

УДК 621.316.925

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.; С. М. Мельничук; О. О. Ємельянов

ЗАСТОСУВАННЯ НАПРАВЛЕНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕПОВНОФАЗНИХ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ У МЕРЕЖАХ З ЕФЕКТИВНО ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

У статті проаналізовано величини, напрямки та співвідношення умовної потужності нульової та зворотної послідовності в режимах поздовжньої несиметрії. Доведено можливість застосування цих величин для захисту мереж з ефективно заземленою нейтраллю. Запропоновано для захисту від неповнофазних режимів використовувати направлений захист умовної потужності зворотної послідовності, який працює за фактом знаходження аргументу цих потужностей у заданих секторах комплексної площини.

Ключові слова: неповнофазні режими, релейний захист, умовна потужність зворотної послідовності, пульсувальна потужність.

Розгляд проблеми

Згідно з вимогами п. 3.2.106 ПУЕ [1] для ліній 110 кВ у мережах з ефективно заземленою нейтраллю повинні бути передбачені пристрої релейного захисту (РЗ) від міжфазних замикань та від замикань на землю. Захист від режимів поздовжньої несиметрії на таких лініях нормативними документами не передбачено. У разі виникнення неповнофазних режимів можлива неправильна, зайва робота пристроїв РЗ суміжних елементів електромережі та порушення в роботі електрообладнання споживачів – двигунів і трансформаторів.

Під час розробки пристроїв РЗ широке застосування отримав метод симетричних складників [2], одним з основних постулатів якого є твердження про те, що місце виникнення несиметричного пошкодження є джерелом потужностей нульової та зворотної послідовностей. За наявності достатнього струму факт виникнення неповнофазного режиму добре виявляється струмовим направленим захистом нульової послідовності (СЗНП). На підстанції, від якої відходять декілька ліній, пошкоджену можна виявити за напрямком вектора I_0 відносно U_0 : потужність S_0 на пошкодженій ПЛ буде направлена від лінії до шин ПС, а на інших, непошкоджених ПЛ, навпаки, буде розтікатися від шин ПС у лінії. Такий захист при КЗ із замиканням на «землю» однаково ефективно працює як у радіальних, так і в замкнутих кільцевих мережах. За величиною струму I_0 можна знайти відстань до місця КЗ і визначити, де сталась аварія: на своїй ПЛ чи на лініях, що відходять від суміжної ПС. У разі виникнення неповнофазного режиму за достатніх величин струмів можна виявити, з боку якої ПЛ, що відходять від шин ПС, сталася аварія. Але застосування СЗНП у багатьох випадках характеризується недостатньо високою чутливістю.

У пристроях РЗ фірми Schneider Electric для виявлення обриву проводу на лінії запропоновано використовувати співвідношення I_2/I_1 . Аналогічний алгоритм використовує фірма General Electric. Використовуючи такий метод, під час виникнення обриву на одній з двох паралельних ліній можна відрізнити, яка з них пошкоджена, а яка – справна. Значення I_2 на обох лініях будуть однакові, але I_1 на пошкодженій буде менше, ніж на справній. Відповідно співвідношення I_2/I_1 для пошкодженої лінії буде більшим, ніж для справної.

Але застосування такого підходу для прохідних (транзитних) підстанцій з малим власним

споживанням є досить проблематичним, тому що співвідношення I_2 / I_1 на обох лініях – і пошкодженій, і справній – будуть дуже близькі за значенням, що не дає можливості для селективної роботи захисту [3].

Обґрунтування результатів

Проаналізуємо можливість виявлення неповнофазного навантажувального режиму на прикладі розподільної кільцевої мережі 110 кВ (рис. 1). Обмежимося аналізом потужностей нульової послідовності $\underline{S}_0 = 3\dot{U}_0 \dot{I}_0$, умовної потужності нульової послідовності $\underline{S}_{10} = 3\dot{U}_1 \dot{I}_0$, які передаються по лініях, та умовної потужності нульової послідовності трансформаторів $\underline{S}_{10T} = 3\dot{U}_1 \dot{I}_{0T}$. Використання потужностей забезпечить можливість порівняльного аналізу.

У табл. 1 наведено результати розрахунку кільцевої мережі у разі обриву фази А Л-3. Для наочності напівжирним шрифтом виділено дані, що стосуються пошкодженої лінії. Розрахунок виконано методом симетричних складників із використанням таких даних: потужність системи $S_c = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ($X_{c1} = X_{c2} = 13,2 \text{ Ом}$, $X_{c0} = 1,4X_{c1} = 18,5 \text{ Ом}$); погонні опори ліній прямої, зворотної та нульової послідовностей $Z_{\text{пор.1}} = Z_{\text{пор.2}} = 0,125 + j0,41 \text{ Ом/км.}$; $Z_{\text{пор.0}} = 0,274 + j1,38 \text{ Ом/км.}$; потужність трансформаторів $S_{\text{нт}} = 16 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ($u_k^* = 0,105$); потужність навантажень $S_{\text{н1}} = 10 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ($\cos\varphi_{\text{н}} = 0,866$), $S_{\text{н2}} = 5$ або $10 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ($\cos\varphi_{\text{н}} = 0,866$).

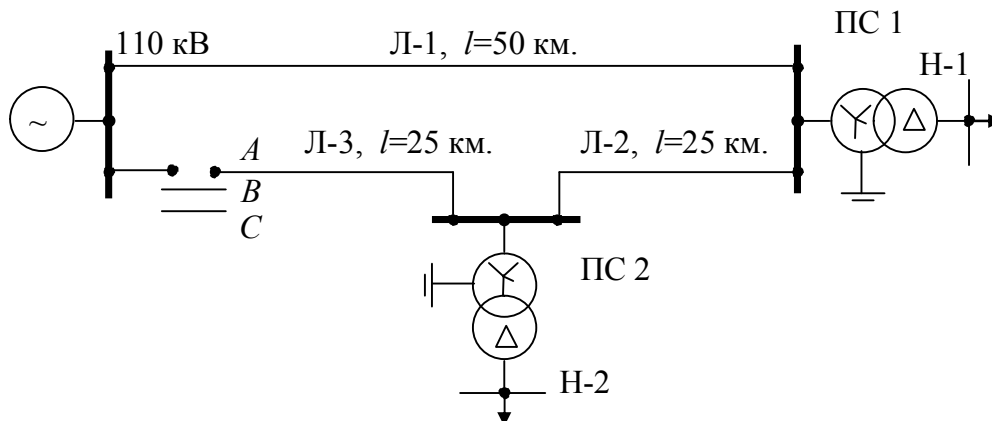


Рис. 1. Розрахункова схема кільцевої мережі

Таблиця 1

Результати розрахунків неповнофазного режиму у разі обриву фази А лінії Л-3

Підстанція, лінія	Навантаження	\underline{S} , МВ·А	\underline{S}_0 , кВ·А	\underline{S}_{10} , МВ·А	\underline{S}_{10T} , МВ·А
ПС-1, Л-1	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	12,2 ∟ 28°	3,7 ∟ -101°	0,8 ∟ 28°	-0,7 ∟ 39°
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	9,6 ∟ 29°	1,8 ∟ -101°	0,6 ∟ 28°	-0,5 ∟ 39°
ПС-1, Л-2 (Л-3)	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	-2,3 ∟ 26°	6,7 ∟ 84°	-1,5 ∟ 33°	-0,7 ∟ 39°
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	0,3 ∟ 48°	3,3 ∟ 84°	-1,0 ∟ 33°	-0,5 ∟ 39°
ПС-2, Л-2 (Л-1)	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	2,3 ∟ 26°	0,9 ∟ -58°	1,5 ∟ 33°	-1,3 ∟ 41°
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	-0,3 ∟ 48°	0,4 ∟ -58°	1,0 ∟ 33°	-0,9 ∟ 41°
ПС-2, Л-3	$S_{\text{н2}} = S_{\text{н1}}$	7,5 ∟ 30°	1,6 ∟ 126°	-2,7 ∟ 37°	-1,3 ∟ 41°
	$S_{\text{н2}} = 0,5S_{\text{н1}}$	5,3 ∟ 30°	0,8 ∟ 126°	-1,9 ∟ 37°	-0,9 ∟ 41°

Із наведеної таблиці випливає, що обрив фази Л-3 можна виявити за аргументом потужності \underline{S}_0 , застосування якої забезпечує можливість селективної роботи захисту в кільцевій мережі. Зважаючи на те, що аргумент потужності \underline{S}_0 змінюється у фіксованих секторах відповідно від 84 до 126 ел. градусів та від -101 до -58 ел. градусів, які відповідають пошкодженій і непошкодженій лініям, і ці сектори залишаються такими ж у разі пошкодження будь-якої з фаз, за значенням аргументу можна виявити пошкоджену лінію й забезпечити селективність вимикання пошкодженої лінії, побудувавши прямо залежну характеристику часу вимикання від аргументу цієї потужності. Аргумент цієї потужності більший на Л-2 ПС-1, ніж на Л-3 ПС-2, яка є пошкодженою. Ця властивість є стабільною за різних співвідношень потужностей. Однак чутливість є недостатньо високою ($\underline{S}_0=800 \text{ В}\cdot\text{А}$ при $\underline{S}=5,3 \text{ МВ}\cdot\text{А}$).

Обрив фази можна також виявити за аргументом потужності \underline{S}_{10} (кутом зсуву фаз струмів \dot{I}_0 відносно напруги \dot{U}_1), оскільки напрямок цієї величини для пошкодженої лінії кільцевої мережі змінюється на протилежний відносно напрямку потужності \underline{S} . Зважаючи на те, що аргумент потужності \underline{S}_{10} перебуває у фіксованих секторах, які відповідають пошкодженій і непошкодженій лініям, і модуль цієї потужності більший на Л-3 ПС-2, ніж на Л-2 ПС-1, за використання потужності \underline{S}_{10} або струму \dot{I}_0 можна забезпечити селективне вимкнення пошкодженої лінії Л-3.

Для забезпечення селективної роботи захисту за потужністю \underline{S}_{10} або струмом \dot{I}_0 повинна бути передбачена обернено залежна характеристика часу спрацювання від модуля цих величин. Сектор, який визначають аргументом \underline{S}_{10} , \dot{I}_0 , що відповідає пошкодженій і непошкодженій фазам, змінюється на 120 ел. градусів залежно від того, яка саме фаза є пошкодженою. Але оскільки ці сектори є значно вужчими, ніж для потужності \underline{S}_0 , то реалізація такого захисту в мікропроцесорному виконанні можлива. При цьому чутливість захисту з використанням \underline{S}_{10} зростає порівняно з тим, якщо інформативною є потужність \underline{S}_0 ($\underline{S}_{10}=1,9 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ при $\underline{S}=5,3 \text{ МВ}\cdot\text{А}$).

Додатковою умовою, яка може бути використана для визначення пошкодженої лінії є напрямок потужності \underline{S}_{10T} на цій підстанції. Якщо \underline{S}_{10T} розташований в тому ж секторі, що і \underline{S}_{10} контрольованої лінії, то лінія пошкоджена. Ця умова є необхідною для ліній, на яких відбувається зміна напрямку передавання потужності

Таблиця 2

Результати розрахунків неповнофазного режиму в разі обриву фази А лінії Л-2

Підстанція, лінія	Навантаження	\underline{S} , МВ·А	\underline{S}_0 , кВ·А	\underline{S}_{10} , МВ·А	\underline{S}_{10T} , МВ·А
ПС-1, Л-1	$S_{H2} = S_{H1}$	8,4 \angle 29°	0,3 \angle -101°	0,3 \angle 32°	-0,2 \angle 43°
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	7,7 \angle 29°	0,8 \angle -101°	0,4 \angle 32°	-0,3 \angle 43°
ПС-1, Л-2 (Л-3)	$S_{H2} = S_{H1}$	1,5 \angle 30°	0,6 \angle 84°	-0,4 \angle 37°	-0,2 \angle 43°
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	2,2 \angle 30°	1,3 \angle 84°	-0,7 \angle 37°	-0,3 \angle 43°
ПС-2, Л-2 (Л-1)	$S_{H2} = S_{H1}$	-1,5 \angle 31°	0,4 \angle 82°	0,4 \angle 37°	0,1 \angle 44°
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	-2,2 \angle 31°	0,8 \angle 82°	0,7 \angle 36°	0,2 \angle 44°
ПС-2, Л-3	$S_{H2} = S_{H1}$	11,4 \angle 30°	0,3 \angle -101°	-0,3 \angle 33°	0,1 \angle 44°
	$S_{H2} = 0,5S_{H1}$	7,2 \angle 30°	0,6 \angle -101°	-0,5 \angle 33°	0,2 \angle 44°

У табл. 2 наведено результати розрахунків неповнофазного режиму в разі обриву фази А

лінії Л-2, з якої видно, що однаковість розміщення векторів \underline{S}_{10} контрольованої лінії та \underline{S}_{10T} трансформатора ПС є основним критерієм виявлення обриву провода для ліній з реверсуванням напрямку передавання потужності.

Водночас, якщо нейтраль трансформатора на ПС-1 або ПС-2 розземлена, то застосування величин нульової послідовності для селективного вимкнення пошкодженої лінії неможливе. Зазначена особливість вимагає врахування цього фактора під час вибору підстанцій із розземленими нейтраліями трансформаторів.

Висновки

Проаналізовано величини, напрямки та співвідношення потужності нульової послідовності, умовних потужностей нульової та зворотної послідовностей у режимах поздовжньої несиметрії.

Для захисту від неповнофазних режимів ліній живлення з одностороннім напрямком передавання потужності запропоновано використовувати направлений захист умовної потужності нульової послідовності (струму нульової послідовності), який працює за фактом знаходження аргумента цієї потужності (струму) в заданих секторах комплексної площини.

Для ліній живлення з двостороннім напрямком передавання потужності в якості критерію обриву провода однієї фази лінії кільцевої мережі запропоновано однаковість розміщення векторів \underline{S}_{10} контрольованої лінії та \underline{S}_{10T} трансформатора ПС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – Харків : Вид-во «Форт», 2011. – 736 с.
2. Вагнер К. Ф. Метод симметричных составляющих / К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс. – ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 407 с.
3. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей / Нагай В. И. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.

Бурбело Михайло Йосипович – д. т. н., професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.

Мельничук Сергій Миколайович – інженер Південно-Західної електроенергетичної системи ДП НЕК „Укренерго”.

Південно-Західна електроенергетична система ДП НЕК „Укренерго”.

Ємельянов Олексій Олександрович – студент інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет.