

## Przebiegi przenoszone przez uzwojenia transformatorów energetycznych - pomiary oraz analiza teoretyczna

**Streszczenie.** Ważnym zagadnieniem z punktu widzenia eksploatacji transformatorów są przebiegi przenoszone pomiędzy uzwojeniami oraz powodowane przez nie zagrożenia dla prawidłowej pracy systemu elektroenergetycznego. W niniejszym referacie przedstawiono analizę doświadczalną przebiegów przenoszonych z uzwojenia wysokiego napięcia do otwartego uzwojenia niskiego napięcia. Dokonano także weryfikacji obliczeniowej tychże przebiegów dla konkretnego transformatora.

**Abstract.** Transferred lightning overvoltage and danger to the grid caused by them are very important issue from exploitation point of view. This paper presents empirical analysis of overvoltage transferred from high voltage winding to open-circuit low voltage winding. Analytical verification of this overvoltage for given transformer was made as well. (**Lightning overvoltage transferred through windings of transformers – measurements, calculation and theoretical analysis**).

**Słowa kluczowe:** transformator blokowy, przebiegi przenoszone, pomiary RSO

**Keywords:** GSU transformer, transferred lightning overvoltage, RSO measurements

### Wstęp

Piorunowymi przebiegami przenoszonymi nazywamy przebiegi powstające w nieatakowanych udarem uzwojeniach transformatora.

W przeszłości rozpatrywane były przypadki przebiegów przenoszonych do uzwojeń nieatakowanych w układach połączeń odpowiadających próbie piorunowej. Jak wiadomo przy tej próbie uzwojenia nie połączone z uzwojeniem testowanym miały wszystkie swoje zaciski zwarte i uziemione.

Tym niemniej w pewnych przypadkach w uzwojeniach tych powstawały wówczas przebiegi niebezpieczne dla ich izolacji.

Klasyczny przypadek tego rodzaju zagrożenia stanowiły przebiegi przeniesione z uzwojenia GN o zacisku liniowym w środku wysokości uzwojenia do sąsiadującego z nim uzwojenia DN o zaciskach na krańcach uzwojenia połączonych z ziemią. Należy zauważyć, że przy eksperymentalnym określaniu wartości tych przebiegów, wobec braku dostępu do miejsc pomiaru na gotowej jednostce, są one kłopotliwe do wykonania.

Pomiary tego rodzaju wraz z analizą zagrożeń zostały opisane przez jednego z autorów w referacie prezentowanym na Konferencji Remontowej Energetyki w roku 2002 [1] oraz na Forum Transformatory Energetyczne [2] w listopadzie 2008r.

Obecnie, coraz częściej, odbiorcy transformatorów żądają określenia zagrożeń piorunowych, przy atakowaniu udarem piorunowym zacisku liniowego GN, na nieatakowanych udarem uzwojeniach DN pozostających z niezziemionymi zaciskami.

Nie ma odpowiednika takiego połączenia podczas próby piorunowej.

Zatem należy wnosić, że mamy do czynienia z odtworzeniem takiej sytuacji w warunkach eksploatacji w którym zacisk liniowy uzwojenia GN jest narażony na przebiegi atmosferyczne, a zaciski uzwojenia DN pozostają otwarte.

Możliwość zaistnienia takiej sytuacji, upatrujemy w konieczności zachowania otwartych uzwojeń DN, gotowych do natychmiastowego ponownego włączenia, w transformatorze ze stale włączoną linią GN. Gdyby bowiem, w takim przypadku, transformator znalazł się w obszarze burzowym, to na jego zaciskach GN mogłoby pojawić się przebiegi piorunowe, które w części, drogą wewnętrznych sprzężeń elektromagnetycznych, przeniosły by się do uzwojenia DN o swobodnych końcach.

Wartości przenoszonych przebiegów zależą od układu sprzężeń elektromagnetycznych między uzwojeniem GN i DN. Warto zauważyć, że są one dokładnie takie same jak przy obliczaniu przebiegów piorunowych odtwarzających warunki próby piorunowej. Inne są natomiast warunki brzegowe dotyczące uzwojenia DN. Należy sądzić, że w danych do obliczeń należy obciążyć zaciski uzwojenia DN dużymi rezystancjami. Taki sposób obliczania został przez autorów wypróbowany, a wyniki dokonanych w takich warunkach obliczeń zostały porównane z pomiarami przebiegów.

### Pomiary przebiegów przenoszonych

Prostym i wygodnym sposobem określania tych przebiegów przenoszonych są pomiary z oscyloskopową rejestracją przebiegów czasowych napięć z zastosowaniem niskonapięciowego generatora udarów powtarzalnych - pomiary RSO<sup>1</sup>.

Przy ich wykonywaniu poczyniono tylko jedno założenie dotyczące liniowości przebiegów impulsowych względem napięcia. Jednakże ten problem został pozytywnie zweryfikowany przez porównanie przebiegów detekcyjnych od udaru pełnego i udaru obniżonego, jak i przez powszechne stosowanie tej metody przy pomiarach rozkładu przebiegów piorunowych w uzwojeniach transformatorów.

Zaletami metody pomiarowej jest:

- uwzględnianie rzeczywistych wymiarów,
- uwzględnianie rzeczywistego sposobu połączeń,
- uwzględnienie aktualnych parametrów materiałowych.

Zapewnia to wierne odtworzenie warunków pomiarowych badanego obiektu.

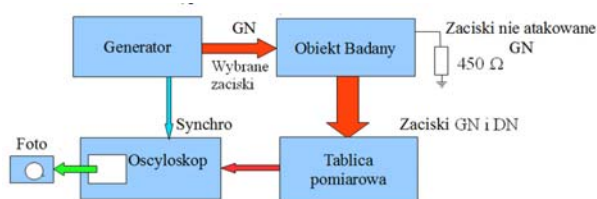
Niestety pomiary mogą być dokonane na istniejącym już obiekcie - mogą więc potwierdzać słuszność koncepcji konstrukcyjnej w odniesieniu do przebiegów przenoszonych, bądź wskazać na zastosowanie zmian konstrukcyjnych.

Podobnie jak przy pomiarach rozkładu przebiegów piorunowych w uzwojeniach powtarzanie takich pomiarów, na takich samych jednostkach, pozwala na porównanie wpływu czynników zmieniających się w poszczególnych egzemplarzach serii wykonanych obiektów.

<sup>1</sup> RSO - recurrent surge oscilloscop

## Wykonywanie pomiarów

Schemat blokowy układu do wykonywania pomiarów RSO, przy pomiarach przepięć przenoszonych przedstawiono na rys.1.



Rys.1 Schemat blokowy układu pomiarowego

W schemacie tym podstawowym elementem jest generator ударов powtarzalnych.

Kształt udaru, podobnie jak ma to miejsce w generatorze do wykonywania prób piorunowych transformatora, uzyskuje się przez dobór stosownych rezystancji i pojemności obwodu w którym ustawiany jest kształt udaru.

Częstotliwość powtarzania udaru jest bliska, lecz nie równa częstotliwości sieci, co zapobiega pojawianiu się na ekranie oscyloskopu zakłóceń sieciowych i zapewnia wytłumienie się przebiegów wyrównawczych przed upływem okresu repetycji udaru.

Zachowanie stałego przedziału czasu, między początkiem wyzwalania podstawy czasu i momentem startu udaru (Synchro), pozwala na uzyskanie nieruchomego, powtarzalnego obrazu na ekranie oscyloskopu. Nieruchomy obraz pozwala na wygodną w dalszej obróbce wyników rejestrację fotograficzną.

Badany transformator winien być kompletnie zmontowanym transformatorem, a jego wszystkie zaciski wyprowadzone na tablicę pomiarów, na której są wykonywane wszystkie połączenia.

Udar z generatora ударов powtarzalnych łączy jest z wybranymi zaciskami uzwojenia GN. Po doprowadzeniu udaru do atakowanych zacisków należy ustawić jego kształt. Wybrane na tej tablicy punkty pomiaru łączy się kolejno z oscyloskopem. Nieruchomy obraz z ekranu oscyloskopu jest rejestrowany przez aparat fotograficzny.

## Przyjęta metodyka pomiaru

Podczas pomiaru wybierane są kolejno zaciski GN, do których doprowadzony jest niskonapięciowy udar powtarzalny. Stosuje się:

- atak w jeden zacisk uzwojenia GN - kolejno: 1U, 1V i 1W,
- atak w parę zacisków uzwojenia GN - kolejno: 1U + 1V, 1V + 1W i 1W + 1U,
- atak we wszystkie trzy zaciski GN: 1U + 1V + 1W.

Nie zaatakowane udarem zaciski GN uziemia się przez rezystor o wartości impedancji falowej linii  $450\Omega^2$ . Pomiary przepięć doziemnych uzwojenia DN są wykonywane kolejno na zaciskach:

- 2U do ziemi,
- 2V do ziemi,
- 2W do ziemi.

Pomiary przepięć międzyfazowych DN są wykonywane kolejno między zaciskami:

- od 2U do 2V,

- od 2V do 2W,
- od 2W do 2U.

Jeżeli podczas pracy transformatora zacisk gwiazdowy jest trwale uziemiony, to przy tych pomiarach winien być również trwale uziemiony.

Jeżeli uzwojenie GN jest połączone z uzwojeniem regulacyjnym, to pomiary przepięć przenoszonych są wykonywane przy pozycjach przełącznika zaczepów:

- pozycja pełny +,
- pozycja pełny -,
- pozycja 0, { 0+ czy 0- } przy której przepięcia przenoszone są większe.

## Ocena wyników pomiarów

Przy ww. pomiarach, otwarte zaciski uzwojenia DN sprawiają, że pojemność doziemna uzwojenia GN jest mniejsza niż w warunkach próby piorunowej, gdy uzwojenie DN jest zwarte i uziemione. Można zatem sądzić, że przepięcia doziemne uzwojenia GN będą w takich warunkach mniejsze niż w warunkach próby piorunowej. To stwierdzenie jest również słuszne w odniesieniu do przepięć na izolacji wzdłużnej uzwojenia GN, bo zmniejszenie pojemności doziemnej zmniejsza współczynnik  $\alpha = \sqrt{c/k}$  decydujący o wartości przepięć na izolacji wzdłużnej.

Zatem, przy rozwartych zaciskach uzwojenia DN, nie należy obawiać się niebezpiecznych zagrożeń izolacji uzwojenia GN, a zagrożona być może izolacja uzwojenia DN.

Przedstawienie, wyników - wartości maksymalnych pomiarów przepięć na zaciskach DN w procentach wartości szczytowej udaru przyłożonego do zacisków uzwojenia GN, informuje o tym jaka część udaru przyłożonego do uzwojenia GN przenosi się na otwarte zaciski uzwojenia DN.

Przedstawienie tych rezultatów w procentach wartości maksymalnej udaru probierczego uzwojenia DN, informuje o tym, w jakim stopniu napięcie przeniesione stanowi zagrożenie dla izolacji uzwojenia DN.

Jeżeli wartość szczytowa, zmierzonego na zaciskach DN przepięcia, jest mniejsza od jego poziomu probierczego przy próbie piorunowej, to uznaje się, że przepięcia przeniesione nie są groźne dla izolacji doziemnej i międzyfazowej uzwojenia DN.

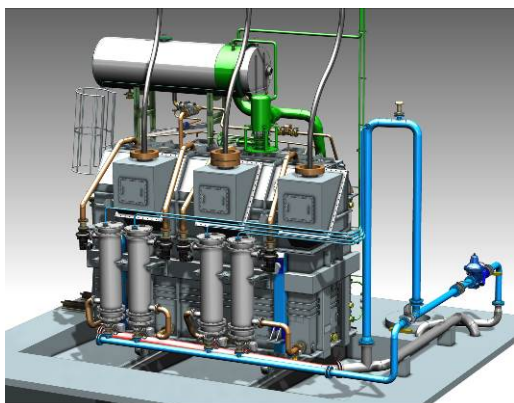
Jeżeli wartość szczytowa, któregośkolwiek przepięcia przeniesionego do DN przekracza jego poziom probierczy, to konieczne jest, aby bezpośrednio na zaciskach uzwojenia DN transformatora zamontować ograniczniki przepięć (odgromniki), stosowne do poziomu probierczego uzwojenia DN.

## Przykład pomiarów

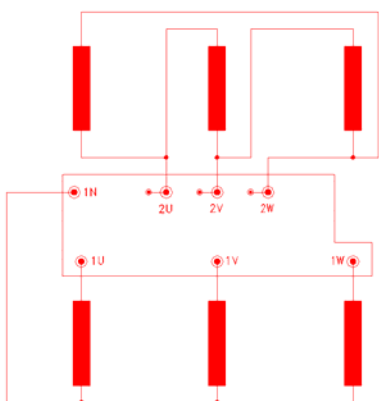
Pomiarów dokonano dla transformatora blokowego typu TOBNLa 156000/240, którego widok pokazano na rys.2 o schemacie połączeń jak na rys.3 i następujących parametrach znamionowych:

- Moc znamionowa: 156 MVA
- Przekładnia napięciowa: 242000 V/13800 V
- Układ i grupa połączeń: YNd11
- Napięcie zwarcia: 12,27%
- Straty obciążeniowe  $\Delta P_{Cu}$ : 474kW
- Straty jałowe  $P_0$ : 54,7kW
- Chłodzenie: ODWF
- Napięcia probiercze:  
Poziomy izolacji: GN LI850 LIC935 SI700 IVPD252 LTAC360 AV230  
GN-N LI550 AV230  
DN LI125 AV50

<sup>2</sup> Spotyka się wartości impedancji falowej  $400\Omega$  lub  $500\Omega$ . Przyjmujemy  $450\Omega$ . Sprawdzone pomiarami, że w transformatorach dużej mocy różnice w przepięciach przy tych rezystancjach, w stosunku do rezystancji  $450\Omega$  są  $\leq 2\%$ .



Rys.2 Widok transformatora TOBNLa 150000/240



Rys.3 Schemat połączeń transformatora typu TOBNLa 150000/240

### Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie oscylogramów przepięć na otwartych zaciskach uzwojenia DN. Obok każdego oscylogramu zamieszczono wartości skali napięcia i czasu, oraz szczytową wartość napięcia przeliczoną proporcjonalnie do poziomu wartości napięcia probierczego.

Dodatkowo wartości szczytowe wszystkich zmierzonych napięć na zaciskach uzwojenia DN, w danym układzie połączeń, przepięć są zestawiane w tabelach wyników.

Tabela 1. Wartości szczytowe przepięć doziemnych DN przy atakowaniu pojedynczych zacisków GN

Atakowane	Do ziemi adres	Wartość szczytowa
1U	2U - Z	62,9kV
1V	2V - Z	62,8kV
1W	2W - Z	59,5kV
Średnia		61,73kV
Max odchyłka		1,90%

Tabela 2. Wartości szczytowe przepięć między fazami DN przy atakowaniu pojedynczych zacisków GN

Atakowane	Między fazami	Wartość szczytowa
1U	2U - 2V	88,4kV
1V	2V - 2W	90,5kV
1W	2W - 2U	105,4kV
Średnia		94,77kV
Max odchyłka		11,20%

Zauważono, że w wynikach z tabeli 1 największe wartości przepięć występują zawsze na zaciskach uzwojenia atakowanego udarem. Pod względem

elektromagnetycznym sprzężenia we wszystkich fazach są takie same. Zbliżone wyniki wskazują na powtarzalność wykonania i staranność montażu.

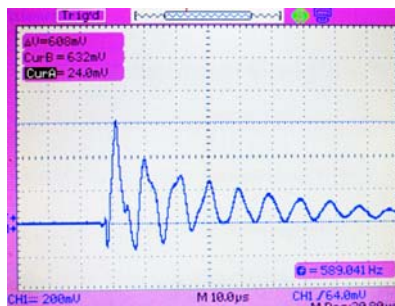
W tabeli 2 wyniki w dwóch pierwszych wierszach różnią się niewiele, dotyczą one sąsiednich faz. Przy ataku w 1W mierzone jest przepięcie między skrajnymi fazami. Wynik ten wyraźnie różni się od dwóch poprzednich, bo sprzężenia w tym przypadku są wyraźnie inne.

Na rys. 4. przedstawiono przykładowy oscylogram napięcia doziemnego na zacisku 2U, przy atakowanym zacisku 1U.



Rys. 4 Przepięcie doziemne na zacisku 2U do ziemi. Atakowany zacisk 1U - Udar pełny 850kV. Wartość szczytowa  $U_m=62,9kV$ . Skala napięcia: 17kV/dz., skala czasu: 10µs /dz.

Na rys. 5. przedstawiono przykładowy obraz napięcia między fazami uzwojenia DN (zaciski 2U i 2V). Atakowany jeden zacisk uzwojenia GN - 1W.



Rys. 5 Przepięcie między fazami 2U - 2V. Atakowany zacisk 1W - Udar pełny 850kV. Wartość szczytowa  $U_m=105,4kV$ . Skala napięcia: 34kV/dz., skala czasu: 10µs/dz.

Tabela 3. Wartości szczytowe przepięć doziemnych przy równoczesnym atakowaniu par zacisków uzwojenia GN

Atakowane	Do ziemi adres	Wartość szczytowa
1U+1V	2V - Z	102,0kV
1V+1W	2W - Z	103,0kV
1W+1U	2U - Z	102,0kV
Średnia		102,33kV
Max odchyłka		0,65%

Tabela 4. Wartości szczytowe przepięć między parami zacisków uzwojenia DN, przy równoczesnym atakowaniu udarem pełnym 850kV, par zacisków uzwojenia GN.

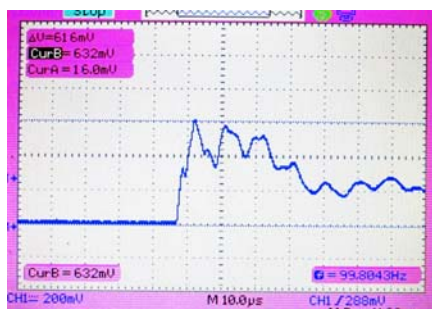
Atakowane	Między fazami DN	Wartość szczytowa
1U+1V	2U - 2V	102,0 kV
1V+1W	2V - 2W	98,1 kV
1W+1U	2W - 2U	102,0 kV
Średnia		100,07 kV
Max odchyłka		1,93%

Znacznie mniej prawdopodobnym zagrożeniem jest pojawienie się przepięcia piorunowego na dwóch

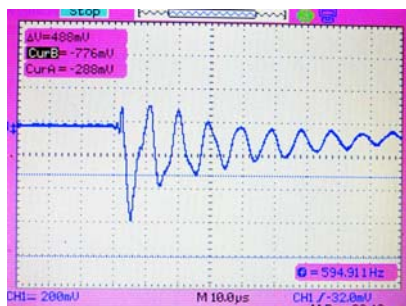


przewodach fazowych. W pomiarach uwzględniono ten wariant zagrożenia.

W tabelach 3 i 4 zebrano wartości szczytowe przepięć przy równoczesnym atakowaniu udarem dwóch zacisków GN transformatora.



Rys. 6. Przepięcie doziemne 2V - Z. Atakowane zaciski GN 1U+1V. Udar pełny 850kV. Wartość szczytowa przepięcia: 102kV. Skala napięcia: 34kV/dz., skala czasu: 10μs/dz.



Rys. 7. Przepięcie między 2W - 2U. Atakowane zaciski GN 1W+1U. Udar pełny 850kV. Wartość szczytowa przepięcia: 102kV. Skala napięcia: 34kV/dz., skala czasu: 10μs/dz.

Tabela 5 Przepięcia doziemne przy ataku trójbiegunowym 850kV

Atakowane	Doziemne uzw. DN	Wartość szczytowa
1U+1V+1W	2U - Z	94,8kV
	2V - Z	98,1kV
	2W - Z	98,1kV
Średnia		97,0kV
Max odchyłka		2,26%



Rys.8 Przepięcie między 2V - Z. Atakowane zaciski GN 1U+1V+1U. Udar pełny 850kV. Wartość szczytowa przepięcia: 98,1kV

Skala napięcia: 34kV/dz., skala czasu: 10μs/dz.

W końcowej próbie poddano ocenie przypadek równoczesnego zaatakowania wszystkich trzech zacisków uzwojenia GN udarem pełnym 850kV.

W tym przypadku istotne zagrożenia pojawiają się tylko na izolacji doziemnej uzwojenia DN. Mają one niemal takie same wartości we wszystkich fazach. Ponieważ na izolacji między zaciskami uzwojenia DN występuje różnica tych napięć, to przepięcia na izolacji międzyfazowej są niewielkie i wynikają z braku pełnej symetrii. W rozważanym przypadku nie przekraczają 11,5kV.

### Wnioski

W rozpatrywanych przypadkach uzyskano:

- Maksymalne przepięcie doziemne na zaciskach DN, przy atakowaniu zacisków GN udarem pełnym 850kV wynosi 103kV.
- Maksymalne przepięcie między zaciskami DN należącymi do różnych faz wynosi 105,4kV.
- Przepięcia te nie przekraczają poziomu probierczego uzwojenia DN - 125kV.
- Marginesy zapasu w stosunku do poziomu probierczego uzwojenia DN dla przepięć przenoszonych wynoszą:
  - dla przepięć doziemnych na zaciskach DN:  $125kV/103kV = 1,21$ ,
  - dla przepięć między fazami uzwojenia DN:  $125kV/105kV = 1,19$ .

Wynik pomiarów uznaje się za pozytywny, gdy zmierzone na zaciskach uzwojenia DN przepięcia doziemne i przepięcia między zaciskami faz uzwojenia DN nie przekraczają poziomu napięć probierczych przypisanego im przez Normę [5].

W przeciwnym przypadku, tj. wtedy, gdy zmierzone przepięcia przekraczają poziom probierczy uzwojenia DN, po wykonaniu prób piorunowych, bezpośrednio na zaciskach uzwojenia DN muszą być zainstalowane stosowne ograniczniki przepięć.

W transformatorze typu TOBNLa 150000/240 zastosowano ograniczniki przepięć PROXAR IV N 21,3AC co w pełni zabezpiecza zaciski liniowe uzwojeń DN przed przepięciami.

### LITERATURA

- [1] Maliszewski A. L. , Majtczak M., Przepięcia przenoszone w transformatorze blokowym, *Materiały Konferencji Blokowej Energetyki ENERGOSERWIS* 2002r.
- [2] Maliszewski A. L., Przepięcia piorunowe przenoszone w uzwojeniach transformatora, *Materiały ABB Forum Transformatory Energetyczne* Listopada 2008
- [3] Sieradzki S., Mnich M., Charakterystyka konstrukcji i budowy transformatora przekształtnikowego w świetle zagrożeń szybkozmiennymi przepięciami indukowanymi. *IV Konferencja Naukowo Techniczna. Kazimierz Dolny 25-27 września 2002.*
- [4] Mnich M., Pewca W., Transformatory energetyczne i specjalne w ocenie wyników obliczeń prób, badań oraz doświadczeń eksploatacyjnych. *Konferencja Naukowo Techniczna Wisła - Jawornik 31 maja - 02 kwietnia 2004.*
- [5] IEC 60076 - 3 International Standard Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric test and external clearances in air

**Autorzy:** dr inż. Maciej Wilk, EthosEnergy Poland S.A. Lubliniec, E-mail: [maciej.wilk@turbocare.pl](mailto:maciej.wilk@turbocare.pl); mgr inż. Michał Mnich, EthosEnergy Poland S.A. Lubliniec, E-mail: [michal.mnich@turbocare.pl](mailto:michal.mnich@turbocare.pl); mgr inż. Andrzej Maliszewski, Emerytowany Pracownik Instytutu Energetyki, E-mail: [askuba@gmail.com](mailto:askuba@gmail.com).