



Adam KETNER, Sławomir KŁYŻ

ABB Sp. z o.o., Oddział w Łodzi – Zakład Transformatorów Mocy

## O zagrożeniu izolacji międzyfazowej transformatorów trójfazowych podczas próby krótkotrwałym napięciem przemiennym indukowanym z pomiarem wyładowań niezupełnych

**Streszczenie:** W referacie krótko omówiono niektóre (nowe) postanowienia aktualnych przepisów dotyczących wymagań i badań wytrzymałości elektrycznej napięciem przemiennym indukowanym transformatorów energetycznych olejowych. Więcej miejsca poświęcono zagadnieniu weryfikacji wytrzymałości przy napięciach przemiennych izolacji uzwojeń transformatorów trójfazowych, a zwłaszcza – izolacji międzyfazowej.

**Abstract:** (About hazards to interphase insulation of three-phase transformers during a short-term induced voltage test with the measurement of partial discharges). Some (new) provisions of valid regulations concerning requirements and induced voltage tests of the electric strength of oil immersed power transformers are discussed in the paper. More space has been given to the issue concerning the verification of the strength of the insulation of three-phase transformer windings, especially interphase insulation at a.c. voltage.

**Słowa kluczowe:** transformator energetyczny, próby napięciem przemiennym indukowanym, układ izolacyjny, wyładowania niezupełne.  
**Keywords:** power transformer, induced voltage testing, insulating system, partial discharges.

### Wstęp

W 2000 roku, po 20 latach rozważań i dyskusji, opublikowano nowelizację zaleceń międzynarodowych IEC [1] dotyczących wymagań i badań wytrzymałości elektrycznej transformatorów energetycznych olejowych. Zalecenia te, praktycznie bez zmian, zostały przez CENELEC<sup>1</sup> przyjęte jako norma europejska EN [2]. Zaś norma europejska jest stosowana w wielu państwach Europy, w tym również w Polsce [3]. Polska norma PN-EN [3] jest tłumaczeniem, bez jakichkolwiek zmian, normy europejskiej opracowanym i opublikowanym przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN).

W omawianych przepisach normalizacyjnych wprowadzono szereg nowych postanowień; dotyczą one, przede wszystkim, prób napięciem przemiennym indukowanym. W niniejszym referacie wskazano je i krótko opisano.

Natomiast więcej miejsca poświęcono rozważaniom dotyczącym postanowienia, które zaleca uzupełniać krótkotrwałą próbę napięciem przemiennym indukowanym (ACSD) pomiarami wyładowań niezupełnych (PD). Kwestia ta ma – zdaniem autorów – istotne znaczenie dla weryfikacji wytrzymałości przy napięciach przemiennych izolacji uzwojeń transformatorów trójfazowych, a zwłaszcza – ich izolacji międzyfazowej; znaczenie tej kwestii podkreślają również przepisy normalizacyjne [1, 2, 3].

Spostrzeżenia i wnioski z tych rozważań zamieszczono w niniejszym referacie.

### Nowe regulacje normalizacyjne dla prób napięciem przemiennym indukowanym

Aktualne przepisy normalizacyjne [1, 2, 3] zawierają szereg nowych postanowień dotyczących prób napięciem przemiennym indukowanym, a mianowicie:

- wyróżniają status prób napięciem przemiennym indukowanym; próby te – w zależności od napięcia  $U_m$  – mają:
  - status **próby wyrobu**,
  - albo
  - status **próby specjalnej**.
- zalecają uzupełniać krótkotrwałą próbę napięciem przemiennym indukowanym (ACSD) pomiarami wyładowań niezupełnych (PD), określają wtedy, dla obu wariantów próby, następujące kwestie:
  - przebiegi napięcia doziemnego na zacisku liniowym (zaciskach liniowych),
  - dopuszczalne poziomy intensywności PD,
- wprowadzają nowe kryterium określania wyniku próby ACSD – dopuszczalny poziom intensywności PD,
- przyjmują jednakowe, dla obu możliwych do zastosowania w praktyce układów probierczych próby ACLD, przebiegi napięcia na zacisku liniowym (zaciskach liniowych) i jednakowe dopuszczalne poziomy intensywności PD,
- wydłużają znacznie czas  $t_{pr}$  utrzymywania napięcia probierczego na zacisku liniowym (zaciskach liniowych) podczas próby ACLD (poprzednio wynosił tylko 5 s<sup>2</sup>); czas ten jest teraz wyznaczany w taki sam sposób, jak dla próby ACSD,
- stwarzają możliwość **zastąpienia** próby udarem łączeniowym próbą ACSD.

Zestaw prób odbiorczych napięciem przemiennym i ich status dla poszczególnych napięć  $U_m$  zestawiono w tablicy 1, a dopuszczalne poziomy intensywności PD dla prób: ACSD i ACLD – w tablicy 2; natomiast w dodatku podano przebiegi napięć doziemnych na zacisku liniowym (zaciskach liniowych).

<sup>1</sup> CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization (Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki); członkami CENELEC są krajowe jednostki normalizacyjne następujących państw: Austria, Belgia, Cypr, Dania, Estonia, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Holandia, Irlandia, Islandia, Litwa, Luksemburg, Łotwa, Malta, Niemcy, Norwegia, Polska, Portugalia, Republika Czeska, Słowacja, Słowenia, Szwajcaria, Szwecja, Węgry, Włochy i Zjednoczone Królestwo.

<sup>2</sup> IEC 76-3:1980, Power transformers – Part 3: Insulation levels and dielectric tests; PN-86/E-04070.13: Transformatory. Metody badań. Próby wytrzymałości napięciem udarowym, piorunowym.

Tablica 1. Status prób napięciem przemiennym transformatorów energetycznych dla różnych napięć  $U_m$ .

$U_m$ [kV]	Próby napięciem przemiennym		
	ACSS	ACSD	ACLD
$\leq 72,5$	■	■	–
$72,5 < U_m \leq 170$	■	■	□
$170 < U_m < 300$	■	□ <sup>a)</sup>	■
$U_m \geq 300$	■	□	■

■ – próba wyrobu; □ – próba specjalna,  
a) może **zastąpić** próbę udarem łączeniowym (SIT).

Tablica 2. Dopuszczalne poziomy intensywności wyładowań niezupełnych PD dla różnych wartości napięć doziemnych ( $U_{PD}$ ).

$U_{PD}$ [-]	Próba napięciem przemiennym indukowanym		
	ACSD <sup>(4f)</sup>	ACSD <sup>(3f)</sup>	ACLD
$1,5 U_m / \sqrt{3}$	500 pC	–	500 pC
$1,3 U_m / \sqrt{3}$	–	300 pC	–
$1,1 U_m / \sqrt{3}$	100 pC <sup>a)</sup>		

a) 100 pC jest zarazem dopuszczalną wartością poziomu szumu tła dla pola probierczego stacji prób wytwórni transformatorów.

### Próba wytrzymałości izolacji międzyfazowej z pomiarami wyładowań niezupełnych.

W transformatorach trójfazowych wymaga się sprawdzenia wytrzymałości izolacji międzyfazowej przy napięciach przemiennych; zadanie to – w myśl przepisów [1, 2, 3] – ma spełnić krótkotrwała próba napięciem przemiennym indukowanym przeprowadzona w układzie probierczym trójfazowym ACSD<sup>(3f)</sup>. Ta tradycyjna próba odbiorcza jest – dla transformatorów na napięcie  $U_m > 72,5$  kV – na ogół uzupełniana pomiarami wyładowań niezupełnych (PD)<sup>3</sup>; wymagane wtedy warunki jej przeprowadzania zostały przedstawione w dodatku. Podczas tej próby na izolacji międzyfazowej uzwojenia GN (górnego napięcia) wymuszane są napięcia ( $U_{mf}$ ), których wartości opisują wyrażenia (1) i (2):

$$(1) \quad (U_{mf})_{pr} = [AC_i; U_n]_{\min} \quad \text{– próba}$$

$$(2) \quad (U_{mf})_{PD} = 1,3 \cdot U_m \quad \text{– pomiary PD}$$

Czasy oddziaływania  $t$  powyższych napięć na omawianą izolację różnią się znacznie (patrz dodatek – rys. D1). Ich wpływ na wytrzymałość izolacji ilustruje charakterystyka napięciowo-czasowa  $U_w = f(t)$ ; dla rozpatrywanego przypadku jej przebieg opisuje poniższa zależność (3) [9]:

$$(3) \quad (U_w)_t = (U_w)_{t=\min/t^\gamma} \quad \text{– dla } t = (1 \div 60) \text{ min.}$$

gdzie  $\gamma$  – współczynnik nachylenia; dla potrzeb niniejszych rozważań przyjęto  $\gamma = 0,02$  [8].

W tablicy 3 zestawiono narażenia izolacji międzyfazowej, jakie mają miejsce podczas próby ACSD<sup>(3f)</sup> z pomiarami PD transformatorów trójfazowych na różne napięcia  $U_m$ . Te odpowiadające napięciu ( $U_{PD}$ )<sup>1</sup> to narażenia napięciowe 1 minutowe, równoważne występującym przy pomiarach PD, przez co najmniej 10 minut; przy ich

wyznaczeniu **odpowiednio**<sup>4</sup> uwzględniono przebieg charakterystyki  $U_w = f(t)$ .

Natomiast kwestia narażeń wymuszanych przez napięcie probiercze  $U_{pr}$  wymaga dodania krótkiego komentarza. Narażenia te z **założenia**<sup>5</sup> powinny być adekwatne do przyjętego wzorca – napięcia o częstotliwości 100 Hz i czasie trwania 1 min. (6000 okresów). To tradycyjne podejście do próby napięciem przemiennym indukowanym jest nadal powszechnie akceptowane, mimo że założenie, na którym się opiera, uważane jest dziś za nieściśle [4, 6]. Ponadto, F. Mosiński wykazał, w oparciu o teorię wartości ekstremalnych, że czas  $t_{pr}$  utrzymywania napięcia probierczego, podczas próby napięciem przemiennym indukowanym powinien wynosić 1 min., niezależnie od wyboru częstotliwości do badań z przedziału (100 ÷ 400) Hz.

**Skutki** (wzrost narażeń napięciowych) uzupełnienia próby ACSD<sup>(3f)</sup> pomiarami PD są obserwowane dla napięć  $U_m \geq 145$  kV; wyróżniono je w tablicy 2 („pogrubienie” oraz ciemne tło). Ma to miejsce wtedy, gdy spełniona jest nierówność:

$$(4) \quad AC_i < 1,36U_m$$

A więc, dla:

- napięć  $U_m = (145 \div 362)$  kV i niskich poziomów izolacji ( $AC_i)_{\min}$ ,
- napięcia  $U_m = 420$  kV i  $AC_i < 570$  kV oraz, napięcia  $U_m = 550$  kV i każdej spotykanej w praktyce wartości  $AC_i$ .

Wobec powyższego, w praktyce kwestia ta ma niewielkie znaczenie tylko dla transformatorów na napięcie  $U_m = 145$  kV i  $AC_i = 185$  kV (próba wyrobu); dla tego przypadku **skutki** pomiarów PD wynoszą około 6%.

Natomiast dla transformatorów na napięcie  $U_m = 245$  kV próba ACSD<sup>(3f)</sup> jest **próbą specjalną**, wykonywaną w przypadku jej uzgodnienia (nabywca, wytwórca). Niewielkie **skutki** pomiarów PD mają miejsce tylko dla  $AC_i = 395$  kV ( $U_{mf} = 1,33 U_m$ ); są bez znaczenia wobec narażeń wymuszanych podczas próby wyrobu ACLD –  $U_{mf} \geq 1,47 U_m$ .

Tablica 3. Narażenia izolacji międzyfazowej podczas próby (ACSD)<sup>(3f)</sup> z pomiarem PD dla różnych  $U_m$ .

$U_m$ [kV]	Narażenia izolacji międzyfazowej ( $U_m/U_m$ )				
	próba				PD
$\leq 72,5$	1,67 <sup>a)</sup>	–	–	–	1,36/1,57
100	1,50	1,82 <sup>a)</sup>	–	–	1,36
123	1,50	1,82 <sup>a)</sup>	–	–	
145	<b>1,28</b>	1,57	1,82 <sup>a)</sup>	–	
170	<b>1,35</b>	1,62	1,82 <sup>a)</sup>	–	
245	<b>1,33</b>	1,47	1,61	1,82 <sup>a)</sup>	
300	<b>1,32</b>	1,53	–	–	
362	<b>1,27</b>	1,41	–	–	
420	<b>1,10</b>	<b>1,21</b>	1,36	1,50	
550	<b>0,93</b>	<b>1,04</b>	<b>1,15</b>	<b>1,24</b>	

a) napięcie  $U_{mf}$  podczas próby ogranicza wartość  $2U_n$  (przyjęto, że  $U_n \cong U_m/1,2$  – dla  $U_m \leq 72,5$  kV i  $U_n \cong U_m/1,1$  – dla  $72,5 < U_m < 300$  kV).

<sup>4</sup> spadek wytrzymałości  $\cong$  wzrost narażeń napięciowych.

<sup>5</sup> założono, że **ostrość** próby napięciem przemiennym indukowanym, dla stosowanego w praktyce zakresu częstotliwości (100 ÷ 400) Hz, zależy tylko od wartości amplitudy i liczby okresów napięcia probierczego.

<sup>3</sup> zalecenia przepisów [1, 2, 3], które stają się **wymaganiem**, jeżeli nabywca formalnie (zapytanie ofertowe lub zamówienie) nie zrezygnuje z ich wykonania.

**Skutki** te mogą być o wiele bardziej odczuwalne niż to wynika z zamieszczonych w tablicy 3 liczb, dlatego że pomiary PD są wówczas podstawą określania rezultatu próby wytrzymałości izolacji przy napięciach przemiennych.

Dla transformatorów rozdzielczych ( $U_m \leq 72,5$  kV) przepisy [1, 2, 3] nie zalecają, lecz tylko sugerują<sup>6</sup> wykonywanie pomiarów PD podczas próby ACSD<sup>(3f)</sup>. Mimo to nabywcy (głównie z poza kraju) coraz częściej żądają ich wykonania łącznie z próbą wytrzymałości izolacji międzyfazowej i to przy wyższym ( $1,5 U_m / \sqrt{3}$ ) poziomie napięcia ( $(U_{PD})^I$ ) niż określają omawiane przepisy dla tej próby ( $1,3 U_m / \sqrt{3}$ ); obie wartości zostały uwzględnione przy sporządzaniu tablicy 3.

### Próba wytrzymałości izolacji doziemnej oraz próba odporności izolacji na przepięcia dorywcze i długotrwałe oddziaływanie napięcia roboczego.

Izolacja międzyfazowa jest również narażana podczas innych prób napięciem przemiennym indukowanym transformatorów trójfazowych, a mianowicie:

- podczas próby wytrzymałości izolacji doziemnej ACSD<sup>(1f)</sup> (izolacja stopniowana),
- podczas odporności izolacji na przepięcia dorywcze i długotrwałe oddziaływanie napięcia roboczego ACLD.

Powyższe próby i wymuszone podczas nich narażenia w układzie izolacyjnym uzwojeń transformatorów trójfazowych omówiono szczegółowo w pracy [7]; tu, w tablicy 4, przytoczono rezultaty tych rozważań dla izolacji międzyfazowej.

Tablica 4. Narażenia izolacji międzyfazowej podczas prób: ACSD<sup>(1f)</sup> i ACLD.

Próba	$(U_m)_{pr}$	Uwagi
ACSD <sup>(1f)</sup>	$(AC)_i$	$AC_N \geq AC/3$
ACSD <sup>(1f)</sup>	$1,5 (AC)_i$	$AC_N < AC/3$
ACLD <sup>(1f)</sup>	$1,47 U_m / 1,96 U_m$	(Y/ $\Delta$ )
ACLD <sup>(3f)</sup>	$1,7 U_m$	
A) ACLD <sup>(1f)</sup>	$1,56 U_m / 2,08 U_m$	(Y/ $\Delta$ )
A) ACLD <sup>(3f)</sup>	$1,8 U_m$	

$AC_N$  – poziom izolacji zacisku neutralnego,

(Y/ $\Delta$ ) – skojarzenie uzwojeń w gwiazdę/trójkąt,

A) dla transformatorów przeznaczonych do pracy w sieciach szczególnie narażonych na przepięcia dorywcze.

Rezultaty zamieszczone w tablicy 4 pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- próba wytrzymałości izolacji doziemnej ACSD<sup>(1f)</sup> wystarczająco dobrze weryfikuje, chociaż nie jest to jej zadanie – wytrzymałość izolacji międzyfazowej transformatorów trójfazowych; wymuszone narażenia podczas próby ACSD<sup>(1f)</sup> przy zastosowaniu układu probierczego VDA [4, 5] są praktycznie takie same (nieco większe dla  $AC_i > 2U_n$ , a przy zastosowaniu układu probierczego BS [4, 5] – nawet 1,5 raza większe), niż podczas prób ACSD<sup>(3f)</sup>,
- próba odporności izolacji na przepięcia dorywcze i długotrwałe oddziaływanie napięcia roboczego ACLD również wystarczająco dobrze weryfikuje wytrzymałość izolacji międzyfazowej dla niektórych transformatorów trójfazowych, a mianowicie:
  - skojarzenie uzwojeń – Y, układ probierczy jednofazowy (1f),  $AC_i \leq 1,47 U_m$ ,

- skojarzenie uzwojeń – Y lub  $\Delta$ , układ probierczy trójfazowy (3f),  $AC_i \leq 1,7 U_m$ ,
- skojarzenie uzwojeń –  $\Delta$ , układ probierczy jednofazowy (1f),  $AC_i$  – każda znormalizowana wartość.

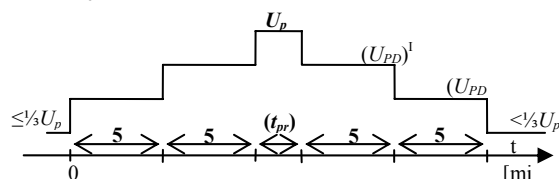
### Podsumowanie

Próba odbiorcza wytrzymałości izolacji międzyfazowej (ACSD)<sup>(3f)</sup> z pomiarami PD jest – dla uzwojeń na napięcia  $U_m \leq 245$  kV – praktycznie tak samo groźna jak próba bez takich pomiarów; ma to miejsce wtedy, gdy jest ona *próbą wyrobu* lub *próbą specjalną*, zastępującą – w myśl przepisów [1, 2, 3] – próbę udarem łączeniowym. Niewielkie (około 6%) **skutki** uzupełnienia omawianej próby pomiarami PD występują tylko dla napięcia  $U_m = 145$  kV i  $AC_i = 185$  kV.

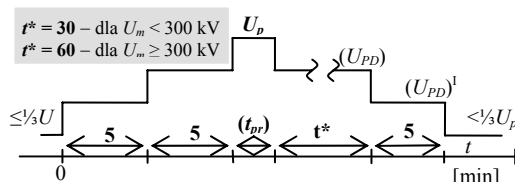
Próba odbiorcza wytrzymałości izolacji międzyfazowej (ACSD)<sup>(3f)</sup> dla transformatorów trójfazowych z izolacją stopniowaną jest z technicznego punktu widzenia zbędna. O jej przeprowadzeniu przesądzają często wymogi formalne – dla napięć  $U_m \leq 170$  kV jest *próbą wyrobu*. Natomiast dla napięć  $U_m > 170$  kV jest przecież *próbą specjalną*, co należy mieć na uwadze przy uzgadnianiu procedury (zestawu) prób odbiorczych napięciowych.

### DODATEK

1. Przebiegi napięcia doziemnego na zacisku liniowym (zaciskach liniowych) podczas prób napięciem przemiennym indukowanym z pomiarami wyładowań niezupełnych PD.



Rys. D1. Próba ACSD



Rys. D2. Próba ACLD.

2. Poziomy napięć doziemnych podczas badań.

Poziomy napięć (doziemnych)  $U_{pr}$  i  $(U_{PD})^I$  dla poszczególnych prób podano w zamieszczonej poniżej tabeli D1. Natomiast poziom napięcia (doziemnego) dla tych prób jest taki sam i wynosi  $(U_{PD})^{II} = 1,5 U_m / \sqrt{3}$ .

Tablica D1. Napięcia doziemne na zacisku (zaciskach) transformatora podczas prób napięciem przemiennym indukowanym z pomiarem PD.

Próba	$U_{pr}$	$(U_{PD})^I$
ACSD <sup>(1f)</sup>	$AC_i$	$1,5 U_m / \sqrt{3}$
ACSD <sup>(3f)</sup>	$[(AC_i; 2U_n)_{\min}] / \sqrt{3}$	$1,3 U_m / \sqrt{3}$
ACLD	$1,7 U_m / \sqrt{3}$	$1,5 U_m / \sqrt{3}$
A) ACLD	$1,8 U_m / \sqrt{3}$	$1,6 U_m / \sqrt{3}$

$AC_i$  – koordynacyjne napięcie przemienne (składnik poziomu izolacji zacisku liniowego uzwojenia GN),

$U_n$  – napięcie znamionowe badanego uzwojenia GN.

A) dla transformatorów przeznaczonych do pracy w sieciach szczególnie narażonych na przepięcia dorywcze.

<sup>6</sup> pomiary PD – narzędziem zarówno dla dostawcy, jak i nabywcy, które może wykryć osłabienie izolacji, zanim nastąpi jej przebiecie.

3. Czas  $t_{pr}$  przyłożenia napięcia probierczego  $U_{pr}$ .

Czas  $t_{pr}$  przyłożenia napięcia probierczego  $U_{pr}$  o częstotliwości  $f_b = (100 \div 400)$  Hz podczas prób napięciem przemiennym indukowanym określa tradycyjny wzór:

$$(D1) \quad t_{pr} = 6000/f_b - \text{dla } f_b = (100 \div 400) \text{ Hz}$$

a dla częstotliwości spoza tego przedziału::

$$(D2.a) \quad t_{pr} = 15 \text{ s} - \text{dla } f_b > 400 \text{ Hz}$$

$$(D2.b) \quad t_{pr} = 60 \text{ s} - \text{dla } f_b < 100 \text{ Hz}$$

#### LITERATURA

- [1] IEC 60076-3:2000, Power transformers – Part 3: Insulation level, dielectric tests and external clearances in air, International Electrotechnical Commission, Geneva 2000.
- [2] EN 60076-3:2001, Power transformers – Part 3: Insulation level, dielectric tests and external clearances in air, European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels 2001.
- [3] PN-EN 60076-3:2002, Transformatory – część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępstwa izolacyjne w powietrzu, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
- [4] Hasterman Z. Mosiński F. Maliszewski A.: Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa 1983.
- [5] Jabłoński M.: Badanie transformatorów w przemyśle i w eksploatacji, WNT, Warszawa 1969.
- [6] Jezierski E.: Transformatory, WNT, Warszawa, 1983 (rozdziały: 12 i 13 opracowane przez Zygmunta Hastermana).
- [7] Ketner A., Jaros A., Kłyż S., Krupski K.: Próby napięciem przemiennym wysokonapięciowych transformatorów energetycznych w świetle przepisów normalizacyjnych i praktyki badań w wytwórni, V Konferencja Naukowo-techniczna *Transformatory energetyczne i specjalne – Przyszłość i środowisko*, Kazimierz Dolny 13–15 października 2004.
- [8] Mosiński F.: Zastosowanie teorii wartości ekstremalnych do oceny wytrzymałości wysokonapięciowych transformatorów energetycznych, Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe Nr 453 – *Rozprawy Naukowe Nr 62*, Łódź 1984.
- [9] Yakov S.: Volt-time relationship for PD inception in oil-paper insulation, *Electra* No 67, December 1979.

---

**Autorzy:** dr inż. Adam Ketner, ul. Zgierska 110/120 m 272, 91-303 Łódź (emerytowany pracownik ABB Elta Sp. z o.o.),  
mgr inż. Sławomir Kłyż, ABB Sp. z o.o., Oddział w Łodzi – Zakład Transformatory Mocy, ul. Aleksandrowska 67/93, 91-205 Łódź,  
E-mail: [slawomir.klyz@pl.abb.com](mailto:slawomir.klyz@pl.abb.com)