Krystian Leonard Chrzan

Uszkodzenia i zniszczenia ograniczników przepięć[1)]

Ograniczniki iskiernikowe z warystorami karborundowymi SiC (wg starej nomenklatury odgromniki zaworowe) zaczęto stosować w latach 1930-tych, ale ich masowa produkcja rozwinęła się w latach 1950-tych. Wtedy rozpoznano trzy podstawowe zagadnienia mające wpływ na ich niezawodność:

- wnikanie wilgoci do wnętrza osłony,
- zabrudzenia osłony,
- zdolność absorpcji energii przepięć.

Awaryjność odgromników zaworowych średnich napięć była zazwyczaj większa niż awaryjność odgromników wysokonapięciowych. Spowodowane to było niską jakością uszczelnień oraz względnie większymi przepięciami po uderzeniu pioruna w przewody fazowe linii średnich napięć.

W latach 1990-tych wszyscy producenci ograniczników przepięć zaczęli stosować osłony polimerowe i warystory z wykorzystaniem tlenku cynku ZnO. Natomiast pewna część ograniczników do linii wysokich napięć jest nadal produkowana w osłonach porcelanowych. Najstarsze beziskiernikowe ograniczniki przepięć osiągnęły już prawie 30 lat. Za granicą zaczęto analizować awaryjność oraz rozwijać metody diagnostyczne ograniczników beziskiernikowych. W niniejszym artykule opisano awaryjność odgromników zaworowych i ograniczników beziskiernikowych na podstawie literatury oraz kilku awarii, jakie wystąpiły w Polsce w ostatnich latach.

Awaryjność odgromników zaworowych

Ograniczniki iskiernikowe z warystorami karborundowymi SiC są podatne na wpływ zabrudzeń [1]. Nierównomierny rozkład napięcia na zawilgoconej osłonie, tworzący się w rezultacie wyładowań powierzchniowych i powstawania stref suchych, może doprowadzić do zapłonu iskierników przy napięciu roboczym. Stan taki jest bardzo niebezpieczny, następuje uszkodzenie ogranicznika, a niekiedy nawet jego wybuch. Uszkodzenia ograniczników SiC powodowane zabrudzeniami notowano w Polsce wielokrotnie, zwłaszcza w latach 1950-1980. Największe problemy stwarzały wieloczłonowe odgromniki GZ110/10 ze sterowaniem pojemnościowym, które były tak zawodne i wybuchowe, że zalecano ich odłączanie zaraz po okresie burzowym [1].

O tym, że zabrudzenia były istotnym czynnikiem zwiększającym awaryjność odgromników zaworowych świadczy wzrost ich awaryjności wraz ze wzrostem napięcia trwałej pracy [2]. Okazuje się, że awaryjność odgromników zaworowych średnich napięć była nawet większa od awaryjności tańszych odgromników wydmuchowych, które uważano za bardziej zawodne (tab. 1).

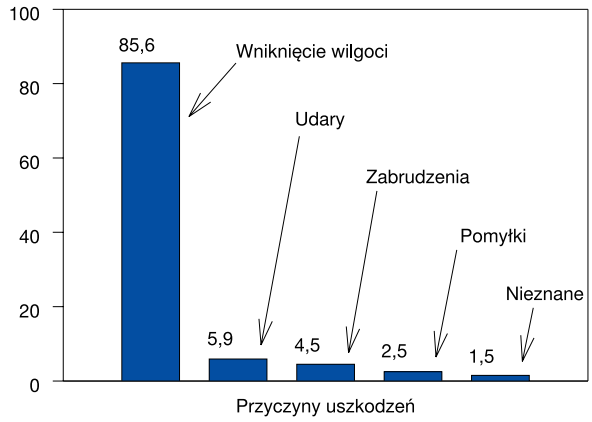
Tabela 1

Procentowa liczba uszkodzeń odgromników SN na terenie kraju [3, 4]

Rok	Odgromniki wydmuchowe		Odgromniki zaworowe	
	krajowe	zagraniczne	GZ15/1,5 kA	GZ15/10 kA
1958	0,21	0,45	0,36	0,43
1959	0,1	0,15	0,41	0,21
1960	0,13		0,29	0,29
1961	0,19		0,41	0,33

Duża awaryjność ograniczników SiC średnich napięć w Kanadzie była powodem obszernych badań przeprowadzonych pod koniec lat 1970-tych. Z terenu zakładu energetycznego *Ontario Hydro* przewieziono do laboratorium 300 ograniczników średnich napięć, które pracowały w systemie co najmniej 7 lat. Aż 250 wykazywało mniejsze lub większe uszkodzenia. Okazało się, że wilgoć, z ponad 80-procentowym udziałem, jest dominującą przyczyną uszkodzeń (rys. 1).

Wykazano również, że wskutek niestarannych oględzin ogranicznika wiele uszkodzeń zalicza się na poczet wyładowań piorunowych, ponieważ znaczna część awarii zdarza się podczas burz. W rzeczywistości prawdziwą przyczyną były nieszczelne uszczelki i wniknięcie wilgoci, a przepięcie piorunowe inicjowało jedynie uszkodzenie. W większości wypadków, gdyby ogranicznik był suchy, nic by się nie stało. Stwierdzono również, że aż 30% uszkodzonych ograniczników wybuchało z mniejszą lub większą intensywnością. Należy podkreślić jednak, że bardzo dużo ograniczników stosowanych w Kanadzie nie miało w tych latach zabezpieczeń antywybuchowych. Podobne badania przeprowadzone w USA, Australii, Niemczech i Brazylii potwierdziły, że wilgoć i wyładowania piorunowe są najczęstszą przyczyną uszkodzeń ograniczników iskiernikowych [6].



Rys. 1. Procentowy udział przyczyn uszkodzeń odgromników zaworowych SN w Kanadzie w 1978 [5]

1) Podziękowania: Autor dziękuje prof. Witoldowi Mielcarkowi z Instytutu Elektrotechniki Oddział we Wrocławiu za wycięcie próbek warystorowych i zmierzenie ich charakterystyk napięciowo-prądowych

Badania awaryjności ograniczników ZnO za granicą

Obszerne badania awaryjności ograniczników średnich napięć przeprowadzone zostały w Australii [7]. Z całego kraju przesłano 124 ograniczniki z warystorami na bazie tlenku cynku do laboratorium na Uniwersytecie Queensland. Były to ograniczniki iskiernikowe i beziskiernikowe, w osłonach porcelanowych lub polimerowych, ściągnięte z linii o napięciach 11 – 22 kV, które wykazywały uszkodzenia lub były podejrzewane, że są uszkodzone. Najstarsze sztuki miały 15 lat, aż 30 ograniczników było zniszczonych, pomiary wykazały, że 19 dalszych nie spełnia wymagań testów (powinny być wycofane z eksploatacji).

Ograniczniki iskiernikowe, zarówno te z osłonami porcelanowymi jak i polimerowymi, uszkodzone zostały z powodu wniknięcia wilgoci. Ograniczniki beziskiernikowe, wewnątrz których nie ma powietrza, są mniej narażone na wniknięcie wilgoci. Wilgoć powoduje korozję części metalowych, charakterystyczny nalot na miedzi, a warystory karborundowe bocznikujące iskierniki mogą się rozkruszyć. W ogranicznikach, przez które przepływał prąd zwarciowy, wiele części jest pokrytych przez sadzę, która maskuje ślady degradacji spowodowane przez wilgoć. Zniszczone przez wilgoć rezystory sterujące powodują zwarcie iskierników i zwiększają obciążenie warystorów roboczych, co w efekcie może prowadzić do przeskoków pod napięciem roboczym lub podczas przepięć dynamicznych. Wnikanie wilgoci najczęściej spowodowane jest przez złą jakość uszczelek, które po kilku, kilkunastu latach tracą swoje właściwości.

Warystory ZnO ulegają bardzo często uszkodzeniu w rezultacie przeskoku powierzchniowego, niekiedy warystor przebity zostaje w pobliżu powierzchni. Rzadziej zdarzają się przebicia wewnętrzne lub rozbicie warystora na dwa lub kilka części.

Uszkodzenie ograniczników zachodzi często podczas normalnych warunków pracy (przy napięciu roboczym). Okazuje się, że awarie często zdarzają się podczas operacji łączeniowych, np. załączanie pola rozdzielni wyłącznikiem liniowym. W takim przypadku współczynnik przepięć może osiągnąć wartość 5,2 [8]. Niekiedy awarii ulegają ograniczniki załączone na początku linii kablowej podczas uszkodzenia kabli. Przepięcia ziemnozwarciowe przy ponownym zapłonie łuku mogą spowodować przeciążenie ograniczników. Kolejnym sprawcą mogą być wyładowania piorunowe pojedyncze o dużym prądzie i ładunku. Bardzo niebezpieczne są również pioruny wielokrotne. Piorun wielokrotny o niewielkim prądzie w pojedynczym wyładowaniu może być groźniejszy od pojedynczego wyładowania o prądzie znacznie większym.

Niedawno w Japonii opublikowano statystykę awaryjności ograniczników przepięć w liniach wysokich napięć 66 – 500 kV za okres 1992 – 2002 [9]. W tym kraju zaczęto stosować ograniczniki beziskiernikowe w rozdzielniach wysokich napięć już w 1980 roku. Najstarsze ograniczniki mają już 30 lat. W systemie znajduje się ponad 52 000 ograniczników wysokich napięć. Ograniczniki iskiernikowe z warystorami karborundowymi stanowią niewielką, zanikającą część. W rozpatrywanym okresie 10 lat uszkodzeniu uległo zaledwie 60 ograniczników. Wskaźnik awaryjności jest zatem niezwykle niski i wynosi 0,01% na rok. Podkreślić należy, że wśród 60 uszkodzonych ograniczników, cztery zostały zniszczone przez trzęsienie ziemi.

Publikacja wymienia 12 przyczyn uszkodzeń:

1) pęknięcie podstawy izolacyjnej ogranicznika,
2) uszkodzona izolacja wskutek wyładowania piorunowego,
3) przebicie warystorów wskutek przepięcia rezonansowego,
4) uszkodzona uszczelka, wniknięcie wilgoci,
5) wzrost wartości prądu,
6) pęknięcie warystorów wskutek bardzo dużego prądu piorunowego,
7) zmiany starzeniowe warystorów,
8) przebita izolacja przez przepięcie dynamiczne,
9) uszkodzona osłona porcelanowa przez trzęsienie ziemi,
10) obniżenie rezystancji izolacji wskutek zmian starzeniowych,
11) tajfun, uszkodzenie osłony porcelanowej przez fruwające w powietrzu elementy,
12) inwazja wilgoci wskutek błędu produkcyjnego.

Beziskiernikowe ograniczniki przepięć do linii wysokich napięć są bardziej odporne na wpływ zabrudzeń od ograniczników iskiernikowych. Istnieje jednak niebezpieczeństwo zapłonu wyładowań niezupełnych wewnątrz osłony. Może to być przyczyną degradacji warystorów [10]. W literaturze pojawiają się doniesienia o degradacji warystorów w ogranicznikach pracujących w warunkach ciężkich zabrudzeń [11].

Awaryjność ograniczników ZnO w Polsce

Informacje dotyczące awaryjności ograniczników beziskiernikowych w Polsce są wyrywkowe. Niektóre zakłady energetyczne wręcz nie chcą ujawniać danych o awaryjności ograniczników traktując je jako tajemnicę firmy. Istnieje chyba tylko jeden artykuł opisujący awarię ograniczników 220 kV na terenie *PSE Południe* [12]. Jednak przypadków podobnych jest znacznie więcej, o czym świadczą informacje i zdjęcia wykonane przez autora (rys. 2 – 6). Niewątpliwie potrzebna jest analiza awaryjności ograniczników w skali całego kraju lub choćby jego części.

Oprócz wymienionych powyżej 12 technicznych przyczyn uszkodzeń ograniczników można znaleźć przypadki wynikające z błędnego doboru ograniczników. Najbardziej trywialnym jest zastosowanie ograniczników o zbyt małym napięciu trwałej pracy U_C i napięciu znamionowym U_r. Może to wynikać z nieznajomości definicji parametrów i procedury doboru ograniczników beziskiernikowych. Otóż napięcie znamionowe ogranicznika oznaczane jako U_r może być błędnie rozumiane jako napięcie, przy którym ogranicznik może pracować w sposób długotrwały pod napięciem roboczym. Niestety w języku angielskim napięcie to określane jest jako „rated voltage", co można również tłumaczyć m. in. jako napięcie kryterialne lub klasa napięciowa. Jest to napięcie sieci, przy którym ogranicznik może pracować tylko chwilowo, około 10 sekund. Po tym czasie może dojść do utraty równowagi termicznej i zniszczenia ogranicznika.

Rysunek 2 przedstawia ogranicznik o napięciu trwałej pracy U_C = 18 kV i napięciu znamionowym U_r = 22,5 kV, który zamontowano w linii 20 kV. Podczas doziemienia jednej fazy, na fazach zdrowych napięcie wzrosło do wartości porównywalnej z napięciem znamionowym. Po przebiciu cieplnym warystorów, łuk zwarciowy spowodował wytopienie w ceramice ZnO kanału o przekroju ponad 1 cm^2 i częściowe spalenie osłony z kauczuku silikonowego.

Prawidłowo obliczone napięcie trwałej pracy tego ogranicznika w sieci o napięciu znamionowym U_n = 20 kV z izolowanym punktem neutralnym powinno wynosić 26 kV:

$$U_C \geq \frac{k_{zd}}{\sqrt{3}} \cdot k_{sn} \cdot 1{,}05 \cdot U_n = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}05 \cdot 20 \ \ kV = 25{,}2 \ \ kV$$

k_{zd} – współczynnik zwarcia doziemnego, w linii z izolowanym punktem neutralnym równy $\sqrt{3}$

k_{sn} – współczynnik uwzględniający spadki napięcia w sieci, w sieciach średnich napięć równy 1,2

1,05 – współczynnik bezpieczeństwa z uwagi na zawartość harmonicznych w napięciu sieci

Rys. 2. Zniszczenia przez łuk na skutek błędnego doboru ogranicznika

Zniszczenie osłon polimerowych

Ograniczniki beziskiernikowe w osłonach polimerowych są bezpieczniejsze od ograniczników z osłonami porcelanowymi, ponieważ rozerwanie osłon polimerowych przebiega mniej gwałtownie. Jednak zapalenie łuku w osłonie może spowodować zwęglenie polimeru (powstanie śladu pełznego). W rezultacie jej rezystancja może zmniejszyć się o kilka rzędów. Przykładowo, rezystancja osłony pewnego ogranicznika 110 kV zmniejszyła się do zaledwie 18 MΩ. Oznacza to, że przy napięciu roboczym 63 kV prąd płynący przez zwęgloną osłonę wynosiłby aż 3,5 mA.

Zapalenie się łuku wewnątrz ogranicznika posiadającego membrany ciśnieniowe powoduje ich przerwanie i wyrzucenie gazów na zewnątrz osłony. Niektóre konstrukcje ograniczników mają tak uformowane elektrody, że po zadziałaniu urządzenia antywybuchowego możliwe jest wniknięcie znacznych ilości wody do środka ogranicznika (rys. 3). Dlatego znane są awarie tych ograniczników spowodowane przez wilgoć. Niekiedy nawet stosunkowo niewielka ilość wilgoci powoduje widoczne zmiany, łatwo dostrzegalne po otwarciu ogranicznika.

Na rysunku 4 pokazano dwie górne pokrywy osłon porcelanowych, lewa pokrywa została odkręcona z ogranicznika suchego, a prawa z ogranicznika, do którego wniknęła wilgoć.

Rys. 3. Uszkodzony ogranicznik z otwartymi otworami wylotu gazów

Rys. 4. Górne pokrywy osłon porcelanowych

Zniszczenie warystorów

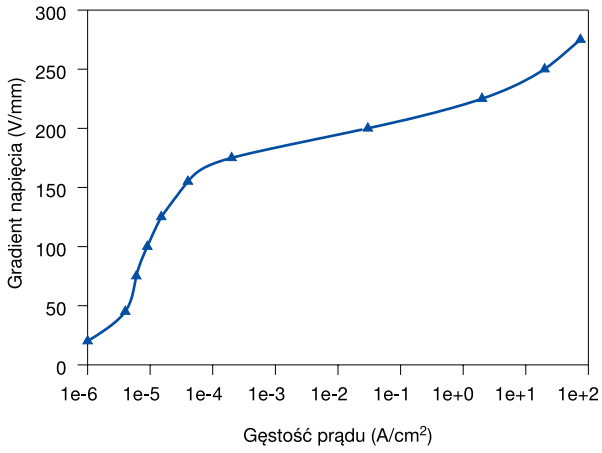
Nawet jeśli zniszczenie kolumny warystorów przez łuk jest znacznie mniejsze niż to pokazane na rysunku 2, to warystory zazwyczaj nie nadają się do użytku. Łuk może spowodować zmiany na powierzchni bocznej warystorów (małe pofałdowania), częściowe ubytki ceramiki (rys. 5), wytopienie cienkich elektrod aluminiowych na powierzchniach czołowych oraz często stosowanych aluminiowych przekładek pomiędzy sąsiednimi warystorami. Kawałki aluminium mogą zostać wtopione w ścianki boczne warystorów dodatkowo zmieniając ich charakterystykę napięciowo-prądową (biały ślad na rys. 6).

Rys. 5. Warystory z ogranicznika 110 kV zniszczonego przez łuk zwarciowy

Rys. 6. Warystor oczyszczony z widocznym ubytkiem elektrod

Jeden z mniej zniszczonych warystorów wybrano do zbadania zmian charakterystyki napięciowo-prądowej po czyszczeniu i oszlifowaniu jego powierzchni bocznych. Zabrudzony warystor miał bardzo małą rezystancję 180 Ω, przy napięciu 0,75 V płynął prąd o natężeniu 4 mA. Oczyszczenie szczotką drucianą spowodowało wzrost rezystancji do 350 Ω. Po oczyszczeniu zauważono metal (prawdopodobnie aluminium), który wtopiony został w boczną ścianę (biała plamka na rys. 6). Prawie cały bok warystora przybrał ciemnozielony kolor, typowy dla ceramiki ZnO. Jednak na obszarze o szerokości 3 cm pozostał ciemny ślad pozostawiony przez łuk. W pobliżu tego miejsca nastąpiło również uszkodzenie aluminiowej elektrody.

Po zeszlifowaniu powierzchni bocznej w miejscu wtopienia aluminium i zaczernionej powierzchni stwierdzono znaczny wzrost rezystancji warystora do 200 kΩ (przy napięciu 200 V prąd wynosił 1 mA). Dalsze szlifowanie wzdłuż całego obwodu spowodowało zaskakujący spadek rezystancji do 55 kΩ i do 48 kΩ po kolejnym szlifowaniu (4,2 mA przy 200 V). Jednak rezystancja nowego warystora przy napięciu 2 kV wynosi aż 2 TΩ. Po przepiłowaniu warystora wycięto ze środka małe próbki grubości 1 mm i powierzchni 1 cm^2. Pomiar charakterystyki napięciowo-prądowej wykazał, że środek warystora nie uległ degradacji (rys. 7). Regeneracja warystorów przez czyszczenie i szlifowanie jest więc możliwa, ale nieopłacalna.



Rys. 7. Charakterystyka napięciowo-prądowa próbki wyciętej ze środka uszkodzonego warystora

Wnioski

Awaryjność ograniczników iskiernikowych była spowodowana przede wszystkim przez wnikanie wilgoci. Wskaźnik awaryjności niektórych szczególnie wadliwych typów wynosił aż 2%.

Ograniczniki beziskiernikowe w osłonach polimerowych, zwłaszcza te, w których nie ma powietrza, są bardzo odporne na wnikanie wilgoci, a przez to i bardziej niezawodne. Wskaźnik awaryjności ograniczników wysokonapięciowych w Japonii wynosi zaledwie 0,01%.

Ograniczniki beziskiernikowe w osłonach polimerowych, tak jak każdy element systemu elektroenergetycznego, ulegają awariom. Niestety nie ma danych o awaryjności tych aparatów w skali całego kraju.

LITERATURA

[1] Czaplak W., Przyczyny uszkodzeń odgromników zaworowych 110 kV. *Energetyka* 1965, nr 2, s. 41-45

[2] Heller W., Jaczewski M., Awaryjność burzowa krajowych sieci wysokiego napięcia w 1957 r. *Energetyka* 1958, nr 6, s. 182-187

[3] Grudziecki S. Wyniki eksploatacyjne odgromników wydmuchowych 15 kV. *Acta Technica Gedaniensia* 1963, nr 2, s. 179-188

[4] Heller W., Jaczewski M., Jasiński E., Awaryjność burzowa sieci wysokiego napięcia w latach 1958-1959. *Energetyka* 1961, nr 5, s. 147-151

[5] Lat M.V., Kortschinski J., Distribution arrester research. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1981, vol. 100, no. 7, pp. 3496-3505

[6] Chrzan K. L., Awaryjność ograniczników przepięć. Konferencja pt."Ochrona przeciwprzepięciowa sieci elektroenergetycznych za pomocą ograniczników przepięć'. Poznań 2007, s. 13-16

[7] Darveniza M., Saha T.K., Wright S., Studies of in-service and laboratory failures of metal-oxide distribution surge arresters. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Australia, 2003, Vol. 22, No. 2, pp. 129-139

[8] Belka H., Schier A., Synal B., Wskazanie przyczyn i mechanizmu powstawania pzepięć w sieci 6 kV w Hucie Miedzi Głogów podczas zwarć doziemnych. Instytut Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, raport SPR nr 31/94, Wrocław 1994

[9] Shirakawa S., Kobayashi T. i inni, Verification on the installed number of surge arresters for 66-500 kV power systems in Japan. *IEEJ Transactions on Power and Energy* 2006, Vol. 126, No. 1, pp. 105-111

[10] Chrzan K., Koehler W., Feser K., Behaviour of zinc-oxide urge arresters under pollution. Int. Symposium on HV Engineering, New Orleans 1989, paper 26.01

[11] Akbar M., Ahmad M., Failure study of metal-oxide surge arresters. *Electric Power Systems Research* 50, 1999, pp. 79-82

[12] Nowak-Gajewska M., Kania A., Zastosowanie termowizji w diagnostyce ograniczników przepięć. *Energetyka* 2005, nr 12, s. 835-838