

**Konferencja „Nowoczesne Rozwiązania w Budownictwie Sieciowym”, SEP Kalisz,  
Ostrów Wlkp., styczeń 2012 r.**

dr inż. Witold Hoppel  
Politechnika Poznańska  
Instytut Elektroenergetyki

**Dodatkowa ochrona przeciwporażeniowa słupów linii średniego napięcia**

**1. Stan prawny**

W Polsce słupy betonowe są w zasadzie stosowane do budowy linii napowietrznych średniego i niskiego napięcia. Jako linie średniego napięcia rozumiane będą tutaj linie o napięciach w zakresie powyżej 1 do 45 kV. W Polsce dotyczy to głównie linii 15 i 20 kV, a sporadycznie 6 oraz 30 kV.

Linie SN powinny być projektowane i budowane wg zaleceń wieloarkuszowej normy „Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 do 45 kV włącznie”. [1].

Ze względu na fakt, że aktualnie prowadzone są prace nad normą obejmującą wszystkie linie napowietrzne powyżej 1 kV i przewiduje jej ustanowienie do 2012 roku, w Polsce nie opracowano Normatywnych Warunków Krajowych (NNA) dla normy [1]. Jako akt prawny związany z zagadnieniem ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej można więc traktować normę [2].

Tytuł normy wskazuje, że dotyczy ona linii o napięciu powyżej 45 kV, jednakże należy przypuszczać, że zapisy dotyczące układów uziemiających w przygotowywanej normie będą takie same dla linii do i powyżej 45 kV.

W zakresie definicji pojęć z zakresu ochrony przeciwporażeniowej można opierać się na zapisach normy [3], która nie dotyczy linii. Norma [3] została wycofana i zastąpiona dwoma normami dotychczas nie przetłumaczonymi dotychczas na język polski, przy czym z zagadnieniami dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej związana jest norma [6]. Przystudiowanie spisu treści nowej normy upoważnia do przypuszczenia, że nie odpowiada części normy poprzedniej. Stąd definicje zaczerpnięte zostaną z tej nieaktualnej już normy.

Wg normy [2] słup to konstrukcja podtrzymująca przewody elektroenergetycznych linii napowietrznych. Trzeba uściślić, że pojęcie „słup” oznacza konstrukcję wsporczą, na której poza izolatorami nie ma innej aparatury, szczególnie łączeniowej. Jeśli na konstrukcji

wsporczej jest aparatura łączeniowa np. odłącznik, to już jest stacja elektroenergetyczna i podlega normie [3]. Nie ma wątpliwości, że stacja elektroenergetyczna musi mieć sprawdzone warunki ochrony przeciwporażeniowej. Bardziej zawiły jest problem słupa, na którym są tylko odgromniki. Z punktu widzenia ochrony odgromowej rezystancja ich uziemienia nie może przekroczyć 10  $\Omega$ . Wydaje się jednak, że jeśli taki słup z odgromnikami nie znajduje się w miejscu, gdzie jest wymagane uziemienie ochronne, nie trzeba analizować dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej. Przykładem tego przypadku są słupy krańcowe z głowicami kablowymi stosowane przy przejściu z linii kablowej w napowietrzną lub odwrotnie.

W artykule używać się będzie pojęć „sieć z izolowanym punktem neutralnym” i „sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor” za normą [3] nie wnikając w zagadnienie, czy poprawniejszymi polskimi wyrażeniami są sformułowania: „sieć o izolowanym punkcie neutralnym” i „sieć o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor”. Natomiast przy tej okazji zauważa się, że wyrażenie stosowane czasem „sieć izolowana” w stosunku do określenia sposobu pracy punktu neutralnego jest całkowicie niepoprawne. Można żartobliwie podać, że każda sieć jest izolowana, bo bez izolacji np. w stosunku do ziemi wystąpiłyby doziemienia.

## 2. Uwagi wstępne

Słupy betonowe należy traktować, jako słupy wykonane z materiału nie izolacyjnego, czyli podlegające ocenie napięć dotykowych rażeńowych. K. Wołkowiński [4] podaje, że rezystywność betonu w zależności od składu, wilgotności, temperatury i wieku waha się w granicach od 20 do 1000  $\Omega \cdot m$  czyli jest porównywalna z rezystywnościami gruntów. W książce nie są uwzględnione obecne technologie wykonywania słupów, przy czym w okresie pisania książki były już stosowane słupy strunobetonowe. Warto by przeprowadzić podobne badania dla betonów stosowanych we współczesnych słupach wirowanych.

Wg [2] projektowany układ uziemiający powinien spełniać następujące warunki:

- a) Zapewnić wytrzymałość mechaniczną i odporność na korozję.
- b) Wytrzymać pod względem termicznym największy prąd doziemny.
- c) Nie dopuścić do pogorszenia właściwości lub uszkodzenia urządzeń.
- d) Zapewnić bezpieczeństwo ludzi poprzez ograniczenie wartości napięć pojawiających się podczas doziemień na częściach uziemionych.
- e) Zapewnić określoną niezawodność linii.

Pewna wątpliwość autora dotyczy sformułowania podpunktu d. Bezpieczeństwo musi dotyczyć wszystkich części słupa, nie tylko uziemionych. Interpretując dosłownie ten punkt można by dojść do stwierdzenia, że bezpieczeństwo części przewodzących dostępnych słupa można zapewnić przez ich nieuziemianie.

Oczywiście inne środki dotyczą części czynnych, które są pod napięciem. Niniejszy artykuł tego zagadnienia nie dotyczy.

Projektując i wykonując układ uziemiający słupa należy wziąć pod uwagę nie tylko względy dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej, ale i pozostałe wymienione powyżej w podpunktach a, b, c oraz e.

Zauważa się, że nie wymienia się warunków związanych z podstawową ochroną przeciwporażeniową, ale w liniach napowietrznych jest ona związana z osiągnięciem niedostępności części czynnych - czyli przewodów.

Układ uziemiający [2] jest to lokalnie ograniczony system elektryczny połączonych elektrycznie uziomów, przewodów uziemiających i przewodów wyrównawczych (lub części metalowych spełniających te same funkcje, na przykład fundamentów słupów, zbrojeń, metalowych powłok kabli).

Takim elektrycznym połączeniem nie jest połączenie przez beton, a połączenie metaliczne. Czyli zbrojenie słupa, jeśli nie posiada metalicznego połączenia z np. poprzecznikiem czy taśmą uziemiającą, uziomem, nie stanowi części układu uziemiającego. Stąd słup betonowy powinien posiadać górny zacisk uziemiający umożliwiający łatwe wykonanie takiego połączenia.

Beton jest wystarczającym przewodnikiem, aby podczas zwarcia doziemnego na słupie przy jego dotknięciu przepłynął przez człowieka prąd zagrażający jego zdrowiu lub życiu. Z punktu widzenia dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej należy więc traktować go jako materiał przewodzący.

### **3. Poprzecznik słupa**

Jeśli poprzecznik słupa wykonany jest z materiału przewodzącego powinien być połączony elektrycznie ze zbrojeniem słupa lub innym elementem umożliwiającym spływ prądu ziemnozwarciowego w kierunku ziemi.

Taki zabieg wynika nie z potrzeb ochrony przeciwporażeniowej, ale znanego od dawna zagrożenia, że podczas przepływu prądu ziemnozwarciowego z poprzecznika do słupa (nie wnikając w to, czy do zbrojenia, betonu, czy bednarki uziemiającej poprowadzonej na zewnątrz słupa) poprzez beton następuje wydzielenie dużej ilości ciepła i powstaje możliwość

uszkodzenia w tym miejscu. W konstrukcjach strunobetonowych nie jest zalecane wykorzystywanie strun do wykonywania uziemienia, stąd dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie dodatkowych prętów nie stanowiących elementów wytrzymałościowych i połączenie zacisków uziemiających właśnie do nich. Przykładem są tutaj słupy produkowane przez WIRBET.

Drugie zagadnienie związane z poprzecznikiem jest następujące: czy z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej metalowy poprzecznik powinien być uziemiony czy nie - zagadnienie dotyczy słupów, dla których wymagane jest uziemienie ochronne. Norma [3], która wprawdzie nie dotyczy słupów, mówi, że ochronie dodatkowej podlegają części przewodzące dostępne.

Definicja części przewodzącej dostępnej jest następująca: Część przewodząca urządzenia elektrycznego, która może być dotknięta i która normalnie nie jest częścią czynną, ale może znaleźć się pod napięciem w wyniku uszkodzenia.

Czy poprzecznik słupa może być dotknięty? Na pewno przez osoby niewyposażone w dodatkowy sprzęt - nie. A wyposażone? Rozporządzenie dotyczące bezpieczeństwa reguluje, że prace wykonywane bliżej niż 0,6 m od części czynnych to prace pod napięciem, a w odległości 0,6 - 1,4 m - w pobliżu napięcia. Poprzecznik jest bliżej przewodów fazowych niż te odległości, czyli nie wolno go dotknąć, jeśli linia jest pod napięciem (nie dotyczy prac pod napięciem).

Rozważanie to jest tylko teoretyczne, bo i tak ze względów konstrukcyjnych poprzecznik ma być połączony ze zbrojeniem lub inną częścią umożliwiającą spływ prądu do ziemi.

#### **4. Dolny zacisk uziemiający**

Połączenie poprzecznika z górnym zaciskiem uziemiającym lub zbrojeniem powoduje, że podczas zwarcia doziemnego polegającego na uszkodzeniu izolatora lub opadnięciu przewodu na poprzecznik, na dolnym zacisku uziemiającym może pojawić się większe napięcie w porównaniu z tym, kiedy nie jest on połączony. Sformułowanie „większe napięcie” jest obrazowe - należy mówić, że taki słup stwarza większe zagrożenie porażeniowe, bo dotknięcie dolnego zacisku uziemiającego jest wówczas bardziej niebezpieczne. Z punktu widzenia przepisów dla słupów nie wymagających uziemień ochronnych nie ma potrzeby analizowania napięć dotykowych w zależności od konstrukcji słupa czyli tego, czy poprzecznik jest połączony, czy nie.

Zagrożenie wydzielaniem ciepła występuje również w dolnej części słupa, jeśli nie jest on wyposażony w uziemienie ochronne. Jeśli jest wyposażony - uziemienie musi być dobrane na ciepłne skutki przepływu prądu, co dokonuje się w postaci doboru minimalnego przekroju z tablic, bez wykonywania szczegółowych obliczeń.

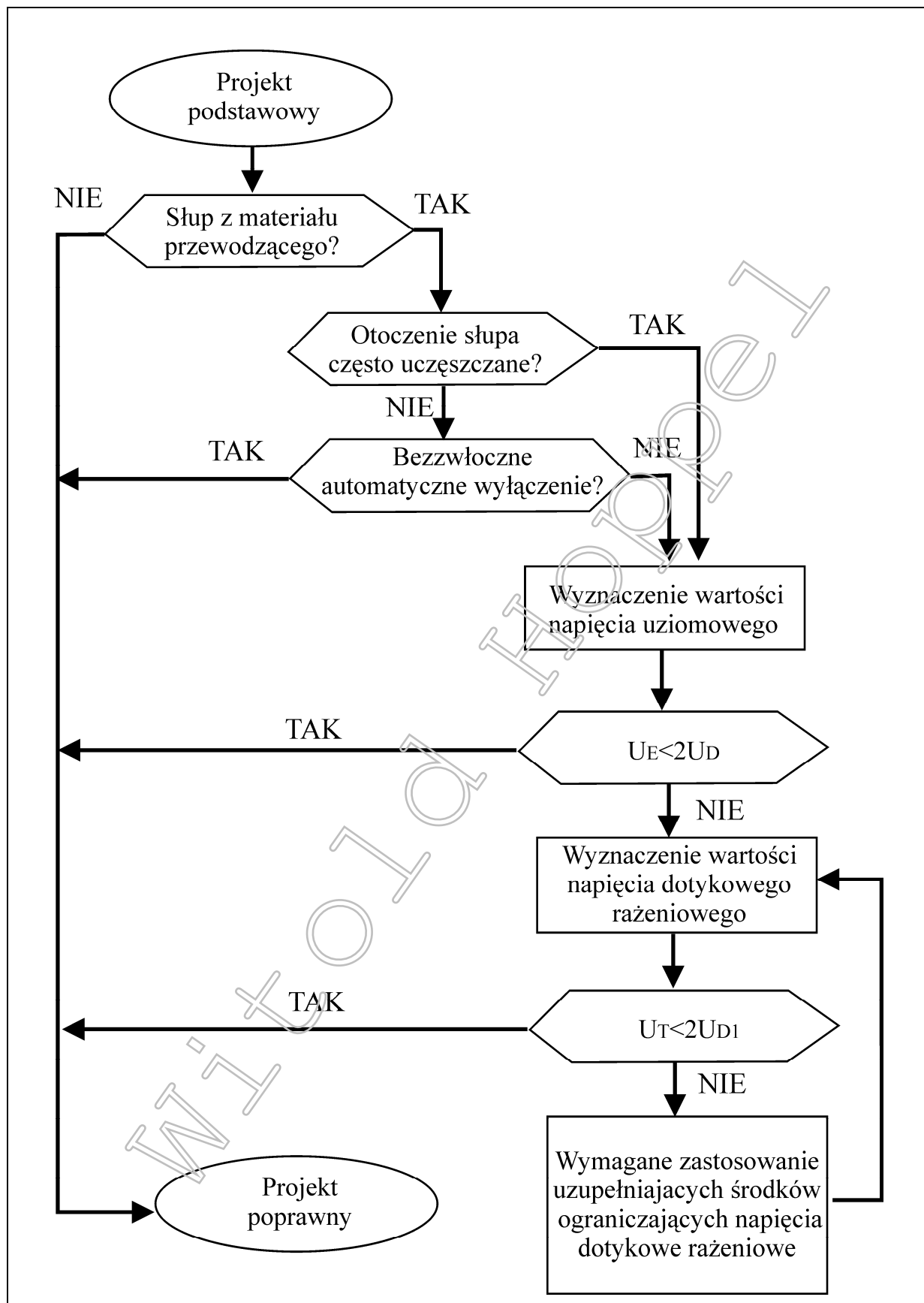
Jeśli zwarcie doziemne jest na słupie wyposażonym w uziemienie ochronne, to rezystancja tego uziemienia w sieciach skompensowanych i pracujących z izolowanym punktem neutralnym praktycznie nie wpływa na wartość prądu ziemnozwarciowego (rezystancja musi być w każdym przypadku mniejsza od  $30 \Omega$ ).

Jeśli zwarcie doziemne jest na słupie nie wyposażonym w uziemienie ochronne, wartość prądu ziemnozwarciowego będzie zawsze zależeć od rezystancji uziemienia słupa - ale rozumianej jako rezystancja przejścia ze zbrojenia poprzez beton do gruntu.

Rzadko wydzielanie ciepła będzie groźne - ponieważ obecnie nie praktykuje się świadomej pracy linii z doziemieniem. Istnieją jeszcze linie wyposażone w zabezpieczenia działające na sygnał (zerowonapięciowe), ale doziemienie musi być natychmiast lokalizowane i wyłączane możliwie szybko. Uszkodzenie słupa może nastąpić tylko wówczas, gdy nie zadziałają zabezpieczenia ziemnozwarciowe, co się zdarza, ale obecnie nadzwyczaj rzadko np. przy bardzo dużych rezystancjach przejścia w gruntach o rezystywności orientacyjnie przekraczającej  $1000 \Omega \cdot m$ . Rozumie się tutaj zabezpieczenia ziemnozwarciowe sprawne technicznie, a brak działania wynikający ze zbyt słabych sygnałów pomiarowych przy występujących bardzo dużych rezystancjach przejścia.

## **5. Algorytm projektowania uziemienia ochronnego słupa i napięcie uziomowe**

W normie [2] znajduje się algorytm opisany jako „Projektowanie układu uziemiającego ze względu na dopuszczalne napięcia rażeniowe dotykowe” przedstawiony na rys.1. Dla potrzeb tego algorytmu należy wyznaczyć napięcie uziomowe  $U_E$ . Autor pozwala sobie zauważyć, że w algorytmie tym w jednym z predykatów postawione jest pytanie: *Bezzwłoczne automatyczne wyłączenie?*. W praktyce zawsze wyłączenie jest zwłoczne, nie stosuje się zabezpieczeń ziemnozwarciowych bezzwłocznych, chociaż ta zwłoka w zabezpieczeniach linii SN jest bardzo krótka i mieści w granicach 0,2 – 2 s (pamiętając o dodatkowej zwłoce powodowanej przez AWSCz). Dosłowna odpowiedź na to pytanie powoduje, że ocenę zagrożenia porażeniowego trzeba by wykonywać dla wszystkich słupów, również tych znajdujących się w miejscach mało uczęszczanych. Sugeruje się, aby przyjmować to pytanie w postaci: *Czy linia jest wyposażona w zabezpieczenia ziemnozwarciowe działające na jej wyłączenie?*



Rys.1. Projektowanie układu uziemiającego ze względu na dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe

Z algorytmu wynika, że ochronę przed przekroczeniem wymaganych napięć rażeniowych powinny być wyposażone słupy, które znajdują się w miejscach uczęszczanych wg normy [2].

Ponieważ podana definicja miejsc uczęszczanych jest mało precyzyjna, wskazanie słupów, które powinny mieć sprawdzone warunki dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej spoczywa na inwestorze.

W praktyce słupy takie może wskazać projektant i uzyskać akceptację inwestora na etapie zatwierdzania projektu.

Nie zostało użyte pojęcie, że słupy te muszą być wyposażone w uziomy ochronne, a mogą być zastosowane inne dopuszczone przez normę środki np. warstwy izolacyjne. Jednakże w polskich warunkach pierwszym środkiem, który należy zastosować dla zmniejszenia napięć rażeniowych dotykowych powinien być uziom ochronny w postaci uziomu otokowego, który jest wystarczający dla zapewnienia bezpieczeństwa i spełnienia wymagań algorytmu.

Z algorytmu wynika kilka innych wniosków:

a) Słupy wykonane z materiału izolacyjnego nie wymagają dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej. Jeśli na słupie jest odłącznik i jego elementy wymagają uziemienia ochronnego, to podlega on ocenie wg normy PN-E-05115, ewentualnie po przetłumaczeniu normy [6].

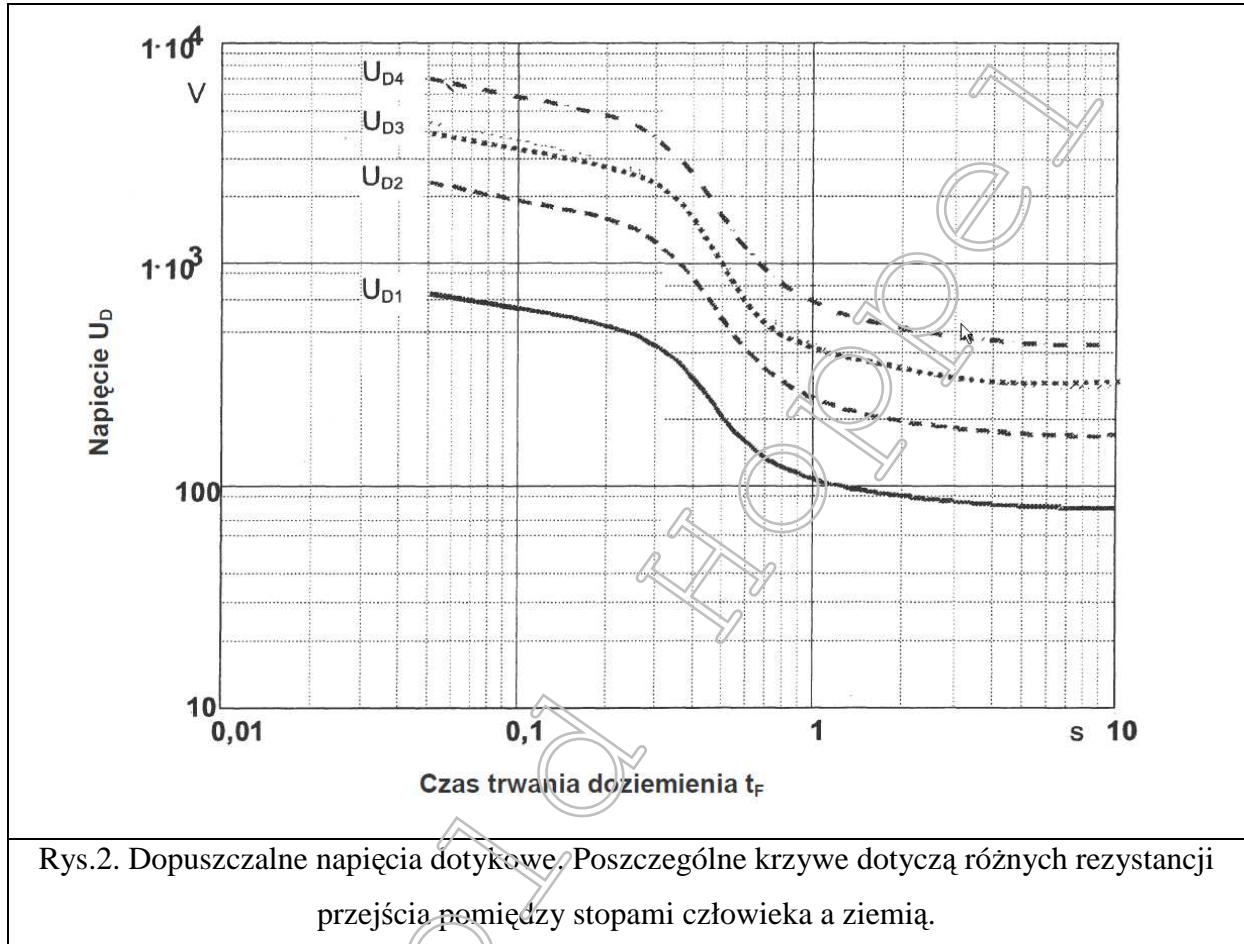
b) Ocenę zagrożenia porażeniowego można wykonać w oparciu o analizę napięcia uziomowego i porównanie z wartością  $2U_D$ .  $U_D$  jest określone wykresem pokazanym na rys.2, który jest zaczerpnięty z normy [2]. Należy wybrać krzywą w zależności od rodzaju gruntu. Pobieżne obliczenia dla przeciętnych przypadków wykazują, że wynik tej oceny jest przeważnie niekorzystny i wymagane są dalsze analizy.

c) Przeważnie trzeba będzie badać na drodze obliczeniowej lub pomiarowej, czy spełniony jest warunek  $U_T < U_{D1}$ , w którym  $U_D$  jest napięciem dotykowym rażeniowym obliczonym lub zmierzonym.

Poszukiwania autora wskazują na to, że nikt w Polsce nie posiada programu umożliwiającego obliczanie napięć dotykowych rażeniowych przy słupach, co jest niekorzystne. Projektanci posługują się często albumem uziemień dla słupów w liniach SN pracujących w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Album ten został opracowany w oparciu o założenia do normy PN-E-05115, która dotyczy stacji, a nie linii. Wymagania w niej zawarte są ostrzejsze, w związku z czym uziomy wykonane wg tej pozycji są mocno przewymiarowane.

Dla obliczenia napięcia uziomowego potrzebna jest wartość prądu uziomowego.

Wzory podane punkcie H.4.3 normy [2] dotyczą wyraźnie linii z przewodami odgromowymi. W Polsce takie przewody posiadają linie o napięciu 110 kV i wyższym. W liniach o napięciu do 45 kV przewodów odgromowych się nie stosuje i wzory te są nieużyteczne.



Napięcie uziomowe  $U_E$  dla słupów linii SN, w których nie ma przewodów odgromowych należy obliczać wg wzoru:

$$U_E = I_E * R_E \quad (1)$$

w którym:

$R_E$  - rezystancja uziemienia słupa,

$I_E$  - prąd uziomowy, przy czym:

$$I_E = r * I_{k1} \quad (2)$$

gdzie:

$r$  - współczynnik redukcyjny,

$I_{k1}$  - prąd jednofazowego zwarcia z ziemią, prąd doziemny.



W normie wyraźnie jest zaznaczone, że rozpatrując warunki dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej w liniach nie uwzględnia się podwójnych zwarć doziemnych. Zdarzają się jeszcze pytania od mniej doświadczonych projektantów dotyczące tego zagadnienia z podkreśleniem, że wówczas wystąpi znacznie większy prąd uziomowy i prawdopodobnie przekroczenie dopuszczalnych napięć rażeniowych. W dodatkowej ochronie porażeniowej tak stacji jak i słupów, nie uwzględnia się tej sytuacji biorąc pod uwagę małe prawdopodobieństwo jej wystąpienia. Autorowi jest znany incydentalny przypadek, gdzie w sieci skompensowanej 15 kV z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi działającymi na sygnał, prawidłowym działaniu zabezpieczeń od skutków zwarć międzyfazowych i właściwych rezystancjach uziemień stacji SN/nn doszło do porażenia zwierząt gospodarskich. Jedno ze zwarć doziemnych było na słupie linii, drugie w stacji SN/nn.

Współczynnik redukcyjny dla linii bez przewodów odgromowych wynosi 1 z wyjątkiem słupów, na których następuje przejście linii kablowej w napowietrzną. Warunkiem zastosowania współczynnika redukcyjnego jest ciągłość powłoki lub żyły powrotnej kabla od stacji zasilającej do słupa, dla którego jest określane napięcie uziomowe. Redukcyjne działanie występuje również w sytuacjach, gdzie jest „wstawka” kablowa w linię napowietrzną, ale nie ma opracowanych zasad jego obliczania, stąd sugeruje się, że należy je wówczas pominąć.

## **6. Prąd zwarcia doziemnego i prąd uziomowy**

Dla sieci z punktem neutralnym izolowanym lub skompensowanej bez AWSCz wartość prądu  $I_{K1}$ , który należy wstawić do wzorów 1 lub 2 jest niezmienna w czasie zwarcia doziemnego, a jej obliczenie łatwe. Dla mniej zorientowanych czytelników podaje się, że AWSCz to automatyka wymuszania składowej czynnej dla potrzeb zabezpieczeń ziemnozwarciowych, najczęściej wartość tego prądu wynosi od 15 do 25 A.

W sieciach skompensowanych z AWSCz pojawia się problem sposobu uwzględniania zmiany prądu ziemnozwarciowego po załączeniu wymuszania. W pierwszym okresie, który trwa od 1 do 3 s (w zależności od zakładu dystrybucji) prąd doziemny wynika tylko ze stopnia skompensowania sieci. W drugim, który zależy od opóźnienia czasowego zabezpieczeń ziemnozwarciowych, przeważnie od 0,5 do 1,5 s, prąd doziemny jest powiększany przez AWSCz. W jednym z polskich zakładów dystrybucyjnych AWSCz jest załączana natychmiast, stąd nie ma zmiany prądu doziemnego w czasie zwarcia. Normy praktycznie tego problemu nie zauważają.

W sieciach skompensowanych zakłada się przy tym, że prąd resztkowy ma charakter bierny, zaniedbuje się więc przy tym upływność sieci i wyższe harmoniczne, co dla dokładności obliczeń uziomów jest zupełnie wystarczające.

Dla sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor występuje wpływ dwóch elementów:

- impedancji wzdłużnej linii dla składowej zerowej,
- rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, czyli w przypadku słupów jego rezystancji uziemienia.

Można przyjąć, że uziemienie ochronne powinno mieć rezystancję nie większą niż 30  $\Omega$ , co nie wynika z żadnego aktu prawnego, ale tradycyjnie jest przyjęte jako granica rezystancji elementu, który można uważać za uziom. W sieciach pracujących z izolowanym punktem neutralnym i sieciach skompensowanych rezystancja przejścia w granicach od 0 do 30  $\Omega$  praktycznie nie wpływa na wartość prądu doziemnego, a dla sieci skompensowanych z AWSCz wpływa tak nieznacznie, że nie ma potrzeby jej uwzględniania. Bardzo orientacyjnie dla typowych sieci rezystancja przejścia o wartości 30  $\Omega$  powoduje zmniejszenie prądu ziemnozwarciowego o:

- do 5 % w sieciach z izolowanym punktem neutralnym,
- poniżej 1 % w sieciach skompensowanych bez AWSCz,
- poniżej 7-10 % w sieciach z AWSCz o wartości 20 A (jedno pole potrzeb własnych),
- poniżej 15-20 % w sieciach z AWSCz o wartości 40 A (połączone dwa pola potrzeb własnych),

Do obliczeń pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego sieci  $I_C$  oraz prądu zwarcia jednofazowego przyjmuje się najbardziej niekorzystny z tego punktu widzenia wariant, w praktyce będzie to najczęściej suma  $I_C$  dwóch sekcji – dla stacji dwusekcyjnych jest to oczywiste, dla stacji o większej liczbie sekcji należy przeanalizować możliwość ich łączenia. Mogą być tylko wyjątkowe sytuacje, gdzie nie dopuszcza się do łączenia sekcji i pracy stacji z jednym transformatorem 110 kV/SN. Jednakże sekcja pozbawiona zasilania od strony 110 kV rozpatrywanej stacji powinna mieć zasilanie awaryjne linią SN. Najbardziej niekorzystny wariant dla wartości pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego powinien wówczas uwzględnić połączenie dwóch sieci SN. Należy również przewidzieć, że po połączeniu sekcji włączać się będą dwa układy AWSCz. Są nieliczne przypadki, że po połączeniu sekcji włącza się tylko układ AWSCz w tej sekcji, która jest zasilana z transformatora 110 kV/nn. Należy wspomnieć, że takie rozwiązanie ogranicza dość znacząco prądy zwarć jednofazowych

i przyczynia się do złagodzenia wymagań odnośnie uziemień ochronnych słupów, a także wymaganych rezystancji uziemienia stacji SN/nn.

Dla poszczególnych sposobów pracy punktu neutralnego można przyjąć następujące zasady:

a) w sieci z izolowanym punktem neutralnym jako prąd zwarcia doziemnego  $I_{K1}$  przyjmuje się  $I_C$ ,

b) w sieci skompensowanej bez automatyki AWSCz, co w Polsce spotyka się nadzwyczaj rzadko, jest kilka sposobów postępowania:

- jeśli dokładnie znane są parametry sieci i nastawienie dławika zaczepowego, to można skorzystać z zależności:

$$I_{K1} = |I_C - I_L| \quad (3a),$$

ale nie mniej niż  $0,1I_C$ ,

- jeśli zastosowana jest kompensacja płynna, to zaleca się przyjmowanie:

$$I_{K1} = 0,1I_C \quad (3b),$$

- jeśli jest znany tylko pojemnościowy prąd zwarcia sieci bez nastaw dławika zaczepowego, dla ostrożności lepiej stosować dawną zasadę:

$$I_{K1} = 0,2I_C \quad (3c),$$

c) w sieci skompensowanej z automatyką AWSCz należy zastosować zasady podane w punkcie b, ale uwzględniając prąd czynny, czyli odpowiednio:

$$I_{K1} = \sqrt{I_{AWSCz}^2 + (I_C - I_L)^2} \quad (4a),$$

$$I_{K1} = \sqrt{I_{AWSCz}^2 + (0,1I_C)^2} \quad (4b),$$

$$I_{K1} = \sqrt{I_{AWSCz}^2 + (0,2I_C)^2} \quad (4c).$$

Często przy obliczeniach dla sieci skompensowanej nie uwzględnia się prądu wymuszanego przez układ AWSCz, co jest znacznym uproszczeniem. Zawiera się on w granicach 15-25 A, rzadko wynosi 40 A (rezystor typu AWP-40), a w pojedynczych rozwiązaniach nawet około 100A. Należy pamiętać również o zasadzie podanej poprzednio, że należy w danej sieci wybrać największy prąd zwarcia doziemnego, czyli jeśli występuje możliwość połączenia sekcji i równoległej pracy dwóch pól potrzeb własnych, to prąd AWSCz należy przyjąć o podwójnej wartości.

Uwzględnienie prądu AWSCz znacznie zaostrza warunki dla uziemień, ponieważ nie ma metody uwzględnienia zmiany wartości prądu zwarcia doziemnego czy napięcia

razeniowego w czasie trwania zwarcia. Trzeba wybrać warunek ostrzejszy, stąd obliczone napięcia uziomowe i rażeniowe będą zawyżone.

W sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, jeśli zaniedbuje się wpływ impedancji wzdłużnej linii i rezystancji przejścia, prąd zwarcia doziemnego do obliczeń można z wystarczającą dokładnością przyjmować wg wzoru:

$$I_{K1} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (5)$$

gdzie:

$I_R$  – znamionowy prąd ziemnozwarciowy rezystora lub przy równoległej pracy pól potrzeb własnych - rezystorów uziemiających. Prąd taki płynie przez rezystor tylko przy zwarciu metalicznym czyli bezrezystancyjnym.

Uwzględniając wpływ rezystancji przejścia zależność na prąd zwarcia doziemnego przyjmuje postać:

$$I_{K1} = \beta \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (6)$$

w której:

$$\beta = \frac{1}{1 + R_F \omega C_s (d_0 - js)} \quad (7)$$

oraz

$R_F$  – rezystancja przejścia w miejscu zwarcia,

$\omega$  – pulsacja sieci,

$d_0$  – upływność sieci, dla sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor z wystarczającą dokładnością wyrażona wzorem  $d_0 = I_R / I_C$ ,

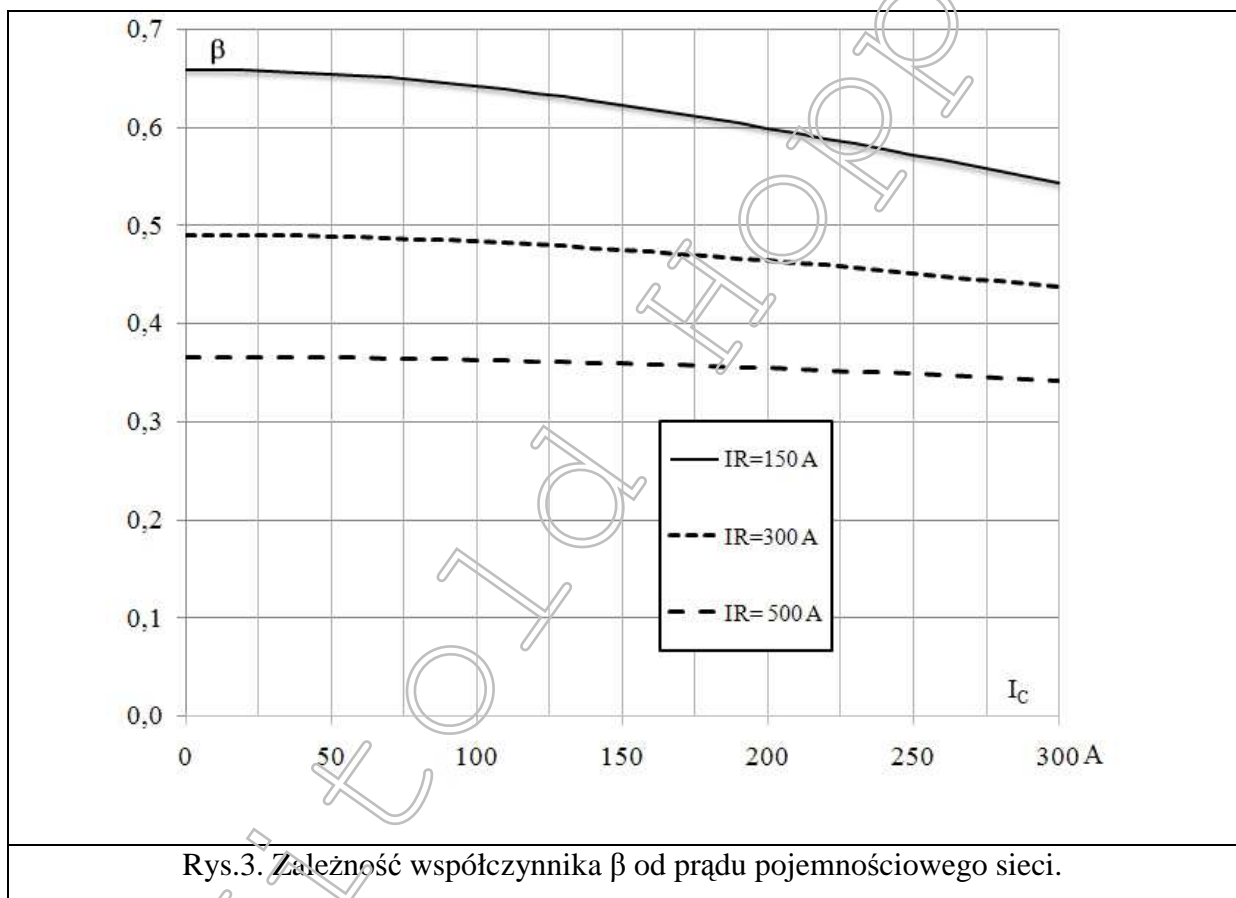
$s$  – stopień rozkompensowania sieci, dla sieci z rezystorem wynosi -1,

$C_s$  – zastępcza doziemna pojemność sieci określona wzorem  $C_s = I_C / U_{ph}$ , gdzie  $U_{ph}$  jest napięciem fazowym sieci.

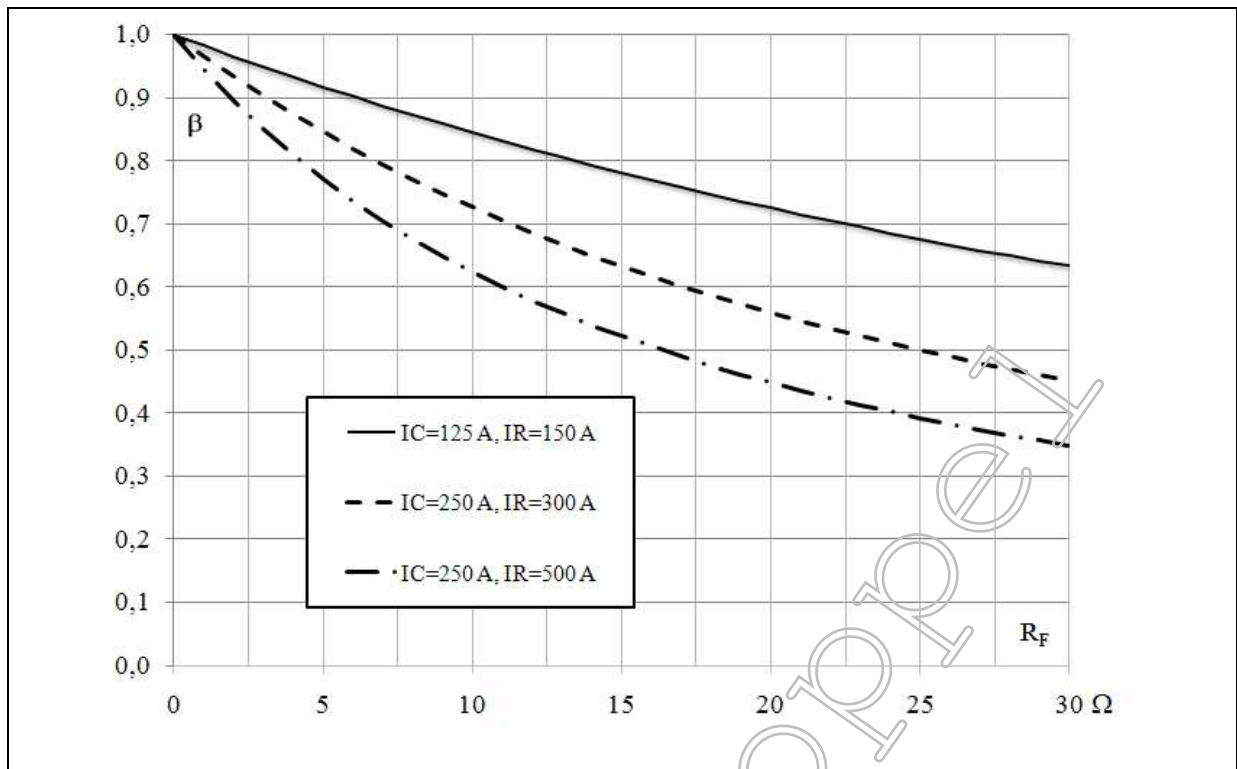
Wpływ rezystancji przejścia  $R_F$  pokazany jest na rys. 3 i 4. Jeśli zwarcie doziemne jest na słupie wyposażonym w uziom ochronny, to przy dobrym połączeniu poprzeczника poprzez zbrojenie z dolnym zaciskiem uziemiającym, rezystancją przejścia jest tylko rezystancja uziemienia. Na rys. 3 pokazano wpływ ziemnozwarciowego prądu pojemnościowego sieci przy  $R_F$  o wartości równej  $30 \Omega$  na współczynnik  $\beta$  dla trzech wartości znamionowego prądu rezystora uziemiającego: 150, 300 i 500 A. Przy połączeniu sekcji wartość prądu znamionowego jest ich sumą dla dwóch rezystorów. W pewnych przypadkach po połączeniu sekcji jeden z rezystorów jest wyłączany. Wyraźnie widać, że prąd ziemnozwarciowy obliczony wg zależności (6) może być znacznie mniejszy w porównaniu z obliczonym wg

uproszczonej zależności (5) nawet o kilkadziesiąt %. Na rys. 4 pokazano wpływ rezystancji  $R_F$  w zakresie od 0 do 30  $\Omega$  na współczynnik  $\beta$  dla trzech kompletów pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego sieci i znamionowego prądu rezystora. Widać, że nawet rezystancje w granicach 10  $\Omega$  już mają znaczący wpływ na prąd ziemnozwarciowy. W obliczeniach pominięto impedancję zerową transformatora uziemiającego oraz linii pomiędzy szynami zbiorczymi i miejscem zwarcia.

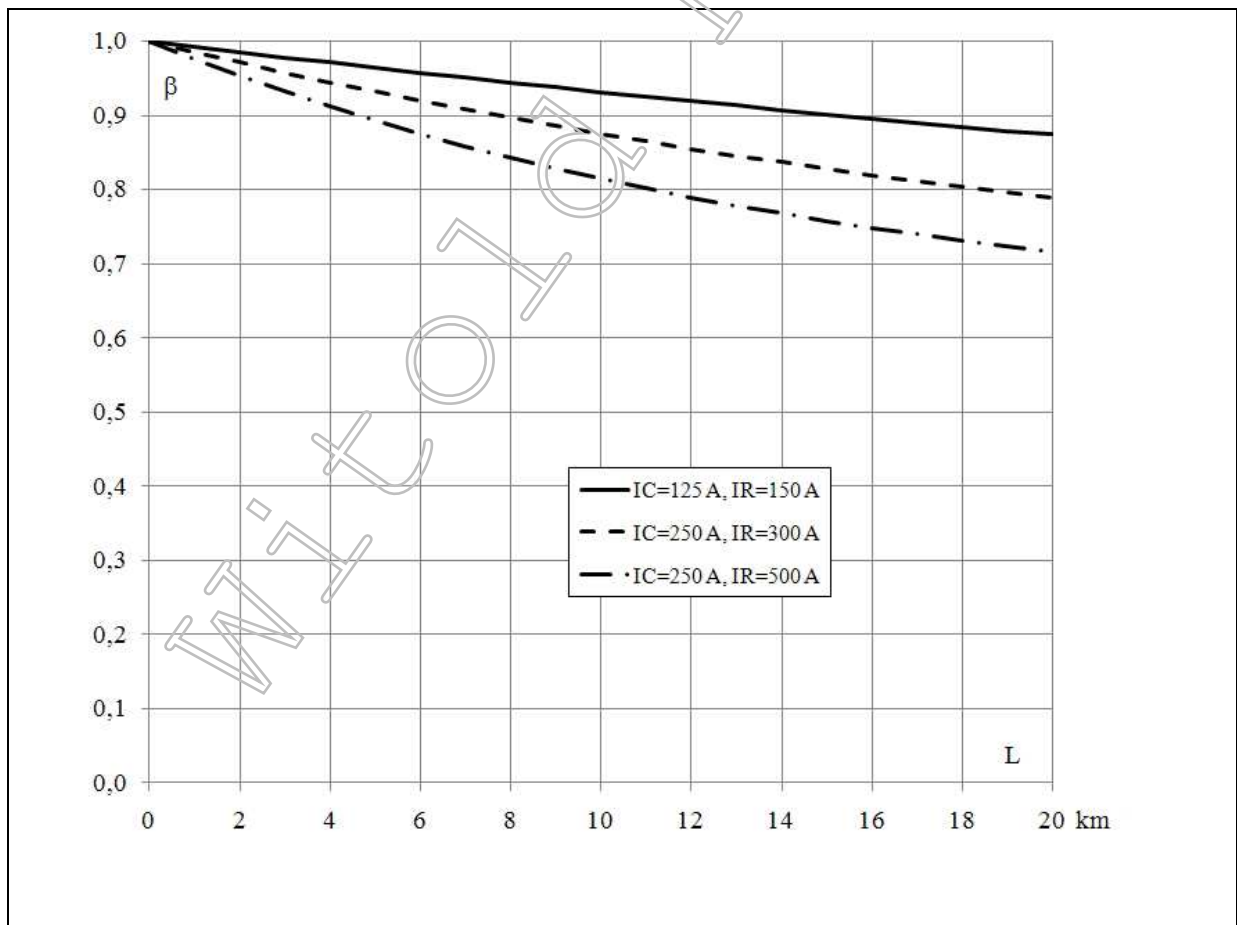
Na rys. 5 pokazano wpływ odległości miejsca zwarcia na wartość prądu ziemnozwarciowego dla trzech przypadków takich samych, jak na rys.4 i linii wykonanej przewodem AFL-6 50mm<sup>2</sup>. Obliczenia wykonano metodą składowych symetrycznych, która w praktyce jest dość uciążliwa i wymaga znajomości impedancji linii dla składowej zerowej.



Jest oczywiste, że złożoność wymaganego uziomu jest zależna od prądu ziemnozwarciowego. Stąd w sieciach o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor wskazane jest uwzględnienie wpływu rezystancji uziemiania słupa, a w miarę możliwości i impedancji wzdłużnej linii na jego wartość.



Rys.4. Zależność współczynnika  $\beta$  od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia.



Rys.5. Zależność współczynnika  $\beta$  od odległości zwarcia od szyn zbiorczych.

## 7. Automatyka SPZ i czas trwania zagrożenia porażeniowego

Normy nie precyzują, w jaki sposób w projektowaniu układu uziomowego słupa uwzględnić automatykę SPZ. Dość powszechnie przyjmuje się dawną zasadę, że jeśli czas przerwy bezprądowej nie przekracza 3 sekund, czasy „prądowe” sumuje się. W sposób bardziej oczywisty – przy czasie przerwy w cyklu SPZ nie przekraczającym 3 sekund należy zsumować opóźnienia zabezpieczeń ziemnozwarciowych w pierwszym cyklu SPZ. Druga przerwa w cyklu SPZ w typowych polach z wyłącznikami o napędzie sprężynowym jest większa od 3 sekund i nie trzeba trzeciego zwarcia doziemnego uwzględniać w obliczeniach. Czas ten jest potrzebny do odczytania z wykresów dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego lub dotykowego spodziewanego.

Dopuszczalne napięcia dotykowe i dotykowe spodziewane zależą od czasu trwania zagrożenia porażeniowego  $t_r$  czyli czasu przepływu prądu zwarcia doziemnego przez dany słup. Czas ten w liniach nie wyposażonych w automatykę SPZ lub jeśli czas pierwszej przerwy beznapięciowej wynosi 3 s lub więcej, wynika z zależności:

$$t_r = t_{wo} + t_{nast} + t_{AWSCz} \quad (8a)$$

w której:

$t_{wo}$  – czas własny wyłącznika przy otwieraniu, przeważnie w granicach 0,05 – 0,1 s,

$t_{nast}$  – czas nastawiony na podstawowym zabezpieczeniu ziemnozwarciowym linii (w zasadzie powinien to być czas zadziałania, ale jest on praktycznie równy nastawionemu),

$t_{AWSCz}$  – czas opóźnienia załączenia automatyki AWSCz - uwzględnia się go, jeśli sieć jest kompensowana i w tą automatykę wyposażona, przeważnie wynosi 2-3 s.

Jeśli sieć pracuje jako skompensowana, ale bez automatyki AWSCz, to oznacza, że nie ma w niej zabezpieczeń ziemnozwarciowych działających na wyłączenie linii, a tylko na sygnalizację i należy przyjąć czas rażenia bardzo długi (ale nie nieskończenie długi).

W sieciach z punktem neutralnym izolowanym i uziemionym przez rezystor we wzorze (8a) należy pominąć  $t_{AWSCz}$ .

W liniach z automatyką SPZ:

$$t_r = 2 * (t_{wo} + t_{nast}) + t_{AWSCz} \quad (8b).$$

W sieciach skompensowanych czas własny wyłącznika ma marginalne znaczenie i może być pomijany, ponieważ krzywa dopuszczalnych napięć rażeniowych przy czasach powyżej 2 s zmienia się nadzwyczaj powoli.

Wyraźnie zaznacza się, że pod uwagę bierze się czas zabezpieczeń podstawowych, a nie ma potrzeby analizowania opóźnień zabezpieczeń rezerwowych. Będą to więc w ogromnej większości nastawy zabezpieczeń ziemnozwarciowych na początku analizowanej linii.

## 8. Wnioski:

a) Z punktu widzenia dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej słupy betonowe należy traktować jako przewodzące.

b) Przewodzące poprzeczniki słupów betonowych powinny być uziemione bez względu na wymagania ochrony przeciwporażeniowej. Sformułowanie „uziemione” należy rozumieć jako ich połączenie ze zbrojeniem słupa i uzyskaniem przejścia do podziemnej części słupa, a nie jako konieczność wyposażenia słupa w dodatkowy uziom. W słupach strunobetonowych, ze względu to, że wykorzystywanie strun jako elementów układu uziemiającego jest niezalecane, korzystne jest umieszczenie do tego celu specjalnych prętów.

c) Podstawowym kryterium oceny dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej przy słupach betonowych są napięcia rażeniowe, przede wszystkim dotykowe, na które ma wpływ również prąd uziomowy, który w liniach napowietrznych SN jest równy prądowi ziemnozwarciowemu. Wyjątkiem są słupy, do których dochodzi linia kablowa ciągła od strony stacji zasilającej – wówczas można uwzględnić współczynnik redukcyjny powłoki kabla lub żyły powrotnej.

d) Zasady obliczania prądu uziomowego dla słupów SN są inne niż w liniach WN. Należy uwzględniać pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci, kompensację ziemnozwarciową i AWSCz. W sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor na wartość tego prądu istotny wpływ ma rezystancja przejścia w miejscu zwarcia i impedancja wzdłużna linii napowietrznej. Ze względu na mniejszą reaktancję wzdłużną i przeważnie większe przekroje żył roboczych, ale także mniejsze długości, wpływ impedancji linii kablowych może być pominięty. Współczynnik redukcyjny należy uwzględniać tylko dla uziomów słupów, ma których następuje przejście linii kablowej w napowietrzną.

d) W liniach wyposażonych w automatykę SPZ należy uwzględnić ją przy obliczaniu czasu trwania zagrożenia porażeniowego.

e) Wystarczającym środkiem dla zapewnienia właściwej ochrony z punktu widzenia napięć rażeniowych dotykowych jest wykonanie uziomu otokowego.



## Literatura

- [1] PN-EN 50423:2007 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 do 45 kV włącznie.
- [2] PN-EN 50341 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV.
- [3] PN-E-05115:2002 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
- [4] Wołkowiński K.: Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych. WNT, Warszawa, 1972.
- [5] PN-EN 12843:2008 Prefabrykaty z betonu -- Maszty i słupy
- [6] PN-EN 50522:2011: Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV (tylko w oryginale)