

Witold HOPPEL

e-mail: witold.hoppel@put.poznan.pl

Józef LORENC

e-mail: jozef.lorenc@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 POZNAŃ

OCENA MOŻLIWOŚCI POPRAWY SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH W SIECIACH SKOMPENSOWANYCH

Referat dotyczy zerowonapięciowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach skompensowanych, które są elementami rozruchowymi współpracującymi z innymi kryteriami lokalizującymi linię doziemioną, a w wykonaniu autonomicznym służą do sygnalizacji doziemienia w nadzorowanej sieci. Nastawa tych zabezpieczeń w bezpiecznym stopniu powinna być większa od napięcia spowodowanego zjawiskiem asymetrii parametrów doziemnych sieci. Z kolei jej zmniejszenie wyraźnie przyczynia się do poprawy wykrywalności zwarć doziemnych poprzez zwiększenie zakresu rezystancji przejścia powodujących rozruch zabezpieczenia. W referacie zaproponowano wprowadzenie zmiany metodyki doboru tej nastawy.

1. WSTĘP

Pomimo, że w polskich sieciach średnich napięć nadal dominuje uziemienie punktu neutralnego przez cewkę Petersena, to od kilkunastu lat widoczny jest przyrost sieci uziemionych przez rezystor pierwotny, którego znamionowy prąd najczęściej mieści się w zakresie od 100 do kilkuset amperów.

Wadom i zaletom tych dwóch sposobów poświęcono wiele publikacji, ale ciągle brak jednolitego stanowiska odnośnie zakresu zastosowania każdego z tych rozwiązań. Dość oczywiste jest, że dla sieci czysto kablowych, dla których dużym zagrożeniem są przepięcia ziemnozwarciowe, należy preferować uziemienie punktu neutralnego przez rezystor. W sieciach napowietrznych i napowietrzno-kablowych rozwiązanie z rezystorem zwiększa zagrożenie porażeniowe i może być powodem pogorszenia jakości energii elektrycznej przez zwiększenie częstości cykli SPZ-tu oraz liczby wyłączeń zbędnych. Ten drugi problem wiąże się z wyłączaniem transformatora zasilającego podczas doziemień na szynach zbiorczych SN lub podczas braku działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w polach liniowych.

Ogólnie przyjmuje się, że w napowietrznej części prawidłowo skompensowanych sieci, duża część zwarć łukowych jest gaszona samoczynnie. Również przy braku działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych [1] w polach liniowych tak z prawnego, jak i technicznego punktu widzenia, można pozwolić na działanie sygnalizacji doziemienia i ręczną lokalizację linii uszkodzonej, a nie wyłączać w trybie awaryjnym całej sekcji rozdzielni [2]. Natomiast w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor często zachodzi potrzeba bezwzględnego wyłączenia rozdzielni SN, między innymi z takich powodów jak:

- groźba cieplnego uszkodzenia samego rezystora,

- możliwe przeciążenia prądem ziemnozwarciowym fragmentów sieci: transformatora potrzeb własnych, transformatora zasilającego i elementów linii,
- znaczne zagrożenie porażeniowe podczas zwarc na trasach linii napowietrznych oraz w stacjach SN/nN, które może przenosić się również do odbiorców zasilanych niskim napięciem.

2. ZABEZPIECZENIA ZIEMNOZWARCIOWE

W sieciach skompensowanych w celu lokalizacji linii doziemionej stosuje się najczęściej następujące zabezpieczenia ziemnozwarciowe [1]:

- kierunkowe czynnomocowe,
- konduktancyjne ($G_{0>}$),
- porównawczo-admitancyjne (YY_0).

Tego typu zabezpieczenia wymagają jednak stosowania w punkcie neutralnym sieci urządzeń wymuszających dodatkowy prąd zwarcia doziemnego. Jest to konieczne, ponieważ naturalne admitancje doziemne sieci generują zbyt słabe sygnały, aby w wystarczająco pewny sposób odróżnić przebiegi wielkości zwarciovych w linii uszkodzonej od przebiegów w liniach zdrowych.

Dla dwóch pierwszych zabezpieczeń musi to być prąd o charakterze czynnym, dla trzeciego układu (YY_0) może również dotyczyć składowej biernej.

Każde z wymienionych zabezpieczeń musi być uzupełnione kryterium rozruchowym – najczęściej zerowonapięciowym, a w przypadku zabezpieczenia kierunkowego dodatkowo zerowoprądowym. Celem stosowania dodatkowych członów rozruchowych jest ograniczenie zbędnych zaszłań zabezpieczeń w warunkach silnego oddziaływania naturalnej asymetrii doziemnej sieci lub prądów uchybowych w obwodzie pomiaru składowej zerowej prądu linii.

Jeżeli podane trzy zabezpieczenia posiadają prawidłowe konstrukcje i algorytmy działania oraz poprawnie współpracują z automatyką wymuszania dodatkowej składowej prądu zwarcia, to ich czułość w obszarze aktywności kryteriów admitancyjnych i kierunkowych nie zależy od wartości rezystancji przejścia w miejscu doziemienia. Natomiast zależność taka dotyczy przede wszystkim rozruchu napięciowego. W związku z powyższym jest w pełni uzasadnione stwierdzenie, że w zdecydowanej większości przypadków spotykanych w praktyce, zakres wykrywanych rezystancji przejścia przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe zależy od nastawy rozruchowego członu zerowonapięciowego.

3. KRYTERIUM ZEROWONAPIĘCIOWE

W sieciach skompensowanych kryterium zerowonapięciowe wykorzystuje się w członach rozruchowych admitancyjnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, w stacyjnych układach sygnalizacji zwańc doziemnych oraz w automatyce urządzeń wymuszających dodatkowy prąd zwarcia z ziemią.

Wartość składowej zerowej napięcia wywołana zwarcie doziemnym zależy od wielu czynników i dla potrzeb zabezpieczeń, gdzie nie jest potrzebna znajomość argumentu można określić ją wzorem::

$$U_{0K} = \beta U_{ph} \quad (1)$$

w której:

U_{ph} - źródłowe napięcie fazowe sieci,

β - współczynnik ziemnozwarciowy, którego przybliżoną wartość można wyznaczyć z zależności:

$$\beta = \left| \frac{1}{1 + R_F \omega C_{0s} (d_0 + js)} \right| \quad (2)$$

w której:

R_F - rezystancja przejścia w miejscu zwarcia doziemnego,

ω - pulsacja sieci,

d_0 - tłumienność sieci,

s - współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej.

Przykładowe obrazy graficzne zależności współczynnika β od rezystancji przejścia R_F pokazano na rys.1. Porównując krzywe 1, 2, 3 i 4 łatwo zauważyć, że zmiana każdego z parametrów sieci wpływa znacząco na ich przebieg. Szczególnie silnie na zmniejszanie wartości β wpływa wzrost współczynnika tłumienności sieci d_0 . Tym należy tłumaczyć znane zjawisko obniżania składowej zerowej napięcia sieci podczas włączania urządzeń AWSCz.

3. ASYMETRIA SIECI

Warunkiem ustalania nastawy zabezpieczenia zerowonapięciowego, nieistotne – czy stanowi ono samodzielny układ, czy tylko element rozruchowy dla innych kryteriów, jest spełnienie wymogu odstrojenia go od napięcia wynikającego z asymetrii naturalnej sieci.

W sieci skompensowanej warunek ten określić można zależnością:

$$U_{0n(w)} \geq \beta_{ns} = \left| \frac{U_{as(w)}}{d_0 + js} \right| \quad (3)$$

gdzie:

$U_{0n(w)}$ - względna wartość nastawcza kryterium zerowonapięciowego,

$U_{as(w)}$ -względna wartość napięcia wynikająca z asymetrii doziemnej sieci.

W typowych rozwiązaniach sieci SN wartości względne napięcia asymetrii mieszczą się najczęściej w zakresie od 0,001 do 0,007 i tylko w sieciach czysto napowietrznych mogą osiągać poziom 0,01. Przykładowe wartości napięcia U_{as} przedstawiono w tabelicy 1. Wartości te pomierzono w przeciągu kilku miesięcy 2004 r. w 15 stacjach rozdzielczych sieci SN. W kolumnie opisanej jako U_{as} podano zmierzone wartości bezwzględne, w kolumnie $U_{as(w)}$ – odniesione do nominalnego napięcia fazowego. W kolumnach oznaczonych „Spodziewane β_{ns} ...” podano obliczone wartości napięcia wywołanego asymetrią przy różnych wartościach s . W niektórych przypadkach, szczególnie przy $|s|=0,05$, osiągałyby one wartości około 0,1.

Silne oddziaływanie na β_{ns} w sieci skompensowanej ma współczynnik rozkompensowania sieci, stąd wypływa znane ogólne zalecenie, że nie należy stosować kompensacji w pełni dokładnej ($s = 0$). Do niedawna uważano, że w celu odstrojenia się od zjawisk związanych z asymetrią sieci, należy w sieciach skompensowanych stosować nastawy $U_{0n(w)}$ rzędu 0,2, a nawet 0,4 (w praktyce przy typowych układach filtru składowej zerowej napięcia, czyli tzw. otwartego trójkąta były to wartości od 20 do 40V). Znaczące asymetrie napięciowe występują w sieciach z dużym udziałem linii napowietrznych, natomiast linie kablowe w pewien sposób symetryzują układ admitancji doziemnych sieci przyczyniając się tym samym do zmniejszenia napięcia asymetrii. W obecnych skompensowanych sieciach SN wartości współczynnika β_{ns} najczęściej nie przekraczają wartości 0,05 i sporadycznie osiągają 0,1. W sieciach mogą wystąpić wzrosty tego współczynnika wywołane działaniem łączników (niesymetryczne zamykanie zestyków), ale są one krótkotrwałe i rzadko trwają dłużej niż kilkanaście sekund.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania i spostrzeżenia można uznać, że obecne warunki pracy skompensowanej sieci SN pozwalają na przyjmowanie nastaw dla zerowonapięciowych elementów automatyki ziemnozwarciowej na poziomie mniejszym niż dotychczas. Przyjmując

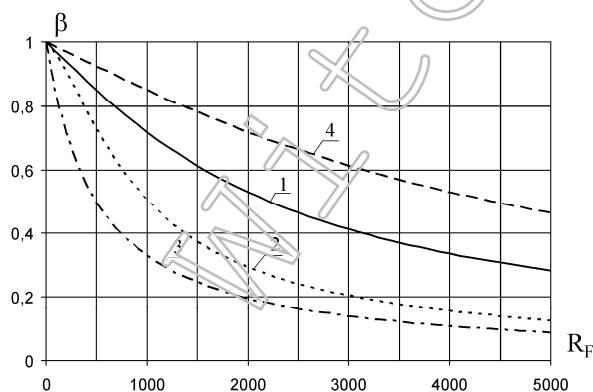
wystarczający zapas nastawy, napięcie $U_{0n(w)}$ może przyjmować wartości zmniejszone do poziomu 0,1 i nie większe niż 0,15.

Tablica 1. Wyniki pomiarów i obliczeń napięć asymetrii doziemnej dla wybranych sieci 15kV

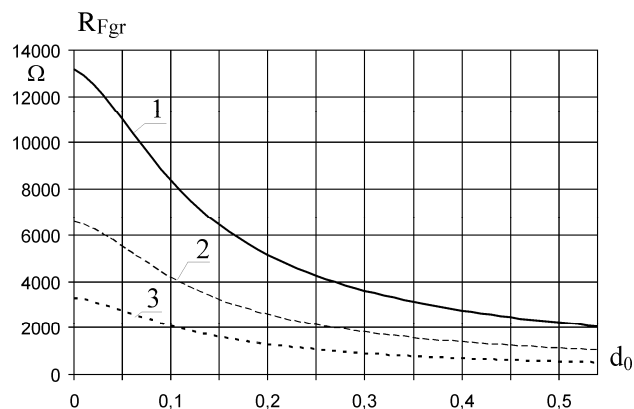
Nr sieci	U_{as} w V		$U_{as(w)}$		Spodziewane β_{ns} przy $d_0=0,05$ oraz					
	sekcja I	sekcja II	sekcja I	sekcja II	s =0,05		s =0,1		s =0,2	
					sekcja I	sek. II	sekcja I	sek. II	sekcja I	sek. II
1	45,03	45,90	0,0052	0,0053	0,0735	0,0750	0,0465	0,0474	0,0252	0,0257
2	60,62	59,75	0,0070	0,0069	0,0990	0,0976	0,0626	0,0617	0,0340	0,0335
3	17,32	29,44	0,0020	0,0034	0,0283	0,0481	0,0179	0,0304	0,0097	0,0165
4	11,26	12,99	0,0013	0,0015	0,0184	0,0212	0,0116	0,0134	0,0063	0,0073
5	38,10	30,31	0,0044	0,0035	0,0622	0,0495	0,0394	0,0313	0,0213	0,0170
6	27,71	26,85	0,0032	0,0031	0,0453	0,0438	0,0286	0,0277	0,0155	0,0150
7	30,31	33,77	0,0035	0,0039	0,0495	0,0552	0,0313	0,0349	0,0170	0,0189
8	21,65	25,11	0,0025	0,0029	0,0354	0,0410	0,0224	0,0259	0,0121	0,0141
9	31,18	27,71	0,0036	0,0032	0,0509	0,0453	0,0322	0,0286	0,0175	0,0155
10	12,99	13,86	0,0015	0,0016	0,0212	0,0226	0,0134	0,0143	0,0073	0,0078
11	17,32	22,52	0,0020	0,0021	0,0283	0,0297	0,0179	0,0188	0,0097	0,0102
12	22,52	28,58	0,0026	0,0026	0,0368	0,0368	0,0233	0,0233	0,0126	0,0126
13	41,57	44,17	0,0035	0,0033	0,0495	0,0467	0,0313	0,0295	0,0170	0,0160
14	67,55	73,61	0,0078	0,0085	0,1103	0,1202	0,0698	0,0760	0,0378	0,0412
15	50,52	52,83	0,0058	0,0061	0,0820	0,0863	0,0519	0,0546	0,0281	0,0296

4. ZAKRES WYKRYWANYCH REZYSTANCJI PRZEJŚCIA

Zupełnie oczywisty jest fakt, że wartość współczynnika β podczas zwarć doziemnych zależy głównie od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, ale również od wielu innych czynników. Pokazane jest to na rys. 1. Jeśli krzywą 1 uważać za odniesienie, to przy zmniejszeniu ωC , a innych parametrach niezmiennych, współczynnik β jest większy. Wzrost upływności w różnej postaci (może to być załączenie rezystora w punkcie neutralnym), czy zwiększenie stopnia rozstrojenia kompensacji sieci s , objawiają się zmniejszeniem β .



Rys. 1. Zależność współczynnika β od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia dla sieci o następujących parametrach: **1:** $\omega C=0,01$ S, $d_0=0,03$, $s=0,05$, **2:** $\omega C=0,01$ S, $d_0=0,2$, $s=0,05$, **3:** $\omega C=0,01$ S, $d_0=0,03$, $s=0,15$, **4:** $\omega C=0,005$ S, $d_0=0,03$, $s=0,05$



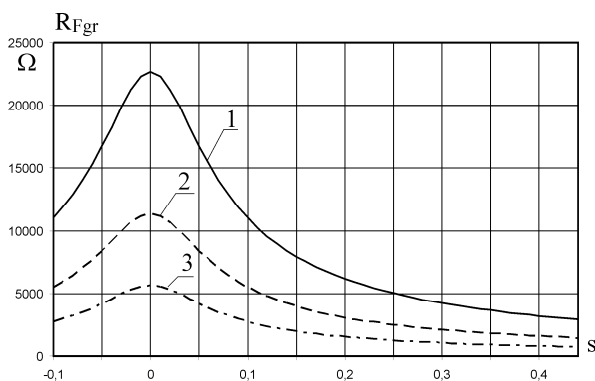
Rys.2. Zależność granicznej rezystancji przejścia R_{Fgr} od upływności sieci przy nastawie $U_{0n(w)} = \beta_{nast} = 0,15$ i przy $s=-0,1$ dla sieci: **1:** $\omega C=0,005$, **2:** $\omega C=0,01$, **3:** $\omega C=0,02$

Jeśli przyjąć, że zabezpieczenie zerowonapięciowe zostało nastawione na $U_{0n(w)} = 0,15$, to zakres wykrywanych rezystancji przejścia R_{Fgr} maleje ze wzrostem upływności sieci d_0 , a to zmniejszenie jest tym silniejsze, im większa jest pojemność doziemna sieci, co pokazano na rys.2.

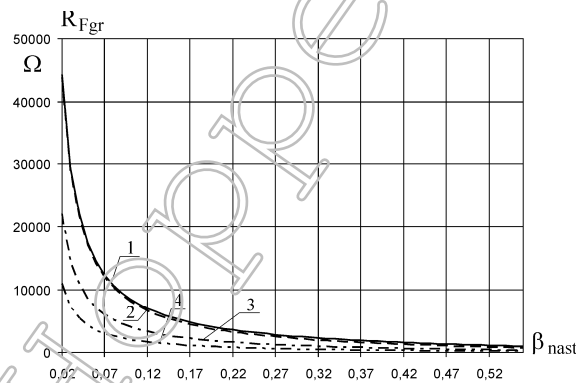
Na rys. 3 pokazano zależność R_{Fgr} od kompensacji sieci przy takiej samej nastawie. Widać wyraźnie, że im sieć jest lepiej skompensowana, czyli $s \rightarrow 0$, to zakres wykrywanych rezystancji przejścia rośnie.

Na rys. 4 pokazany został zakres wykrywanych rezystancji przejścia dla różnych sieci przy zmianie nastawy $U_{0n(w)}$ w zakresie od 0,02 do 0,57. Zależność ta jest bardzo silna, bo przy bardzo małych nastawach możliwe jest dla niektórych sieci wykrywanie zwarć o rezystancji nawet 40 k Ω .

Należy zwrócić jednak uwagę na pewną specyfikę tego wykresu – założenie stałej wartości d_0 dla sieci o różnych wartościach ωC prowadzi do wniosku, że wartość prądu AWSCz jest zależna od prądu pojemnościowego sieci.

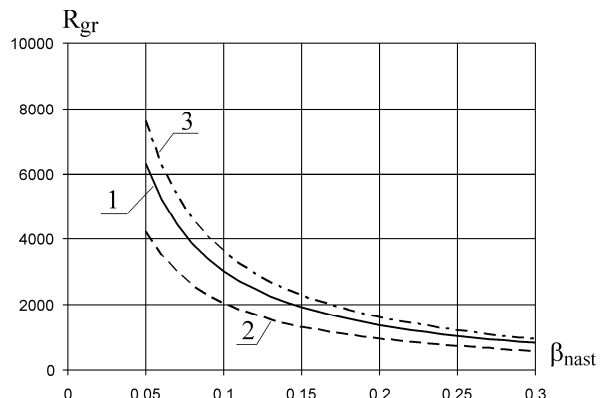
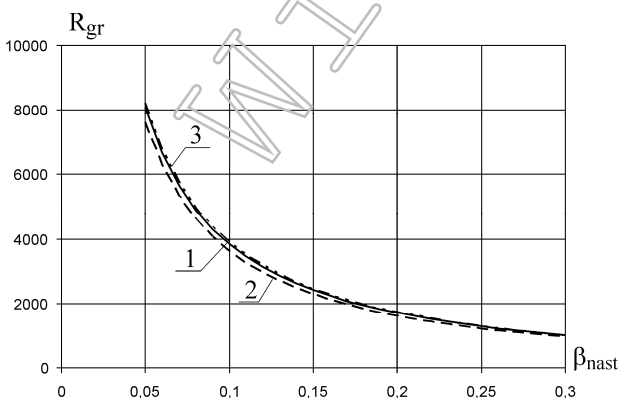


Rys.3. Zależność granicznej rezystancji przejścia R_{Fgr} od stopnia rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej przy nastawie $U_{0n(w)} = \beta_{nast} = 0,15$ oraz dla: sieci o $d_0 = 0,05$ przy 1- $\omega C = 0,01$ S; 2- $\omega C = 0,02$ S, 3- $\omega C = 0,005$ S



Rys.4. Zależność granicznej rezystancji przejścia R_{Fgr} wykrywanej przez zabezpieczenia admitancyjne od nastawy $U_{0n(w)} = \beta_{nast}$ dla sieci o $s = -0,1$ oraz: 1 - $\omega C = 0,01$ S, $d_0 = 0,05$, 2 - $\omega C = 0,005$ S, $d_0 = 0,2$, 3 - $\omega C = 0,01$ S, $d_0 = 0,2$, 4 - $\omega C = 0,02$ S, $d_0 = 0,2$

Stąd dla bardziej praktycznej interpretacji wykonano dodatkowe krzywe pokazane na rys. 5 i 6. Przedstawiają one wykrywane rezystancje przejścia R_{Fgr} dla możliwego w praktyce nastawienia zabezpieczenia zerowonapięciowego w przedziale od 0,05 do 0,3 (dla przeważającej liczby zabezpieczeń oznacza to odpowiednio nastawę od 5 do 30 V). Wykresy sporządzono dla trzech sieci o susceptancji ωC odpowiednio równej 0,01, 0,2 i 0,005 mS. Dla sieci 15 kV odpowiada to prądom pojemnościowym 86,6, 173,2 oraz 43,3 A. Każda krzywa jest wykonana dla innego współczynnika upływności sieci, ponieważ przyjęto stałą wartość wymuszanej składowej czynnej na poziomie 20 A.



Rys.5. Zależność granicznej rezystancji przejścia od

Rys.5. Zależność granicznej rezystancji przejścia od

nastawy zabezpieczenia ziemnozwarciowego dla sieci o $s=0,05$ oraz: 1- $\omega C=0,01$, $d_0=0,23$, 2- $\omega C=0,02$, $d_0=0,115$, 3- $\omega C=0,005$, $d_0=0,46$

nastawy zabezpieczenia ziemnozwarciowego dla sieci o $s=0,2$ oraz: 1- $\omega C=0,01$, $d_0=0,23$, 2- $\omega C=0,02$, $d_0=0,115$, 3- $\omega C=0,005$, $d_0=0,46$

Przy współczynniku rozstrojenia $|s|=0,05$ (niezależnie od tego, czy sieć jest przekompensowana czy niedokompensowana) wartość granicznej rezystancji przejścia w praktyce nie zależy od prądu pojemnościowego sieci, a tylko od nastawy zabezpieczenia zerowonapięciowego. W badanym zakresie β_{nast} waha się od około 1 do aż 8 k Ω .

Przy współczynniku rozkompensowania $|s|=0,2$ wartość granicznej rezystancji przejścia zależy w pewnym stopniu od prądu pojemnościowego, ale znacznie większy wpływ ma nastawa zabezpieczenia zerowonapięciowego. W badanym zakresie β_{nast} waha się od około 1 do 4 – 8 k Ω .

W Polsce obecnie używa się nastaw w pobliżu 0,15 – 0,25, co wg autorów jest w większości przypadków nadmierną ostrożnością wobec spodziewanych wartości napięcia w obwodach składowej zerowej pochodzącego od asymetrii sieci.

Wykonywane pomiary tego napięcia w wielu sieciach wykazywały w ostatnim czasie wartości w zakresie 1 – 5 V, ale w pojedynczych przypadkach sięgały one wartości większych, nawet 12 V. Były to jednak sytuacje wyjątkowe i najczęściej spowodowane nietypowymi sytuacjami technicznymi.

Przed wprowadzeniem nastaw można dokonywać kontroli wartości tego napięcia, co w sytuacjach kiedy rozdzielnie są wyposażone terminale polowe, jest nadzwyczaj proste.

Szczególnie w sieciach, gdzie kompensacja jest prawidłowo prowadzona, czyli istnieje przekompensowanie w granicach 5-15 %, nie ma niebezpieczeństwa wzrostu napięcia wywołanego asymetrią doziemną. Pewien problem może być w stacjach wyposażonych w kompensację automatyczną – płynną, ponieważ podczas działania regulatora może pojawić się wartość maksymalna (rezonansowa) napięcia.

5. WNIOSKI

1. Współczynnik β , a więc także wartość składowej zerowej napięcia, podczas zwarcia doziemnego w sieci skompensowanej zależy od szeregu parametrów sieci, a bardzo silnie od wartości rezystancji przejścia. Z parametrów sieci mocno oddziałują współczynniki tłumienności d_0 i rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s .
2. Nastawa zabezpieczeń zerowonapięciowych musi zapewniać odstrojenie od napięcia pojawiającego się w obwodach składowej zerowej napięcia wywołanego asymetrią doziemną sieci. Wartość tego napięcia we współczesnych sieciach tylko wyjątkowo przekracza 5 V.
3. Zmniejszając nastawę kryteriów zerowonapięciowych używanych w autonomicznych zabezpieczeniach działających na sygnalizację doziemienia oraz jako elementy rozruchowe dla wielokryterialnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych zwiększa się zakres wykrywanych rezystancji przejścia, co wobec zwiększającej się szczególnie w okresach letnich rezystywności gruntów zwiększa bezpieczeństwo w liniach napowietrznych.
4. Autorzy zalecają w praktyce zmniejszanie nastawy zerowonapięciowej do 0,1 (w jednostkach względnych), a nawet 0,06-0,08, co w praktyce odpowiada nastawom 10, 6 i 8 V.

LITERATURA

- [1] Lorenc J.: **Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe**. Monografia wydana pod patronatem Komitetu Elektrotechniki PAN. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, listopad 2007 r.
- [2] PN-E-05115: Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.