результаті призведе до ще менших діючих значень гармонічних складових повного струму КЗ.

Короткі замикання з додатковим опором у місці пошкодження. Металічні КЗ є найгіршим випадком КЗ, їх розглядають зазвичай як критичні (граничні). Відсоток таких КЗ у високовольтних мережах є незначним. Значно більша частота КЗ припадає на металічні КЗ, де між струмопровідними частинами міститься певний додатковий опір, характер якого зазвичай нелінійний. Зокрема, такий додатковий опір може створювати електрична дуга при зближенні фаз, опір землі при КЗ на землю тощо.

Згідно з [7] частка дугових замикань, не враховуючи грозові КЗ (удари блискавок) у лінії електропередачі, становлять відповідно для мереж з номінальною напругою 110 кВ – 50 %, 220 кВ – 55 %, 330 кВ – 62 %. Існують праці, зокрема [8], в яких стверджується, що властивості дуги значного впливу на струм КЗ не мають, і дугою можна нехтувати. Проте, враховуючи значний відсоток дугових КЗ, а також можливість спаду напруги до (10-15) % від значення доаварійної фазної напруги в разі виникнення дуги [9], а за максимально несприятливих умов (різких поривів вітру) – до 40 % [10], окрім зниження значення рівня фазної напруги, за появи дуги на діюче значення усталеного струму КЗ впливатиме також значення опору дуги. Опір дуги зменшуватиме сталу часу T_{1k} аперіодичної складової струму короткого замикання.

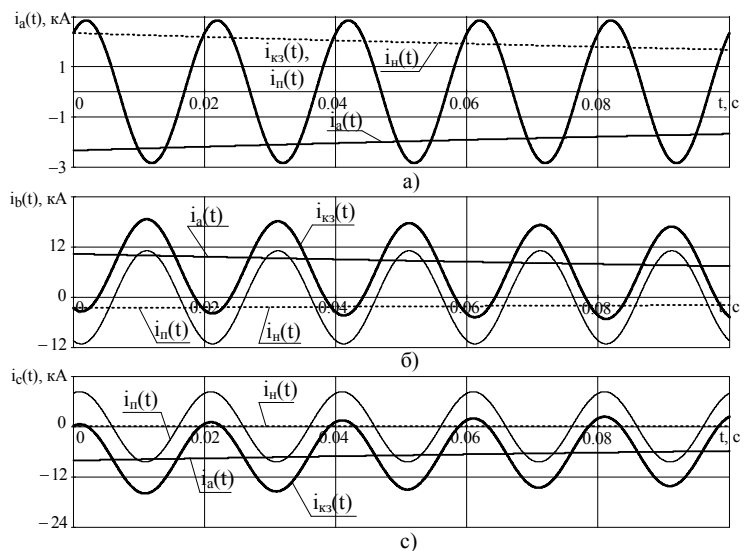


Рис. 5

Опір землі z_z при КЗ на землю, як і опір дуги, зменшує діюче значення усталеного струму КЗ і сталу частоту аперіодичної складової струму КЗ. Найбільшою проблемою під час розрахунку параметрів моделей струмів КЗ з урахуванням впливу опору землі є вибір самої формули розрахунку опору землі, визначення параметрів цієї формули, а також той факт, що цей опір у значній мірі залежить від частоти [2, 10]. Найбільш адекватна модель опору землі представлена формулою Керсона [10]:

$$z_z = \left[\pi^2 f + j\omega \left(2 \ln \left(\frac{2}{\gamma \sqrt{\omega \mu_0 \sigma \alpha}} + 1 \right) \right) \right] \cdot 10^{-4},$$

де μ_0 – постійна магнітна проникність; α – еквівалентний радіус проводу; σ – провідність землі; f , ω – відповідно частота та кутова частота струму, який протікає через землю.

Висновки. 1. Розроблено математичні моделі миттєвих струмів для різних видів КЗ трифазної мережі, які, на відміну від рекомендованої МЕК моделі однофазного струму, враховують навантажувальну складову струму КЗ (струм доаварійного режиму) і несиметрію мережі, а також дають змогу побудувати осцилограми струмів КЗ, аналогічні розрахованим шляхом розв’язання диференціальних рівнянь моделі мережі, і завдяки цьому значно спростити розрахунки струмів.

2. Виходячи з проведеного порівняння результатів розрахунків повного струму КЗ і його окремих складових за рекомендованою та запропонованими моделями, показано, що в певних випадках амплітуда навантажувальної складової може сягати до 10 % від значення повного струму КЗ, підсилюючи або, навпаки, ослаблюючи сумарну аперіодичну складову цього струму.

Фінансується за держбюджетною темою «Методи та засоби моделювання й обробки інформації при моніторингу електроенергетичних систем» (шифр «Інтелмер-2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 08.11.2016 р., протокол № 16. Державний реєстраційний номер роботи 0117U002583.

1. Вичев С. Т. Моделирование входных величин для релейных защит: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 02.06.02. Софія. 2001. 77 с.
2. Подгорный Э. В. Аперіодические составляющие переходного тока короткого замыкания. *Изв. вуз. Электромеханика*. 1980. № 9. С. 980 – 987.
3. Ульянов С. А. Электромагнитные процессы в электрических системах. М.: Энергия. 1970. 520 с.
4. IEC TR 61869-100. Instrument transformers. Part 100 – Guidance for application of current transformers in power system protection. 2017. 135 p.
5. Смирнов С. С., Коверникова Л. И. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. *Электричество*. 1999. № 6. С. 2 – 6.
6. Курбацкий В. Г., Трофимов Г. Г. Контроль несинусоидальности напряжения в электрических сетях. *Электричество*. 1991. № 6. С. 17 – 22.
7. Майкопар А. С. Дуговые замыкания на линиях электропередач. М.: Энергия, 1965. 200 с.
8. Бердов Г. В. Эквивалентные постоянные времени в сетях 110 – 220 кВ энергосистем. *Научно-технический сборник «Энергосетьпроект»*. 1972. Вип. 5. С. 21– 23.
9. Бургсдорф В. В. Открытые электрические дуги большой мощности. *Электричество*. 1948. № 10. С. 15 – 23.
10. Подгорный Э. В. Техническое приложение и развитие теории электромагнитных процессов для построения быстродействующих релейных защит: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Новочеркасск. 1989. 454 с.

УДК 621.314

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МГНОВЕННЫХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ**В. И. Паньків, Е. Н. Танкевич**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

Разработаны математические модели мгновенных токов короткого замыкания (КЗ) трехфазной несимметричной сети с глухозаземленной нейтралью для различных видов КЗ. На примерах расчетов значений полного тока КЗ показана целесообразность учета его нагрузочной составляющей. Представлены рекомендации по проведению расчетов токов КЗ по разработанным моделям для случаев металлических КЗ и КЗ с дополнительным сопротивлением в месте повреждения. Библ. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: короткое замыкание, мгновенный ток, модель, высоковольтная сеть.

MATHEMATICAL MODELS OF INSTANTANEOUS FAULT CURRENTS OF THREE-PHASE HIGH-VOLTAGE NETWORKS**V. I. Pankiv, E. M. Tankevych**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03056, Ukraine

e-mail: pankiv.volodimir@gmail.com

Mathematical models of instantaneous fault currents of a three-phase asymmetric network with a solidly grounded neutral for various types of short-circuit are developed. The examples of calculations of the total fault current value show the feasibility of taking into account its decaying load component. Presented recommendations for the calculation of fault currents on the developed models for cases of metal short-circuit and short-circuit with additional resistance at the site of damage. Ref. 10, Fig. 5, Table 1.

Keywords: short circuit, instantaneous current, model, high-voltage network.

1. Vichev S. T. Simulation of input values for relay protection: author's abstract of Dr. tech. sci. diss.: 02.06.02 / Sofiya. 2001. 77 p. (Rus)
2. Podgorny E. V. Aperiodic components of the transient fault current. *Izvestie vuzov elektromekhanika*. 1980. No 9. Pp. 980 – 987. (Rus)
3. Ulyanov S. A. Electromagnetic processes in electrical systems. M.: *Energiya*. 1970. 520 p. (Rus)
4. IEC TR 61869-100. Instrument transformers. Part 100 – Guidance for application of current transformers in power system protection. 2017. 135 p. (Eng)
5. Smirnov S.S., Kovernikova L.I. Higher harmonics in high-voltage networks. *Elektrichestvo*. 1999. No 6. Pp. 2 – 6. (Rus)
6. Kurbatskiy V. G., Trofimov G. G. Control of non-sinusoidal voltage in electrical networks. *Elektrichestvo*. 1991. No 6. Pp. 17 – 22. (Rus)
7. Maykopar A. S. Arc fault on power transmission lines. M.: *Energiya*, 1965. 200 p. (Rus)
8. Berdov G. V. Equivalent time constants in power systems networks of 110 – 220 kV. *Nauchno-tehnicheskiiy sbornik «Energosetproyekt»*. 1972. Vol. 5. Pp. 21 – 23. (Rus)
9. Burgsdorf V. V. Open electric arcs of high power. *Elektrichestvo*. 1948. No 10. Pp. 15 – 23. (Rus)
10. Podgorny E. V. Technical Application and the Development of the Theory of Electromagnetic Processes for Building High-Speed Relay Protection: Dr. tech. sci. diss.: 05.14.02 / Novocherkassk. 1989. 454 p. (Rus)

Надійшла 03.06.2019

Received 03.06.2019