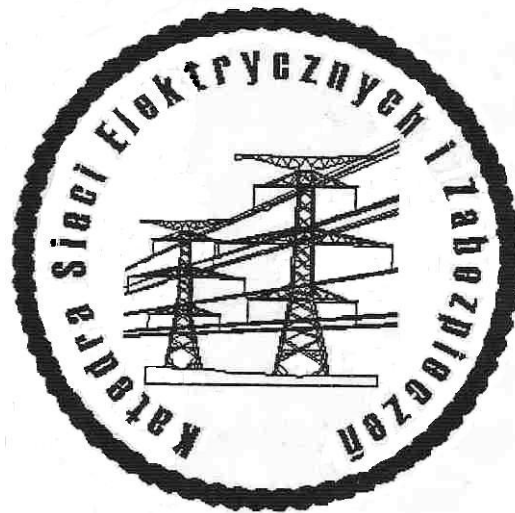


POLITECHNIKA LUBELSKA

Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń



Badanie rozplywu prądów ziemnozwarciowych w sieciach z izolowanym oraz uziemionym przez rezystor punktem neutralnym transformatora.

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów ze zjawiskami towarzyszącymi zwarciom jednofazowym (zwarciom doziemnym) w sieciach średniego napięcia (SN) a w szczególności z rozplywem prądów w tych sieciach oraz z wielkościami pomiarowymi wykorzystywanymi przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe.

Zadania domowe

Zadanie 1. Dla fragmentu sieci 10 kV złożonego z linii kablowych: $l_1 = 1,5 \text{ km}$ 3x 500mm², $l_2 = 1,9 \text{ km}$ 3x 630mm², $l_3 = 0,9 \text{ km}$ 3x 400mm² przyjmując jako C_0 wartość pojemności z tabeli poniżej wyznaczyć prądy własne (ładowania) poszczególnych linii, oraz prąd ziemnozwarciowy sieci.

Zadanie 2. Dla fragmentu sieci 20 kV złożonego z linii kablowych: $l_1 = 1,5 \text{ km}$ 3x 500mm², $l_2 = 1,9 \text{ km}$ 3x 630mm², $l_3 = 0,9 \text{ km}$ 3x 400mm² przyjmując jako C_0 wartość pojemności z tabeli poniżej wyznaczyć wartość $3I_0$ na początku każdej linii przy zwarcu doziemnym, które wystąpiło na linii l_2 .

Zadanie 3. Dla fragmentu sieci 20 kV złożonego z linii kablowych: $l_1 = 1,5 \text{ km}$ 3x 500mm², $l_2 = 1,9 \text{ km}$ 3x 630mm², $l_3 = 0,9 \text{ km}$ 3x 400mm² przyjmując jako C_0 wartość pojemności z tabeli poniżej wyznaczyć wartość $3I_0$ na początku każdej linii przy zwarcu doziemnym, które wystąpiło na linii l_2 .

Zadanie 4. Dla fragmentu sieci 20 kV złożonego z linii kablowych: $l_1 = 1,5 \text{ km}$ 3x 500mm², $l_2 = 1,9 \text{ km}$ 3x 630mm², $l_3 = 0,9 \text{ km}$ 3x 400mm² przyjmując jako C_0 wartość pojemności z tabeli poniżej dobrać nastawy prądów rozruchowych zabezpieczeń nadprądowych ziemnozwarciowych poszczególnych linii.

Zadanie dla każdego studenta podaje prowadzący, lub wynika od kolejności studentów w grupie ćwiczącej.

POJEMNOŚĆ KABLI:

Wartość pojemności dla poszczególnych rodzajów kabli oraz związane z pojemnością parametry przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 10

Przekrój żyły	Napięcie	Pojemność	Reaktancja pojemnościowa	Prąd ładowania	Pojemnościowy prąd zwarcia z ziemią
mm ²	kV	μF/km	kΩ/km	A/km	A/km
35	3,6/6	0,27	11,8	0,31	0,93
50		0,30	10,6	0,34	1,02
70		0,34	9,37	0,38	1,14
95		0,39	8,17	0,44	1,32
120		0,42	7,58	0,47	1,41
150		0,46	6,92	0,52	1,56
185		0,50	6,37	0,57	1,71
240		0,55	5,79	0,62	1,86
300		0,56	5,69	0,63	1,89
400		0,59	5,40	0,67	2,01
500		0,62	5,14	0,70	2,10
630		0,71	4,49	0,80	2,40
800		0,80	3,98	0,90	2,70
1000		0,86	3,70	0,97	2,91
35	6/10	0,21	15,17	0,40	1,20
50		0,25	12,74	0,47	1,41
70		0,28	11,37	0,53	1,59
95		0,31	10,27	0,58	1,74
120		0,34	9,37	0,64	1,92
150		0,37	8,61	0,70	2,10
185		0,40	7,96	0,75	2,25
240		0,44	7,24	0,83	2,49
300		0,48	6,63	0,90	2,70
400		0,55	5,79	1,03	3,06
500		0,60	5,31	1,13	3,39
630		0,66	4,83	1,24	3,72
800		0,74	4,30	1,39	4,17
1000		0,82	3,88	1,54	4,62
35	8,7/15	0,17	18,73	0,46	1,38
50		0,21	15,17	0,57	1,71
70		0,23	13,85	0,63	1,89
95		0,26	12,25	0,71	2,13
120		0,27	11,80	0,74	2,22
150		0,29	11,98	0,79	2,37
185		0,32	9,95	0,87	2,61
240		0,35	9,10	0,96	2,88
300		0,38	8,38	1,03	3,09
400		0,43	7,41	1,17	3,51
500		0,47	6,78	1,28	3,84
630		0,52	6,12	1,42	4,26
800		0,59	5,40	1,61	4,83
1000		0,64	4,98	1,75	5,25
35	12/20	0,15	21,23	0,57	1,71
50		0,18	17,70	0,68	2,04
70		0,20	15,92	0,75	2,25
95		0,22	14,48	0,83	2,49
120		0,23	13,85	0,87	2,61
150		0,25	12,74	0,94	2,82
185		0,27	11,80	1,02	3,06
240		0,30	10,62	1,13	3,39
300		0,32	9,95	1,21	3,63
400		0,36	8,85	1,36	4,08
500		0,40	7,96	1,50	4,50
630		0,44	7,24	1,66	4,98
800		0,49	6,50	1,85	5,55
1000		0,54	5,90	2,03	6,09
50	18/30	0,14	22,75	0,79	2,37
70		0,15	21,23	0,85	2,55
95		0,17	18,73	0,96	2,88
120		0,18	17,96	1,02	3,06
150		0,19	16,76	1,07	3,21
185		0,20	15,92	1,13	3,39
240		0,22	14,48	1,24	3,72
300		0,24	13,27	1,36	4,08
400		0,27	11,80	1,53	4,59
500		0,29	10,98	1,64	4,92
630		0,32	9,95	1,81	5,43
800		0,35	9,10	1,98	5,94
1000		0,38	8,38	2,15	6,45

1. Wiadomości wstępne.

Większość napowietrznych i kablowych sieci elektroenergetycznych średniego napięcia pracujących w naszym kraju, są to sieci o tzw. małym prądzie zwarcia z ziemią. Występujące w tych sieciach transformatory WN/SN oraz SN/SN pracują z punktem izolowanym albo uziemionym (pośrednio lub bezpośrednio) przez indukcyjność kompensującą pojemnościowy prąd doziemny. Przed wykonaniem ćwiczenia należy powtórzyć wiadomości z wykładu dotyczące sieci SN, zwarciach w sieciach, zabezpieczeniach sieci SN lub przestudiować odpowiednie rozdziały w [1, 2, 5, 6, 7, 8].

1.1 Specyfikacja zwarć doziemnych

Zdecydowaną większość wszystkich zwarć w sieciach napowietrznych stanowią zwarcia jednofazowe (doziemne). Wartości prądów zwarciovych a także przebiegi stanów nieustalonych towarzyszących tym zwarciom zależą od sposobu pracy punktu neutralnego sieci.

Sposób pracy punktu neutralnego sieci wynika ze sposobu pracy punktu gwiazdowego transformatorów pracujących w sieci. Trójfazowe uzwojenia transformatorów energetycznych mogą być połączone w trójkąt, gwiazdę lub zygzak. W połączeniu w gwiazdę punkt wspólny trzech faz nazywany jest punktem gwiazdowym transformatora. Gdy punkt gwiazdowy żadnego z transformatorów w danej sieci nie jest połączony z ziemią mówi się, że sieć pracuje z izolowanym punktem neutralnym. Gdy punkt gwiazdowy co najmniej jednego z transformatorów pracujących w sieci jest połączony z ziemią mówi się, że sieć pracuje z uziemionym punktem neutralnym. Uziemienie to może być bezpośrednie, za pomocą dławika kompensacyjnego lub za pomocą rezystora.

Sposób pracy punktu neutralnego sieci ściśle związany jest z zagadnieniami przepięć w sieciach, a także ochrony przeciwporażeniowej. Podczas zwarć doziemnych na elementach urządzeń, które normalnie nie znajdują się pod napięciem, a także w ziemi w pobliżu miejsca zwarcia pojawia się napięcie

grożące porażeniem. Niebezpieczeństwo porażenia uzależnione jest od wartości prądu doziemnego i czasu trwania zwarcia.

W sieciach WN oraz najwyższych napięć NN stosuje się bezpośrednie uziemienie punktu neutralnego. Sieci średniego napięcia SN o małej rozległości mogą pracować z izolowanym punktem neutralnym lub punktem neutralnym uziemionym przez dławik kompensujący (sieci kompensowane). Rozległe sieci SN pracują z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.

Należy pamiętać, że termin punkt gwiazdowy dotyczy konstrukcji transformatora, zaś termin punkt neutralny używany jest zawsze w kontekście sieci, w której pracuje transformator.

1.1.1 Zwarcie i wyłączenie w obwodzie z pojemnościami

W przypadku zwarć doziemnych (zwłaszcza w sieciach SN) dużą rolę odgrywają pojemności sieci oraz indukcyjność transformatora zasilającego.

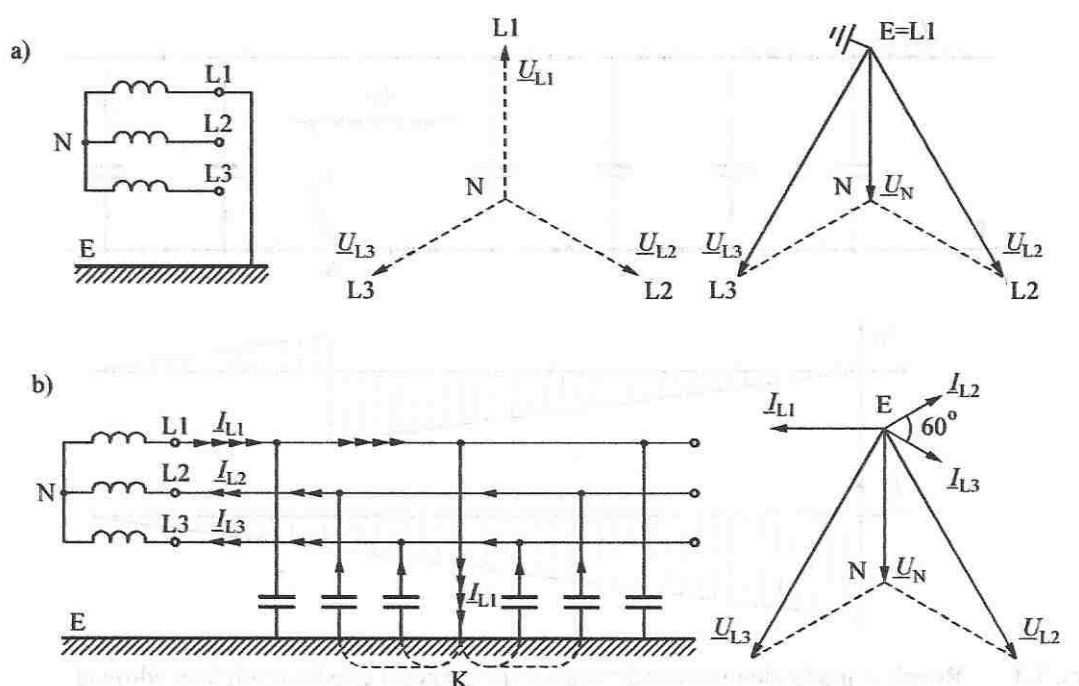
Z tego względu wstępnie warto omówić wybrane zjawiska zachodzące w obwodach z pojemnościami. Wynikają one z zasady zachowania energii (będącej jedną z fundamentalnych zasad fizyki) oraz faktu, że energia $W_L = \frac{1}{2} Li^2$ zmagazynowana w polu magnetycznym cewki zależy od indukcyjności cewki oraz płynącego przez nią prądu. W przypadku pojemności obowiązuje podobna zasada ciągłości napięcia mówiąca, że na pojemności nie może zmieniać się skokowo. Wynika to z tej samej zasady stałości energii oraz faktu, że energia $W_C = \frac{1}{2} CU^2$ zmagazynowana w polu elektrycznym kondensatora zależy od jego pojemności C oraz kwadratu napięcia U panującego na jego zaciskach. Zasada ta odgrywa istotną rolę w zjawiskach towarzyszących zwarciom w obwodach LC.

1.1.2 Zwarcie w sieci z izolowanym punktem neutralnym

Przypadek zwarcia jednofazowego (doziemnego) w sieci z izolowanym punktem neutralnym ilustruje rys. 1.1. Uzwojenie wtórne transformatora zasilającego sieć połączone jest w gwiazdę. Przed zwarciem napięcia faz względem punktu neutralnego N tworzą gwiazdę symetryczną i napięcie tego punktu względem ziemi E jest równe zero. Ilustruje to wykres wskazowy narysowany linią przerywaną (obok schematu).

Gdy transformator nie zasila żadnej sieci (rys. 1.3a) zwarcie jednej z jego faz do ziemi nie wywołuje żadnego prądu, gdyż nie ma dla niego zamkniętego obwodu. W takiej sytuacji dochodzi jedynie do zmiany potencjałów względem ziemi. Wskutek zwarcia fazy L1 z ziemią Z zwarty koniec tego uzwojenia przyjmuje zerowe napięcie względem ziemi. Na uzwojeniu fazy L1 transformatora jest napięcie fazowe. Tym samym punkt neutralny N połączony z drugim końcem uzwojenia musi mieć względem ziemi napięcie odpowiadające napięciu fazowemu uzwojenia transformatora (linia przerywana). Napięcia na uzwojeniach pozostałych faz (linie przerywane)

dodają się do napięcia punktu neutralnego i w rezultacie napięcia faz zdrowych względem ziemi (linie ciągłe) osiągają wartości napięć międzyfazowych $\sqrt{3}U_{ph}$.

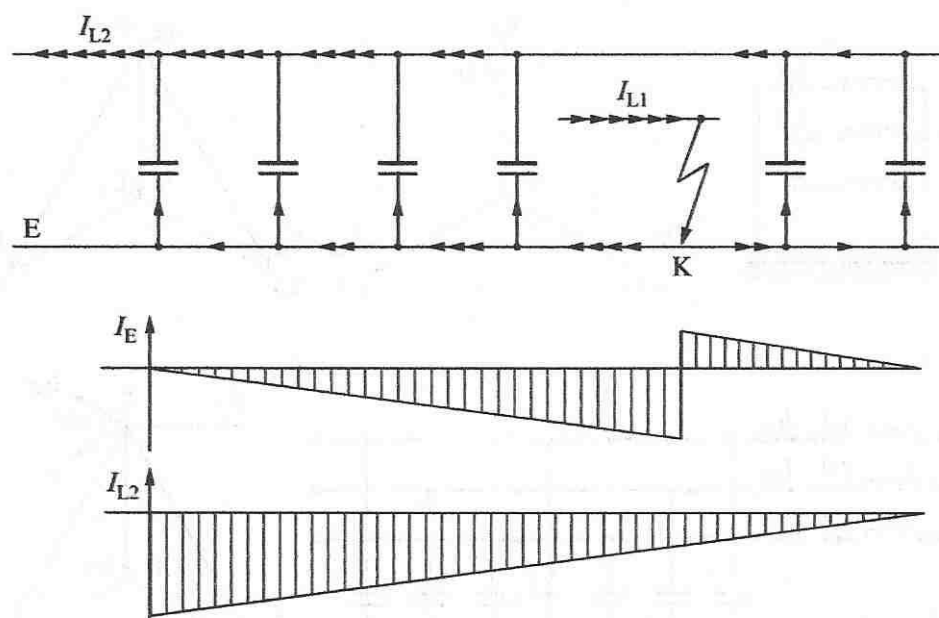


Rys. 1.1 Zwarcie jednofazowe (doziemne) w przypadku izolowanego punktu neutralnego (a) przy braku sieci, (b) przy podłączonej sieci

Gdy transformator zasila sieć (rys. 1.1b) sytuacja napięć względem ziemi jest podobna lecz prąd zwarcia może zamknąć się przez pojemności sieci. Prąd zwarciaowy dopływa do miejsca zwarcia przewodem fazy zwartej i wpływa do ziemi. Tutaj płynie pod przewodami linii elektroenergetycznej i wraca pojemnościami faz zdrowych. Zgodnie z prawem Kirchoffa dla węzła N prądy muszą spełniać równanie $I_{L1} = -(I_{L2} + I_{L3})$ świadcząc o tym, że suma prądów w fazach zdrowych równa się prądowi w fazie zwartej z przeciwnym znakiem. Fakt ten uwzględniono także na wykresie wskazowym przy czym wzięto pod uwagę, że prądy poszczególnych faz wyprzedzają ich napięcia o 90° (charakter pojemnościowy prądów). Na schemacie prawo Kirchoffa uwzględniono za pomocą liczby strzałek. W fazie zwartej narysowano cztery strzałki odpowiadające dwóm strzałkom w fazach zdrowych. Te dwie strzałki w fazach zdrowych są dalej rozdzielone na pojedyncze strzałki w pojemnościach doziemnych odpowiednio na lewo i prawo od miejsca zwarcia. Napięcia faz zdrowych względem ziemi mają wartość napięć międzyfazowych $\sqrt{3}U_{ph}$.

Pojemności linii są rozłożone wzdłuż jej długości. Prąd zwarcia wpływający do ziemi odpowiada wszystkim tym pojemnościom cząstkowym i w miarę zbliżania się od miejsca zwarcia w stronę transformatora wartość prądu płynącego ziemią jest coraz mniejsza, a na początku linii (przy

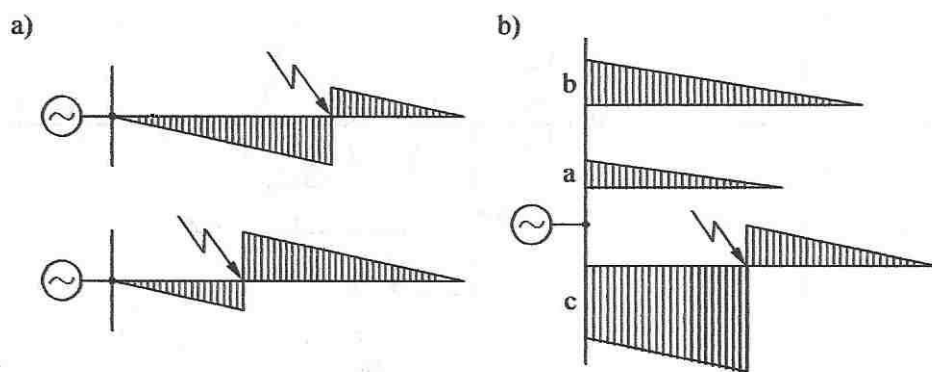
transformatorze) jest równa zero. Podobnie na drugim końcu linii. Ilustruje to rys. 1.2 wykonany dla prostoty tylko dla jednej fazy zdrowej. Pojemność linii podzielono na kilka pojemności cząstkowych. Jedną strzałką oznaczono prąd płynący przez pojedynczą pojemność cząstkową. W miejscu zwarcia K z fazy zwartej wpływa prąd odpowiadający wszystkim pojemnościom. Od tego miejsca w stronę transformatora kolejne cząstki prądu wpływają do kolejnych pojemności i prąd w ziemi zmniejsza się. Podobnie w stronę drugiego końca linii. Rozkład prądu w ziemi I_E ilustruje pierwszy zakreskowany wykres. W fazie zdrowej prąd zwarciaowy zwiększa się od wartości zerowej na końcu linii do wartości największej I_{L2} na początku linii (przy zaciskach transformatora).



Rys. 1.2 Rozpływ prądu ziemnozwarciowego do pojemności cząstkowych fazy zdrowej

W sieci z izolowanym punktem neutralnym prąd zwarcia zależy od pojemności sieci (gałęzie poprzeczne) oraz jej napięcia. Prąd praktycznie nie zależy od impedancji na drodze od źródła do miejsca zwarcia (gałąź wzdłużna). Innymi słowy wartość prądu zwarcia (w miejscu zwarcia) nie zależy od lokalizacji zwarcia względem transformatora zasilającego. Ilustruje to rys. 1.3a na którym pokazano rozkład prądu dla dwóch przypadków lokalizacji zwarcia. W pierwszym przypadku (rysunek górny) zwarcie jest blisko końca linii a w drugim (rysunek dolny) blisko transformatora zasilającego. W obu przypadkach prąd w miejscu zwarcia jest jednakowy. Inny jest tylko rozkład tego prądu wzdłuż linii.

Jeżeli z danego transformatora zasilanych jest więcej linii to w tym miejscu zwarcia prąd odpowiada łącznym pojemnościom wszystkich linii. Następnie prąd ten rozplywa się wzdłuż linii tak, że na ich końcach osiąga wartości równe zero. Największa wartość prądu jest w miejscu zwarcia, a na końcu linii równa się zero. Na rys. 1.3b pokazano rozkład prądu w sieci z trzema liniami. Prąd zwarcia w trzeciej z linii zamyka się przez pojemności faz zdrowych wszystkich linii, czyli również przez linię pierwszą i drugą. W pobliżu szyn stacji sumą prądów w ziemi pod liniami zdrowymi musi być równa prądowi pod linią zwartą. Na omawianym rysunku (rys. 1.3b) oznacza to, że odpowiednie odcinki muszą spełniać warunek $c = a + b$.

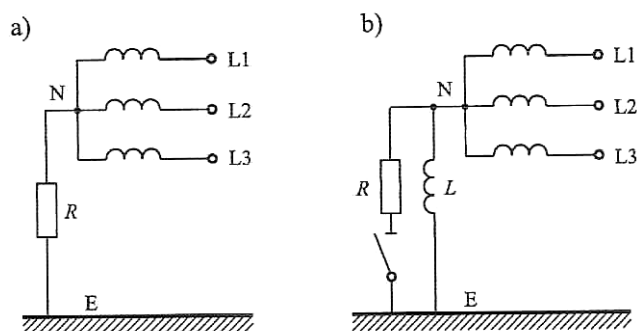


Rys. 1.3 Wartości prądu w ziemi wzdłuż linii (a) w sieci z jedną linią w dwu przypadkach lokalizacji zwarcia, (b) w sieci z trzema liniami

W schemacie na rys. 1.1b dla uproszczenia rozważań uwzględniono jedynie pojemności sieci. W dokładniejszym schemacie (równoległe do pojemności) powinny wystąpić też konduktancje odpowiadające upływności linii. Przepływ prądu przez te konduktancje jest analogiczny jak przez pojemności. W rezultacie w prądach zwarciovych (zarówno w fazie zwartej jak i fazach zdrowych) występuje składowa czynna prądu. Dla sieci SN jest ona jednak bardzo mała i często pomijana. W stanie nieustalonym przebiegi prądów i napięć w zasadniczy sposób zależą od tego czy zwarcie jest metaliczne czy łukowe.

1.1.3 Zwarcie w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

Sieci SN, w których występują trudności z efektywnym zastosowaniem kompensacji prądu ziemnozwarciowego mogą pracować z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor (rys. 4a) lub dławik i rezystor (rys. 1.4b).



Rys. 1.4 Uziemienie punktu gwiazdowego transformatora za pomocą:
a) rezystora oraz (b) dławika i rezystora

Uziemienie punktu neutralnego sieci SN za pomocą rezystora jest pośrednim rozwiązaniem między siecią z izolowanym punktem neutralnym a bezpośrednim uziemieniem punktu neutralnego. Zasadniczym celem, jaki przyświeca tej metodzie, jest zwiększenie prądu zwarcia do wartości ułatwiającej działanie prostych zabezpieczeń oraz zmniejszenie przepięć ziemnozwarciowych. Spełnione muszą być jednak wymagania ochrony przed porażeniami.

W przypadku uziemienia przez rezystor prąd zwarcia ma dwie porównywalne składowe. Składową bierną płynącą przez pojemności sieci, jak w przypadku sieci z izolowanym punktem neutralnym oraz składową czynną płynącą przez rezystor i fazę zwartą (podobnie jak prąd dławika w sieci kompensowanej). Im mniejsza wartość rezystancji, tym większa składowa czynna prądu zwarciovego i tym większy prąd. Przy dużych prądach zwarciovych łatwiejsze i czulsze jest działanie zabezpieczeń.

W miejscu zwarcia prąd czynny i bierny dodają się tak, że prąd w miejscu zwarcia jest przesunięty względem napięcia fazy o kilkadziesiąt stopni i nie przechodzi przez zero, gdy napięcie przechodzi przez maksimum. To utrudnia ponowne zapłony łuku w przypadku zwarć łukowych i tym samym ogranicza przepięcia towarzyszące ponownym zapłonom. W stanie zwarcia ustalonego napięcia faz zdrowych względem ziemi nie zwiększają się do wartości międzyfazowych. Napięcia tych faz zależą od wartości rezystancji rezystora uziemiającego, przy czym im mniejsza wartość rezystancji, tym mniejsze wartości napięć fazowych. To powoduje, że w chwili zwarcia skok napięcia wymuszanego przez źródło jest mniejszy. Mniejsza jest, więc amplituda oscylacji Δu towarzyszących doładowaniu się pojemności faz zdrowych i tym samym mniejsze są przepięcia towarzyszące powstaniu zwarcia. Mniejsze wartości rezystancji uziemiającej oznaczają jednak większe wartości prądów zwarciovych. Powoduje to większe zagrożenie porażeniowe napięciami na elementach urządzeń normalnie niebędących pod napięciem oraz w ziemi

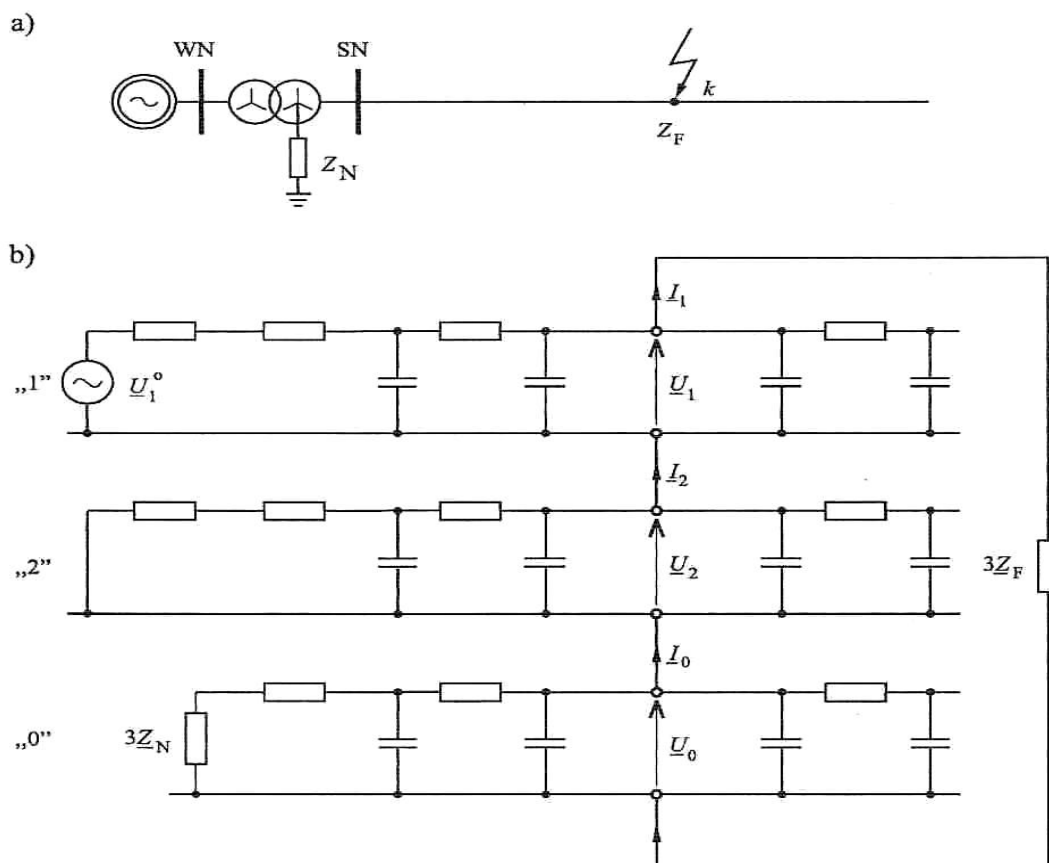
w pobliżu miejsca zwarcia. Dobór rezystancji rezystora uziemiającego jest kompromisem między czułym działaniem zabezpieczeń zabezpieczeń mniejszymi przepięciami a zagrożeniem porażeniowym. Na podstawie wielu prac studialnych i doświadczenia „Energoprojekt” w Poznaniu zaleca by w sieciach kablowych SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, prąd zwarcia nie przekraczał 500A, zaś w sieciach napowietrznych 120A. Przy tych wartościach sieci SN są zaliczane do sieci o małym prądzie zwarcia doziemnego, a przy odpowiednio małych rezystancjach uziomów ochronnych stacji i słupów są spełnione niezbędne wymagania ochrony przeciwporażeniowej. Zapewnienie odpowiednio małych rezystancji uziomów ochronnych jest warunkiem trudnym pod względem technicznym

i ekonomicznych (zwłaszcza dla sieci napowietrznych). Z tego powodu stosuje się też pośrednie. Jednym z nich jest uziemienie punktu neutralnego za pomocą dławika, z możliwością równoległego załączenia rezystora. W stanie normalnym sieć pracuje jako sieć kompensowana (z punktem neutralnym uziemionym za pomocą dławika). Po stwierdzeniu zwarcia (na podstawie pomiaru napięć) odpowiedni układ automatycznie łączy (na kilka sekund) rezystor powodujący wymuszenie składowej czynnej zwarcia (nie przekracza 120A), co stwarza dogodne warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Nazywa się to automatyką wymuszenia składowej czynnej (AWSC). Rezystor może być dostosowany do pracy przy średnim napięciu i wtedy jest przyłączony jak na rys 1.4b, lub może być rezystorem niskiego napięcia i wtedy przyłącza się go za pomocą dodatkowego transformatora.

1.2 Zwarcia w sieci z punktem neutralnym uziemionym za pomocą impedancji

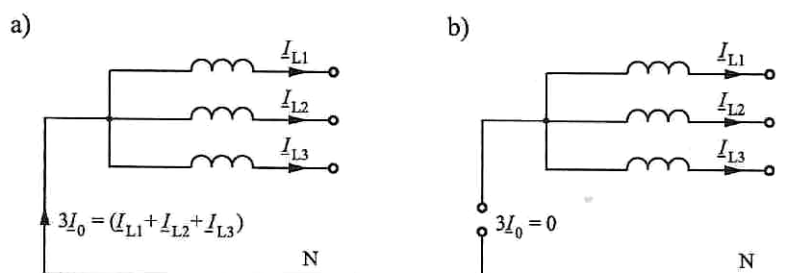
Schemat rozważanego układu pokazano na rys. 1.5a. Transformator z obu uzwojeniami połączonymi w gwiazdę zasila sieć rozdzielczą SN, przy czym punkt gwiazdowy transformatora od strony tej sieci jest uziemiony za pomocą impedancji \underline{Z}_N . Podobnie jak wcześniej przyjęto, że zwarcie doziemne występuje w fazie L1. Przy takim założeniu schematy składowych symetrycznych (zgodnej, przeciwnej i zerowej) należy podłączyć szeregowo, odpowiedni schemat pokazano na rys.1.5b. W schemacie dla składowej zgodnej (wyliczając od lewej strony rysunku) uwzględniono napięcie źródła zastępczego, impedancję zastępczą zgodną systemu zasilającego oraz transformatora, impedancję wzdłużną zgodną linii do miejsca zwarcia oraz pojemności poprzeczne linii, a za miejsca zwarcia odpowiednio impedancję

i pojemności pozostałej części linii. Podobnie w schemacie dla składowej przeciwnej oraz zerowej, lecz tu nie występują źródła napięcia. Wyjaśnienia wymaga impedancja $3 \underline{Z}_N$ występująca w schemacie dla składowej zerowej.



Rys. 1.5. Zwarcie jednofazowe w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez impedancję: a) schemat rozważanego fragmentu schematu; b) schemat sieci składowych symetrycznych

Jeśli po stronie SN pojawia się zwarcie doziemne, to przez tę impedancję i przewód uziemiający płynie suma prądów w trzech fazach, równa potrójnej wartości składowej zerowej prądu $3\underline{I}_0 = \underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3}$ rys. 1.6.



Rys. 1.6. Składowa zerowa w obwodzie trójfazowym

Składowe zgodna i przeciwna prądu nie płyną przez impedancję \underline{Z}_N . Oznacza to, że dla odwzorowania impedancji uziemiającej do obwodu składowej zerowej, obok impedancji zerowej transformatora, należy przyłączyć dodatkową impedancję. Wartość tej dodatkowej impedancji wynika z tego, że w układzie trójfazowym (rys.1.5a) na impedancji uziemiającej \underline{Z}_N powstanie strata napięcia

$$\underline{U}_N = -(\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3})\underline{Z}_N = -(3\underline{I}_0)\underline{Z}_N = -\underline{I}_0(3\underline{Z}_N) \quad (1.1)$$

odpowiadająca napięciu punktu gwiazdowego względem ziemi. By napięcie to odwzorować w schemacie zastępczym (w którym płynie tylko \underline{I}_0), to do impedancji zerowej transformatora trzeba dodać impedancję $3\underline{Z}_N$, co uwzględniono na rys. 1.6b. Jeżeli zwarcie doziemne jest przez impedancję \underline{Z}_F , to do każdego połączenia schematów składowych symetrycznych trzeba dodać impedancję \underline{Z}_F lub do jednego z połączeń potrójną wartość tej impedancji, czyli $3\underline{Z}_F$, wartość tą uwzględniono w schemacie na rys. 1.5b.

W praktyce obliczenia dla omawianego schematu można bardzo uprościć, o ile są spełnione następujące założenia:

- impedancje gałęzi wzdłużnych linii i transformatora oraz impedancja zastępcza systemu są dużo mniejsze niż impedancja gałęzi poprzecznych;
- impedancja \underline{Z}_N , uziemiająca punkt neutralny, jest duża w porównaniu z impedancją gałęzi wzdłużnych linii i transformatora oraz impedancją zastępczą systemu.

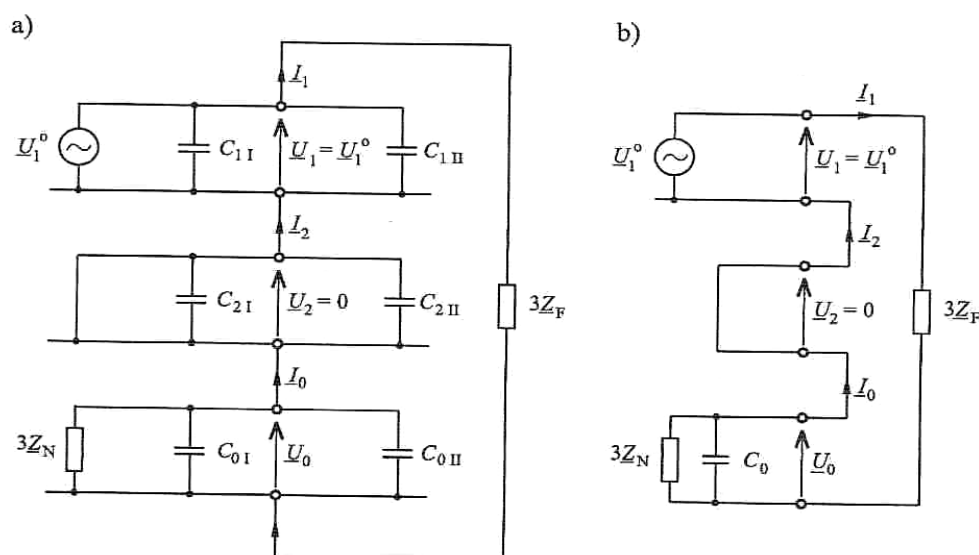
Jeżeli są spełnione te założenia, to schemat z rys. 1.5b można uprościć do postaci jak na rys. 1.7a. Wszystkie gałęzie wzdłużne zastąpiono tu bezpośrednimi połączeniami węzłów, a równoległe gałęzie poprzeczne (pojemności) połączono ze sobą. Pojemności C_{1I}, C_{2I}, C_{3I} oraz $C_{1II}, C_{2II}, C_{3II}$ odpowiadają sumie wartości pojemności odpowiednio po lewej i po prawej stronie schematu, patrząc z miejsca zwarcia (rys.1.7a). W schemacie dla

składowej przeciwnej pojemności C_{2I} , C_{2II} są zwarte i nie mają wpływu na wartość prądu. Napięcie $\underline{U}_2 \approx 0$. W schemacie dla składowej zgodnej pojemności C_{1I} , C_{1II} są włączone bezpośrednio do zacisków źródła $\underline{U}_1 = \underline{U}_1^o$

i również nie mają wpływu na wartość prądu \underline{I}_1 w miejscu zwarcia.

W schemacie dla składowej zerowej występują równolegle połączone pojemności $C_0 = C_{0I} + C_{0II}$ oraz impedancja $3\underline{Z}_N$. Schemat po usunięciu zbędnych elementów pokazano na rys. 1.7b. W tym uproszczonym obwodzie występuje tylko impedancja zwarcia oraz impedancja dla składowej zerowej

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{Z}_C 3\underline{Z}_N}{\underline{Z}_C + 3\underline{Z}_N} = \frac{\frac{1}{j\omega C_0} 3\underline{Z}_N}{\frac{1}{j\omega C_0} + 3\underline{Z}_N} = \frac{3\underline{Z}_N}{1 + j\omega C_0 3\underline{Z}_N} \quad (1.2)$$



Rys. 1.7. Uproszczone schematy dla składowych symetrycznych w przypadku zwarcia jednofazowego w sieci z punktem neutralnym uziemionym za pomocą impedancji: a) pominięcie impedancji gałęzi wzdłużnych; b) połączenie równoległych pojemności

Składowe symetryczne prądu i napięcia w obwodzie z rys. 1.7b wyrażone są następującymi wzorami:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_1^o}{\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_F} \quad (1.3)$$

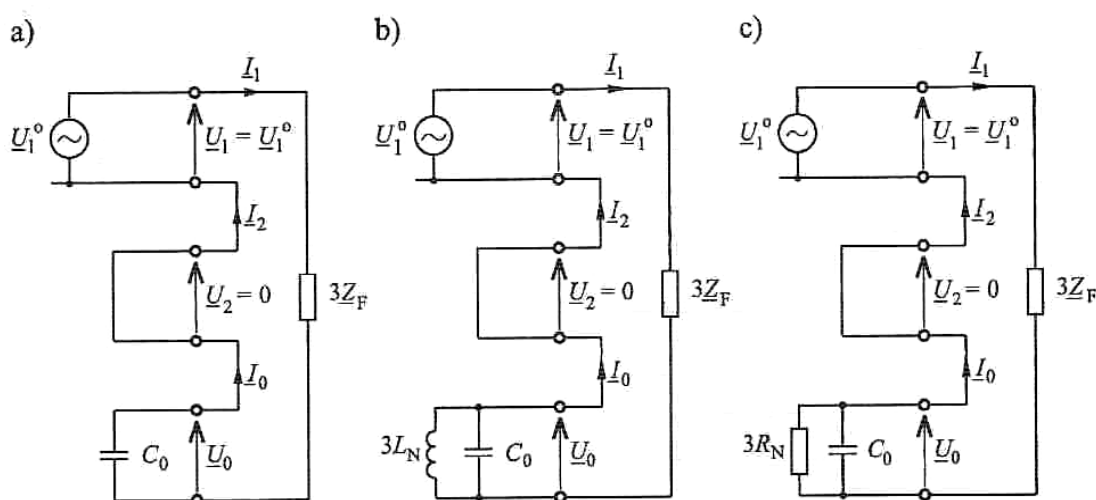
$$\underline{U}_0 = -\underline{Z}_0 \underline{I}_0 = -\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_F} \underline{U}_1^o \quad (1.4)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_1^o \quad (1.5)$$

$$\underline{U}_2 = 0 \quad (1.6)$$

Powyższe wartości składowych symetrycznych prądów napięć (wzory (1.3)-(1.6)) dotyczą miejsca zwarcia. Korzystając ze schematu z rys. 1.7a można określić jak składowe prądu zwarcia rozplývają się w równoległych pojemnościach C_{1I} , C_{2I} , C_{0I} , oraz C_{1II} , C_{2II} , C_{0II} , czyli jak rozplývają się w sieci od strony I oraz II.

Z punktu widzenia sieci elektroenergetycznych są istotne trzy szczególne przypadki układu sieci, odpowiednio dla: a) $\underline{Z}_N = \infty$ - sieć z izolowanym punktem neutralnym, b) $\underline{Z}_N = j\omega L_N$ - sieć z punktem neutralnym uziemionym za pomocą dławika kompensacyjnego oraz c) $\underline{Z}_N = R_N$ - sieć z punktem neutralnym uziemionym za pomocą rezystora. Uprozczone schematy w tych szczególnych przypadkach pokazano na rys. 1.8.



Rys. 1.8. Uprozczone schematy sieci składowych symetrycznych przy zwarciu jednofazowym w sieci: a) z izolowanym punktem neutralnym; b) z punktem neutralnym uziemionym za pomocą dławika kompensacyjnego; c) z punktem neutralnym uziemionym za pomocą rezystora

1.3. Zwarcia w sieci z izolowanym punktem neutralnym

Składowe symetryczne prądu zwarcia, w przypadku sieci z izolowanym punktem neutralnym, można obliczyć korzystając ze schematu z rys. 1.5b, przyjmując, że $\underline{Z}_N = \infty$ (brak połączenia punktu neutralnego neutralnego ziemią). W takim przypadku składowa zerowa prądu zwarcia zamyka się tylko przez pojemności sieci, zaś składowe zgodna i przeciwna zamykają się dodatkowo przez impedancję transformatora i systemu.

Proste wzory otrzymuje się w przypadku obliczeń uproszczonych pominięciem impedancji wzdłużnych. Dla $\underline{Z}_N = \infty$ impedancja zerowa (dana wzorem (1.2)) odpowiada tylko pojemności sieci i jest wyrażona wzorem $\underline{Z}_0 = 1/j\omega C_0$. Wzory (1.3) i (1.4) sprowadzają się wtedy do następującej postaci:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{j\omega C_0 \underline{U}_1^0}{1 + j\omega C_0 3\underline{Z}_F} \quad (1.7)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = - \frac{1}{j\omega C_0} \underline{I}_0 = - \frac{1}{1 + j\omega C_0 3\underline{Z}_F} \underline{U}_1^0 \quad (1.8)$$

Identyczne zależności otrzymuje się korzystając ze schematu pokazanego na Rys. 1.8a, w którym pojemność zerowa sieci C_0 jest połączona szeregowo z impedancją zwarcia \underline{Z}_F .

Powyższe zależności upraszczają się w przypadku zwarcia metalicznego, gdy $\underline{Z}_F = 0$. Wtedy w obwodzie składowych symetrycznych występuje jedynie pojemność zerowa sieci i składowe symetryczne prądu i napięcia są dane wzorami

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = j\omega C_0 \underline{U}_1^0 \quad (1.9)$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{U}_1^0, \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_1^0, \quad \underline{U}_2 = 0 \quad (1.10)$$

Stąd na podstawie wzorów (1.3) i (1.4) otrzymuje się następujące wartości we współrzędnych fazowych:

$$\underline{I}_{L1} = 3\underline{I}_0 = j\underline{U}_1^0 3\omega C_0 \quad (1.11)$$

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = 0 \quad (1.12)$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{U}_0 + a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 = \underline{U}_1^0 (a^2 - 1) \quad (1.13)$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{U}_0 + a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 = \underline{U}_1^0(a^2 - 1) \quad (1.14)$$

Zwykle (rys. 1.1) przyjmuje się, że przed wystąpieniem zwarcia fazy napięcia fazy A na płaszczyźnie liczb zespolonych ma położenie pionowe, czyli

$\underline{U}_1^0 = +jE$. Konsekwencją tego założenia jest, że (zgodnie ze wzorem (1.11)) prąd zwarcia przyjmuje wartość rzeczywistą:

$$\underline{I}_{L1} = -3\omega C_0 E \quad (1.15)$$

Wektor prądu zwarcia na płaszczyźnie liczb zespolonych ma wtedy położenie poziome i ujemny zwrot (wyprzedza napięcie o 90°). Napięcia faz zdrowych można obliczyć z zależności (1.13) i (1.14), podstawiając odpowiednie wartości

ze wzoru: $(a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{U}_1^0(a^2 - 1) = \left(+\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{3}{2} \right) = \sqrt{3}Ee^{-j60^\circ} \quad (1.16)$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{U}_1^0(a - 1) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{3}{2} \right) = \sqrt{3}Ee^{-j120^\circ} \quad (1.17)$$

Położenie wektorów prądu \underline{I}_{L1} oraz napięć \underline{U}_{L2} , \underline{U}_{L3} jest takie jak na rys. 1.1b. Prądy \underline{I}_{L2} i \underline{I}_{L3} , których wektory także pokazano na tym rysunku dotyczą prądu zwarcia w linii i nie występują w powyższych wzorach. Prąd \underline{I}_{L1} jest prądem zwarcia w miejscu zwarcia, gdzie prądy faz L2, L3 są równe zeru (zwarcie jednofazowe).

Należy pamiętać, że w sieci z izolowanym punktem neutralnym prąd zwarcia doziemnego (jednofazowego) ma charakter pojemnościowy. Jego wartość zależy od łącznej pojemności sieci i wskutek tego nie zależy od miejsca zwarcia. Napięcia faz zdrowych mają wartość napięć międzyfazowych $\sqrt{3}E$ i są przesunięte względem siebie o 60° .

W dokładniejszych obliczeniach można uwzględnić wpływ upływności sieci. Wtedy równolegle do pojemności linii (rys. 1.5b) należy przyłączyć konduktancje reprezentujące ulot. Konduktancje takie należy uwzględnić również w schematach uproszczonych (rys. 1.7 oraz rys. 1.8), także we wzorach (1.2)÷(1.4).

1.4. Zwarcia w sieci z punktem neutralnym uziemionym za pomocą rezystora

Jeśli jest spełnione założenie, że rezystancja R_N uziemniająca punkt neutralny jest duża w porównaniu z impedancją wzdłużną linii i transformatora oraz impedancją zastępczą systemu, to orientacyjne obliczenia w tym przypadku można wykonać na podstawie schematu pokazanego na rys. 1.8c. Dla tak uproszczonego obwodu składowe prądy zwarcia są następujące:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_1^0}{\underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_F} \quad (1.18)$$

Impedancja \underline{Z}_0 ogólnie wyrażona wzorem (1.2) teraz przyjmuje postać

$$\underline{Z}_0 = \frac{3R_N}{1 + j\omega C_0 3R_N} \quad (1.19)$$

co odpowiada równoległemu połączeniu reaktancji sieci C_0 oraz potrojonej wartości rezystancji uziemniającej $3R_N$. Prądy wyrażone wzorem (1.18) zawierają dwie składowe: a) składowa czynna wymuszana przez rezystancję uziemiającą oraz b) składową bierną wynikającą z pojemności sieci. Dla $\underline{Z}_F = 0$ otrzymuje się (rys. 1.8c)

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_1^0}{\underline{Z}_0} = \left(\frac{1}{3R_N} + j\omega C_0 \right) \underline{U}_1^0 \quad (1.20)$$

W praktyce wartość rezystancji uziemniającej R_N jest taka, że obie składowe (czynna i bierna) są porównywalne.

Przy przyjętych uproszczeniach (rys.1.8c) składowe symetryczne napięć są wyrażone wzorami (1.4)÷(1.6), a w przypadku zwarcia metalicznego $\underline{Z}_F = 0$, przyjmują wartości wyrażone wzorami (1.10). Napięcia fazowe są, więc takie same jak w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Jest to oczywiście słuszne tylko dla uproszczonego schematu z rys. 1.7c, który można stosować

w przybliżonych obliczeniach wówczas, gdy rezystancja R_N jest duża, a prąd zwarcia mały na tyle, że straty napięć na impedancjach wzdłużnych (rys. 1.5b) SA do pominięcia. W rzeczywistych systemach – już dla stosowanych tam wartości R_N – prądy zwarc są na tyle duże, że w wartościach napięć faz zdrowych istotną rolę odgrywają straty napięcia na impedancjach wzdłużnych.

Ogólnie napięcia faz zdrowych względem ziemi nie zwiększają się aż do wartości międzyfazowych i przyjmują wartości pośrednie, od napięć fazowych do międzyfazowych. Wartości tych napięć zależą od wartości rezystancji rezystora uziemiającego, przy czym im mniejsza wartość rezystancji, tym mniejsze wartości napięć faz zdrowych.

2. Rozpływ prądu ziemnozwarciowego w sieci z liniami wielotorowymi

Określenie rozptywu prądu ziemnozwarciowego w sieciach jednostronnie zasilanych w większości przypadków nie stwarza większych trudności. Zagadnienie to komplikuje się, kiedy sieć elektroenergetyczna ma bardziej złożoną konfigurację. Przykładem takiego rozwiązania może być sieć zawierająca linie równoległe połączone do wspólnych wyłączników nazywane także liniami wielotorowymi. Linie takie coraz powszechniej występują w przemysłowych sieciach kablowych średnich napięć.

W rozwiązaniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla linii wielotorowych występują określone trudności, które wynikają głównie z braku przekładników ziemnozwarciowych typu Ferranti dostosowanych do obejmowania wiązki kabli tworzących jedną linię. Oprócz tego do przyczyn utrudniających rozwiązanie zaliczyć należy brak dostatecznej znajomości rozptywu prądu ziemnozwarciowego w sieciach z liniami wielotorowymi. Z konieczności krajowe rozwiązanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla kablowych linii wielotorowych projektuje się, a następnie montuje i eksploatuje jako układy złożone z kilku pojedynczych przekładników typu Ferranti i jednego przełącznika ziemnozwarciowego zasilanego z układu tych przekładników. Pojedyncze przekładniki Ferrantiego mają bardzo duże błędy prądowe i kątowe. W układzie zabezpieczeniowym składającym się z jednego przełącznika i kilku, w odpowiedni sposób połączonych ze sobą, przekładników określenie błędów prądowych i kątowych jest zagadnieniem dość złożonym i trudnym. Poprawna ocena eksploatowanych układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych wymaga m.in. znajomości konfiguracji sieci elektroenergetycznej oraz znajomości rozptywu prądu ziemnozwarciowego w tej sieci. Oprócz rozptywu prądu w obwodach pierwotnych niezbędne jest określenie rzeczywistych wartości prądów płynących w uzwojeniach wtórnych przekładników ziemnozwarciowych oraz prądu płynącego przez przekładnik prądowy bądź uzwojenie prądowe przełącznika kierunkowego.

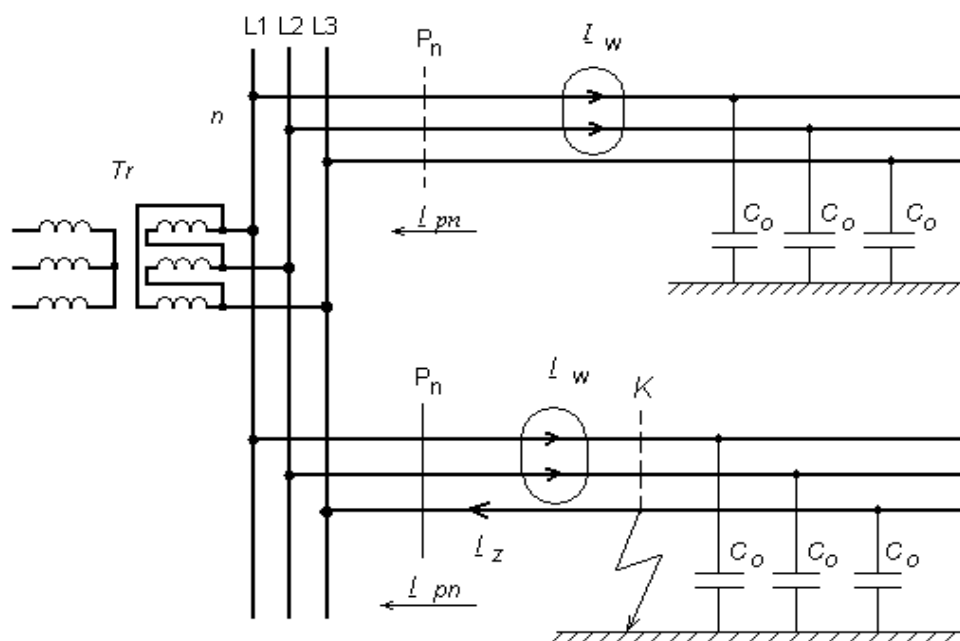
Znajomość rozptywu prądu ziemnozwarciowego w linii wielotorowej (w obwodach pierwotnych i wtórnych) jest podstawą przy projektowaniu i doborze właściwego rodzaju zabezpieczenia. Istotne jest wyznaczenie zakresu zmian wartości i kierunków prądów zerowych płynących żyłami fazowymi

poszczególnych kabli linii wielotorowej w miejscach zamontowania przekładników Ferrantiego w zależności od miejsca wystąpienia doziemienia na trasie linii.

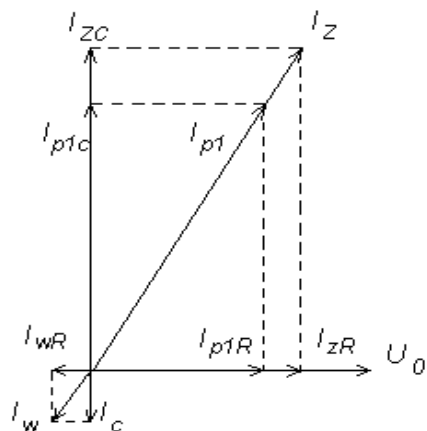
O czułości i selektywności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych decyduje liczba przekładników Ferrantiego w układzie, sposób połączenia ich uzwojeń wtórnych oraz wartości prądów zerowych płynących poszczególnymi kablami w linii.

Na rys. 2.1 przedstawiono schemat sieci promieniowej o izolowanym punkcie zerowym z naniesionym rozpływem prądu doziemnego. Określenie rozpływów prądu ziemnozwarciowego w sieciach o skomplikowanej konfiguracji jest dość złożone. Przykładem takiej sieci jest układ, w którym występują linie wielotorowe. Jako przykład podano rozpływ prądu ziemnozwarciowego w sieci kablowej o izolowanym punkcie zerowym zawierającej m.in. linie wielotorowe.

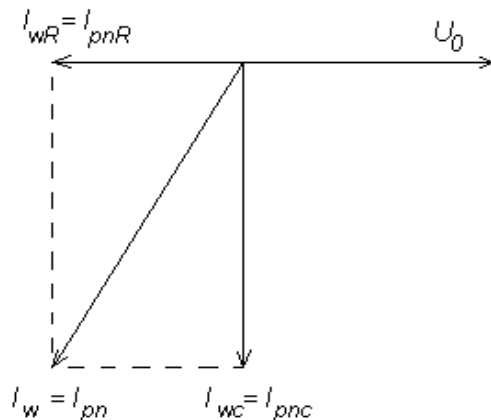
a)



b)

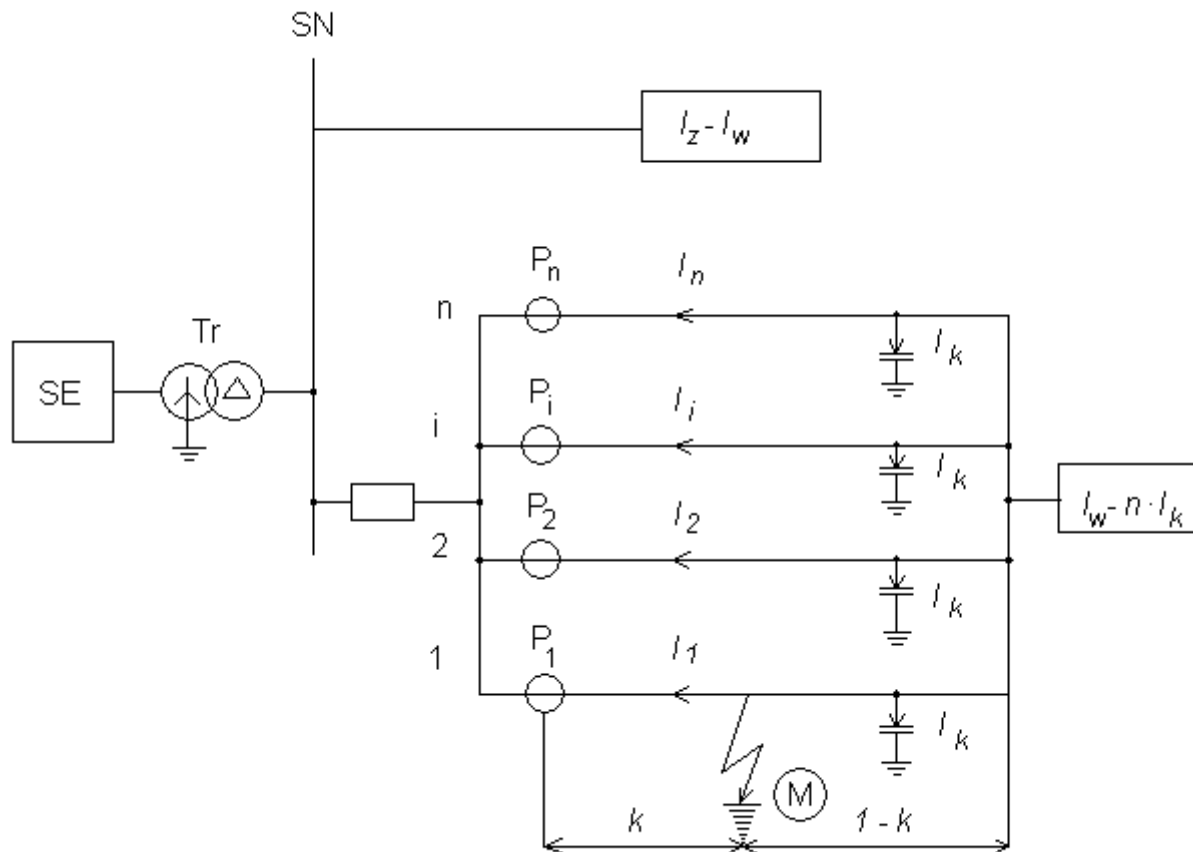


c)



Rys. 2.1 Uproszczony schemat sieci promieniowej o izolowanym punkcie zerowym z naniesionym rozpływem prądu ziemnozwarciowego:

a) uproszczony schemat sieci; b) wykres wskazowy prądów na początku linii uszkodzonej; c) wykres wskazowy prądów na początku linii nieuszkodzonej; I_z – prąd ziemnozwarciowy odpowiadający pojemności wszystkich linii w sieci, I_w – prąd ziemnozwarciowy własny jednej linii; I_p, \dots, I_p – prądy ziemnozwarciowe płynące w miejscu zainstalowania przekładników ziemnozwarciowych; P_1, \dots, P_n – miejsca pomiarowe prądu ziemnozwarciowego w odpowiedniej linii; $1, \dots, n$ – linie kablowe w sieci; K – miejsce wystąpienia zwarcia; Tr – transformator zasilający sieć izolowaną.



Rys. 2.2 Uproszczony schemat sieci kablowej z wyodrębnioną linią wielotorową. I_w – prąd ziemnozwarciowy odpowiadający pojemności fragmentu sieci zasilanej linią wielotorową łącznie z tą linią; I_k – prąd ziemnozwarciowy własny kabla w linii wielotorowej; $1, \dots, n$ – liczba kabli tworzących linię kablową jednorodną; k – względna odległość miejsca zwarcia od początku linii; M – przyjęte miejsce doziemienia w linii wielotorowej; a – współczynnik określający udział prądu I_w w całkowitym prądzie ziemnozwarciowym sieci ($a = \frac{I_w}{I_z}$); pozostałe oznaczenia objaśniono pod rys. 2.1

Na rys. 2.2 pokazano uproszczony schemat takiej sieci. Podstawowe zależności na wartość prądów wypadkowych płynących w miejscach zainstalowania przekładników ziemnozwarciowych na kablach linii wielotorowej w zależności od miejsca wystąpienia doziemienia na trasie tej linii.

Kabel uszkodzony

$$I_{p1} = \frac{n(1-k)+k}{n} I_z - \frac{1}{n} I_w \quad (2.1)$$

Po wprowadzeniu wyrażenia na $a = \frac{I_w}{I_z}$ otrzymujemy:

$$I_{p1} = \left[(1-k) + \frac{k-a}{n} \right] I_z \quad (2.2)$$

Kable nieuszkodzone

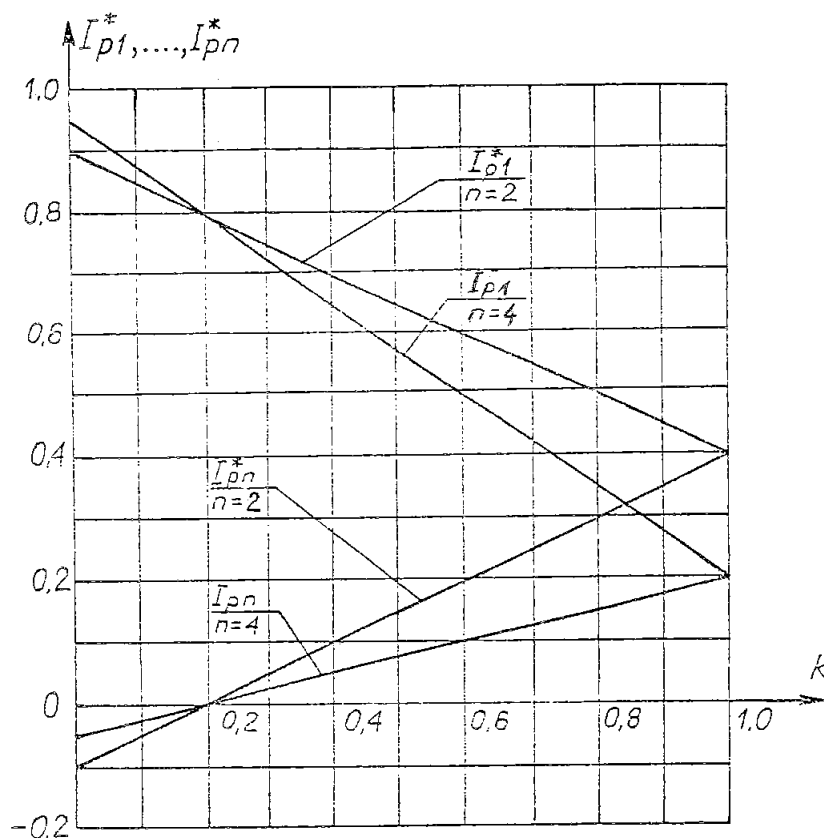
$$I_{pn} = \frac{k}{n} I_z - \frac{1}{n} I_w \quad (2.3)$$

a po uwzględnieniu, że $a = \frac{I_w}{I_z}$ mamy postać:

$$I_{pn} = \frac{k-a}{n} I_z \quad (2.4)$$

Na podstawie wprowadzonych zależności 2.2 – 2.4 dla określonej sieci można graficznie przedstawić charakterystyki $I_{p1} = f(k)$ i $I_{pn} = f(k)$.

Dla sieci, w której $a = 0,2$ i $n = 4$ wartości tych prądów wyrażone w jednostkach względnych pokazano na rys. 2.3.



Rys. 2.3 Charakterystyki $I_{p1}^*=f(k)$ i $I_{pn}^*=f(k)$ przy doziemieniach w kablu linii wielotorowej dla $a = 0,2$ i $n = 2$ oraz $n = 4$, I_{p1}^*, I_{pn}^* – wartości względne prądów w punktach pomiarowych odniesione do prądu I_Σ .

Najistotniejsze spostrzeżenia i wnioski z rozważań nad rozplływem prądu ziemnozwarciowego w linii wielotorowej można sformułować następująco:

1. W kablu uszkodzonym wypadkowy prąd przepływający przez miejsca pomiarowe zmieniają swoją wartość w znacznym zakresie przy zachowaniu tego samego kierunku przepływu. Zakres zmian wartości tego prądu zależy od liczby kabli połączonych równolegle i im liczba kabli w danej linii jest większa, tym większy zakres zmian wartości. Najmniejszy prąd popłynie przy doziemieniu na końcu linii, a największy przy zwarcu na początku linii.
2. W kablach nieuszkodzonych linii wielotorowej przez miejsca pomiarowe będą płynęły prądy o takiej samej wartości. Wartości i kierunki przepływających prądów przez miejsca pomiarowe zależą od wzajemnej relacji współczynnika, a oraz k i tak: dla $a < k$ prądy mają taki sam kierunek jak prąd w kablu uszkodzonym, a największe wartości osiągają przy doziemieniu na końcu linii ($k = 1$), dla $a > k$ prądy mają kierunek przeciwny niż prąd w kablu uszkodzonym, a największe wartości osiągają dla przypadku doziemienia w pobliżu miejsca pomiarowego na początku linii ($k = 0$), dla $a = k$ prądy te są równe zero.

3. Suma prądów wypadkowych płynących przez miejsca pomiarowe na kablach nieuszkodzonych i kablu uszkodzonym w danej linii wielotorowej ma wartość stałą i nie zależy od miejsca zwarcia K:

$$I_z = I_{p1} + (n-1)I_{pn} = (1-a)I_z \quad (2.5)$$

3. Ćwiczenie laboratoryjne

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z rozplywem prądu ziemnozwarciowego w sieci kablowej średniego napięcia zawierającej linie wielotorowe, o izolowanym oraz uziemionym przez rezystor punkcie zerowym. Rodzaje stosowanych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, sposobami obliczania wartości prądów rozruchowych oraz nastawieniem tych wartości na przekąznikach często spotykanych w eksploatacji.

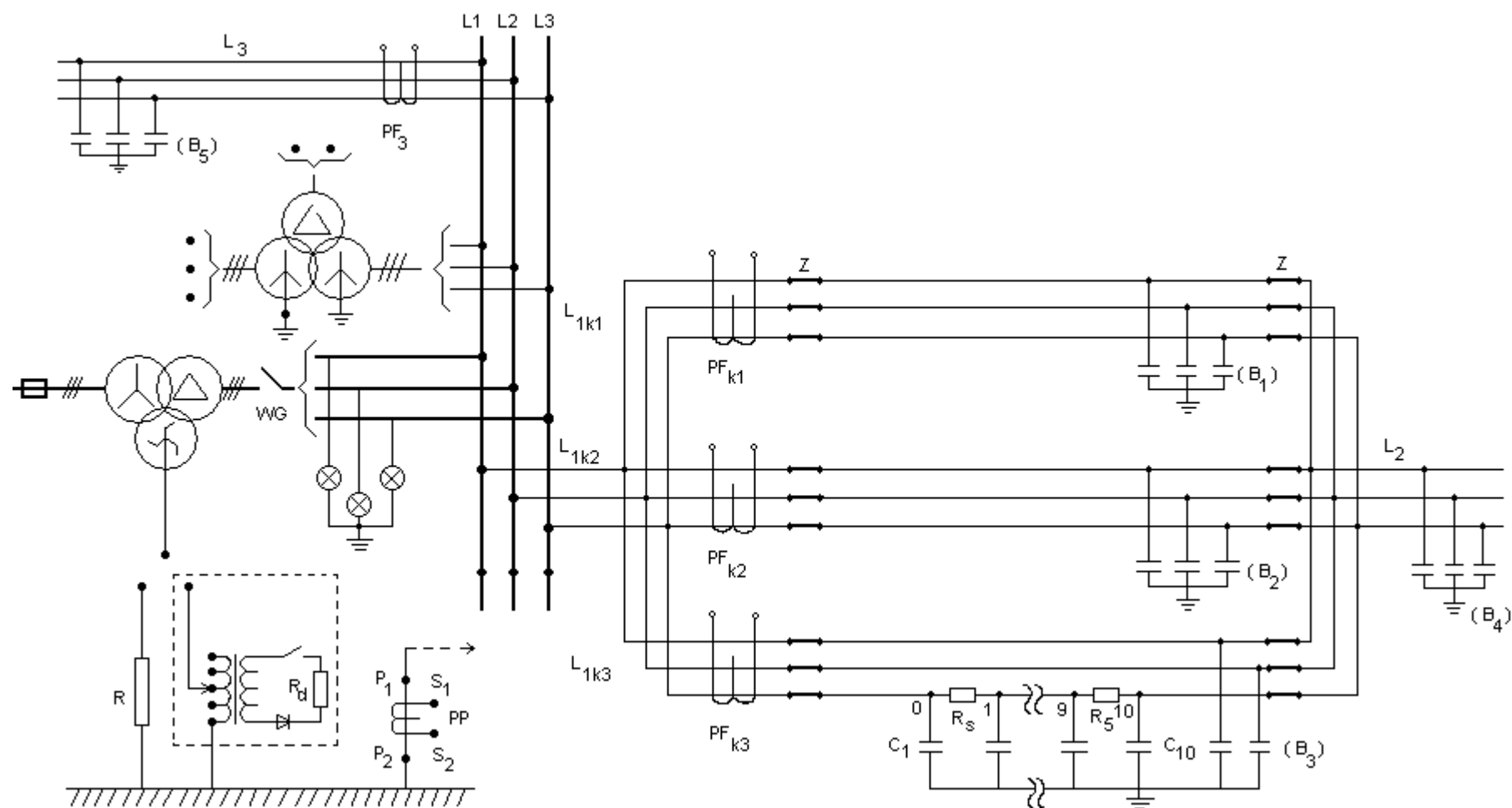
3.1 Stanowisko laboratoryjne

Zasadniczą częścią stanowiska laboratoryjnego jest model fizyczny sieci kablowej średniego napięcia. Uproszczony schemat tego modelu przedstawia Rys.3.1. Model ten jest przeznaczony do badania rozplywu prądów ziemnozwarciowych w sieci punktem neutralnym transformatora izolowanym oraz uziemionym przez rezystor. Zawiera linie kablowe wielotorowe, pozwala on zapoznać się z warunkami pracy stosowanych układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych do ochrony linii wielotorowej w takich układach. Wartość pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego w modelu sieci może osiągać 35 – 57 A.

Przed rozpoczęciem badań na stanowisku laboratoryjnym, ze względu na bezpieczeństwo osób należy sprawdzić, czy po załączeniu transformatora zasilającego i modelu sieci pod napięcie zaświecą się 3 lampki sygnalizacyjne. Należy wykonać pomiary napięć fazowych i międzyfazowych na szynach modelu a wyniki pomiarów zestawić w tablicy 3.1.

Tablica 3.1.

Napięcie						Uwagi
Fazowe			Międzyprzewodowe			
U _A	U _B	U _C	U _{AB}	U _{AC}	U _{BC}	
V	V	V	V	V	V	



Rys. 3.1 Uproszczony schemat ideowy sieci. L_1, L_2, L_3 -modele linii; $PF_3, PF_{k1}, PF_{k2}, PF_{k3}$ -przekładniki IO-2; B_1-B_5 -baterie kondensatorów; C_1-C_{10} -kondensatory; Z -zwory

3.2 Badanie rozplywu prądu ziemnozwarciowego

Po załączeniu transformatora zasilającego pod napięcie, zasileniu modelu stanowiska i stwierdzeniu, że 3 lampki sygnalizacyjne świecą się, model wyłączamy spod napięcia. Przygotowujemy układ pomiarowy do zmierzenia wartości pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego modelu sieci.

W przewód uziemiający włączamy przekładnik prądowy a następnie uziwiamy przewód fazowy linii L_{1k3} w miejscu oznaczonym 0 (Rys. 3.1).

Załączamy model sieci pod napięcie i odcytujemy wartość całkowitego prądu ziemnozwarciowego modelu sieci i przystępujemy do pomiarów rozplywu prądu ziemnozwarciowego.

Pomiary prądów fazowych

Prądy płynące przewodami fazowymi 3 kabli linii wielotorowej mierzy się za pomocą amperomierza cęgowego na zworach Z. Wyniki pomiarów całkowitego prądu ziemnozwarciowego modelu sieci, oraz wartości prądów fazowych zestawia się w tablicy 3.2.

Tablica 3.2

Całkowity prąd ziemnozwarciowy sieci: $I_{zc} =$ A		
Kabel L_{1k1}	Kabel L_{1k2}	Kabel L_{1k3}
$I_a =$	$I_a =$	$I_a =$
$I_b =$	$I_b =$	$I_b =$
$I_c =$	$I_c =$	$I_c =$

Pomiary prądów zerowych kabli

Prądy zerowe płynące kablami L_{1k1} i L_{1k2} linii wielotorowej mierzymy amperomierzem cęgowym lub pośrednio mierząc spadki napięć na oporniku o rezystancji $1,0 \Omega$ włączamy kolejno w uzwojenia wtórne przekładników ziemnozwarciowych PF_{k1} i PK_{k2} . Pomiary prądów przekładników ziemnozwarciowych PK_{k3} i PF_3 dokonujemy identycznie. Pomiary rozplywu prądu zerowych kabli należy rozpocząć od doziemienia przewodu fazowego kabla L_{1k3} w miejscu oznaczonym 0 a zakończyć w 10. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawiamy w tablicy 3.3.

Tablica 3.3

Miejsce doziemienia L_{1k3}	Kabel L_{1k1}		Kabel L_{1k2}		Kabel L_{1k3}		Linia L_3	
	U	I_{p1}	U	I_{p2}	I'_{p3}	I_{p3}	I'_p	I'_p
	V	A	V	A	A	A	A	A
0								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Następnie uzwojenia wtórne przekładników łączymy równolegle (uzwojenia wtórne 3 przekładników ziemnozwarciowych linii

$L_1 - PF_{k1}, PF_{k2}, PF_{k3}$), zasilamy amperomierz. Doziemiamy przewód fazowy L_{1k3} w miejscach oznaczonych 0,5,10 mierzy się prądy zerowe płynące liniami L_1 i L_3 . Wyniki pomiarów zestawiamy w tablicy 3.4.

Tablica 3.4

		Miejsce doziemienia L_{1k3}			Uwagi
		0	5	10	
L_1	$I'_p(A)$				
	$I_p(A)$				
L_3	$I'_p(A)$				
	$I_p(A)$				

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów należy:

- Obliczyć współczynnik udziału prądu własnego linii L_1 w całkowitym prądzie ziemnozwarciowym ($a = \frac{I_{L1}}{I_z}$),

- Określić względną odległość miejsca zwarcia od początku linii, przy którym prądy zerowe w kablu L_{1k1} i L_{1k2} będą równe zero,
- Sporządzić wykresy zmian wartości i kierunku prądów zerowych płynących w L_{1k3} i L_{1k1} w zależności od miejsca zwarcia,
- Na podstawie wyników pomiarów prądów fazowych określić wartość prądu zerowego dla kabli.

3.3 Badanie działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych

Zabezpieczenia zerowe prądowe

Dla przypadku, kiedy każdy kabel posiada niezależny układ zabezpieczeniowy, który składa się z przekładnika IO-2 (1/75) i przełącznika nadprądowego na podstawie określonego rozptywu prądu obliczyć wartość prądu rozruchowego przełącznika oraz współczynnik czułości działania zabezpieczenia. Po nastawieniu prądu rozruchowego na przełączniku należy sprawdzić działanie zabezpieczeń kabli nieuszkodzonych oraz kabla uszkodzonego. Fazę kabla L_{1k3} należy kolejno doziemiać w miejscach oznaczonych 0,1,...,10 (rys. 3.1).

Wyniki prób zestawić w tablicy 3.5.

Tablica 3.5

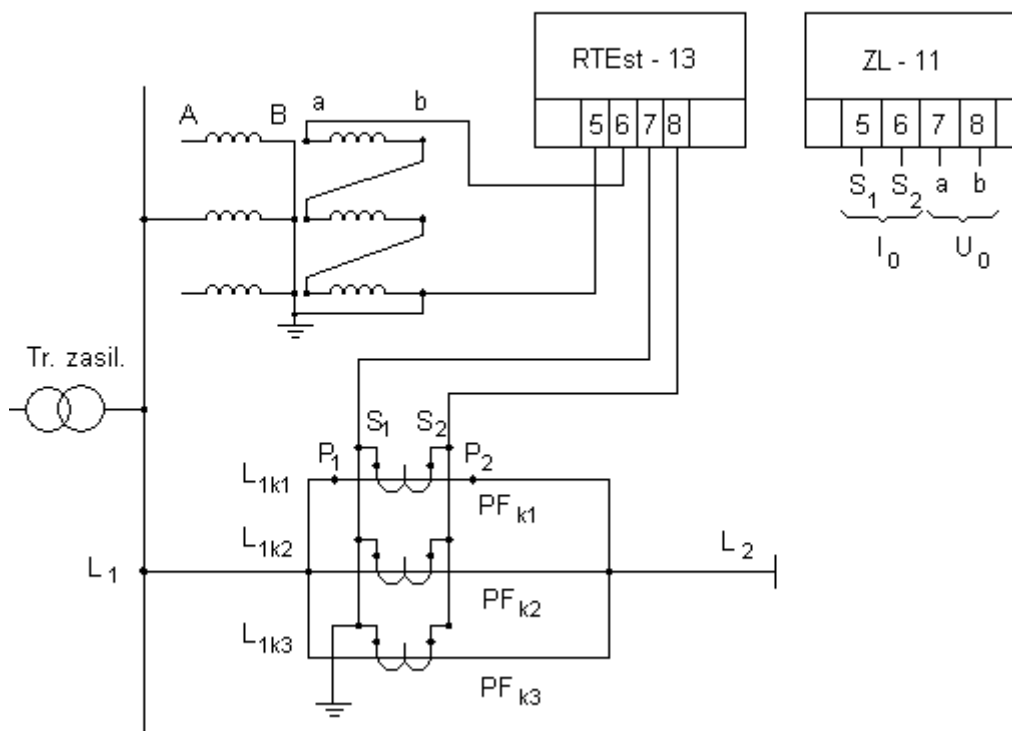
Zabezpieczenie	I_r	K_c	Miejsce doziemiań kabla L_{1k3}									
	A	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_{1k1} RIGx-10												
L_{1k2} RIGx-10												
L_{1k3} RIGx-10												
L_1 RIGx-10												

W przypadku, kiedy linia wielotorowa jest zabezpieczona układem składającym się z 3 przekładników IO-2 ($PF_{k1}, PF_{k2}, PF_{k3}$), których uzwojenia wtórne połączone są równolegle i zasilają jeden przełącznik nadprądowy, na podstawie ustalonego rozptywu prądu ziemnozwarciowego należy obliczyć i nastawić prąd rozruchowy na przełączniku oraz obliczyć współczynnik czułości działania zabezpieczenia. Poprawność działania zabezpieczeń sprawdzamy doziemiając

przewód fazowy kabla L_{1k3} w miejscach oznaczonych 0,1,...,10 (rys. 3.1). Wyniki sprawdzenia zestawień w tabeli 3.5.

Zabezpieczenie kierunkowe biernomocowe

Sprawdzenie poprawności działania zabezpieczenia kierunkowego przeprowadza się w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 3.2.



Rys. 3.2 Uproszczony schemat podłączenia przekaźnika kierunkowego biernomocowego do przeprowadzania prób.

Podobnie należy podłączyć przekaźnik kierunkowy do ochrony linii L_3 nieuszkodzonej. Sprawdzenie poprawności działania zabezpieczeń wykonuje się podczas zwarć w miejscu 0 i 10 (rys. 3.1).

Rezultaty prób zestawiamy w tabeli. Na podstawie rezultatów badań zabezpieczeń zerowo-prądowych i kierunkowych należy ocenić przydatność tych zabezpieczeń do ochrony linii kablowych pojedynczych i wielotorowych w sieciach izolowanych oraz z uziemionym przez rezystor punktem neutralnym transformatora i opracować wyniki.

UWAGA!

Zmianę układu połączeń na stanowisku laboratoryjnym dokonujemy jedynie przy wyłączonym stanowisku pomiarowym, dopiero po zgaśnięciu lampek sygnalizacyjnych. Przy pomiarze prądów doziemnych, czas pomiaru należy skrócić do minimum (szczególnie w układzie uziemionym przez rezystor) ze względu na nagrzewanie się elementów stanowiska.

Pytania na zaliczenie.

1. Zwarcie jednofazowe (doziemne) w sieci z izolowanym punktem neutralnym, podać podstawowe zależności, wykresy wskazowe, narysować rozptyw prądu ziemnozwarciowego do pojemności cząstkowych faz zdrowych.
2. Narysować i omówić rozkład prądu w ziemi podczas zwarcia doziemnego w sieci z izolowanym punktem neutralnym z jedną linią oraz w sieci z wieloma liniami.
3. Zwarcie jednofazowe (doziemne) w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez dławik, podać podstawowe zależności, wykresy wskazowe, narysować rozptyw prądu ziemnozwarciowego do pojemności cząstkowych faz zdrowych, oraz wykresy prądów w ziemi pochodzące od pojemności, dławika i wypadkowy prąd w ziemi.
4. Zwarcie jednofazowe (doziemne) w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, podać podstawowe zależności, omówić pracę tej sieci.
5. Składowe symetryczne prądu i napięcia w przypadku zwarcia jednofazowego z ziemią w sieci z izolowanym punktem neutralnym sieci, podać wzory i schemat (uproszczony) sieci dla składowych symetrycznych.
6. Składowe symetryczne prądu i napięcia w przypadku zwarcia jednofazowego z ziemią w sieci z uziemionym przez dławik punktem gwiazdowym transformatora, podać wzory i schemat (uproszczony) sieci dla składowych symetrycznych.
7. Składowe symetryczne prądu i napięcia w przypadku zwarcia jednofazowego z ziemią w sieci z uziemionym przez rezystor punktem gwiazdowym transformatora, podać wzory i schemat (uproszczony) sieci dla składowych symetrycznych.

Literatura

1. Borkiewicz K.: Automatyka zabezpieczeniowa, regulacyjna i łączeniowa w systemie elektroenergetycznym. Bielsko-Biała, ZIAD 1998.
2. Kacejko P., Machowski J.: *Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych*.. Warszawa, WNT 1993.
3. Machowski J., Bernas S.: *Stany nieustalone i stabilność systemu elektroenergetycznego*. Warszawa 1989, WNT.

4. Kończykowski S., Bursztyński J.: *Zwarcia w układach elektroenergetycznych*. Warszawa, WNT 1963.
5. Żydanowicz J.: *Elektroenergetyczne zabezpieczenia przekaźnikowe*. Warszawa, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej 1978
6. Żydanowicz J.: *Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa*. T1 Warszawa, WNT 1979.
7. Synal B., Rojewski W., Dzierżanowski W.: *Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa*. Wrocław, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2003.
8. Winkler W., Wiszniewski A.: *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*. Warszawa, WNT 1999.
9. Szymańska A.: *Zabezpieczenia elektroenergetyczne. Ćwiczenia laboratoryjne*. Kielce, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach.
10. Lorenc J.: *Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe kompensowanych sieci średnich napięć*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Seria *Rozprawy*. 1992. Nr 272.