

*Mgr inż. Franciszek Szymik, mgr inż. Ryszard Kuszleyko,
mgr inż. Zygmunt Roszak*

Katedra Sieci Elektrycznych

Wykorzystanie górnego przewodu dla poprawy odporności burzowej w sieciach średnich napięć

1. Wstęp

W sieciach napowietrznych średnich napięć, a więc normalnie 6, 15, 30 kV ochrona burzowa stanowi specjalne zagadnienie. W sieciach tych ze względów ekonomicznych nie stosuje się na ogół linek odgromowych — tego najskuteczniejszego środka ochrony burzowej linii napowietrznych — dlatego też awaryjność tych sieci jest stosunkowo duża. Sieci średnich napięć często zasilają ważnych odbiorców, dla których każda przerwa w ruchu powoduje duże straty produkcyjne i społeczne. Zachodzi zatem potrzeba wykorzystania innych środków pozwalających na podniesienie odporności burzowej przez odpowiednią modernizację istniejących starych linii względnie wprowadzenie zmian w projektowaniu linii nowych.

Duży odsetek linii budowanych na terenie naszego kraju w latach mniej więcej od r. 1925 do wybuchu drugiej wojny światowej wyposażony jest w słupy drewniane z poprzecznikami żelaznymi typu „lira“, tworzącymi połączenie metaliczne trzonów izolatorowych wszystkich trzech faz. Dzięki temu linie te odznaczają się słabą izolacją międzyfazową w porównaniu z dużą wartością izolacyjności względem ziemi, o której decyduje drewniana żerdź słupa. Niekorzystny ten układ izolacyjności stanowi o nader niekorzystnych własnościach burzowych tych linii, które zaliczyć należy do najgorszych pod względem odporności burzowej. Linie tego typu są przedmiotem niniejszego artykułu będącego streszczeniem pracy wykonanej w Katedrze Sieci Elektrycznych Politechniki Śląskiej.

W pracy poddano szczegółowej analizie odporność burzową konkretnej sieci 30 kV ze słupami wyżej wymienionego typu, uwzględniając różne warianty modernizacji stanu istniejącego. W szczególności opraco-

wano i przeanalizowano skuteczność modernizacji polegającej na wykorzystaniu górnego przewodu jako odgromowego, uziemiając go poprzez iskiernik o odpowiedniej długości, przy zastosowaniu gaszenia za pomocą cewki kompensacyjnej, za pomocą samoczynnego powtórnego załączania (SPZ) względnie stosując odgromniki wydmuchowe w miejsce iskiernika. Mimo że sposób nie daje takich efektów jak np. zastosowanie poprzeczek drewnianych, to jednak należy go uznać za najodpowiedniejszy w przypadkach istniejących sieci, kiedy przebudowa słupów z wymianą poprzeczek napotyka na zasadnicze trudności ruchowe w związku z niemożliwością wyłączenia sieci na czas dłuższy spod napięcia.

W omawianych układach rozpatrzono różne możliwości w odniesieniu do miejsca i sposobu powstawania przeskoków izolacji w procesie przebiegów falowych, przy czym posługiwano się klasyczną metodą Bewleya „siatki przebiegów falowych“. Również tą metodą posługiwano się przy konkretnym wyznaczaniu odporności burzowej w układach bardziej skomplikowanych, gdzie w rachubę wchodziły przebiegi falowe w przesłach między słupami uziemionymi i nie uziemionymi. Dla wyznaczania odporności burzowej w układach prostych, z uderzeniem pioruna bezpośrednio w słup uziemiony, używano analitycznego wzoru uwzględniającego w sposób prawie dokładny nieskończoną ilość kolejnych przebiegów falowych między wierzchołkiem słupa a ziemią. Możliwość stosowania tego wzoru w związku z obecnością iskiernika sprawdzono na podstawie wykresów przebiegów falowych.

Prawdopodobną ilość wyładowań i wyłączeń określano w zasadzie opierając się o wzory i metody stosowane w Związku Radzieckim z tym, że przystosowano je do odmiennych danych wyjściowych rozpatrywanego terenu, ustalonych na podstawie wieloletnich spostrzeżeń personelu eksploatacyjnego.

2. Określanie odporności burzowej

Wskaźnikiem odporności burzowej linii napowietrznej może być graniczna wartość napięcia względnie natężenia prądu pioruna trafiającego w linię, od której począwszy wywołany zostaje przeskoczek na izolacji i w dalszej konsekwencji powstanie łuku zwarciovego mogącego spowodować wyłączenie linii. Ponieważ jednakże nie każdy przeskoczek prowadzi do wyłączenia, określamy praktycznie odporność burzową za pomocą prawdopodobnej ilości wyłączeń przypadającej na określoną długość danej linii w ciągu 1 roku. Ilość tych wyłączeń jest związana wprost proporcjonalnie z wyżej wymienionym granicznym napięciem względnie prądem pioruna i uzależniona jest poza tym od pewnych współczynników prawdopodobieństwa wynikających z teoretycznych rozważań oraz obserwacji

przeprowadzonych w eksploatacji i w laboratoriach. Mamy tu do czynienia z prawdopodobieństwem występowania prądów pioruna o natężeniach większych od danej wartości (Ψ_I), prawdopodobieństwem trafienia przez piorun przewodu chronionego z danym kątem ochronnym (Ψ_a) oraz prawdopodobieństwem przejścia przeskoku udarowego w huk trwały (Ψ_I).

Poza wyżej wymienionymi współczynnikami prawdopodobieństwa, podstawową wielkością, którą należało określić dla warunków rozpatrywanej sieci i terenu, jest prawdopodobna ilość wyładowań piorunowych trafiających w linię o określonej długości. Ilość tę określa się ogólnie w odniesieniu do 20 dni burzowych w roku i 100 km linii prostą zależnością

$$N = k \cdot h, \quad (1)$$

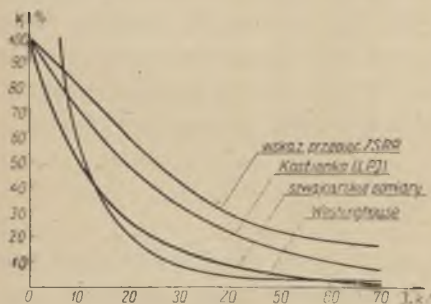
gdzie h jest średnią wysokością linii w m, a k jest współczynnikiem proporcjonalności zależnym od warunków burzowych danego rejonu.

W literaturze radzieckiej przyjmowano do niedawna $k=2$ i więcej, jednakże obecnie istnieje tam tendencja przyjmowania wartości mniejszych, średnio $k=1,2$ (Burgsdorf, Kostienko). Z ilości wyłączeń oraz dni burzowych notowanych w okresie kilku lat otrzymano drogą przeliczeń wstecznych wielkość znacznie mniejszą, $k=0,8$, jako najbardziej słuszną dla rozważanej sieci. Należy zaznaczyć, że jest to granica dolna zakresu podanego przez Burgsdorfa $k=0,8-2,3$. Okazuje się, że przyjęta wielkość $k=0,8$ nie jest w naszych warunkach absolutnie za niska i w pewnych przypadkach mogą być przyjmowane wartości jeszcze mniejsze. Ponieważ ilość dni burzowych w roku w rozpatrywanym terenie wynosi według mapki izoceramicznej mgr W. Wiszniewskiego 17, zatem wielkości N przelicza się proporcjonalnie mnożąc je przez stosunek $\frac{17}{20} = 0,85$.

Z dalszych podstawowych wielkości, które należało ustalić, jest prawdopodobieństwo Ψ_I występowania piorunów o natężeniu równym i większym od danej wartości I_0 . W literaturze spotyka się różne dane w postaci wykresów względnie wzorów empirycznych opartych na długoletnich pomiarach rzeczywistych piorunów w różnych krajach. Dla Polski takich danych nie posiadamy. Zebrano porównawczo dane różnych krajów i na rysunku 1 ujęto je w postaci wykresów $\Psi_I = f(I_0)$. Analizując wielkości otrzymywane z przytoczonych krzywych, porównując je z danymi niemieckimi i szwajcarskimi odnoszącymi się do warunków najbliższych warunkom naszego kraju, porównując wyniki obliczeniowe ilości wyłączeń z ilością wyłączeń wynikających ze statystyk eksploatacyjnych ustalono, że najwłaściwsza dla nas jest krzywa szwajcarska, którą skonstruowano z wyników pomiarów wykonanych na doświadczalnym maszcie na górze Monte Salvatore w latach 1946 do 1951. Krzywa ta daje znacznie łagodniejsze warunki aniżeli krzywe radzieckie („Rukowodiaszczije ukazanija

po zaszczytanie ot pierienapriażenij“ oraz Kostienko), a częściowo pokrywa się ona z krzywą amerykańską (Westinghouse).

Dla określenia prawdopodobieństwa Ψ_a oraz Ψ_I użyto empirycznych wzorów, otrzymanych w laboratorium T'WN Leningradzkiego Politechnicznego Instytutu, które zostały sprawdzone w eksploatacji przez Burgsdorfa.



Rys. 1. Krzywe prawdopodobieństwa $\Psi_I = f(J_0)$

Prawdopodobieństwo wyładowania w przewód chroniony linką odgromową względnie przewodem ochronnym z kątem ochronnym α określa wzór

$$\log \Psi_a = \frac{\alpha^0}{20} - 2 [^0/0], \quad (2)$$

prawdopodobieństwo zaś przejścia udarowego przeskoku w łuk — wzór

$$\Psi_I = 1,6 E_{sr} - 6 [^0/0], \quad (3)$$

gdzie E_{sr} jest średnim gradientem napięcia roboczego wzdłuż n izolatorów i drzewa

$$E_{sr} = \frac{U_r}{l_{drz} + n \cdot h_{iz}} \text{ [kV/m]}. \quad (4)$$

Przy określaniu napięcia udarowego U_x powodującego przeskok na izolacji o wytrzymałości udarowej U_d wchodzi w rachubę współczynnik sprężenia k_{12} przewodów (1—2), między którymi następuje przeskok, oraz współczynnik λ powiększający współczynnik k_{12} w związku ze zjawiskiem ulotu. Stosujemy dla tych współczynników znane wzory:

$$k_{12} = \frac{\log \frac{D_{12}}{d_{12}}}{\log \frac{2h_1}{r}}, \quad (5)$$

$$\lambda = 1,32 \left(1 + \frac{2}{h_1} \cdot U_x \right), \quad (6)$$

gdzie

d_{12} — odstęp między przewodem 1 i 2,

D_{12} — odstęp między przewodem 1 i zwierciadlanym odbiciem względem ziemi przewodu 2,

h_1 — wysokość przewodu nad ziemią,

r — połowa średnicy zewnętrznej przewodu (odległości w metrach, napięcie w kV).

Prawdopodobna ilość wyłączeń w roku przypadająca na 100 km linii może być ogólnie przedstawiona za pomocą następującego wzoru:

$$n_1 = N \cdot \Psi_I \cdot \Psi_l \quad (7)$$

(wielkości stosunkowe $\Psi = \frac{\Psi^0/0}{100}$).

W przypadku rozpatrywania dodatkowo ilości wyładowań w przewód dolny chroniony przewodem górnym z kątem ochronnym α dojdzie do wzoru (7) współczynnik Ψ_α :

$$n_2 = N \cdot \Psi_I \cdot \Psi_l \cdot \Psi_\alpha. \quad (8)$$

Sumaryczna ilość wyłączeń wyniesie wówczas

$$n = n_1 + n_2. \quad (9)$$

W naszym przypadku prawdopodobieństwo trafienia przewodu dolnego będzie znikome, mianowicie wyniesie

$$\Psi_\alpha = 10^{\left(\frac{\alpha}{20} - 2\right)} = 10^{-0,5} = 0,32^0/0 = 0,0032.$$

Wartość ta jest pomijalna, wobec czego przeważnie można poprzestać na wzorze (7), tzn. przyjąć $n = n_1$.

Do wzoru (7) wprowadzamy poprzednio ustalone proste zależności

$$N = 0,8 h_1, \quad (10)$$

oraz według wzorów (3) i (4)

$$\Psi_l = f(E_{kr}),$$

natomiast dla prawdopodobieństwa Ψ_I obowiązuje skomplikowana zależność od szeregu czynników, którą można przedstawić za pomocą ogólnego wyrażenia

$$\Psi_I = f(I_0) = f'(U_d, k_{12}, \lambda, \text{układ przebiegów fal}). \quad (11)$$

Im większy jest prąd I_0 , tym prawdopodobieństwo jego występowania jest mniejsze. Większym wartościom U_d i mniejszym współczynnikom k_{12} i λ odpowiada większa wartość prądu I_0 , a tym samym mniejsze prawdopodobieństwo jego występowania, czyli mniejsza ilość wyłączeń n . Zależność Ψ_I od układu przebiegów falowych jest skomplikowana, nie dająca się przeważnie wyrazić za pomocą jednego wzoru i jej określenie możliwe jest wówczas tylko na podstawie wykresu przebiegów falowych.

3. Sposoby poprawienia odporności burzowej w sieciach średnich napięć

Ze wzorów (7) i (10) wynika, że w omawianym układzie linii ilość wyłączeń może być zmniejszona przez zwiększenie prądu I_0 pioruna powodującego wyłączenie. Jest to możliwe przy zastosowaniu jednego względnie kilku z niżej podanych środków:

a) Zmiana układu przebiegów falowych przez połączenie z ziemią przewodu górnego „wychwytyjącego“ przeważną część wyładowań.

b) Zwiększenie wytrzymałości udarowej izolacji międzyfazowej (U_d).

c) Zmiana pozostałych parametrów, a więc przede wszystkim gabarytów słupa, od których zależą, w myśl podanych w ustępie 2 wzorów, współczynniki sprzężenia (k_{12}) i ulotu (λ) oraz ilość wyładowań w linię (N).

Omówimy po kolei powyższe trzy sposoby poprawiania odporności burzowej.

a) W przypadku uderzenia pioruna w przewód górny omawianej linii powstanie na tym przewodzie napięcie wynikające z falowych parametrów kanału piorunowego oraz przewodu. Napięcie to będzie wzrastało w miarę narastania czoła fali udarowej aż do momentu przeskoku na fazę drugą poprzez obydwie izolatory połączone metalicznie za pomocą poprzeczki żelaznej. Izolacyjność względem ziemi jest wielokrotnie wyższa (żerdź drewniana), zatem praktycznie może tu wystąpić tylko zwarcie międzyfazowe.

Jeżeli w trakcie narastania czoła fali na przewodzie górnym umożliwimy połączenie tego przewodu z ziemią przed nastąpieniem przeskoku międzyfazowego, to spowodujemy w ten sposób obniżenie napięcia fali na skutek powstania przebiegów falowych między przewodem górnym a ziemią, obniżających narastanie czoła fali biegnącej z kanału piorunowego. Dla wywołania przeskoku międzyfazowego potrzeba będzie teraz znacznie silniejszego pioruna (większego I_0), inaczej mówiąc, prawdopodobieństwo zwarcia międzyfazowego, a co za tym idzie, prawdopodobieństwo wyłączenia będzie znacznie mniejsze. Jest to idea wykorzystania przewodu górnego jako odgromowego.

Połączenie górnego przewodu z ziemią wykonujemy za pośrednictwem iskiernika bocznikującego jego izolator. Długość przerwy iskrowej musi być odpowiednio dobrana, tak aby z jednej strony iskiernik nie działał przy przepięciach łączeniowych, z drugiej strony nie dopuszczał do nadmiernego wzrostu fali pioruna, a tym samym nie podważał skuteczności ochrony. Duże znaczenie dla skuteczności takiej ochrony posiada dobroć uziemienia.

Jednofazowe zwarcie powstałe na skutek przeskoku na iskierniku powinno być zgaszone bądź to przez cewkę kompensacyjną, bądź też za pomocą urządzenia samoczynnego powtórnego załączania (SPZ) w przy-

padku sieci z uziemionym punktem zerowym. Uziemienie przewodu górnego może być również wykonane poprzez odgromnik wydmuchowy w miejsce iskiernika — pod warunkiem, że zagwarantowany będzie jego zakres gaszenia prądów, odpowiednio do prądów zwarcia jednofazowego, występujących w danej sieci. W tym przypadku odpada oczywiście konieczność stosowania urządzeń kompensacyjnych względnie SPZ.

b) Zwiększenie wytrzymałości udarowej izolacji międzyprzewodowej praktycznie uzyskane być może przez wprowadzenie w miejsce poprzeczek żelaznych poprzeczek drewnianych. W związku z bardzo dobrymi własnościami wytrzymałościowymi drewna w odniesieniu do przebiegów udarowych, efekt jest tu nadzwyczajny, tym bardziej jeśli zastosować dodatkowo zwiększenie odstępów międzyprzewodowego. Zwiększenie tego odstępów jest bardzo wskazane również z tego względu, że musimy skoordynować wytrzymałość udarową po poprzeczce drewnianej z wytrzymałością udarową przestrzeni powietrznej międzyprzewodowej w środku przęsła. Zachodzi to przeważnie przy odstępach międzyprzewodowych większych od stosowanych normalnie przy użyciu poprzeczek żelaznych.

Przy wykorzystaniu drewna jako środka podnoszącego odporność burzową znaczenie istotne ma oczywiście tylko drewno między górnymi a dolnymi przewodami. Jeżeli dolne przewody zawieszane będą na poprzeczce żelaznej, wtenczas uzyskamy nieco mniejszy efekt, gdyż droga po drewnie z górnego do dolnego przewodu będzie krótsza.

W przypadku kombinacji poprzeczek drewnianych, z wykorzystaniem przewodu górnego jako odgromowego, uzyskać możemy prawie idealne warunki ochronne, linia pracować będzie praktycznie bez wyląceń burzowych.

c) Zmiana gabarytów słupa może mieć dosyć poważny wpływ na odporność burzową linii. Chodzi tu zasadniczo o odstępów międzyprzewodowe i wysokość przewodów nad ziemią.

W przypadku poprzeczników żelaznych odstęp międzyprzewodowy ma wpływ tylko nieznaczny na odporność burzową, gdyż ze wzrostem tego odstępów nieznacznie maleje współczynnik sprzężenia k_{12} (funkcja logarytmiczna), a tym samym nieznacznie wzrastać będzie napięcie stanowiące o przeskoku między przewodami. Zasadnicze natomiast znaczenie ma odstęp międzyprzewodowy w przypadku poprzeczek drewnianych, kiedy ze wzrostem tego odstępów rośnie wartość izolacyjna drewna między fazami. Musimy jednakże pamiętać, że przy zwiększaniu odstępów międzyprzewodowego dojdziemy do takiej jego wartości, od której począwszy przeskoczek nie będzie powstawał na słupie, lecz w środku przęsła w przestrzeni powietrznej między przewodami. Dla określenia odporności burzowej miarodajny będzie w takich przypadkach odstęp międzyprzewodowy w po-

wietrze, przy czym należy uwzględnić niekorzystne zbliżenie przewodów podczas ich kołysania.

Wysokość przewodów nad ziemią ma duży wpływ na odporność burzową linii. Ze wzrostem wysokości rośnie wprost proporcjonalnie prawdopodobna ilość wyładowań w linię (wzór 9), a także w pewnym stopniu maleje napięcie międzyprzewodowe w związku ze zmniejszeniem się współczynników sprzężenia i ulotu (wzory 5 i 6). Obydwa te fakty powodują szybki wzrost (większy niż proporcjonalny) ilości wyłączeń ze wzrostem wysokości linii. Zmniejszanie wysokości linii jako środek poprawy odporności burzowej nie może mieć oczywiście praktycznego znaczenia, gdyż wysokość linii wynika z konieczności zachowania pewnych minimalnych odstępów od ziemi, dyktowanych przez przepisy oraz z konieczności stosowania ekonomicznych rozpiętości pręseł.

4. Wskaźniki odporności burzowej w różnych wariantach modernizacji linii

Dla konkretnej sieci 30 kV jednego z Zakładów Sieciowych rozpatrzono szczegółowo kilka wariantów modernizacji, sprowadzających się w zasadzie do różnych kombinacji zasad opisanych w poprzednim rozdziale.

Sieć o ogólnej długości ok. 53 km zbudowana jest na słupach drewnianych z poprzeczkami żelaznymi typu „lira“, z izolatorami typu VHD 30, z przewodami miedzianymi, stalowo-aluminiowymi i stalowymi o przekrojach od 16 do 70 mm² zawieszonymi w układzie trójkąta równobocznego, z odstępem międzyprzewodowym wynoszącym 2 m. Średnia rozpiętość pręseł wynosi 120 m, średnia wysokość przewodu górnego nad ziemią 10,5 m, a jako średni przekrój przewodu przyjęto 25 mm², która to wartość stanowi mniej więcej średnią ważoną — liczoną według średnic przewodów — z zakresu przekroju podanego wyżej. Współczynnik sprzężenia obliczony z powyższych wartości wynosi $k_{12} = 0,26$.

W rozważaniach przyjęto następujące dane fali pioruna:

kształt fali — czoło ukośne, grzbiet poziomy,

długość czoła $T_1 = 2 \mu s$,

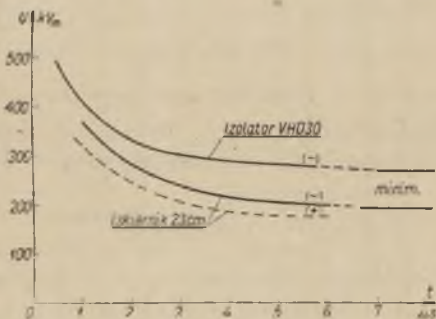
biegunowość — ujemna,

prędkość rozchodzenia w przewodach 300 m/ μs .

Przyjęcie uproszczonego kształtu fali jest praktycznie dopuszczalne, a umożliwia w sposób stosunkowo prosty przeprowadzanie analizy przebiegów falowych i obliczeń; w obliczeniach muszą być przyjmowane różne średnie przybliżone wartości wynikające ze spostrzeżeń oraz pomiarów wykonywanych w eksploatacji i w przyrodzie, które to przyjęcia powodują błędy większe od błędów wynikających z uproszczonego kształtu fali. Przyjęcie długości czoła fali $T_1 = 2 \mu s$ uzasadnione jest praktycznie

występującymi w naturze wartościami, które najczęściej wahają się w granicach $1 \dots 4 \mu\text{s}$. Przyjęcie biegunowości ujemnej lub dodatniej nie ma zasadniczego znaczenia w rozważaniach porównawczych, przyjęto ją jako ujemną, gdyż taka według statystyk najczęściej występuje w przyrodzie.

Charakterystyki udarowe izolatorów przyjęto według danych Zakładu Wysokich Napięć GIEL, natomiast dla iskiernika i powietrza według S. Szpora oraz *Przesyłu i rozdziału...* (Westinghouse). Wytrzymałość udarową drzewa przyjęto jako minimalną 200 kV/m .



Rys. 2. Charakterystyki udarowe izolatora iskiernika

Osobnego omówienia wymaga wybór odstępu iskrowego iskiernika na izolatorze przewodu górnego. Jak już wspomniano w rozdziale 3, odstęp ten musi być co najmniej taki, aby przepięcia łączeniowe nie powodowały zadziałania iskiernika. Z drugiej strony skuteczność ochrony wymaga zachowania odstępu możliwie małego, a w każdym razie mniejszego od odstępu odpowiadającego wytrzymałości udarowej izolatora. Wychodząc z założenia, że najwyższe przepięcie łączeniowe wynosić może według Rotha $2,9 \cdot U = 2,9 \cdot 30 = 87 \text{ kV}$ (wg „radzieckich wskazówek przepięciowych“ $4 \cdot U_f = 69 \text{ kV}$) przyjęto w naszych rozważaniach jako podstawę długość przerwy iskrowej odpowiadającą temu napięciu 87 kV – tj. 23 cm . Wielkość tę w razie konieczności można by ewentualnie zwiększyć do 26 cm , jak tego wymagają „Wskazówki ochrony odgromowej stacji elektroenergetycznych“, co jednakże nie należy uważać za wskazane, mimo że w zasadzie nie miałyby to większego znaczenia dla skuteczności ochrony. Zauważyć należy, że dla wartości wymaganej przez wskazówki radzieckie, czyli 69 kV , odpowiedni odstęp iskrowy wyniósłby $17,5 \text{ cm}$.

Z porównania charakterystyk udarowych (rys. 2) wynika, że między izolatorem VHD 30 a iskiernikiem 23 cm zachowana jest selektywność z dostateczną rezerwą.

W obliczeniach przyjęto oporności falowe kanału piorunowego 300Ω , przewodu 400Ω oraz zwodu uziemieniowego 400Ω . Oporność udarową

uziemiaenia w zasadzie przyjęto równą 10Ω z tym, że porównawczo wykonano przeliczenia również dla innych wartości. Prawdopodobieństwo występowania piorunów o pewnych natężeniach przyjmowano według krzywej skonstruowanej z pomiarów szwajcarskich (rys. 1).

Analizę przebiegów falowych oraz obliczenia ilości wyłączeń przeprowadzono dla 3 zasadniczych układów:

- 1) bez wykorzystania górnego przewodu jako odgromowego,
- 2) z wykorzystaniem przewodu górnego jako odgromowego przez uziwienie na każdym słupie,
- 3) z wykorzystaniem przewodu górnego jw., lecz na co drugim słupie.

Każdy z powyższych 3 układów przeanalizowano w zastosowaniu do 3 rodzajów słupów:

- a) z poprzeczkami żelaznymi (obecnymi) typu „lira“,
- b) „ „ „ drewnianymi,
- c) „ „ „ dolnymi — żelaznymi.

Dla każdego z 3 zasadniczych układów (1, 2, 3) podamy poniżej tylko pewne charakterystyczne momenty występujące przy ich analizowaniu oraz wyniki końcowe w odniesieniu do 3 rodzajów słupów (*a, b, c*). Ilości wyłączeń odnoszą się do 100 km linii i 17 dni burzowych w roku.

4.1. Linia w układzie bez wykorzystania przewodu górnego jako odgromowego

Układ ten stanowi najprostszy przypadek obliczeniowy, w którym o odporności burzowej decyduje minimalna wytrzymałość udarowa izolacji międzyprzewodowej oraz napięcie wytworzone przez prąd pioruna na zastępczej oporności falowej, wynikającej z oporności falowych kanału piorunowego i przewodów, z uwzględnieniem współczynników wsprężenia i ulotu.

a) Słup z poprzeczkami żelaznymi „lira“ (stan istniejący) przedstawia nader niekorzystny pod względem odporności burzowej układ, który cechuje małą wytrzymałość izolacji międzyprzewodowej (2 izolatory VHD 30, tj. $2 \times 270 = 540$ kVm) oraz duży gradient napięcia roboczego na izolacji (E_{sr}). W rachubę wchodzi tylko przeskok na słupie, gdyż wytrzymałość w powietrzu jest ok. 2 razy większa.

Ilość wyłączeń (100 km, 17 dni burzowych w roku) $n = 3,38$, tj. ok. 3,4.

b) Stosując poprzeczki drewniane należy zwrócić uwagę na konieczność koordynacji wytrzymałości międzyprzewodowych po drzewie oraz w powietrzu. Z tego warunku wychodząc jako odstęp międzyprzewodowy przyjęto 3 m. Układ ten odznacza się dużą wytrzymałością izolacji między-

przewodowej (1330 kV_m) i małym gradientem (E_{sr}), dlatego też daje bardzo dobrą odporność burzową.

Ilość wyłączeń $n = 0,092$, tj. ok. 0,1.

c) Stosując poprzeczkę żelazną dla obydwu dolnych przewodów otrzymujemy mniejszą długość drzewa jak w przypadku b), a mianowicie tylko odcinek pionowy między górnym umocowaniem izolatora a poprzeczką żelazną. W celu zachowania koordynacji wytrzymałości na słupie i w powietrzu odstęp międzyprzewodowy przyjęto 2,60 m.

Ilość wyłączeń $n = 0,48$.

4.2. Linia z wykorzystaniem górnego przewodu jako odgromowego z uziemieniem na każdym słupie

W układzie tym zasadniczo należy rozpatrywać oddzielnie 2 przypadki, a mianowicie wyładowanie w słup oraz w środek przęsła. W przypadku wyładowania w środek przęsła, w zależności od stosunku wytrzymałości izolacji międzyprzewodowej na słupie i w przęsle (w powietrzu), przeskok może nastąpić na izolacji słupa lub też w powietrznej przerwie w miejscu wyładowania. Im wyładowanie występować będzie dalej od słupa uziemionego przez iskiernik, tym większe będzie prawdopodobieństwo powstania przeskoku na przerwie powietrznej w miejscu wyładowania, a tym samym mniejsza będzie skuteczność uziemienia na słupie. Pozostaje to w związku z przebiegami falowymi między miejscem wyładowania a słupem uziemionym przez iskiernik, na skutek których napięcie w miejscu wyładowania wzrośnie znacznie wyżej jak na zwodzie uziemienia.

Wykazano na wykresach przebiegów falowych, że dla poprzeczek żelaznych „lira“, gdzie wytrzymałość izolacji w powietrzu jest znacznie wyższa od izolacji na słupie, przeskoki – mimo zadziałania iskiernika – występować będą tylko na izolacji słupa, niezależnie od miejsca uderzenia pioruna w przewód górny. Jeżeli natomiast chodzi o słupy z wykorzystaniem izolacji drewna (b, c), gdzie odstęp międzyprzewodowe w powietrzu i na słupie zostały skoordynowane wytrzymałościowo, wyładowanie w przewód górny na przęsle może spowodować przeskok raczej w powietrzu aniżeli na słupie. Określenie ilości wyłączeń w tych warunkach jest znacznie utrudnione.

a) Słup z poprzeczkami żelaznymi typu „lira“. Jak już wspomniano, ilość wyłączeń określona może być w tym przypadku z przeskoków występujących na słupie. Przeskok nastąpi ze zwodu uziemiającego do przewodu bocznego. Miarodajna będzie tu wytrzymałość jednego izolatora, tzn. 270 kV_m. Związane z tą wartością napięcie względnie prąd pioruna

określa się z przebiegów falowych między wierzchołkiem słupa a jego uziemieniem.

Ilość wyłączeń $n = 1,22$.

b) W przypadku poprzeczek drewnianych z zastosowaniem iskiernika uziemiającego górny przewód należy zwrócić uwagę na konieczność prowadzenia zwodu uziemiającego z odpowiednim odstępem od poprzeczki, a to w celu lepszego wykorzystania izolacyjności drewna. Odstęp ten przyjęto 0,25 m na przestrzeni 0,9 m nad i pod poprzeczką.

Ilość wyłączeń można określić tylko pod założeniem wyładowań występujących bądź to w słup, bądź też w środek przęsła. W pierwszym przypadku miarodajny będzie przeskok na izolacji kombinowanej „odstęp pow. zwodu — $1/2$ poprzeczki — izolator“, której wytrzymałość wyniesie ok. 750 kVm. Odpowiednia ilość wyłączeń wynosi $n_1 = 0,0075$. W drugim przypadku, gdzie miarodajna będzie przerwa powietrzna zmniejszona na skutek uwzględnienia zbliżenia przewodów przy kołysaniu (2,6 m) oraz odpowiednie napięcie na tej przerwie wynikające z wykresu przebiegów falowych, otrzymamy ilość wyłączeń $n_2 = 0,04$. Prawdopodobna ilość wyłączeń będzie wielkością pośrednią między tymi dwoma otrzymanymi wartościami n_1 i n_2 . Należałoby znaleźć zależność ilości wyłączeń od założonego miejsca wyładowań i średnią na całej długości przęsła przyjmując jako prawdopodobną ilość wyłączeń. Ponieważ nie są znane prawa rozkładu prawdopodobnych wyładowań na słup i poszczególne punkty w przęsle, analiza taka przy żmudnych przeliczeniach byłaby bardzo problematyczna, dlatego też ilość wyłączeń określono wprost jako średnią z obydwu wartości n_1 , n_2 , przy czym można stwierdzić, że wartość ta będzie nieco za duża:

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} = 0,024.$$

c) Uwagi poczynione w odniesieniu do poprzedniego przypadku odnoszą się również do słupa z dolną poprzeczką żelazną. Specjalny moment w tym przypadku stanowi uderzenie pioruna z boku — w jeden z przewodów dolnych. O ile w dotychczasowych układach przypadek ten nie odgrywał żadnej roli, gdyż prawdopodobieństwo takiego wyładowania dla kąta ochronnego $\alpha = 30^\circ$ wynosi zaledwie $\Psi_\alpha = 0,32\%$, to tutaj — na skutek braku izolacji drewna między dolnymi fazami — to małe prawdopodobieństwo łatwiej może spowodować przez poprzeczkę żelazną wyłączenia stanowiące niepomijalny udział w całkowitej ilości wyłączeń.

Pod założeniem, że wyładowania trafiają w przewód górny na słupie, ilość wyłączeń wynosi $n'_1 = 0,026$, natomiast w przypadku takich wyładowań w środku przęsła $n'_2 = 0,1$. Ilość wyłączeń na skutek wyładowań

z boku wynosi $n'' = 0,0113$, zatem całkowitą ilość wyłączeń można określić podobnie jak w przypadku b):

$$n = \frac{n'_1 + n'_2}{2} + n'' = 0,074.$$

4.3. Linia z wykorzystaniem przewodu górnego jako odgromowego z uziemieniem na co drugim słupie

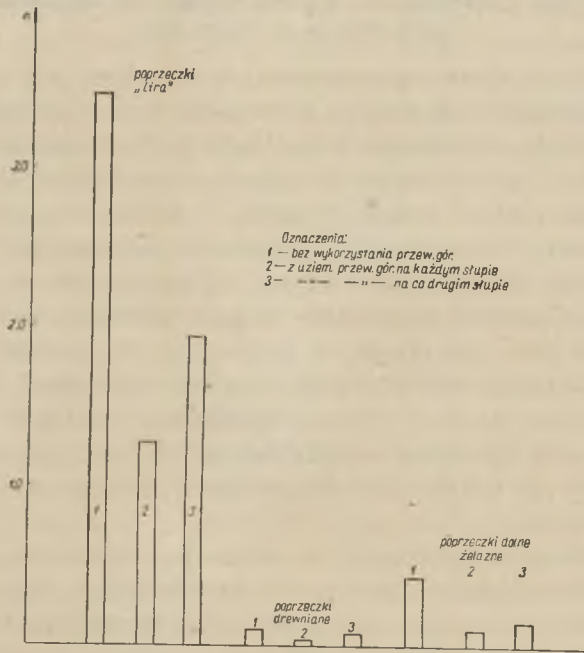
W układzie tym sprawa przedstawia się podobnie jak w układzie 4.2, mianowicie w zależności od miejsca założonych wyładowań będziemy mieli do czynienia z różną odpornością burzową linii. Przy założeniu wyładowań w słup uziemiony przez iskiernik zagadnienie będzie identyczne jak w podobnym przypadku rozpatrywanym w układach poprzednich, tzn. ilość wyłączeń określona będzie przeskokiem występującym na izolacji słupa uziemionego. Przy wyładowaniach w przęsło oraz w słup nie uziemiony przeskok nastąpić może poza słupem uziemionym, tzn. na słupie nie uziemionym albo na przęsle w powietrzu, w zależności od wytrzymałości odpowiedniej izolacji. Ogólnie można stwierdzić, że na skutek większych odległości miejsc możliwych wyładowań od słupów uziemionych, co powoduje mniej skuteczne oddziaływanie fal odbitych od uziemienia, układ oznaczać się będzie znacznie większą ilością wyładowań poza słupami uziemionymi.

W zasadzie analiza tych układów obejmuje rozpatrzenie kilku założeń w odniesieniu do miejsca występowania wyładowań, a więc wyładowanie w słup uziemiony, w przęsło oraz w słup nie uziemiony. Ilość wyłączeń określona będzie jako wartość pośrednia z odpowiednich ilości otrzymanych przy różnych założeniach.

a) Słup z poprzeczkami żelaznymi typu „lira“. Zakładając wyładowania w słup uziemiony przez iskiernik, otrzymamy ilość wyłączeń jak w układzie 4.2a) — tzn. $n_u = 1,22$. W przypadku założenia wyładowań w słup nie uziemiony analiza przebiegów falowych wykazuje, że po zadziałaniu iskiernika na sąsiednim słupie uziemionym przeskok nastąpi na izolacji słupa nie uziemionego, na którym nastąpiło wyładowanie. Ilość wyłączeń wynikająca z takiego założenia wynosi $n_n = 2,66$. Pioruny, trafiające przewód górny w przęsle, powodować będą przeskoki bądź to na słupie uziemionym, bądź też na słupie nie uziemionym — w zależności od odległości. Miejsce wyładowania na przęsle, w którym wystąpi jednakowe prawdopodobieństwo przeskoku na jednym i drugim słupie, będzie położone bliżej słupa nie uziemionego, zatem ilość wyłączeń określona jako średnia z wielkości n_u i n_n będzie nieco za duża. Wynosi ona

$$n = \frac{1,2 + 2,66}{2} = 1,94.$$

b-c) W zastosowaniu omawianego układu do słupów z wykorzystaniem izolacyjności drewna (b,c), określone zostały na podstawie analizy — omówionej poprzednio — orientacyjne ilości wyłączeń. Wynoszą one dla słupów z poprzeczkami drewnianymi (b) $n=0,05$, dla słupów z dolnymi poprzeczkami żelaznymi (c) $n=0,15$.

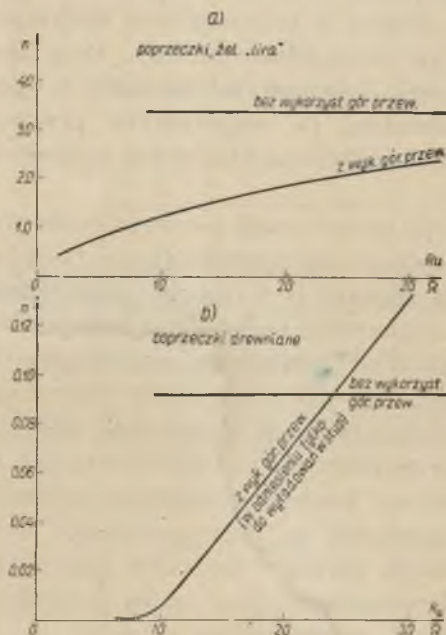


Rys. 3. Ilość wyłączeń na 100 km, 17 dni burzowych w zależności od układu słupa

Wyniki z przeprowadzonych analiz poszczególnych układów przedstawiono na rysunku 3. Jak już wspomniano, ilości wyłączeń zostały obliczone dla udarowej oporności uziemienia 10Ω . Jak się okazuje, wielkość oporności uziemienia ma duży wpływ na skuteczność wykorzystania przewodu górnego jako odgromowego. W zastosowaniu do słupów z poprzecznikami „lira“ oraz z poprzecznikami drewnianymi przeprowadzono obliczenia dla różnych wartości oporności uziemienia — wyniki przedstawiono na wykresach rysunku 4.

Z wykresów wynika dobitnie znaczenie, jakie przedstawia dobro uziemienia dla skuteczności rozpatrywanej modernizacji. Przy zastosowaniu uziemienia o dużej wartości oporności efekt jest mały i odporność burzowa z jej wzrostem staje się coraz bliższa odporności przy stanie istniejącym — bez wykorzystania przewodu górnego jako odgromowego. W przypadku poprzeczek drewnianych zastosowanie uziemienia z opor-

nością powyżej pewnej wartości (24Ω) powoduje spadek odporności burzowej, ilość wyłączeń wzrasta powyżej wartości występującej w linii bez wykorzystania przewodu górnego jako odgromowego. Pozostaje to



Rys. 4. Ilość wyłączeń na 100 km, 17 dni burzowych w zależności od uderowej oporności uziemienia przewodu górnego

w związku z osłabieniem izolacji drewna przez zwód uziemieniowy, które to osłabienie w przypadku dużej oporności uziemienia zmajoryzować może korzyści wynikające z uziemiania górnego przewodu.

5. Wnioski

1) Wykorzystanie górnego przewodu jako odgromowego przynosi znaczną poprawę odporności burzowej w liniach średnich napięć bez linki odgromowej, z układem przewodów w trójkącie równobocznym. Przy zastosowaniu dobrych uziemień o oporności nie większej od 10Ω ilość wyłączeń spada mniej więcej 3-krotnie.

2) Omówiona modernizacja wykazuje dobrą skuteczność przy wszystkich rodzajach stosowanych poprzeczek, z układem przewodów w trójkącie równobocznym, z kątem ochronnym przewodu górnego wynoszącym 30° .

3) Wykorzystanie górnego przewodu jako odgromowego z uziemieniem na co drugim słupie nie przynosi zadowalających rezultatów. Uziemienie

przewodu górnego przez iskiernik na każdym słupie należy uważać — ze względu na skuteczność ochrony — za warunek konieczny.

4) Również podstawowym warunkiem skuteczności działania proponowanej modernizacji jest dobroć uziemień. Warunek ten jest szczególnie ważny w przypadku słupów z poprzeczkami drewnianymi, gdzie wpływ oporności uziemień jest szczególnie dobitny. Przy zastosowaniu w tym układzie z poprzeczkami drewnianymi uziemień o oporności większej od pewnej wartości granicznej (w omawianym przypadku 24 Ω) można spowodować pogorszenie odporności burzowej w stosunku do stanu istniejącego.

5) Zasadniczą zaletą modernizacji jest możliwość jej realizacji w istniejących liniach, bez konieczności wyprowadzania tych linii z ruchu na czas dłuższy. Moment ten stanowi o wyższości modernizacji w stosunku do sposobu podniesienia odporności burzowej za pomocą wymiany poprzeczek na drewniane, co stanowi kompletną przebudowę linii, wymagającą w zasadzie odstawienia na czas przebudowy linii z ruchu.

6) W liniach nowobudowanych stosowanie poprzeczek drewnianych z odstępem międzyprzewodowym nie mniejszym jak 3 m należy uważać za bezwzględnie najlepszy środek podniesienia odporności burzowej linii średnich napięć. Stosowanie w tym przypadku dodatkowej ochrony w postaci wykorzystania górnego przewodu jako odgromowego — mimo bardzo dobrej jej skuteczności — jest mniej potrzebne, gdyż odporność burzowa jest tutaj sama przez się bardzo dobra.

Opracowanie pochodzi z r. 1953.