



Mariusz Gamracki*, Mariusz Trojnar*, Stanisław Wyderka*

REGULACJA I POMIAR NAPIĘCIA PROBIERCZEGO W UKŁADACH DO BADANIA IZOLACJI WYSOKONAPIĘCIOWEJ

Streszczenie: Badania napięciowe układów izolacyjnych urządzeń wysokonapięciowych wymagają stosowania układów probierczo-pomiarowych spełniających wymagania aktualnych norm. Jednym z wielu istotnych zagadnień prawidłowego działania takich układów jest właściwe rozwiązanie problemów regulacji i pomiaru wartości napięcia probierczego. W referacie przedstawiono zbudowany przez autorów układ probierczy, w którym człon regulacyjny wykonano wykorzystując silnik indukcyjny pierścieniowy. Uzyskano płynną regulację napięcia probierczego w szerokim zakresie prędkości jego podwyższania. W układzie pomiaru napięcia probierczego zastosowano woltomierz cyfrowy współpracujący z układem elektronicznym pamiętającym największą wartość napięcia, jakie było przed przeskokiem iskry lub przebicciem badanej izolacji.

Słowa kluczowe: próby wysokonapięciowe, napięcie przemienne, regulacja, pomiar

1. Wstęp

Napięcie przemienne, sinusoidalne o częstotliwości 50 Hz jest w praktyce badań izolacji wysokonapięciowej podstawowym rodzajem napięcia probierczego. Zgodnie z normą [1] napięcie to powinno być stosowane do prób izolacji urządzeń elektrycznych o napięciach znamionowych od 1 do 220 kV.

Zapewnienie uzyskania miarodajnych wyników takich prób wymaga spełnienia postanowień innej polskiej normy [2]. Pierwsza grupa jej wymagań dotyczy wytwarzania napięć probierczych. Napięcia te powinny być sinusoidalne o częstotliwości od 45 do 65 Hz. Dopuszczalne są niewielkie zniekształcenia, jednak stosunek wartości

* Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

maksymalnej do skutecznej nie powinien różnić się od $\sqrt{2}$ więcej niż $\pm 5\%$. Norma wymaga także odpowiedniej stabilności napięcia w czasie prób wytrzymałości napięciowej (1% w próbach jednoczyniowych i 3% w próbach o dłuższym czasie trwania). Dalsze wymagania dotyczą prądu zwarcia układu probierczego. Wartości tego prądu dla izolacji stałej i ciekłej oraz dla izolacji zewnętrznej (w powietrzu) w próbach na sucho nie powinny być mniejsze niż 0,1 A, a dla izolacji zewnętrznej na mokro nie mniejsze niż 0,5 A.

W zakresie metod probierczych norma [2] wymaga podwyższania napięcia probierczego z odpowiednią prędkością, żeby badana izolacja nie była zbyt długo poddana napięciom bliskim probierczym. Wymaganie to jest spełnione gdy prędkość podwyższania powyżej 75% spodziewanego napięcia przeskoku (przebiecia) wynosi 2% tego napięcia na sekundę. Regulacja napięcia powinna być ciągła, dopuszczalne są zmiany skokowe o wartości pojedynczego skoku na tyle małej, żeby było możliwe dostatecznie dokładne określenie wytrzymałości badanego układu izolacyjnego.

Wymagania dotyczące metod probierczych odnoszą się pośrednio do metod pomiaru wysokiego napięcia. Układ pomiarowy powinien reagować wystarczająco szybko na zmianę napięcia w czasie jego podwyższania wskazując jego wartość z dokładnością nie mniejszą niż 3% [3]. W przypadku próby wytrzymałości doraźnej (kończącej się wyładowaniem zupełnym w badanej izolacji) układ pomiarowy powinien wskazywać jeszcze przez co najmniej kilka sekund po wyładowaniu wartość napięcia, która go spowodowała.

Spełnienie wymienionych wyżej wymagań zależy od konstrukcji i właściwości eksploatacyjnych urządzeń wchodzących w skład układu probierczego. Obok transformatora probierczego istotnym urządzeniem, od którego zależy spełnienie tych wymagań jest regulator napięcia. Duże znaczenie ma także zastosowanie odpowiedniego układu pomiaru napięcia probierczego.

2. Regulator napięcia

W praktycznych układach probierczych wysokiego napięcia stosuje się różnego rodzaju regulatory począwszy od zwykłego autotransformatora a skończywszy na przetwornicach elektromaszynowych. Wybór zależy od wielu czynników, spośród których najważniejsze to moc znamionowa i zwarciowa układu probierczego, wymagania odnośnie zakresu wartości i prędkości zmian regulowanego napięcia oraz koszt regulatora.

Jednym z tańszych rozwiązań regulatora dla układu probierczego o niezbyt dużej mocy znamionowej jest zastosowanie silnika indukcyjnego pierścieniowego. Rozwiązanie to jest proste w realizacji i daje możliwość płynnej zmiany napięcia z możliwością regulacji prędkości tej zmiany w szerokim zakresie.

Dla weryfikacji właściwości takiego rozwiązania przystosowano silnik indukcyjny pierścieniowy o mocy 7,5 kW do pracy jako regulator napięcia w układzie z transformatorem probierczym 60/0,4 kV. Istotne z punktu widzenia zastosowania dane znamionowe tego silnika to: napięcie stojana 220/380 V, napięcie wirnika 170 V, prąd stojana 25/15 A i prąd wirnika 29 A. Dla dopasowania napięciowego między zaciskami

uzwojeń wirnika i uzwojeniem pierwotnym transformatora probierczego zastosowano transformator pośredniczący o małej wartości napięcia zwarcia.

Traktując zahamowany silnik pierścieniowy jako transformator regulacyjny, wybrano dwa uzwojenia fazowe jego stojana połączone w punkcie gwiazdowym jako uzwojenie pierwotne. Uzwojenie wtórne regulatora stanowią natomiast dwa połączone w punkcie gwiazdowym uzwojenia wirnika. Przy określonym napięciu zasilania uzwojeń stojana zmianę napięcia na zaciskach uzwojeń wirnika uzyskuje się przez obrót wirnika o odpowiedni kąt. Pełną zmianę napięcia od 0 do wartości największej uzyskuje się przez obrót wirnika o kąt równy 90° . Do obracania wirnika zastosowano silnik prądu stałego o mocy 30 W i dwie przekładnie ślimakowe połączone szeregowo o przełożeniu wypadkowym 3660:1.

Dla zapewnienia płynności regulacji prędkości obrotowej wirnika regulatora, a tym samym dla zapewnienia regulacji napięcia probierczego w szerokim zakresie, do sterowania silnikiem napędowym zastosowano układ tyrystorowy. Przy znamionowej prędkości obrotowej silnika napędowego podwyższenie napięcia od 0 do wartości maksymalnej trwa 30 s, co w przypadku współpracy regulatora z transformatorem probierczym o znamionowym napięciu probierczym 60 kV daje maksymalną prędkość podwyższania napięcia 2 kV/s, a w przypadku współpracy z transformatorem probierczym o napięciu znamionowym 110 kV (TP 110) daje prawie 3,7 kV/s.

W każdym przypadku maksymalna prędkość podwyższania napięcia wynosi 3,3% najwyższego uzyskiwanego z transformatora napięcia probierczego na sekundę. Wynika to z podzielenia 100% napięcia przez 30 s. Przy niepełnym wykorzystaniu transformatora probierczego maksymalna procentowa wartość prędkości podwyższania napięcia będzie większa, np. przy napięciu probierczym równym połowie znamionowego napięcia transformatora wartość ta będzie dwa razy większa.

Ze względu na możliwość zmniejszenia obrotów silnika napędowego regulatora do niewielkich wartości, uzyskiwana minimalna prędkość podwyższania napięcia jest mniejsza niż 0,01 kV/s.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że moc znamionowa układu probierczego złożonego z wykonanego regulatora napięcia i transformatora probierczego 60/0,4 kV jest wystarczająca do badania układów izolacyjnych o pojemności do 2000 pF napięciem probierczym w zakresie od 10 do 60 kV. Natomiast moc zwarcia układu pozwala uzyskać prąd wyładowania zupełnego o wartości od 0,6 do 1,5 A w podanym zakresie napięciowym.

Przy współpracy wykonanego regulatora z transformatorem probierczym TP 110 obydwie wielkości charakteryzujące układ probierczy są mniejsze i wynoszą odpowiednio 800 pF oraz 0,2 do 0,7 A dla zakresu napięcia probierczego od 45 do 110 kV.

3. Układ do pomiaru napięcia probierczego

W czasie badań wytrzymałości napięciowej oraz napięcia przeskoku lub przebiecia różnych wysokonapięciowych układów izolacyjnych należy stosować odpowiednie mierniki lub układy do pomiaru napięcia probierczego. Przy badaniu napięciem przemiennym układów izolacyjnych z dielektrykiem ciekłym lub stałym, albo będącym

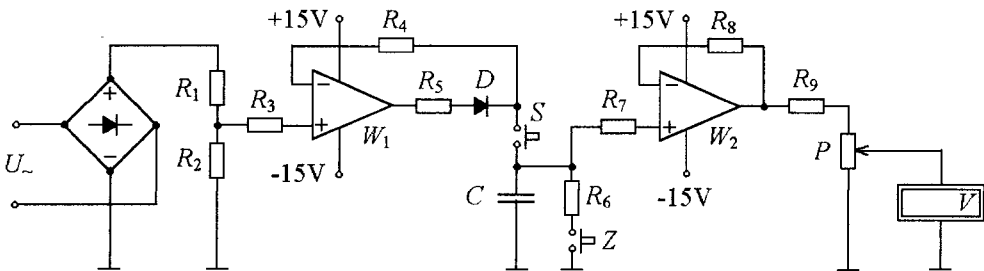
połączeniem tych dwóch rodzajów dielektryków, wymaga się zwykle pomiaru wartości skutecznej napięcia probierczego. Natomiast w przypadku badania napięciem przemiennym układów izolacyjnych, których wytrzymałość elektryczna jest określona napięciem przeskoku w gazie, wymaga się pomiaru wartości szczytowej napięcia probierczego.

Pomiar wartości skutecznej lub szczytowej napięcia probierczego przemiennego w czasie próby wytrzymałości napięciowej układu izolacyjnego wiąże się z wymaganiami wskazywania przez układ pomiarowy wartości tego napięcia z odpowiednią dokładnością (3%) w czasie jego podwyższania oraz w czasie jego utrzymywania na wymaganym poziomie. W czasie podwyższania napięcia wskazywanie jego wartości nie może się opóźniać.

W przypadku próby, w czasie której napięcie jest podwyższane z określoną prędkością aż do wystąpienia wyładowania zupełnego, układ pomiaru jego wartości powinien spełniać jeszcze jedno wymaganie. Powinien wskazywać największą wartość szczytową lub skuteczną napięcia probierczego przemiennego, jaka była bezpośrednio przed przeskokiem lub przebiciem badanej izolacji, przez czas wystarczający do jej zarejestrowania.

Jako przykład rozwiązania problemu pomiaru wartości szczytowej napięcia probierczego przemiennego podczas badania wytrzymałości doraźnej wykonano układ pomiarowy składający się z woltomierza cyfrowego współpracującego z elektronicznym układem pamiętającym. Mierzone napięcie można doprowadzić do tego układu ze strony pierwotnej transformatora probierczego lub z zacisków badanego obiektu za pośrednictwem dzielnika napięcia. W każdym przypadku należy przeprowadzić skalowanie układu pomiarowego.

Woltomierz cyfrowy wykonano w oparciu o układ scalony ICL 7106. Dla sterowania diodowym wskaźnikiem napięcia zastosowano układ dopasowujący oparty na układzie scalonym UCY 74549. Uzyskano miernik o zakresie pomiarowym $0 \div 1,999 \text{ V}$ i klasie dokładności 0,05%. Jego prąd wejściowy nie przekracza 10 pA a częstotliwość odnawiania wskazania aktualnej wartości napięcia wynosi 3 wskazania na sekundę.



Rys. 1. Schemat układu pamięci analogowej wartości napięcia probierczego

Schemat układu pamięci analogowej mierzonego napięcia przedstawiono na rysunku 1. Mierzone napięcie doprowadzone z dzielnika napięcia probierczego lub z zacisków uzwojenia pierwotnego transformatora probierczego zostaje wyprostowane i podane na dzielnik rezystancyjny $R_1 R_2$ w celu zmniejszenia do zakresu $0 \div 5 \text{ V}$. Następnie

jest doprowadzone do wejścia wzmacniacza operacyjnego W_1 (UL 741). Dołączony przez diodę D do wyjścia tego wzmacniacza kondensator C ($10\ \mu\text{F}$) jest ładowany do napięcia proporcjonalnie do wartości napięcia na wejściu wzmacniacza.

Rozładowanie kondensatora C jest w wysokim stopniu utrudnione. Dodatkowo sprzyja temu otwarcie zestyku S na skutek zadziałania przekaźnika prądowego podczas przeskoku iskry w badanym układzie izolacyjnym. Kondensator (styroflexowy) rozładowuje się bardzo wolno przez upływność własnej izolacji oraz przez wejście wtórnika napięciowego wykonanego w oparciu o wzmacniacz operacyjny W_2 . Zastosowany układ scalony TL 081 został wybrany ze względu na relatywnie dużą oporność wejściową. Pierwsza zmiana ostatniej cyfry na wskaźniku woltomierza V na cyfrę o 1 mniejszą następuje dopiero po 20 s.

4. Zakończenie

Wykonany układ probierczy może być stosowany do prób wytrzymałości elektrycznej zewnętrznej na sucho i na mokro izolatorów stosowanych w sieciach elektroenergetycznych średniego napięcia. Może być także użyty do prób napięcia przeskoku izolatorów o napięciu znamionowym do 20 kV zarówno w badaniach na sucho, jak i na mokro. Można stosować go także do prób wytrzymałości napięciowej wewnętrznej i napięcia przebicia izolatorów przepustowych oraz przekładników napięciowych i prądowych średniego napięcia o umiarkowanej pojemności układu izolacyjnego.

Do przeprowadzenia konkretnej próby należy zestawić układ probierczy wykorzystując wykonany regulator napięcia i jeden z transformatorów probierczych, tak aby największe nastawiane napięcie probiercze lub spodziewane napięcie przeskoku (przebicia) miało wartość możliwie bliską napięciu znamionowemu transformatora probierczego.

Wykonany regulator napięcia ma za małą moc znamionową i zwarciovą do prób izolatorów średniego napięcia w warunkach zabrudzeń oraz prób układów izolacyjnych o większych pojemnościach, a także do współpracy z transformatorami probierczymi o napięciu znamionowym wyższym niż 110 kV. Dla uzyskania większych wartości tych mocy należałoby zbudować regulator w oparciu o maszynę indukcyjną pierścieniową większej mocy.

Ze względu na dużą różnicę napięcia stojana i wirnika zastosowanego silnika pierścieniowego sposób połączenia jego uzwojeń do pracy jako regulatora napięcia mógł być tylko taki jak przedstawiono w punkcie 2. Przy zbliżonych wartościach tych napięć możliwe byłoby połączenie szeregowo uzwojeń stojana z uzwojeniami wirnika. Pozwoliłoby to uzyskać na wyjściu regulatora napięcie zmieniane od różnicy napięć w tych uzwojeniach do ich sumy przy obrocie wirnika o 180° .

Literatura

- [1] PN-81/E-05001. *Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Znamionowe napięcia probiercze izolacji*
- [2] PN-92/E-04060. *Wysokonapięciowa technika probiercza. Ogólne określenia i wymagania probiercze*
- [3] PN-87/E-04053. *Pomiary wysokonapięciowe. Układy pomiarowe i wskazówki ich stosowania*

CONTROL AND MEASUREMENT OF TEST VOLTAGE IN SYSTEMS FOR TESTING OF HIGH VOLTAGE INSULATION

Voltage tests of insulation of high voltage devices demand the use of test systems which fulfil the requirements of up-to-date standards. Proper solution of control and measurement of test voltage value is one among many substantial problems of correct performance of such systems. The paper presents the test system built by authors, in which the voltage control unit was made using a wound-rotor induction motor. Infinitely variable adjustment of test voltage was achieved in wide range of its rise speed. In the test voltage measurement system the digital voltmeter was used. This voltmeter is connected to the electronic system storing the highest voltage value which causes spark-over or breakdown of tested insulation.