

Rozdział 1

PODSTAWOWE WIELKOŚCI ZNAMIONOWE APARATÓW

Podstawowe wielkości znamionowe aparatów charakteryzujące ich zachowanie się w zwykłych i zakłóceńowych warunkach pracy są następujące:

- napięcie znamionowe izolacji,
- znamionowy prąd ciągły,
- obciążalność zwarciorowa określona wartościami szczytowego prądu znamionowego i znamionowego prądu krótkotrwałego n - sekundowego.

1.1. Napięcie znamionowe izolacji

1.1.1. Stany obciążeń napięciowych izolacji aparatów

Napięcie znamionowe izolacji aparatu lub całego urządzenia U_{ni} jest to skuteczna wartość napięcia międzyprzewodowego, na którą izolacja aparatu, lub całego urządzenia została zbudowana i oznaczona oraz wytrzymuje - określona dla tego napięcia - napięcia probiercze.

Obowiązująca norma polska na łączniki wysokonapięciowe prądu zmiennego PN-64/E-06100 podaje np. następujące wartości liczbowe napięć znamionowych izolacji wymienionych łączników:

3; 6; 10; 15; 20; 30; 35; 45; 60; 110Z; 110; 120; 220Z; 220; 380Z kV.

Przy tym wartości liczbowe z literą Z odnoszą się do izolacji aparatów przeznaczonych do pracy w sieciach o skutecznie uziemionym punkcie zerowym. Konieczność regulacji napięcia w sieci powoduje utrzymywanie w pewnych punktach sieci napięcia wyższego od napięcia znamionowego sieci U_{ns} przez czas nieograniczony.

Przy tym przez napięcie znamionowe sieci U_{nS} rozumiemy skuteczną wartość napięcia międzyprzewodowego, na którą sieć została zbudowana.

Ogólne wymaganie doboru napięcia znamionowego izolacji aparatu jest określone warunkiem

$$U_{ni} \geq U_{nS} ,$$

wtedy bowiem największe napięcia robocze U_{rmax} występujące w pewnych punktach sieci

$$U_{rmax} = k_{rmax} U_{nS}$$

nie przekraczają najwyższych dopuszczalnych wartości napięć roboczych aparatów $U_{gn} = k_{rmax} U_{ni}$. Wartości te z kolei przykładowo dla łączników wysokonapięciowych prądu zmiennego wg cytowanej normy PN-64/E-06100 są następujące:

3,6; 7,2; 17,5; 24; 36; 40,5; 52; 72,5; 123; 145;
245; 420 kV.

Czytelnik zechce sprawdzić, że wartości współczynnika

$$k_{rmax} = \frac{U_{rmax}}{U_{nS}} = \frac{U_{gn}}{U_{ni}}$$

dla poszczególnych wartości napięcia znamionowego izolacji wahają się w granicach 1,1 - 1,2, co odpowiada wymaganiom wszystkich praktycznie norm innych krajów oraz norm międzynarodowych.

Niezależnie od konieczności uwzględnienia omówionych wyżej skutków regulacji napięcia w sieciach i dopuszczalnej obciążalności napięciowej ciągłej izolacji, odporność izolacji o określonym napięciu znamionowym U_{ni} aparatów uwzględniać musi następujące ciągłe lub krótkotrwałe stany przepięciowe występujące podczas pracy tej izolacji:

- przepięcia łączeniowe o częstotliwości znamionowej,
- przepięcia łączeniowe o średniej częstotliwości (częstotliwości własnej sieci f_0),
- przepięcia udarowe.

A. Spośród przebiegów łączeniowych o częstotliwości znamionowej wyróżniamy:

a) przebiegi dynamiczne powstające przy wyłączaniu większych odbiorów i linii długich obciążonych na końcu i osiągnące wartości $\leq 1,3 U_{NS}$,

b) przebiegi ruchowe długotrwałe wywołane asymetrią pojemnościową linii napowietrznych o praktycznie pomijalnych wartościach,

c) przebiegi zakłóceniowe w postaci łączeniowych przebiegów ustalonych występujących przy zwarciach doziemnych. W sieci z izolowanym punktem zerowym występują wtedy napięcia doziemne o 87% większe od obliczeniowych ciągłych napięć roboczych izolacji doziemnej, czyli napięcia w przybliżeniu równe napięciu międzyprzewodowemu. Ponieważ przy zwarciu doziemnym w sieci z izolowanym punktem zerowym mamy do czynienia z małymi prądami zwarciovymi, przebiegi te mogą być utrzymywane przez czas dłuższy, np. kilka godzin. W sieci z uziemionym skutecznie punktem zerowym omawiany wzrost napięcia wynosi tylko 38% i z uwagi na dużą wartość prądu doziemnego przebiegi te musi być likwidowane w możliwie najkrótszym czasie.

B. Przebiegi łączeniowe o średniej częstotliwości (częstotliwości własnej sieci f_0) występują przy wyłączaniu prądów zwarciovych, prądów obciążeniowych, prądów jałowych linii i transformatorów, przy gaśnięciu łuku elektrycznego płonącego swobodnie. Czas trwania tych przebiegów jest na ogół mniejszy od jednego półokresu napięcia sieci i jedynie przy występowaniu zapłonów zwrotnych przy wyłączaniu obciążeń pojemnościowych może się przedłużać do około 3 półokresów. Przebiegi łączeniowe określane jako wartość szczytowa przebiegu względem ziemi przekracza wartość szczytową obliczeniowego ciągłego napięcia robocznego izolacji doziemnej ($U_{ro} = \frac{U_{rmax}}{\sqrt{3}}$) dwu-, trzykrotnie, a przy wyłączaniu prądów zwarciovych bezpiecznikami nawet cztero- do ośmiokrotnie. Jednakże występowanie krotności większych od 4 jest bardzo mało prawdopodobne.

C. Przepięcie udarowe o największych wartościach występują wskutek bezpośredniego wyładowania piorunowego do linii lub urządzeń podstacji bez urządzeń odgromowych. Drugą grupę przepięć udarowych stanowią przepięcia pośrednie (indukowane) stwarzające znacznie mniejsze zagrożenie izolacji.

Fale wyładowań bezpośrednich do podstacji napowietrznych bez urządzeń odgromowych mogą osiągnąć wartości:

$$\begin{aligned} \text{wartość szczytowa } U_{\max} &\geq 5 \text{ MV,} \\ \text{stromość narastania } &\geq 10 \text{ MV}/\mu\text{s,} \\ \text{prąd szczytowy } i_{\max} &\approx 160 \div 200 \text{ kA.} \end{aligned}$$

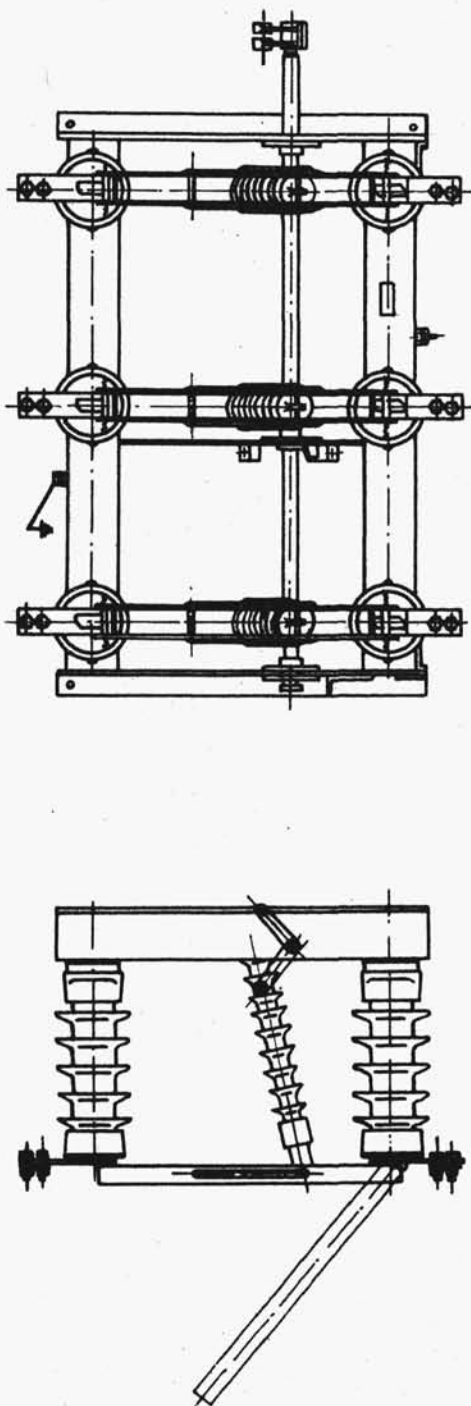
1.1.2. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych izolacji aparatów

Tory prądowe aparatów elektrycznych znajdujące się pod napięciem muszą być izolowane względem siebie oraz względem ziemi. W stanie otwartym łącznika musi również występować izolacja międzyczaciskowa między rozłączonymi częściami bieguna. Ponadto uzwojenia dławików i przekładników z uwagi na różnicę potencjałów między zwojami posiadają izolację międzyzwojową (tzw. izolację szeregową).

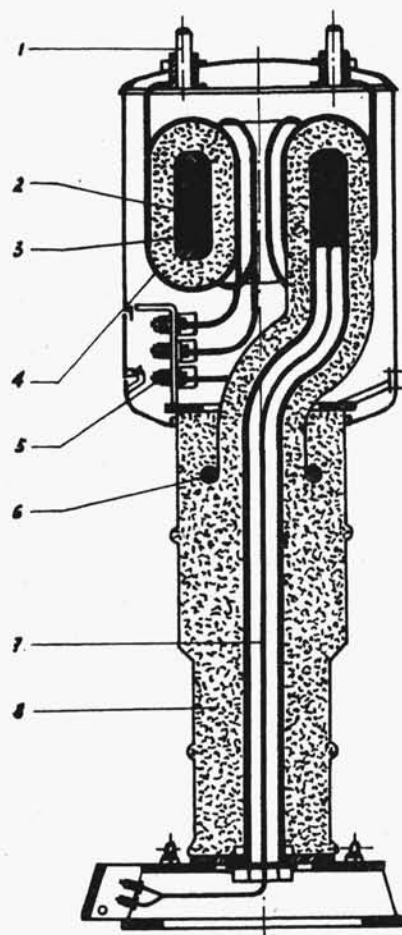
Prostym przykładem realizacji izolacji trójbiegunowego łącznika w.n. jest rys.1.1 pokazujący trójbiegunowy odłącznik napowietrzny. Z uwagi na rodzaj materiału izolacyjnego mamy tutaj izolację stałą (izolatory wsporcze ceramiczne lub żywiczne) równoległe z izolacją powietrzną, jako izolację doziemną oraz powietrze, jako izolację międzybiegunową i między rozłączonymi częściami bieguna w stanie otwartym odłącznika.

Kolejny rys.1.2 podaje przykład nowoczesnego rozwiązania izolacji przekładnika prądowego wewnętrznego 110 kV w postaci izolacji z żywicy epoksydowej.

Obok izolacji powietrznej i stałej stosuje się również w budowie aparatów elektrycznych izolację olejową i gazową szczelnie zamkniętą. Ta ostatnia występuje przede wszystkim w postaci sprężonego powietrza a ostatnio i sześćciofluorku siarki (SF_6).



Rys.1.1.1. Odłącznik napowietrzny 30 kV (ZWAR)



Rys.1.2. Przekładnik prądowy żywiczny (wykonanie wewnętrzne AEG): 1-zaciski przyłączeniowe uzwojenia pierwotnego, 2-rdzenie toroidalne, 3-uzwojenie wtórne, 4-uzwojenie pierwotne, 5-zaciski przełączniowe uzwojenia pierwotnego, 6-pierścień ekranujący, 7-przewody doprowadzające do uzwojenia wtórnego, 8-izolator żywiczny

1.1.3. Napięcia probiercze izolacji

Wartości i rodzaje napięć probierczych dla sprawdzenia izolacji aparatu zbudowanego na dane napięcie znamionowe są tak dobrane, aby stanowiły sprawdzian niezawodnej pracy izolacji w warunkach zwykłych i zakłóceniach.

I tak:

- Izolacja biegunów aparatów względem ziemi w sieci z izolowanym punktem zerowym może znajdować się trwale pod napięciem międzyprzewodowym, a więc wytrzymałość tej izolacji powinna być sprawdzana tym samym napięciem, co izolacja międzybiegunowa.

- Izolacja doziemna aparatów przeznaczonych do pracy w sieci ze skutecznie uziemionym punktem zerowym narażona jest na przebiecia o częstotliwości znamionowej równe 0,8 wartości przebiec tego rodzaju występujących w sieci z izolowanym punktem zerowym.

- Największe wartości przebiec łączeniowych związane są z częstotliwościami własnymi sieci f_0 i krótkimi czasami trwania.

- Izolacja aparatów powinna posiadać odpowiednio dużą wytrzymałość udarową. Wartości przebiec udarowych ograniczają w tym przypadku ochronne urządzenia odgromowe.

A. Napięcia probiercze izolacji o częstotliwości znamionowej f_n .

Wyróżniamy tutaj próby napięciowe izolacji długotrwałe i krótkotrwałe:

a. Próby napięciowe izolacji długotrwałe prowadzone są w zasadzie dla sprawdzenia izolacji organicznej na napięcia 30 kV i wyższe w czasie zwykle rzędu godzin, po którym następuje tzw. stabilizacja, tj. ustalenie się tangensa kąta stratności izolacji $[tg\delta = f(t) = \text{const}]$.

Napięcie probiercze U_p dla izolacji względem ziemi dla aparatów przeznaczonych do pracy w sieci z nieuziemionym i uziemionym skutecznie punktem zerowym wynoszą kolejno

$$U_p = 1,1 U_{rmax} = 1,1 k_{rmax} U_{ni}, \quad (1.1a)$$

$$U_p = 1,1 U_{ro} = 1,1 U_{rmax} / \sqrt{3} = 1,1 k_{rmax} U_{ni} / \sqrt{3}, \quad (1.1b)$$

gdzie $U_{ro} = \frac{U_{rmax}}{\sqrt{3}}$ - obliczeniowe ciągłe napięcie robocze izolacji doziemnej.

b. Próby napięciowe izolacji krótkotrwałe (1 min. lub 5 min.) służą sprawdzeniu odporności izolacji aparatów (doziemnej, międzybiegunowej i międzyczaciskowej) na przepięcia łączeniowe.

W przypadku prób aparatów przeznaczonych do sieci bez skutecznie uziemionego punktu zerowego izolacja doziemna sprawdzana jest napięciem spełniającym związek

$$\left(U_{pfn} 1 \right) \geq k U_{ro} = \frac{k U_{rmax}}{\sqrt{3}} = \frac{k k_{rmax} U_{ni}}{\sqrt{3}}, \quad (1.2)$$

gdzie k - współczynnik przepięcia,

k_{rmax} - współczynnik dopuszczalnego trwałego przekroczenia napięcia znamionowego w warunkach roboczych izolacji.

Dla zwymiarowania natomiast izolacji przerwy łączników izolacyjnych i podstaw bezpiecznikowych wychodzi się z założenia rozłączania badanym łącznikiem 2 układów czynnych^{x)}, które mogą znajdować się w opozycji napięciowej względem siebie w czasie występowania trwałego przepięcia na izolacji doziemnej od uziemienia jednej fazy po jednej stronie przerwy i przepięcia łączeniowego o częstotliwości własnej sieci f_0 po drugiej stronie przerwy. Otrzymujemy wtedy wyrażenie na napięcie probiercze dla przerwy izolacyjnej

^{x)} tj. zawierających źródła SEM w odróżnieniu od biernych, nie zawierających źródeł SEM.

$$\begin{aligned}(U_{\text{pfn}})_2 &\geq (U_{\text{pfn}})_1 + \sqrt{3} U_{\text{ro}} = (U_{\text{pfn}})_1 + k_{\text{rmax}} U_{\text{ni}} \approx \\ &= (U_{\text{pfn}})_1 + 1,10 U_{\text{ni}}.\end{aligned}\quad (1.3)$$

Powyższe wzory po przyjęciu wartości liczbowych współczynników przyjmują postać

$$\begin{aligned}(U_{\text{pfn}})_1 &= 2,2 U_{\text{ni}} + 20 \text{ kV}, \\ (U_{\text{pfn}})_2 &= 2,2 U_{\text{ni}} + 20 \text{ kV} + 1,1 U_{\text{ni}} = \\ &= 3,3 U_{\text{ni}} + 20 \text{ kV}.\end{aligned}\quad (1.3a)$$

Warto tu jeszcze przypomnieć, że dla zwymiarowania przerwy izolacyjnej wyłączników przyjmujemy napięcie probiercze wg wzoru 1.2a w przypadku odłączania układu czynnego od biernego i wg wzoru 1.3a w przypadku rozłączania badanym wyłącznikiem dwóch układów czynnych.

W przypadku prób aparatów przeznaczonych do sieci o skutecznie uziemionym punkcie zerowym omawiane wyżej napięcia probiercze obniża się o 20%.

Izolacja aparatów napowietrznych powinna dodatkowo wytrzymywać napięcia probiercze o częstotliwości znamionowej pod znormalizowanym deszczem (np. w Polsce wg normy PN-56/E-04060) o wartościach ze wzorów 1.2a i 1.3a.

c. Próby napięciowe udarowe służą sprawdzeniu odporności izolacji na działanie przepięć atmosferycznych.

W celu ochrony izolacji wewnętrznej urządzeń przed falami udarowymi o różnej wysokości i kształcie stworzono w tym względzie zasadę dwupoziomowej izolacji oraz poziomu ochrony.

Poziom podstawowy izolacji jest to poziom średni i obowiązuje dla izolacji powietrznej otwartej, między częściami

będącymi pod napięciem a ziemią oraz między biegunami iskierników koordynacyjnych poziomu podstawowego.

Poziom wyższy izolacji obowiązuje dla:

- izolacji stałej,
- izolacji olejowej,
- izolacji gazowej szczelnie zamkniętej,
- przerw izolacyjnych łączników izolacyjnych oraz przerw między zaciskami rozłączonych części bieguna odłączników mocy i obciążenia.

Poziom ochrony jako poziom dolny ograniczający przepięcia obowiązuje dla:

- iskierników ochronnych,
- odgromników.

I tak izolacja aparatów przeznaczonych do pracy w sieci bez skutecznie uziemionego punktu zerowego powinna wytrzymać udary obydwu znaków (wg m.in. normy polskiej 1/50 μ s) o wartości szczytowej:

- dla poziomu podstawowego

$$U_{pp} = 4,7 U_{ni} + 30 \text{ kV}, \quad (1.4)$$

- dla poziomu wyższego wartości o 15% wyższe

$$U_{pp} = 1,15 (4,7 U_{ni} + 30 \text{ kV}). \quad (1.5)$$

Przy tym przerwy izolacyjne łączników izolacyjnych powinny zawsze wytrzymywać napięcia udarowe o wartościach szczytowych powodujących 100% przeskoków na izolacji doziemnej.

Wreszcie poziom udarowy ochrony rozumie się jako największą dopuszczalną wartość napięcia udarowego, która może wystąpić na zaciskach odgromnika lub iskiernika ochronnego. Jest ona wyznaczona ze wzoru

$$U_{po} = 3,6 U_{nS} + 10 \text{ kV}. \quad (1.6)$$

Izolacji aparatów przeznaczonych do pracy w sieci o napięciu przekraczającym 60 kV ze skutecznie uziemionym punktem

zerowym przypisuje się wartości uderowych napięć probierczych wyznaczonych ze wzorów 1.4, 1.5 i 1.6 i obniżonych o 20%.

Ponieważ wytrzymałość izolacji powietrznej zależy od warunków klimatycznych, przeto wartości napięć probierczych "na sucho" obowiązują w określonych warunkach klimatycznych ustalonych porozumieniem międzynarodowym jako tzw. klimat normalny zdefiniowany jak następuje.

Temp. otoczenia $t_n = 20^{\circ}\text{C}$,
ciśnienie $p_n = 760 \text{ Tr}$,
wilgotność $w_n = 11 \text{ g H}_2\text{O/m}^3$.

1.1.4. Przykłady liczbowe

A. Wyznaczyć wartości napięć probierczych dla odłącznika o napięciu znamionowym izolacji 20 kV przeznaczonego do pracy w sieci z punktem zerowym izolowanym.

- Napięcie probiercze izolacji doziemnej i międzybiegunowej przy $f_n = 50 \text{ Hz}$ wg 1.2a

$$(U_{p50})_1 = 2,2 \cdot 20 + 20 \text{ kV} = 64 \text{ kV}.$$

- Napięcie probiercze izolacji przerwy międzyczaciskowej przy $f_n = 50 \text{ Hz}$ wg 1.3a

$$(U_{p50})_2 = 3,3 \cdot 20 + 20 \text{ kV} = 86 \text{ kV}.$$

- Napięcie probiercze uderowe izolacji doziemnej i międzybiegunowej wg 1.4

$$U_{pp} = 4,7 \cdot 20 + 30 \text{ kV} = 124 \text{ kV}.$$

- Napięcie probiercze uderowe izolacji międzyczaciskowej na rozłączonym biegunie wg 1.5

$$U_{pp} = 1,15 (4,7 \cdot 20 + 30 \text{ kV}) = 143 \text{ kV}.$$

Tak obliczone wartości napięć probierczych różnią się zwykle nieco od wartości podawanych w normach. Te ostatnie bo-

wiem podają wartości zaokrąglone w takich granicach, jakie wynikają z dokładności pomiaru i nastawiania napięć probierczych przy przeprowadzaniu prób napięciowych.

Przykładem może tu służyć tablica 1, wyjęta z cytowanej już normy polskiej PN-64/E-06100 i podająca udarowe napięcia probiercze izolacji.

Tablica 1

Udarowe napięcia probiercze izolacji wg PN-64/E-06100

Napięcie znamionowe izolacji U_{in}	Najwyższe dopuszczalne napięcie robocze U_{gn}	Udarowe napięcie probiercze	
		izolacji doziemnej i międzybiegunowej oraz izolacji międzyzaciiskowej łączników bez bezpiecznych przerw izolacyjnych	izolacji międzyzaciiskowej bez bezpiecznych przerw izolacyjnych
kV	kV	kV	kV
3	3,6	45	52
6	7,2	60	70
10	12	75	85
15	17,5	95	110
20	24	125	145
30	36	170	195
35	40,5	200	230
45	52	250	290
60	72,5	325	375
110 Z	123	450	520
110	123	550	630
120 Z	145	550	630
120	145	650	750
220 Z	245	900	1035
220	245	1050	1210
380 Z	420	1425	1550

B. Wyznaczyć wartości napięć probierczych dla wyłącznika o napięciu znamionowym izolacji 110 kV przeznaczonego do pracy w sieci z punktem zerowym skutecznie uziemionym.