

5. ZWARCIA DOZIEMNE W SIECI Z NIESKUTECZNIE UZIEMIIONYM PUNKTEM NEUTRALNYM

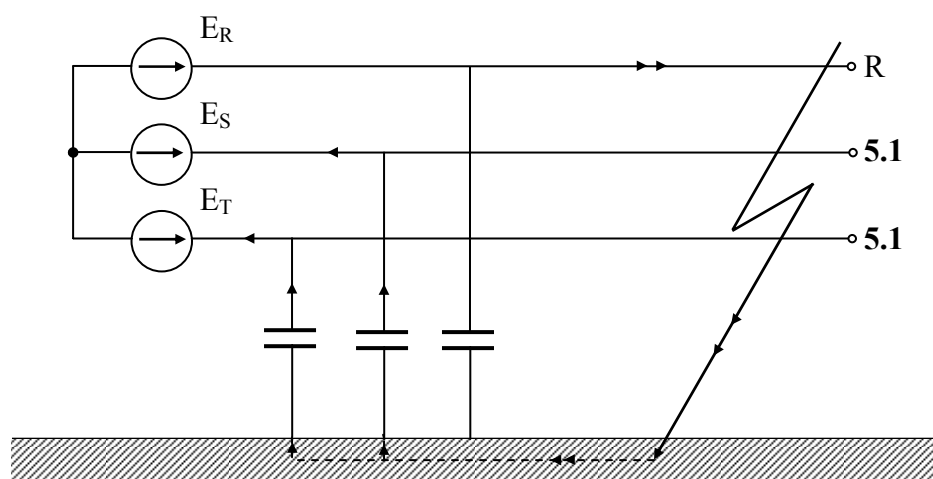
5.1. Własności sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym

Do sieci pracujących z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym należą:

- sieć z izolowanym punktem neutralnym,
- sieć z kompensacją prądu zwarcia doziemnego tzn. uziemionym punktem neutralnym poprzez dławik gaszący tzw. cewkę Petersena,
- sieć z kompensacją prądu zwarcia doziemnego oraz z automatyką wymuszania składowej czynnej prądu zwarciovego,
- sieć z punktem neutralnym uziemionym przez duży rezystor ograniczający wartość prądu zwarcia doziemnego do założonej granicy, zwykle 500 lub 300 A.

Rozważone zostaną teraz zjawiska podczas zwarc jednofazowych w sieci z izolowanym punktem neutralnym.

W sieci z izolowanym punktem neutralnym obwód składowej symetrycznej zerowej nie jest zamknięty, gdyż impedancja $Z_{(0)} = \infty$. Jeśli jednak uwzględni się przewodności poprzeczne istniejące w sieci (pojemności i upływności) to okazuje się, że stanowią one połączenie umożliwiające zamknięcie obwodu prądu zwarcia doziemnego (składowej zerowej). Umożliwiają więc zamknięcie obwodu zwarciovego w przypadku zwarcia jednofazowego w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Przewodności poprzeczne spełniają rolę uziemienia punktu neutralnego sieci. Przewodności poprzeczne, faktycznie pojemności elementów sieci, stanowią dla przepływu prądu zwarciovego duże impedancje, które są wielokrotnie większe od impedancji, jaka występowałaby w przypadku gdyby dana sieć miała skutecznie uziemiony punkt zerowy. W związku z tym wartość prądu zwarcia jednofazowego w sieci z izolowanym punktem neutralnym jest niewielka od kilku do kilkudziesięciu amperów. W przypadku zwarc jednofazowych w sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym prąd zwarciovowy jest charakteru indukcyjnego. Przy zwarciach w sieci z izolowanym punktem neutralnym prąd zwarcia jednofazowego ma charakter pojemnościowy.



Rys. 5.1 Schemat sieci z izolowanym punktem neutralnym.

Zwarcia jednofazowe w sieciach z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym mogą być trwałe lub przemijające. Zwarcie trwałe może być:

- metaliczne np. opadnięcie przewodu linii napowietrznej na poprzecznik słupa,
- za pośrednictwem łuku palącego się stabilnie w miejscu zwarcia,
- za pośrednictwem tzw. uporczywego łuku palącego się nie stabilnie w miejscu zwarcia np. wskutek przebicia izolatora,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

d) za pośrednictwem rezystancji przejścia np. przy opadnięciu przewodu linii na ziemię.

Zwarcia przemijające (samogasnące) to zwarcia powstające zazwyczaj za pośrednictwem łuku, który po jednym półokresie lub dłuższym czasie same gasną. W sieciach napowietrznych z izolowanym punktem neutralnym ok. 70 % zwarć doziemnych jest zvarciami samogasnącymi, w sieciach kablowych udział ten jest niższy i wynosi ok. 30 %. Zjawisko samogaszenia się zwarć doziemnych jest najważniejszą cechą tego typu sieci i było podstawą do zastosowania pracy punktu neutralnego bez uziemienia. Przyczynami zjawiska samogaszenia doziemienia są:

- wiatr w sieci napowietrznej gaszący palący się łuk,
- rozgrzane pod wpływem łuku elektrycznego syciwo kablowe lub izolacja z tworzyw sztucznych w sieci kablowej.

Zjawisko samogaszenia powoduje, że nawet zwarcia powstające pod wpływem awarii urządzenia np. pod wpływem pęknięcia izolatora wsporczeo linii napowietrznej może zostać samozgaszone czyli „zlikwidowane” pomimo występowania awarii.

W przypadku zwarcia jednofazowego w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym najgroźniejsze w skutkach jest zwykle cieplne działanie łuku. W liniach napowietrznych działanie łuku może doprowadzić do stopienia się przewodów, zniszczenie izolatorów. W liniach kablowych łuk szybko niszczy izolację kabla i zwykle zwarcie jednofazowe przeradza się w międzyfazowe. W maszynach elektrycznych łuk może spowodować wytopienie żelaza czynnego maszyny, co może prowadzić do konieczności wymiany części żelaza czynnego (rdzenia) maszyny. W maszynach łuk niszczy izolację sąsiednich fragmentów uzwojenia. W przypadku długotrwałego przepływu prądu zwarcioowego przez słup linii napowietrznej do ziemi obserwuje się, że impedancja warstwy ziemi wokół słupa zwiększa swoją rezystywność na skutek odparowywania z niej wody i zżuzłania się jej. Może to prowadzić w konsekwencji do otrzymania rezystancji przejścia nieskończenie wielkiej a więc do „wyzolowania się” słupa. Zwarcie doziemne oczywiście zanika, ale słup taki stanowi duże niebezpieczeństwo dla życia ludzi i zwierząt ze względu na możliwość porażenia. Przy przepływie prądu zwarcia doziemnego przez słup żelbetowy prąd ten płynie do ziemi poprzez zbrojenie słupa (poprzeczników metalowych specjalnie się nie uziemia). Długotrwały przepływ prądu doziemnego przez zbrojenie może spowodować miejscowe wytopienie się takiego zbrojenia. Osłabia to zasadniczo wytrzymałość słupa na zginanie.

Przy zwarcu z ziemią, napięcia faz nie dotkniętych zwarcieo w stosunku do ziemi wzrastają maksymalnie $\sqrt{3}$ razy. Takie przepięcie ustalone zazwyczaj nie jest zbyt groźne dla izolacji sieci SN. W sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym, jednofazowym zvarciami z ziemią powstałym za pośrednictwem łuku towarzyszą przepięcia ziemnozwarciowe. Przyczyną wymienionych przepięć ziemnozwarciowych jest zjawisko przerywania się łuku w chwili przejścia prądu zwarcioowego przez zero. Łuk taki, zwany uporczywym, gaśnie 100 razy na sekundę i zapala się ponownie przy odpowiednim wzroście wartości chwilowej napięcia też 100 razy na sekundę. W takim przypadku przepięcia ziemnozwarciowe mogą osiągać od 2 do 4,5 – krotność napięcia fazowego. Przepięcia o tak dużej amplitudzie mogą spowodować uszkodzenie izolacji elementów danej sieci.

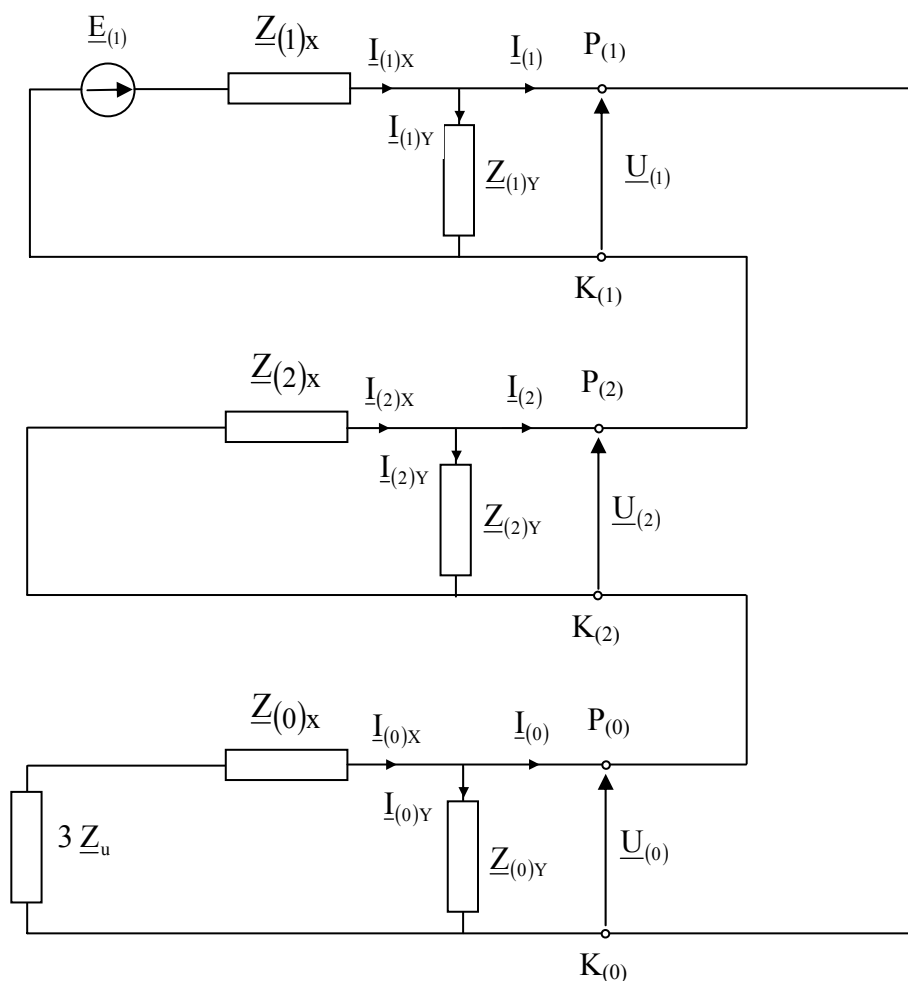
Zwarcie za pośrednictwem łuku uporczywego występują w sieciach o dostatecznie dużym prądzie zwarcioowym, przy małym prądzie zwarcioowym zwykle są one przemijające. W przepisach PBUE podano graniczne wartości prądu zwarcia doziemnego powyżej, których zazwyczaj występuje łuk uporczywy. I tak w sieci kablowej 15 kV wynosi on 40 A, a w sieci napowietrzno - kablowej 15 kV – 20 A. W przypadku, gdy wartości prądu zwarcia jednofazowego w sieci z izolowanym punktem neutralnym przekroczą podane wartości graniczne należy punkt zerowy tej sieci uziemić poprzez cewkę gaszącą, co spowoduje wyraźne zmniejszenie wartości prądu doziemnego, a w konsekwencji zwiększenie udziału zwarć samogasnących.

Zwarcia jednofazowe stwarzają niebezpieczeństwo porażenia ze względu na występowanie napięć dotykowych i krokowych. Jest to tym groźniejsze, że w sieci o izolowanym punkcie neutralnym i uziemionym przez cewkę Petersena trwałe zwarcie doziemne nie są szybko włączane

przez zabezpieczenia (tak jak zwarcia międzyfazowe). Ich zlokalizowanie i usunięcie niekiedy trwa wiele czasu.

5.2. Prąd i napięcie w miejscu zwarcia doziemnego – sieć z izolowanym punktem neutralnym

W poprzednim rozdziale stwierdzono, że przy zwarciach jednofazowych w sieci z izolowanym punktem neutralnym należy uwzględnić impedancje poprzeczne. Schematy zastępcze obwodu zwarciovego dla poszczególnych składowych symetrycznych będą teraz następujące:



Rys. 5.2 Schemat sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym w układzie składowych symetrycznych podczas zwarcia doziemnego.

W schematach tych założono, że można je przedstawić w postaci schematów skupionych, choć w rzeczywistości są to obwody o stałych rozłożonych. Wielkości impedancji poprzecznych sieci są znacznie większe od impedancji wzdłużnych tzn.

$$\underline{Z}_{(1)Y} \gg \underline{Z}_{(1)X} \quad (5.1)$$

$$\underline{Z}_{(2)Y} \gg \underline{Z}_{(2)X} \quad (5.2)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{Z}_{(0)Y} \gg \underline{Z}_{(0)X} \quad (5.3)$$

a w przypadku sieci z izolowanym punktem neutralnym $\underline{Z}_u = \infty$.

Impedancje dla poszczególnych składowych będą wynosiły:

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{\underline{Z}_{(1)X} \underline{Z}_{(1)Y}}{\underline{Z}_{(1)X} + \underline{Z}_{(1)Y}} \approx \underline{Z}_{(1)X} \quad (5.4)$$

$$\underline{Z}_{(2)} = \frac{\underline{Z}_{(2)X} \underline{Z}_{(2)Y}}{\underline{Z}_{(2)X} + \underline{Z}_{(2)Y}} \approx \underline{Z}_{(2)X} \quad (5.5)$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)X} + 3\underline{Z}_u) \underline{Z}_{(0)Y}}{\underline{Z}_{(0)X} + 3\underline{Z}_u + \underline{Z}_{(0)Y}} \approx \underline{Z}_{(0)Y} \quad (5.6)$$

W przypadku zwarcia jednofazowego

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \approx \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)X} + \underline{Z}_{(2)X} + \underline{Z}_{(0)Y}} \quad (5.7)$$

Ponieważ:

$$\underline{Z}_{(0)Y} \gg \underline{Z}_{(1)X} = \underline{Z}_{(2)X} \quad (5.8)$$

to wzór można w przybliżeniu napisać w postaci:

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} \approx \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)Y}} \quad (5.9)$$

W praktycznych obliczeniach upływność sieci SN można pominąć. Impedancja $\underline{Z}_{(0)Y}$ ma charakter reaktancji pojemnościowej dla składowej symetrycznej zerowej tzn.

$$\underline{Z}_{(0)Y} = \frac{1}{j\omega C_{(0)}} \quad (5.10)$$

gdzie: $C_{(0)}$ to pojemność dla składowej zerowej sieci.

Uwzględniając powyższy wzór mamy:

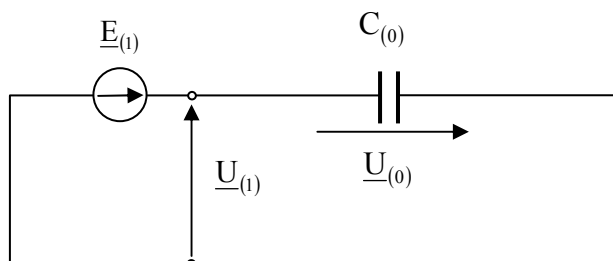
$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = j \omega C_{(0)} \underline{E}_{(1)} \quad (5.11)$$

a prąd w miejscu zwarcia:

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{I}_R = j 3 \omega C_{(0)} \underline{E}_{(1)} \quad (5.12)$$

Dla tych założeń upraszczających schematy zastępcze dla składowych symetrycznych będą w postaci pokazanej na rys. 5.3.



Rys. 5.3 Uproszczony schemat sieci z izolowanym punktem neutralnym w układzie składowych symetrycznych podczas zwarcia doziemnego.

Wartości napięć w miejscu zwarcia, składowe symetryczne tego napięcia wynoszą:

$$\underline{U}_{(0)} = -\underline{Z}_{(0)} \underline{I}_{(0)} = -\underline{Z}_{(0)} \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)Y}} = -\underline{E}_{(1)} \quad (5.13)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \underline{E}_{(1)} - \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} = \underline{E}_{(1)} - \underline{Z}_{(1)X} \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)Y}} \approx \underline{E}_{(1)} \quad (5.14)$$

$$\underline{U}_{(2)} = -\underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(2)} = -\underline{Z}_{(2)X} \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)Y}} \approx 0 \quad (5.15)$$

Napięcia fazowe:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \quad (5.16)$$

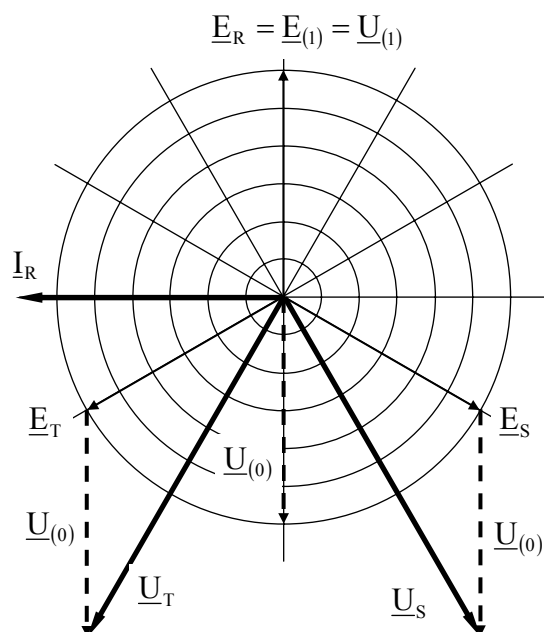
$$\underline{U}_S = \underline{U}_{(0)} + a^2 \underline{U}_{(1)} + a \underline{U}_{(2)} = (a^2 - 1) \underline{E}_{(1)} = \sqrt{3} \underline{E}_{(1)} e^{j210^\circ} \quad (5.17)$$

$$\underline{U}_T = \underline{U}_{(0)} + a \underline{U}_{(1)} + a^2 \underline{U}_{(2)} = (a - 1) \underline{E}_{(1)} = \sqrt{3} \underline{E}_{(1)} e^{j150^\circ} \quad (5.18)$$

Z równań tych wynika, że moduły napięć faz zdrowych w miejscu zwarcia wzrosły $\sqrt{3}$ razy, wzrosły więc do wartości napięć międzyprzewodowych. Napięcia punktu neutralnego układu względem ziemi (co wynika ze schematu) wynosi:

$$\underline{U}_u = -\underline{U}_{(0)} = \underline{E}_{(1)} \quad (5.19)$$

Wykres wskazowy prądów i napięć w miejscu zwarcia jednofazowego, metalicznego w układzie z izolowanym punktem neutralnym przedstawiono na rys. 5.4



Rys. 5.4 Wykres wskazowy prądów i napięć podczas doziemienia w sieci z izolowanym punktem neutralnym.

W przypadku, gdy zwarcie nie jest metaliczne a jest zwarcie za pośrednictwem łuku o rezystancji wynoszącej R_τ , to wartość składowej zerowej prądu będzie:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{3R_\tau + \frac{1}{j\omega C_{(0)}}} = \frac{\underline{E}_{(1)} j\omega C_{(0)}}{1 + j\omega C_{(0)} 3R_\tau} = \underline{E}_{(1)} \frac{j\omega C_{(0)} + \omega^2 C_{(0)}^2 3R_\tau}{1 + \omega^2 C_{(0)}^2 (3R_\tau)^2} \quad (5.20)$$

Przyjmując:

$$1 + \omega^2 C_{(0)}^2 (3R_\tau)^2 \approx 1 \quad \text{dla} \quad 3R_\tau \ll \frac{1}{\omega C_{(0)}} \quad (5.21)$$

mamy:

$$\underline{I}_{(0)} = j\omega C_{(0)} \underline{E}_{(1)} + \omega^2 C_{(0)}^2 3R_\tau \underline{E}_{(1)} \quad (5.22)$$

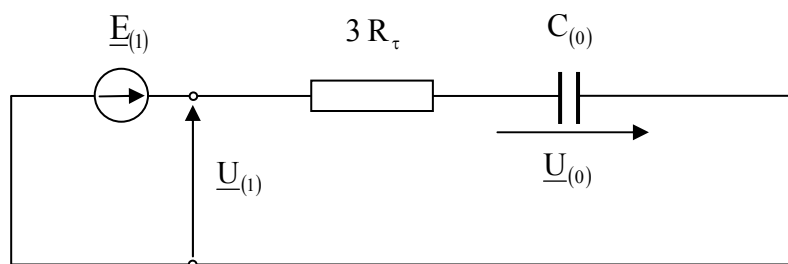
Prąd zawiera dwie składowe:

- pojemnościową o wartości jak dla zwarcia metalicznego,
- czynną o wartości proporcjonalnej do rezystancji przejścia.

Napięcie składowej zerowej i fazy zwartej wynosi:

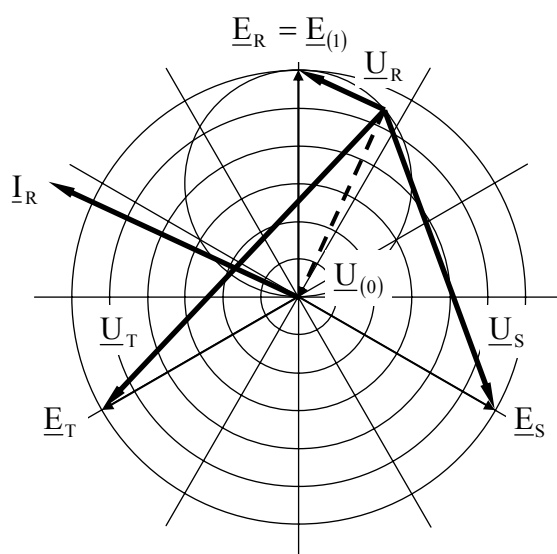
$$\begin{aligned} \underline{U}_{(0)} &= -\underline{Z}_{(0)} \underline{I}_{(0)} = -\frac{1}{j\omega C_{(0)}} (j\omega C_{(0)} \underline{E}_{(1)} + \omega^2 C_{(0)}^2 3R_\tau \underline{E}_{(1)}) = \\ &= -\underline{E}_{(1)} + j\omega C_{(0)} 3R_\tau \underline{E}_{(1)} \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\underline{U}_R = 3\underline{I}_{(0)} R_\tau = j\omega C_{(0)} 3R_\tau \underline{E}_{(1)} + \omega^2 C_{(0)}^2 (3R_\tau)^2 \underline{E}_{(1)} \quad (5.24)$$



Rys. 5.5 Uproszczony schemat sieci z izolowanym punktem neutralnym w układzie składowych symetrycznych podczas zwarcia doziemnego niemetalicznego.

Uproszczenia przyjęte odnośnie impedancji prowadzą do schematu jak na rys. 5.5 i wykresu wskazowego przedstawionego na rys. 5.6.



Rys. 5.6 Wykres wskazowy prądów i napięć podczas zwarcia doziemnego niemetalicznego.

Gdyby uwzględnić upływność sieci jako równoległe połączenie $R_{(0)}$ i $X_{(0)} = \frac{1}{j\omega C_{(0)}}$ to mamy:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{R_{(0)}} + j\omega C_{(0)} \underline{E}_{(1)} \quad (5.25)$$

Wartość prądu ziemnozwarciowego przy zwarciu metalicznym zależy od rodzaju sieci, wartości napięcia znamionowego i od długości sieci. Wartość tego prądu można obliczać z następującego przybliżonego wzoru:

$$I_Z = U_N (k_k l_k + k_n l_n) \quad [A] \quad (5.26)$$

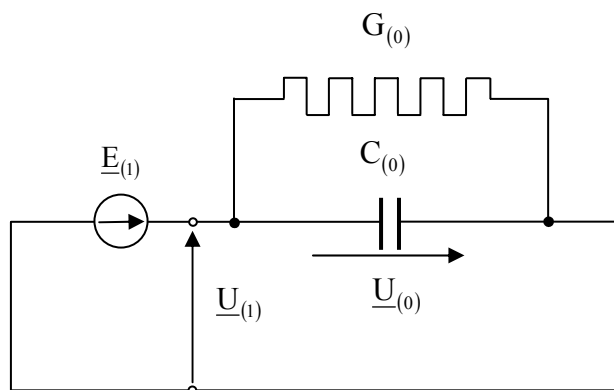
gdzie:

U_N – napięcie znamionowe sieci w kV,

l_k – sumaryczna długość linii kablowych w km,

l_n – sumaryczna długość linii napowietrznych w km,

k_k, k_n – współczynniki określające prąd doziemny generowany przez 1km linii na 1kV.



Rys. 5.7 Uproszczony schemat sieci z izolowanym punktem neutralnym uwzględniającej upływności w układzie składowych symetrycznych podczas zwarcia doziemnego metalicznego.

Tabl. 5.1 Współczynniki określające prąd doziemny generowane przez linie w $\frac{A}{kV \cdot km}$.

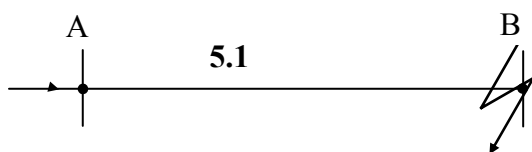
Przekrój linii mm ²	Napięcie znamionowe linii			
	6 kV	10 kV	15 kV	30 kV
Kabel z izolacją rdzeniową				
70	0.130	0.120	0.087	0.056
95	0.145	0.130	0.100	0.060
Kabel ekranowany jednofazowy				
70	-	-	0.185	0.133
95	-	-	0.198	0.141
Linie napowietrzne				
0.003				

5.3. Rozpływ prądu zwarcia doziemnego – sieć z izolowanym punktem neutralnym

W rozważaniach przedstawionych w poprzednim podrozdziale przyjęto, że pojemności elementów sieci można uważać za wielkości skupione. Na tej podstawie narysowano schematy zastępcze obwodów dla poszczególnych składowych symetrycznych. To założenie nie wprowadza żadnych błędów przy obliczeniach wielkości zwarciovych w miejscu zwarcia. Gdyby obliczać rozpływ prądu doziemnego to nie można tego założenia przyjąć – należy uwzględnić, że pojemności przewodów są równomiernie rozłożone wzdłuż sieci. W rozważaniach nad rozpływem prądów zwarć jednofazowych w sieci z izolowanym punktem neutralnym można przyjąć, że wartości napięć w poszczególnych fazach wzdłuż linii są stałe i równe wartościom w miejscu

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

zwarcia tzn. pomijamy spadki napięć. Odpowiada to założeniu, że impedancje wzdłużne są wielokrotnie mniejsze od impedancji poprzecznych. Rozważono zwarcie w sieci składającej się z jednej, promieniowej linii zasilanej z generatora lub transformatora, których uzwojenia są połączone w gwiazdę z izolowanym punktem neutralnym.



Rys. 5.8 Schemat rozpatrywanej sieci.

Prąd na początku linii (w punkcie A) obliczono na podstawie schematu zastępczego, w którym przyjęto, że impedancje poprzeczne są impedancjami skupionymi.

$$\underline{I}_{(1)A} = \underline{I}_{(1)} + \frac{\underline{U}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)Y}} = \underline{I}_{(1)} + \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)Y}} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(1)YA} \quad (5.27)$$

$$\underline{I}_{(2)A} = \underline{I}_{(2)} + \frac{\underline{U}_{(2)}}{\underline{Z}_{(2)Y}} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.28)$$

$$\underline{I}_{(0)A} = 0 \quad \text{bo} \quad \underline{Z}_u = \infty \quad (5.29)$$

Prąd $\underline{I}_{(1)YA}$ wynoszący:

$$\underline{I}_{(1)YA} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)Y}} \quad (5.30)$$

$$\underline{Z}_{(1)Y} = \frac{1}{j\omega C_{(1)}} \quad (5.31)$$

nazywa się prądem ładowania linii i prąd ten płynie w stanie pracy normalnej. Zwykle w sieciach mamy:

$$C_{(0)} < C_{(1)} \quad (5.32)$$

oprócz kabli ekranowanych gdzie:

$$C_{(0)} = C_{(1)} \quad (5.33)$$

Przeto

$$I_{(0)} = \omega C_{(0)} E_{(1)} < I_{(1)Y} = \omega C_{(1)} E_{(1)} \quad (5.34)$$

lub

$$I_{(0)} = \omega C_{(0)} E_{(1)} = I_{(1)Y} = \omega C_{(1)} E_{(1)} \quad (5.35)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Pomijając prąd ładowania linii określono rozptyw prądów fazowych w rozpatrywanym układzie. Wówczas rozptyw ten można nazwać rozptywem składowej zerowej prądu albowiem zawiera on jedynie składowe generowane przez zwarcie.

$$\underline{I}'_{(1)A} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.36)$$

$$\underline{I}'_{(2)A} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.37)$$

$$\underline{I}'_{(0)A} = 0 \quad (5.38)$$

Prądy fazowe w punkcie A będą:

$$\underline{I}'_{RA} = 2\underline{I}_{(0)} \quad (5.39)$$

$$\underline{I}'_{SA} = a^2 \underline{I}_{(0)} + a \underline{I}_{(0)} = -\underline{I}_{(0)} \quad (5.40)$$

$$\underline{I}'_{TA} = -\underline{I}_{(0)} \quad (5.41)$$

$$\underline{I}_{ZA} = 0 \quad (5.42)$$

Prądy z indeksem prim pojawiły się w sieci na skutek zwarcia jednej fazy z ziemią. Prądy te niekiedy nazywa się prądem „zwarciovym” w dowolnym punkcie linii (sieci). Należy zauważyć, że filtr składowej zerowej będzie mierzył sumę tych prądów (bez prądu ładowania).

W punkcie B prądy wynoszą:

$$\underline{I}_{RB} = 3\underline{I}_{(0)} \quad (5.43)$$

$$\underline{I}_{SB} = \underline{I}_{TB} = 0 \quad (5.44)$$

$$\underline{I}_{(1)B} = \underline{I}_{(2)B} = \underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.45)$$

$$\underline{I}_{ZB} = 3\underline{I}_{(0)} \quad (5.46)$$

Ze wzorów tych wynikają wartości prądu w dowolnym punkcie linii, gdy założymy, że pojemności sieci są rozłożone równomiernie wzdłuż linii.

$$\underline{I}'_{(1)\alpha} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.47)$$

$$\underline{I}'_{(2)\alpha} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.48)$$

$$\underline{I}'_{(0)\alpha} = \alpha \underline{I}_{(0)} \quad (5.49)$$

$$\alpha = \frac{L_{A\alpha}}{L_{AB}} \quad (5.50)$$

Prądy fazowe w punkcie α

$$\underline{I}'_{R\alpha} = \underline{I}_{(0)}(2 + \alpha) \quad (5.51)$$

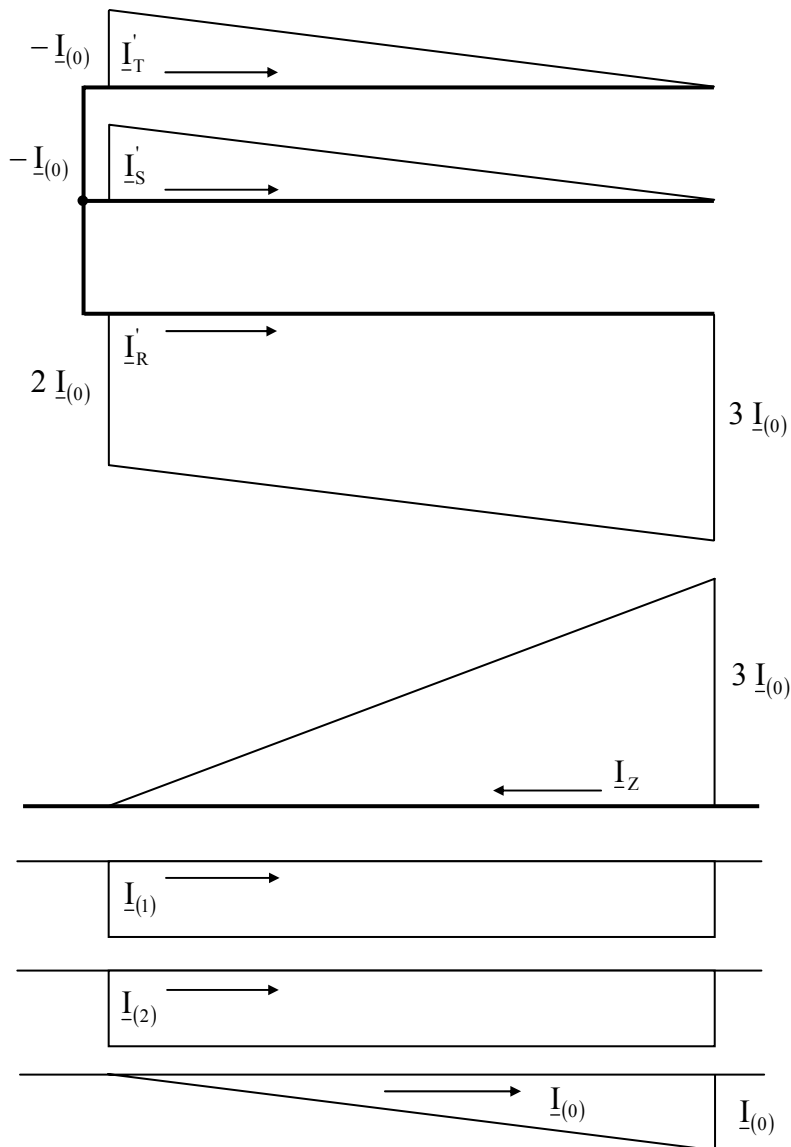
$$\underline{I}'_{S\alpha} = \underline{I}_{(0)}(\alpha - 1) \quad (5.52)$$

$$\underline{I}'_{T\alpha} = \underline{I}_{(0)}(\alpha - 1) \quad (5.53)$$

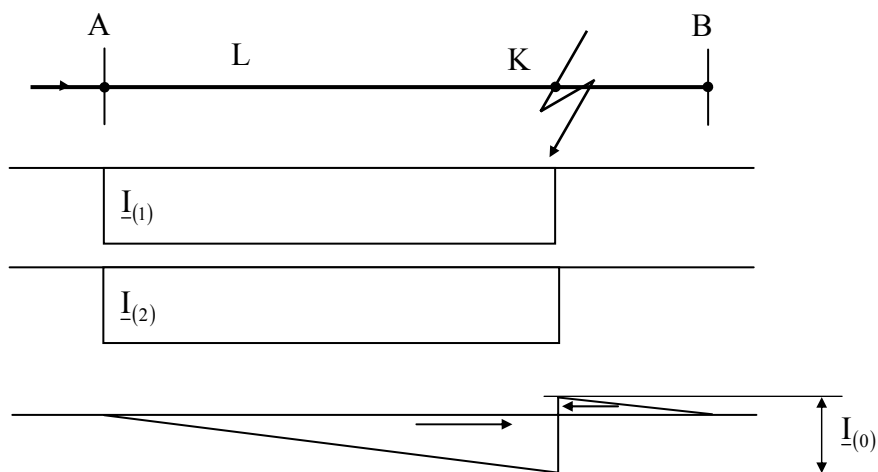
Wartość prądu płynącego w ziemi pod linią wynosi:

$$\underline{I}_{Z\alpha} = \underline{I}'_{R\alpha} + \underline{I}'_{S\alpha} + \underline{I}'_{T\alpha} = 3\underline{I}_{(0)}\alpha \quad (5.54)$$

Prądy płynące wzdłuż linii wyznaczone przy pominięciu prądu ładowania przedstawiono na rys. 5.9 zaś rys. 5.10 ilustruje rozptył składowych symetrycznych podczas zwarcia jednofazowego powstałego w linii a nie na jej końcu.



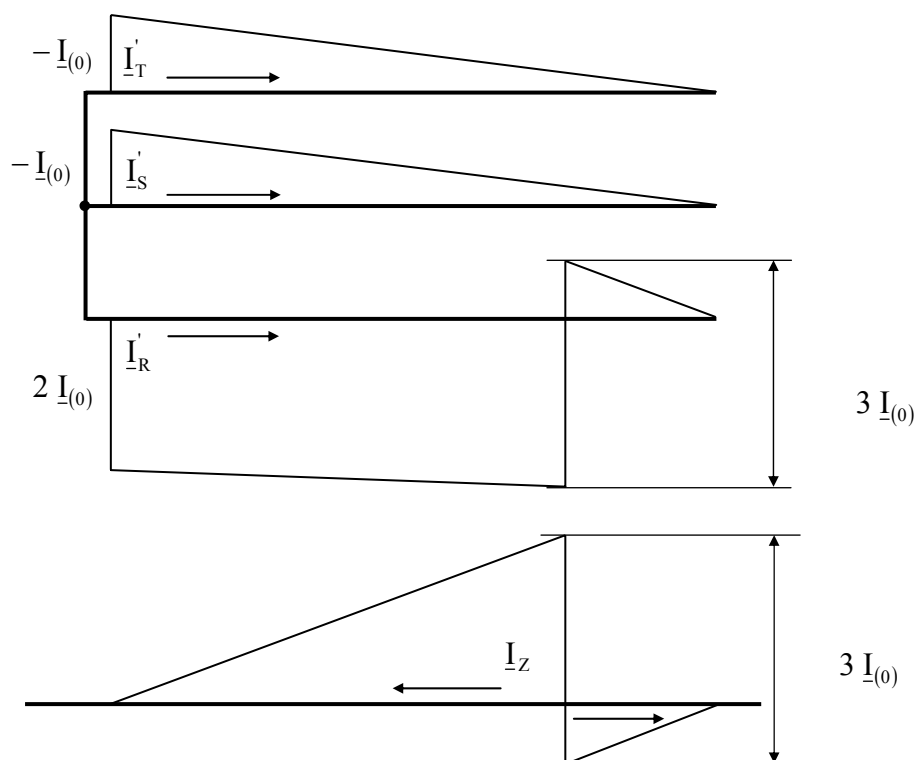
Rys. 5.9 Rozptył prądów podczas doziemienia na końcu linii.



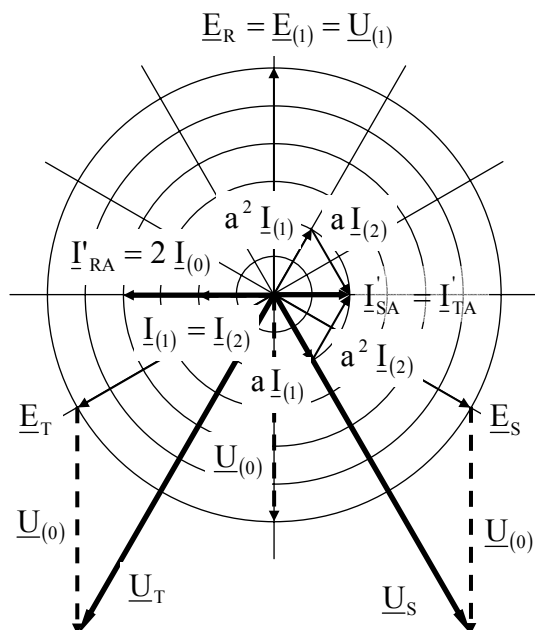
Rys. 5.10 Rozpływ składowych symetrycznych prądu podczas doziemienia w linii.

Prąd w miejscu zwarcia $I_{RB} = I_{ZB}$ wpływa do ziemi i następnie przez równomiernie rozłożone impedancje pojemnościowe (pojemność linii) wpływa do przewodów fazowych. Prądy I'_S, I'_T płyną zgodnie z tymi oznaczeniami od punktu A do punktu B, lecz na rysunku często oznacza się kierunki przepływu tych prądów odwrotnie. Z rysunku wynika, że poprzez pojemność fazy R też płynie prąd, albowiem $I'_{R\alpha}$ rośnie od $2I_{(0)}$ do $3I_{(0)}$, choć napięcie $U_{R\alpha} = 0$. Wynika to z faktu pominięcia prądu ładowania linii oraz pojemności międzyfazowych.

Znając rozpływ składowych symetrycznych wykreślono rozpływ prądów fazowych – rys. 5.11 i wykres wskazowy - na rys. 5.12.



Rys. 5.11 Rozpływ prądów fazowych podczas doziemienia w pojedynczej linii.



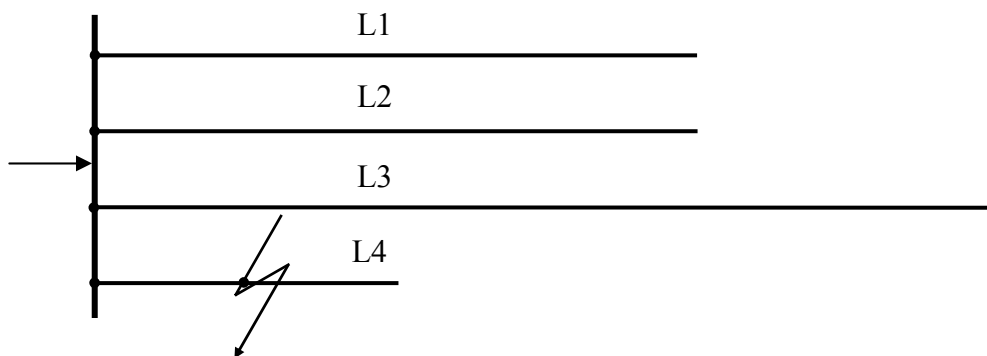
Rys. 5.12 Wykres wskazowy prądów i napięć na początku linii przy pominięciu prądów ładowania linii.

Gdyby powyższą linię narysowano w układzie jednokreskowym to rozptył składowej zerowej prądu będzie taki jak prądu w ziemi jedynie kierunki prądu będą przeciwne.

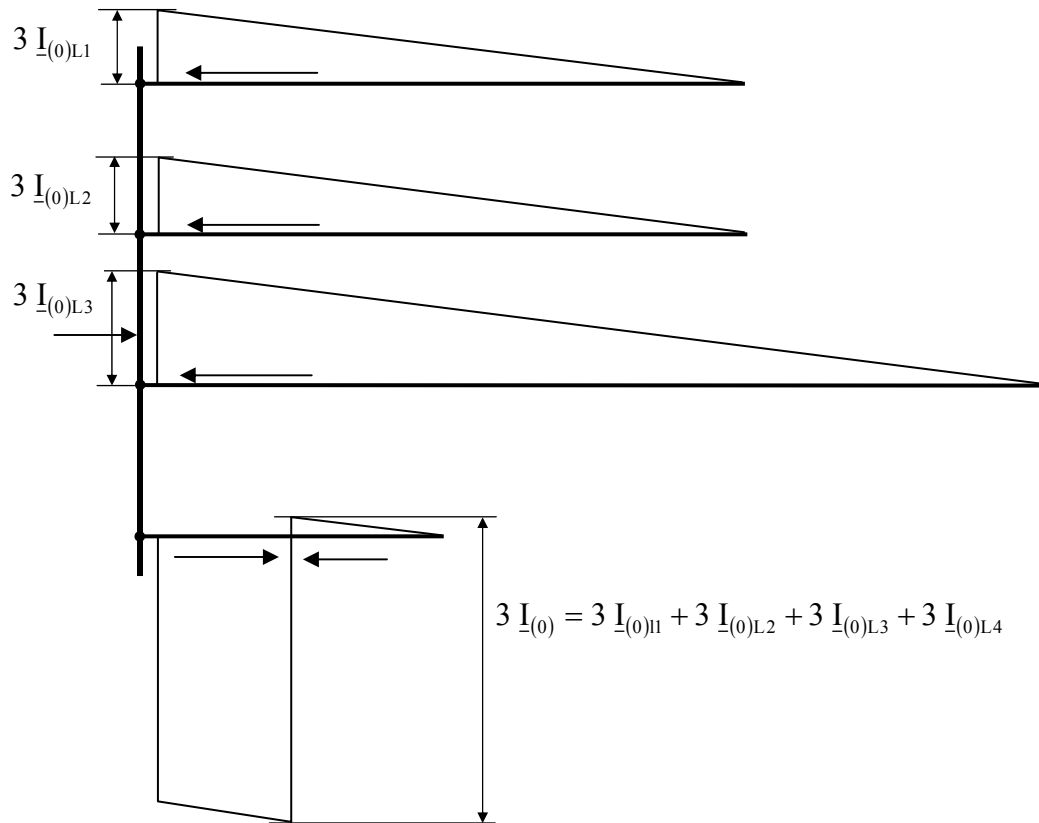
Moc składowej zerowej wynosi:

$$P_{(0)} = \operatorname{Re} \{ \underline{S}_{(0)} \} = \operatorname{Re} \{ \underline{U}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} \} = \operatorname{Re} \{ - \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)}^* \} = -R_{(0)} \cdot I_{(0)}^2 \quad (5.55)$$

Następnie zostanie rozpatrzony rozptył prądu $3I_{(0)}$ w sieci składającej się z kilku linii np. z czterech linii o różnej długości. Schemat tej sieci jest na rys. 5.13 a rozptył prądu $3I_{(0)}$ na rys. 5.14.



Rys. 5.13 Schemat rozpatrywanej sieci.



Rys. 5.14 Rozpływ prądów $3 \underline{I}_{(0)}$ podczas doziemienia w sieci.

Upřednio analizowano wielkości zwarciove pomijając prąd ładowania. W celu zobrazowania jego wpływu rozważono ponownie układ składający się z pojedynczej linii, zwarcie na końcu. Na końcu mamy:

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} \Rightarrow \underline{I}_S = \underline{I}_T = 0 \quad \underline{I}_R = 3\underline{I}_{(0)} \quad (5.56)$$

a na początku linii jest:

$$\underline{I}'_{(1)A} = \underline{I}_{(0)} \quad \underline{I}'_{(2)A} = \underline{I}_{(0)} \quad \underline{I}'_{(0)A} = 0 \quad (5.57)$$

$$-\underline{I}'_{RA} = \underline{I}'_{SA} + \underline{I}'_{TA} \quad (5.58)$$

Przy założeniu, że:

$$\underline{I}_{(1)YA} = \underline{I}_{(0)} \quad (5.59)$$

z uwzględnieniem prądu ładowania linii mamy:

$$\underline{I}_{(1)A} = 2\underline{I}_{(0)} \quad \underline{I}_{(2)A} = \underline{I}_{(0)} \quad \underline{I}_{(0)A} = 0 \quad (5.60)$$

$$\underline{I}_{RA} = 3\underline{I}_{(0)} \quad (5.61)$$

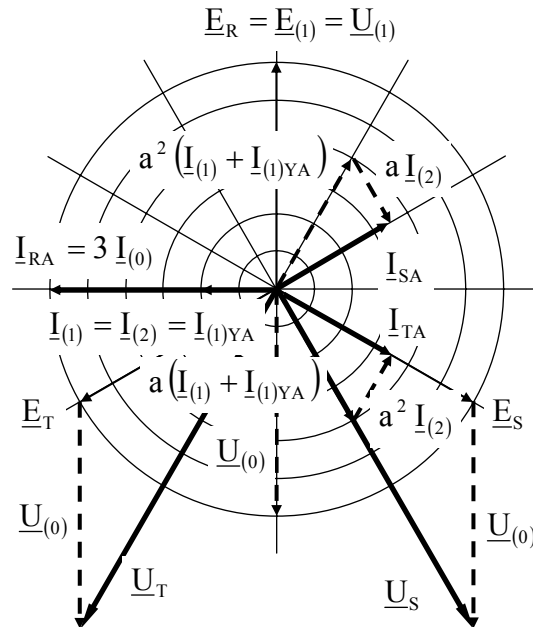
A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\begin{aligned} \underline{I}_{SA} &= \underline{I}_{(0)} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - 2\frac{1}{2} - j2\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \underline{I}_{(0)} \left(-\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= -\sqrt{3} \underline{I}_{(0)} e^{j30^\circ} = \sqrt{3} \underline{I}_{(0)} e^{j210^\circ} \end{aligned} \quad (5.62)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TA} &= \underline{I}_{(0)} (a^2 + 2a) = \underline{I}_{(0)} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - 2\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= -\sqrt{3} \underline{I}_{(0)} e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} \underline{I}_{(0)} e^{j150^\circ} \end{aligned} \quad (5.63)$$

$$\underline{I}_{SA} + \underline{I}_{TA} = \sqrt{3} \underline{I}_{(0)} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = -3\underline{I}_{(0)} = -\underline{I}_{RA} \quad (5.64)$$

Wartości prądów faz S i T przy posuwaniu się z punktu A do B maleją proporcjonalnie do odległości lecz nie ulegają zmianie ich kąty. Powyższe zależności ilustruje wykres wskazowy – rys. 5.15.



Rys. 5.15 Wykres wskazowy prądów i napięć na początku linii z uwzględnieniem prądów ładowania linii przy $C_{(1)} = C_{(0)}$.

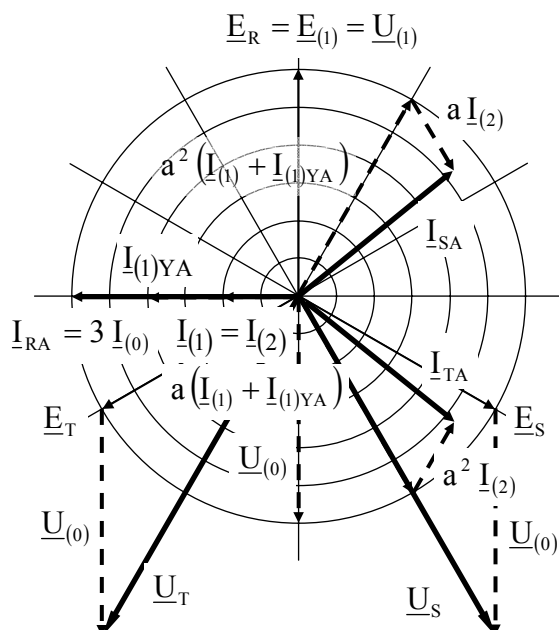
Gdyby uwzględnić, że prąd ładowania linii jest różny od $\underline{I}_{(0)}$ np. $\underline{I}_{(1)Y} > \underline{I}_{(0)}$ albowiem $C_{(1)} > C_{(0)}$, to wykres prądów na początku linii byłby jak na rys.5.16.

$$\underline{I}_{RA} = 2\underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)Y} \quad (5.65)$$

$$\underline{I}_{SA} = a^2(\underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)Y}) + a\underline{I}_{(0)} = a^2\underline{I}_{(1)Y} - \underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{SY} - \underline{I}_{(0)} \quad (5.66)$$

$$\underline{I}_{TA} = a(\underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)YA}) + a^2\underline{I}_{(0)} = a\underline{I}_{(1)YA} - \underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{TY} - \underline{I}_{(0)} \quad (5.67)$$

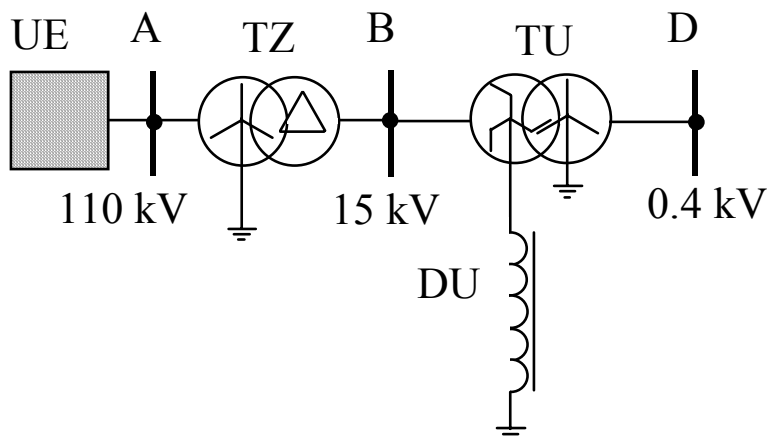
Wszystkie te wykresy i przebiegi rysowano przy pominięciu prądów obciążeniowych, które nakładają się na prądy wynikające ze zwarcia a trzeba pamiętać, że prądy obciążeniowe zwykle są większe od prądów zwarcia doziemnego.



Rys. 5.16 Wykres wskazowy prądów i napięć na początku linii z uwzględnieniem prądów ładowania linii przy $C_{(1)} \neq C_{(0)}$.

5.4. Kompensacja prądu doziemnego

Pojemnościowy prąd doziemny będący wynikiem zwarcia jednej fazy z ziemią w układzie z izolowanym punktem neutralnym można skompensować poprzez prąd indukcyjny. Kompensację tę uzyskuje się uziemiając punkt zerowy układu za pomocą cewki indukcyjnej zwanej dławikiem gaszącym lub cewką Petersena. Można ten efekt otrzymać przyłączając do sieci transformator systemu Bauchy lub systemu Reithoffera zwany transformatorem gaszącym. Sieć średniego napięcia jest zasilana poprzez transformator, w którym nie jest dostępny punkt neutralny sieci. W celu włączenia cewki gaszącej w rozdzielni średniego napięcia jest zainstalowany dodatkowy transformator uziemiający, do którego punktu neutralnego przyłącza się cewkę.



Rys. 5.17 Sposób włączenia cewki Petersena (DU) do sieci za pośrednictwem transformatora uziemiającego (TU).

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Można tu by postawić pytanie wymagające wyjaśnienia, dlaczego transformator uziemiający posiada grupę połączeń ZNyn5. W odpowiedzi na to pytanie należy wymienić kilka czynników wzajemnie od siebie zależnych, a mianowicie:

- transformator uziemiający musi posiadać dostępny punkt neutralny lecz niekoniecznie musi to być zygzak,
- jedynie uzwojenie połączone w zygzak jest uzwojeniem samokompensującym się dla składowej zerowej,
- impedancja dla składowej zerowej od strony zygza tego transformatora jest najmniejsza w porównaniu ze wszystkimi innymi grupami połączeń transformatorów,
- gdyby zrezygnować z grupy połączeń ZNyn5 to mamy do dyspozycji jedynie YNd5, a wtedy sieć potrzeb własnych niskiego napięcia stacji 110 kV/ŚN byłaby zasilana z transformatora z izolowanym punktem neutralnym.

W przypadku włączenia do punktu gwiazdowego sieci cewki Petersena o impedancji:

$$\underline{Z}_u = j\omega L_u \quad (5.68)$$

gdzie: L_u – indukcyjność cewki Petersena

Impedancja składowej zerowej sieci widziana z miejsca zwarcia wynosi:

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)Y} (\underline{Z}_{(0)X} + 3\underline{Z}_u)}{\underline{Z}_{(0)Y} + \underline{Z}_{(0)X} + 3\underline{Z}_u} \quad (5.69)$$

Ponieważ $Z_u \gg Z_{(0)X}$ to:

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)Y} 3\underline{Z}_u}{\underline{Z}_{(0)Y} + 3\underline{Z}_u} = \frac{3j\omega L_u \frac{1}{j\omega C_{(0)}}}{\frac{1}{j\omega C_{(0)}} + 3j\omega L_u} = \frac{3 \frac{L_u}{C_{(0)}}}{j(3\omega L_u - \frac{1}{\omega C_{(0)}})} \quad (5.70)$$

Prąd zwarcia doziemnego wyniesie:

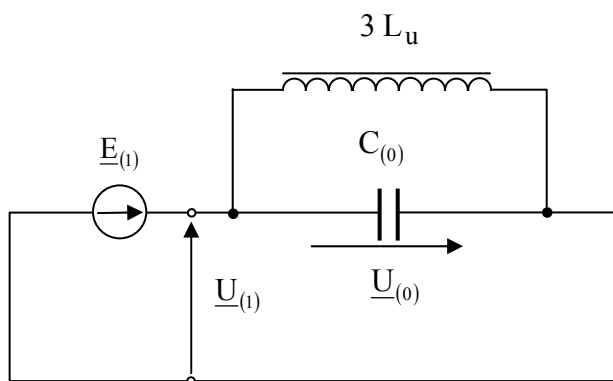
$$\underline{I}_R \cong \frac{3\underline{E}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)}} = \underline{E}_{(1)} \frac{j(3\omega L_u - \frac{1}{\omega C_{(0)}})}{\frac{L_u}{C_{(0)}}} \quad (5.71)$$

Wartość prądu doziemnego może być równa zero, gdy

$$3\omega L_u - \frac{1}{\omega C_{(0)}} = 0 \quad (5.72)$$

tzn., gdy indukcyjność cewki Petersena wynosi:

$$L_u = \frac{1}{3\omega^2 C_{(0)}} \quad \text{lub} \quad X_u = \frac{1}{3\omega C_{(0)}} \quad (5.73)$$



Rys. 5.18 Schemat zastępczy sieci z kompensacją prądu doziemnego.

Kompensacja idealna jest niekorzystna albowiem występują wtedy największe przepięcia. Zazwyczaj staramy się, aby sieć pracowała jako przekompensowana tzn.

$$\omega L_u < \frac{1}{3\omega C_{(0)}} \quad (5.74)$$

lub

$$I_L = \frac{\underline{E}_{(1)}}{j\omega L_u} > I_C = 3j\omega C_{(0)} \underline{E}_{(1)} \quad (5.75)$$

Wprowadzono pojęcie współczynnika kompensacji jako:

$$k = \frac{|I_L|}{|I_C|} > 1 \quad (5.76)$$

Różnica wektorowa między pojemnościowym prądem kompensacyjnym nazywamy prądem reszkowym. W rzeczywistości prąd indukcyjny cewki Petersena i prąd pojemnościowy posiadają składową czynną, a więc i przy idealnej kompensacji prąd w miejscu zwarcia jest różny od zera i wystąpi prąd reszkowy o charakterze czynnym – schemat na rys.5.19. Wykres wektorowy, gdy $I_L \neq I_C$ pokazano na rys. 5.20. Prąd w miejscu zwarcia wynosi:

$$\underline{I}_R = \frac{3\underline{E}_{(1)}}{(3R_K + j3\omega L_K) \frac{1}{j\omega C_{(0)}}} = 3\underline{E}_{(1)} \frac{1 - 3\omega^2 L_K C_{(0)} + j3R_K \omega C_{(0)}}{3R_K + j3\omega L_K} \quad (5.77)$$

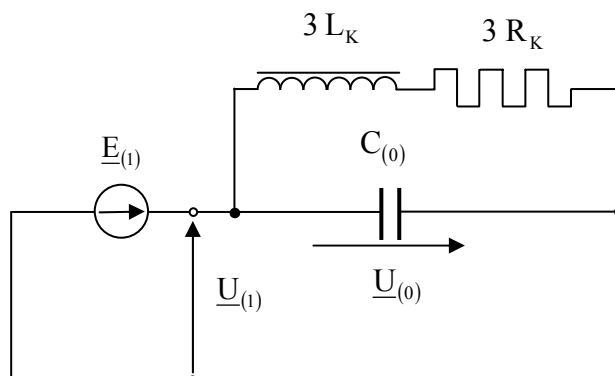
$$\frac{1}{3R_K + j3\omega L_K + \frac{1}{j\omega C_{(0)}}}$$

gdy

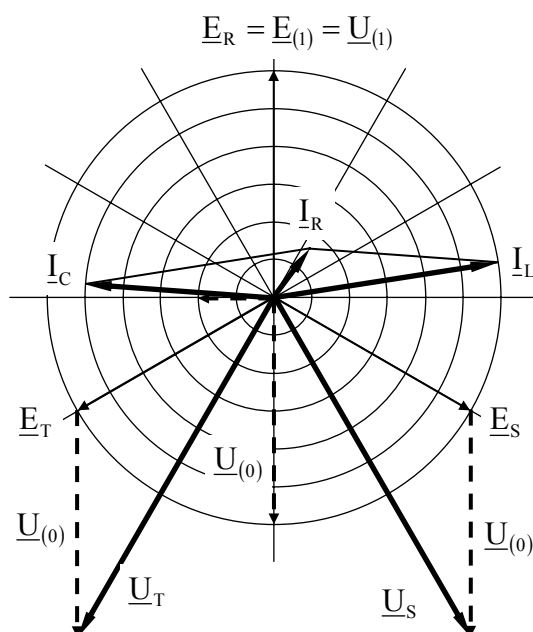
$$R_K \ll L_K \quad (5.78)$$

to równanie powyższe upraszcza się do postaci:

$$\underline{I}_R = 3 \underline{E}_{(1)} \left[\frac{R_K C_{(0)}}{L_K} + j \left(3 \omega C_{(0)} - \frac{1}{\omega L_K} \right) \right] \quad (5.79)$$



Rys. 5.19 Schemat zastępczy sieci z kompensacją prądu doziemnego.



Rys. 5.20 Wykres wskazowy prądów i napięć w miejscu zwarcia w sieci z kompensacją prądów doziemnych.

Równanie powyższe ma składową czynną i bierną wynoszącą:

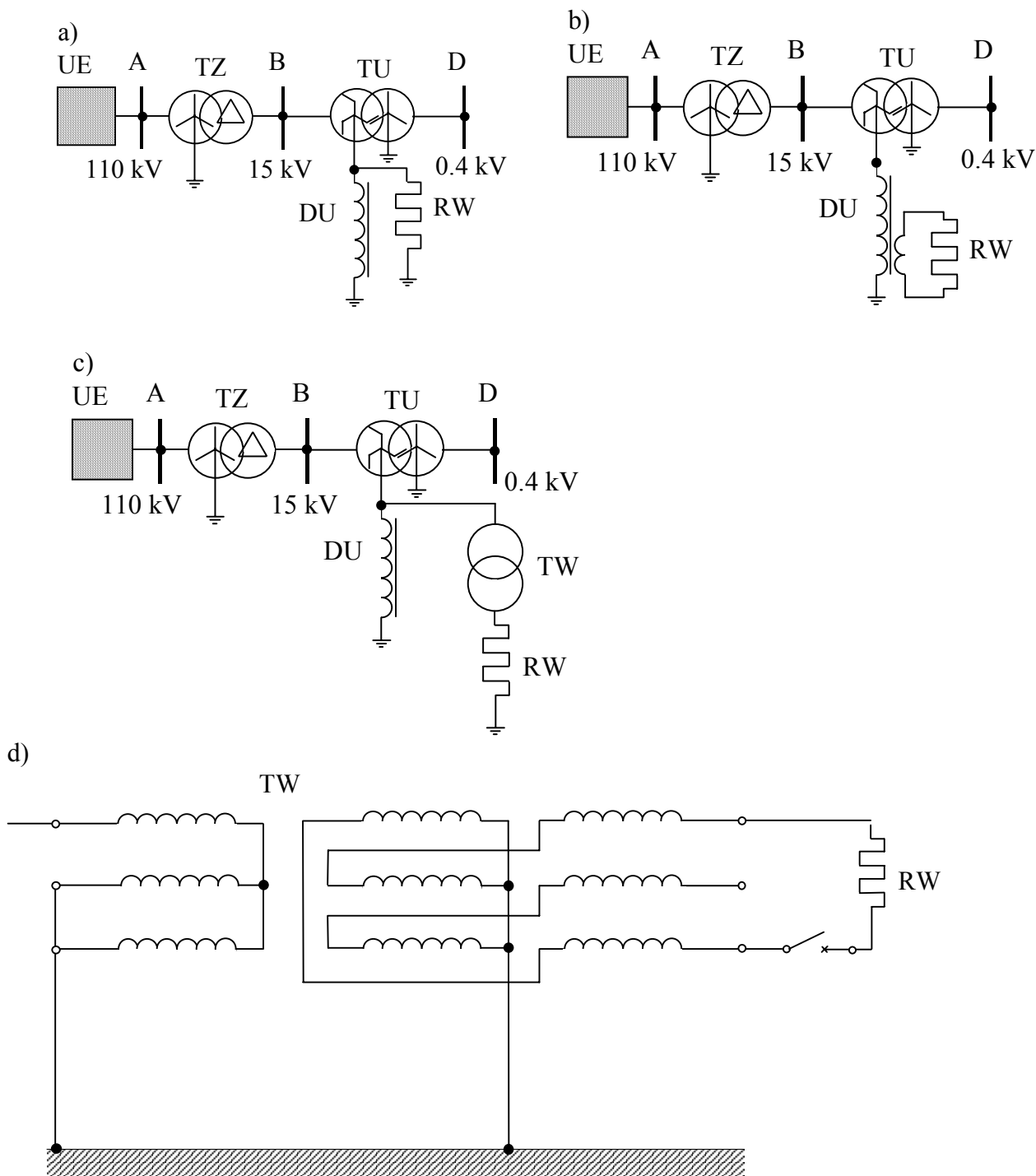
$$\underline{I}_{Rcz} = 3 \underline{E}_{(1)} \frac{R_K C_{(0)}}{L_K} \quad (5.80)$$

$$\underline{I}_{Rb} = j \left(3 \omega C_{(0)} - \frac{1}{\omega L_K} \right) 3 \underline{E}_{(1)} \quad (5.81)$$

W układach zabezpieczeń ziemnozwarciowych sieci z kompensacją prądu zwarcia doziemnego w celu poprawy pracy przekładników mierzących moc czynną składowej zerowej włącza się na około 3 sekundy równolegle do cewki rezystor R_w . Rezystancja tego rezystora jest duża, porównywalna z reaktancją cewki Petersena. Włączenie rezystora powoduje powiększenie się

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

składowej czynnej prądu resztkowego a w konsekwencji mierzonej przez przekaźnik mocy czynnej składowej zerowej. Przy uwzględnieniu tylko rezystancji rezystora oraz założeniu, że w sieci występuje idealna kompensacja prąd w miejscu zwarcia doziemnego wynosi:



Rys. 5.21 Sposoby włączania rezystora wymuszającego:

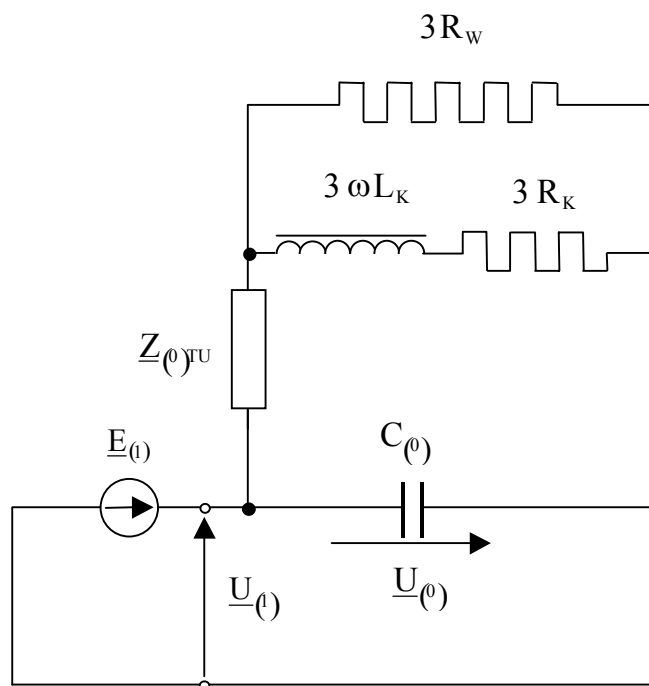
- rezystor wysokonapięciowy bezpośrednio, równoległe do cewki Petersena, ,
- do dodatkowego uzwojenia cewki Petersena, jeżeli cewka posiada takie uzwojenie,
- na stronę wtórną dodatkowego transformatora włączonego równoległe do cewki Petersena pracującego jednofazowo,
- sposób połączenia transformatora wymuszającego w układzie z rys. c).

$$\underline{I}_R = \frac{3 \underline{E}_{(1)}}{3 R_W} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{R_W} \quad (5.82)$$

Opóźnienie jest potrzebne, aby wymusić zjawisko samogaszenia się zwarcia. W przypadku, gdy transformator zasilający ma niedostępny punkt gwiazdowy np. grupę połączeń YNd to cewkę Petersena przyłącza się do sieci poprzez transformator uzemiający. Transformator ten ma uzwojenia pierwotne połączone w zygzak ze względu na efekt samokompensacji składowej zerowej przez to uzwojenie. Strona wtórna transformatora uzemiającego jest wykorzystywana do zasilania potrzeb własnych stacji i ma on grupę połączeń ZNyn. Do punkty gwiazdowego uzwojenia połączonego w zygzak dołączona jest cewka Petersena. Dodatkowy rezystor R_w do wymuszania składowej czynnej prądu doziemnego włączamy (rys. 5.21):

- bezpośrednio, równolegle do cewki Petersena,
- do dodatkowego uzwojenia cewki Petersena, jeżeli cewka posiada takie uzwojenie,
- na stronę wtórną dodatkowego transformatora (wymuszającego) włączonego równolegle do
- cewki Petersena (pracującego jednofazowo) np. transformator TUOHb.

Dobiera się tak rezystancję R_w aby dodatkowy prąd I_{RW} był od 20 do 40 A. Pełny schemat zastępczy takiego układu pokazano na rys. 5.22.

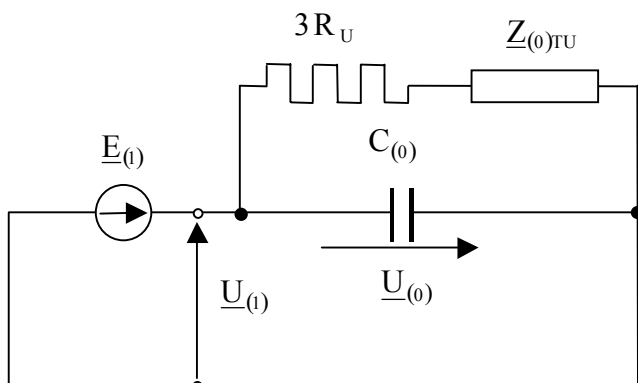


Rys. 5.22 Schemat zastępczy sieci z kompensacją prądu zwarcia doziemnego i z automatyką wymuszania składowej czynnej (AWSK) tego prądu

5.5. Uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystor

W celu zmniejszenia przepięć pojawiających się przy doziemieniach stosuje się uziemienie przez rezystor. Wartość tego rezystora powinna oprócz tego wymuszać prąd doziemny zapewniający prawidłowe działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych. W Polsce przyjmuje się, że prąd ten powinien być od (200-600)A zwykle od 300 do 500A. Przy tak dużym prądzie należy sprawdzić zagrożenie porażeniowe, jakie może on wywoływać. Przy uziemieniu punktu gwiazdowego przez rezystor schemat zastępczy sieci w czasie doziemienia jest postaci z rys. 5.23. Prąd w miejscu zwarcia przy $R_p = 0$ wynosi:

$$\underline{I}_R = 3 \underline{E}_{(1)} \left(\frac{1}{R_{(0)TU} + 3 R_U + j X_{(0)TU}} + j B_{(0)} \right) \quad (5.83)$$



Rys. 5.23 Schemat zastępczy sieci z uziemieniem punktu neutralnego przez rezystor.

Zakładając, że znamy prąd I_R określono wartość R_U , która wymusza taki prąd:

$$R_U = \sqrt{\frac{E_{(1)}^2 (1 - 2 X_{(0)TU} B_{(0)})}{I_R^2 - 9 E_{(1)}^2 B_{(0)}^2} - \left(\frac{X_{(0)TU}}{3} \right)^2} - \frac{R_{(0)TU}}{3} \quad (5.84)$$

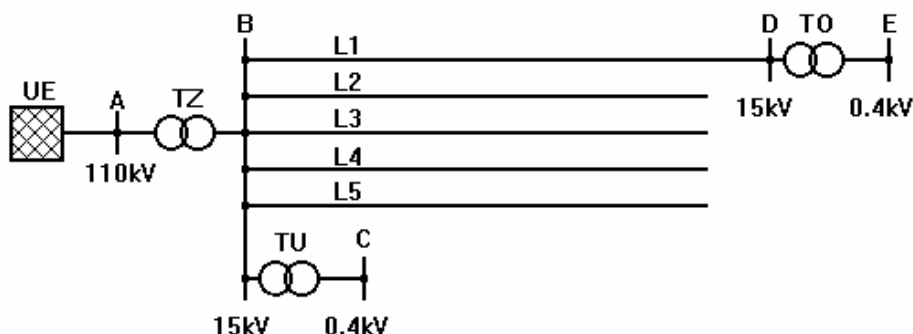
Wartość R_U jest nieznacznie mniejsza, gdy pominiemy wartość impedancji transformatora uziemiającego i wynosi:

$$R_U = \sqrt{\frac{E_{(1)}^2}{I_R^2 - 9 E_{(1)}^2 B_{(0)}^2}} = \sqrt{\frac{E_{(1)}^2}{I_R^2 - I_C^2}} \quad (5.85)$$

oznaczając przez I_C prąd jaki płynąłby w takiej sieci przy pracy z izolowanym punktem neutralnym w czasie zwarcia doziemnego. W związku ze wzrostem prądu doziemnego należy przeanalizować warunki pracy ochrony przeciwporażeniowej.

5.6. Pytania kontrolne

5.6.1. Sieć z izolowanym punktem neutralnym



Rys. 5.24 Schemat sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym.

1. Czy przy zmianie miejsca zwarcia zmieni się prąd w miejscu zwarcia?
2. Czy przy zmianie miejsca zwarcia w danej linii, zmienią się prądy płynące na początku linii zwartej?
3. Czy przy zmianie miejsca zwarcia w danej linii, zmienią się prądy płynące na początku linii nie zwartych?
4. Czy przy zmianie miejsca zwarcia na zwarcie w innej linii, zmienią się prądy płynące na początku linii nie zwartych?
5. Czy przy zmianie miejsca zwarcia na zwarcie w innej linii, zmienią się prądy płynące na początku linii zwartej?
6. Czy po wyłączeniu linii, zmieni się prąd w miejscu zwarcia?
7. Czy po wyłączeniu linii, zmienią się prądy płynące na początku linii nie zwartych?
8. Czy po wyłączeniu linii, zmienią się prądy płynące na początku linii zwartej?
9. Narysować rozływ prądu $3I_{(0)}$ w sieci pokazanej na rys. 5.24.
10. Jak zmienią się warunki pracy silnika asynchronicznego po zwarciu doziemnym?
11. Jakie napięcie występuje na punkcie gwiazdowym wysokonapięciowego silnika asynchronicznego podczas zwarcia doziemnego?
12. Jak zmienią się napięcia na szynach 110kV po zwarciu doziemnym w sieci SN jeżeli transformator zasilający 110kV/SN ma grupę połączeń YNd11?
13. Jak zmienią się napięcia na szynach 0.4kV po zwarciu doziemnym w sieci SN jeżeli transformator SN/nn ma grupę połączeń Dyn5?
14. Czy zmiana grupy połączeń transformatora zmieni odpowiedź na powyższe dwa pytania?
15. Nastąpił przepływ prądu zwarcia doziemnego przez uziom stacji SN/nn, przy czym rezystancję tego uziomu nie można pominąć. Czy taki stan wpływa na pracę sieci niskiego napięcia?
16. Czy napięcia poza miejscem doziemienia różnią się od napięć w miejscu doziemienia?
17. Jak wpływa włączenie obciążenia na prąd zwarcia doziemnego i na prądy w gałęziach?

5.6.2. Sieć z kompensacją prądu zwarcia doziemnego

18. Które prądy fazowe ulegną zmianie po włączeniu (wyłączeniu) cewki Petersena w sieci z doziemieniem?
19. Które napięcia fazowe ulegną zmianie po włączeniu (wyłączeniu) cewki Petersena w sieci z doziemieniem?
20. Jak zmieni się prąd w miejscu doziemienia po włączeniu (wyłączeniu) cewki Petersena?

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

21. Dlaczego stosujemy kompensację prądu zwarcia doziemnego?
22. Jak jest definiowany współczynnik kompensacji?
23. W przypadku gdy sieć jest przekompensowana i nastąpi wyłączenie jednej linii, to może wystąpić:
 - tylko głębsze przekompensowanie sieci,
 - przejście do pracy z niedokompensowaniem.
24. W przypadku gdy sieć jest niedokompensowana i nastąpi wyłączenie jednej linii, to może wystąpić:
 - tylko głębsze niedokompensowanie sieci,
 - przejście do pracy z przekompensowaniem.
25. Dlaczego zazwyczaj pracujemy z przekompensowaniem?
26. Jakie warunki muszą być spełnione, aby pojawił się prąd resztkowy?
27. Czy w warunkach idealnej kompensacji może pojawić się prąd resztkowy?
28. Dlaczego cewkę Petersena włączamy do punktu gwiazdowego transformatora uziemiającego?
29. Dlaczego transformator uziemiający ma grupę połączeń ZNyn?
30. Przyczyny stosowania automatyki wymuszania składowej czynnej prądu zwarcia doziemnego w sieci z kompensacją tego prądu.
31. Sposoby włączania rezystora wymuszającego.
32. Narysować schemat zastępczy transformatora uziemiającego wraz z cewką Petersena i rezystorem wymuszającym pierwotnym.
33. Narysować rozptyw prądów w stanie normalnym w transformatorze uziemiającym.
34. Narysować rozptyw prądów podczas doziemienia w transformatorze uziemiającym i cewce Petersena.
35. Narysować rozptyw prądów w stanie normalnym i podczas doziemienia w transformatorze wymuszającym wykonanym w oparciu o trójfazowy transformator Yz.

5.6.3. Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

36. Przyczyny stosowania pracy sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.
37. Narysować schemat transformatora uziemiającego z włączonym rezystorem pierwotnym.
38. Jakiej wartości prądu zwarcia doziemnego możemy się spodziewać w sieci 15kV pracującej z rezystorem o rezystancji 17.5 Ohma?
39. Czy prąd zwarcia doziemnego zależy od miejsca zwarcia?
40. Narysować wykres wskazowy prądów i napięć podczas doziemienia.

5.6.4. Różne typy sieci

41. Dana jest sieć z izolowanym punktem neutralnym, w której występuje zwarcie doziemne. Narysować wykres wskazowy prądów i napięć w miejscu zwarcia i w dowolnym miejscu poza miejscem zwarcia przy uwzględnieniu konduktancji sieci. Narysować te same wykresy po włączeniu układu do kompensacji prądu zwarcia doziemnego.
42. Dana jest sieć z izolowanym punktem neutralnym, w której występuje zwarcie doziemne. Narysować wykres wskazowy prądów i napięć w miejscu zwarcia i w dowolnym miejscu poza miejscem zwarcia. Narysować te same wykresy po włączeniu układu do kompensacji prądu zwarcia doziemnego oraz po załączeniu układu do wymuszania dodatkowej składowej czynnej prądu doziemnego.
43. Sieć 15kV pracująca z izolowanym punktem neutralnym, składa się z pięciu linii o jednakowych stałych kilometrycznych i $\frac{C_{(0)}}{C_{(1)}} = 1$. Poszczególne linie posiadają długość:
 - linia 1, 2, 3: 6km,
 - linia 4: 9km,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- linia 5: 3km.

Prąd zwarcia doziemnego, metalicznego wynosi 90A. W dalszych rozważaniach pomijać konduktancję sieci.

Obliczyć:

- a) Wartości prądu $3I_{(0)}$ i prądów fazowych na początku i w połowie każdej linii, przy:

- i) zwarcia na końcu linii 1,
- ii) zwarcia w połowie linii 1,
- iii) na końcu linii 5.

Dla każdego z tych przypadków narysować przebieg prądu $3I_{(0)}$ w tej sieci.

- b) Wartość prądu zwarcia doziemnego po wyłączeniu linii 4.

- c) Wartość prądu zwarcia doziemnego, niemetalicznego przez rezystancję przejścia 100 Ohm. W tym przypadku dodatkowo obliczyć napięcia fazowe.

- d) Powtórzyć obliczenia z punktu a) lecz dla $\frac{C_{(0)}}{C_{(1)}} = 0.5$.

- e) Powtórzyć obliczenia z punktu a) po włączeniu układu do kompensacji prądu zwarcia doziemnego ze współczynnikiem kompensacji wynoszącym 1.1.

- f) Wartość prądu zwarcia doziemnego, niemetalicznego przez rezystancję przejścia 100 Ohm w sieci z włączonym układem do kompensacji prądu zwarcia doziemnego pracującym ze współczynnikiem kompensacji wynoszącym 1.1. W tym przypadku dodatkowo obliczyć napięcia fazowe.

- g) Powtórzyć obliczenia z punktu a) przy założeniu, że konduktancja tej sieci jest 10 razy mniejsza od susceptancji. Obliczenia rozpocząć od obliczenia nowego prądu w miejscu zwarcia.

44. Sieć 15kV pracująca z izolowanym punktem neutralnym, składa się z pięciu linii, dla których $\frac{C_{(0)}}{C_{(1)}} = 1$. Poszczególne linie posiadają długość:

- linia 1, 2, 3: 6km,
- linia 4: 9km,
- linia 5: 3km.

Pojemność kilometryczna linii 1-szej i 4-tej jest dwukrotnie większa od pojemności kilometrycznych pozostałych linii. Prąd zwarcia doziemnego, metalicznego wynosi 90A. W dalszych rozważaniach pomijać konduktancję sieci. Obliczyć punkty od a) do g) z pytania poprzedniego.