

Układ pomiaru symetrycznych i asymetrycznych prądów zwarciovych z zastosowaniem wielozakresowych przekładników prądowych w warunkach laboratorium zwarciovego

Autorzy

Michał Babiuch
Jan Olak

POWRÓT
DO SPISU TREŚCI

Słowa kluczowe

badania zwarciovie, pomiary prądów zwarciovych, przekładnik prądowy

Streszczenie

W artykule przedstawiono różne wymagania zawarte w normach przedmiotowych, dotyczące parametrów probierczych dla aparatury elektroenergetycznej i różnych rodzajów badań wykonywanych w laboratorium zwarciovym. Opisano wyposażenie badawczo-pomiarowe Zwarciozni Instytutu Elektrotechniki w Warszawie (IEL). Przedstawiono układ pomiaru prądów zwarciovych przy użyciu nowo opracowanych przekładników. Opisano metodę sprawdzenia dokładności przekładników prądowych do pomiaru prądów zwarciovych i zamieszczono przykładowe wyniki i oscylogramy z badań. Układ został wdrożony i jest eksploatowany w Zwarciozni IEL.

1. Wstęp

Instalowana w systemie elektroenergetycznym aparatura, w tym szczególnie aparatura rozdzielcza, musi być przystosowana do pracy w sytuacjach awaryjnych. Symulowanie stanów awaryjnych i badanie odporności urządzeń na sytuacje awaryjne przeprowadza się w specjalistycznych laboratoriach wielkich mocy, tzw. zwarciozniach. Podstawowe badania, jakie przeprowadza się w zwarciozni, to: a) badanie zdolności łączeniowej (np. łączenie w szeregu SPZ, w opozycji faz, zwarć pobliskich, baterii kondensatorów, linii długich itp.), b) badania wytrzymałości zwarciowej cieplnej, tzw. obciążalności zwarciowej prądem krótkotrwałym wytrzymywanym i szczytowym wytrzymywanym, c) próby łukowe – badanie odporności urządzeń na wystąpienie wewnętrznego zwarcia łukowego. Badania te dotyczą m.in. rozdzielnic, stacji prefabrykowanych, przekładników, transformatorów, kabli, skrzynek przyłączowych, silników. Jednym z podstawowych parametrów, który podczas tych badań musi być uwzględniony i wiarygodnie pomierzony, jest prąd zwarcioy. Prąd zwarcioy składa się ze składowej symetrycznej (sinusoidalnej) oraz składowej asymetrycznej (nieokresowej), której zanikanie charakteryzuje tzw. stała czasowa tłumienia składowej nieokresowej prądu zwarcioy – τ . W praktyce stała czasowa to wartość czasu, w którym chwilowa wartość składowej nieokresowej wynosi $e^{-1} = 0,3678$ początkowej wartości tej składowej.

Podstawowy wzór określający składową nieokresową

$$i_d = I_{d0} e^{-\frac{R}{L}t} = I_{d0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

gdzie: i_d – wartość chwilowa składowej nieokresowej, I_{d0} – wartość początkowa składowej nieokresowej, $\tau = L/R$ – stała czasowa obwodu, e – podstawa logarytmu naturalnego.

O ile pomiar prądu symetrycznego nie stwarza trudności, to wiarygodny pomiar prądu asymetrycznego wymaga szczególnej uwagi, zwłaszcza przy pomiarze prądu zwarcioygo przekładnikami. Składowa stała obwodu może powodować nasycanie się rdzenia przekładnika, co prowadzi do powstawiania błędów transformacji. Chcąc ograniczyć te błędy, należy dążyć do tego, aby przekładnik się nie nasycił.

2. Wymagania dotyczące stałej czasowej prądów niesymetrycznych dla różnych badań

Stala czasowa jest jednym z parametrów charakteryzujących przebieg składowej nieokresowej prądu zwarcioygo. Znajomość stałej czasowej ma istotne znaczenie na etapie przygotowywania układu probierczego do badań.

Normy przedmiotowe charakteryzują obwód zwarcioy między innymi poprzez wymaganie ustawienia konkretnego $\cos(\varphi)$ obwodu, współczynnika udaru prądu zwarcioygo k (stosunek wartości pierwszego szczytu prądu zwarcioygo do wartości skutecznej składowej okresowej) lub czasami stosunku wielkości X/R w obwodzie). Wielkości te są ściśle powiązane ze stałą czasową. Dla 50 Hz ilościowe zależności przedstawiono w tab. 1. W przeważającej części badań, szczególnie aparatury rozdzielczej średniego napięcia, wymagany współczynnik udaru wynosi $k = 2,5$. Jednocześnie dla wielu prób wymagany współczynnik k jest różny. Dla transformatorów kategorii I (25 kVA do 2,5 MVA) współczynnik udaru zmienia się w zakresie 1,51–2,51, dla

X/R	1	2	3	4	5	6
$\cos(\varphi)$	0,707	0,447	0,316	0,243	0,196	0,164
τ [ms]	3,2	6,4	9,6	12,7	15,9	19,1
k	1,510	1,760	1,950	2,090	2,190	2,270

	8	10	12	14	20	25
	0,124	0,100	0,083	0,071	0,050	0,040
	25,5	31,8	38,2	44,6	63,7	79,6
	2,380	2,460	2,529	2,550	2,739	2,831

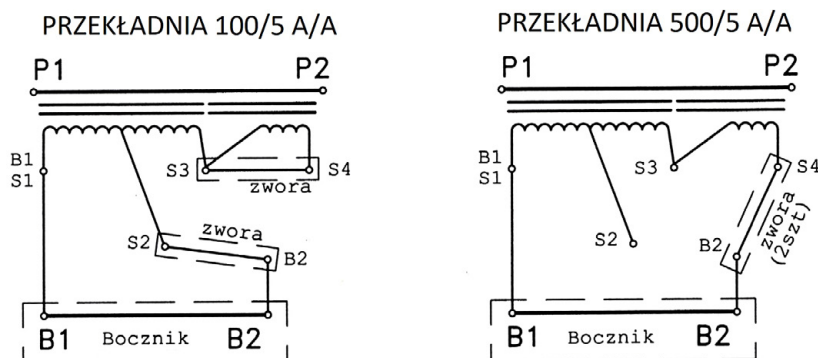
Tab. 1. Podstawowe zależności parametrów obwodu i prądu zwarcio-
wego dla 50 Hz

transformatorów kategorii II (2,5–100 MVA) wynosi 2,55, natomiast dla kategorii III (powyżej 100 MVA) $k = 2,69$. Dla aparatury niskiego napięcia wymagany współczynnik udaru zmienia się w przedziale $k = 1,5–2,2$. Również w próbach łukoodporności współczynnik może być różny, np. w badaniu rozdzielnic czy stacji spodziewany współczynnik wymagany wynosi $k = 2,5$ (w czasie próby dopuszcza się jego zmniejszenie o 10%), ale w badaniu odporności na zwarcie wewnętrzne przekładnika wysokonapięciowego współczynnik jest stosunkowo niski i wynosi $k = 1,7$. Stałą czasową najwięcej uwagi poświęca się w normie dotyczącej badania wyłączników (2001). W normie zacytowana jest też obszerna dyskusja przeprowadzona przez Grupę Roboczą CIGRE WG13-04. Przyjmuje się standardową „znamionową stałą czasową”, która wynosi $\tau = 45$ ms i nazywa się ją „wartością

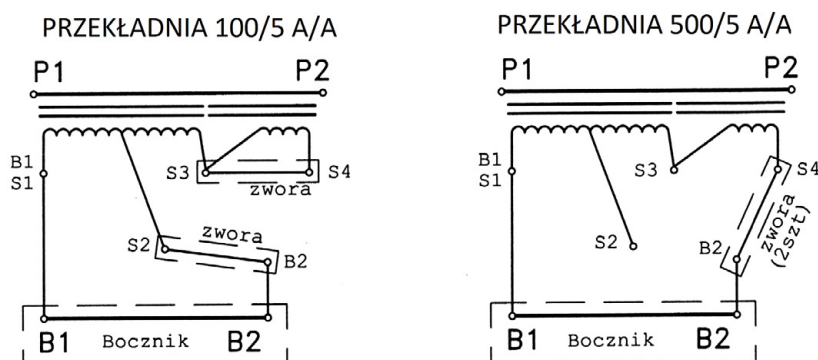
znormalizowaną”. Ta wartość stałej czasowej jest właściwa dla większości realnych przypadków. Rozważa się również inne wartości stałej czasowej $\tau = 60$ ms, 75 ms, 120 ms, ale traktowane są one jako „szczególny przypadek stałych czasowych”. Ponieważ stałe czasowe uzyskiwane w laboratoriach zwarciovych różnią się między sobą, to norma precyzuje i podaje procedury postępowania w sytuacji, kiedy stała czasowa obwodu probierczego jest większa lub mniejsza od wartości przypisanej. Badania wykonane przy większej wartości dla przypisanych wartości mniejszych uznaje się pod warunkiem, że składowa okresowa ma tę samą wartość lub większą i zachowane są wymagane parametry napięcia powrotnego. W laboratorium zwarciovym IEL naturalna stała czasowa, związana z maksymalnym prądem zwarciovym przy napięciu generatorowym, wynosi ok. 50 ms.

	Typ PL-30/E2		Typ PL-30/E1	
I_{1n}	2000 A	10 000 A	100 A	500 A
zakres pomiarowy	1–10 kA	5–65 kA	50–500 A	250–2500 A
I_{2n}	5 A	5 A	5 A	5 A
S_{2max}	2,5 VA	2,5 VA	2,5 VA	2,5 VA
klasa	0,1	0,1	0,1	0,1
zaciski	S1–S2	S1–S3	S1–S2	S1–S3
napięcie na boczniku 50 mΩ	0,125–1,25 V	0,125–1,625 V	0,125–1,25 V	0,125–1,25 V

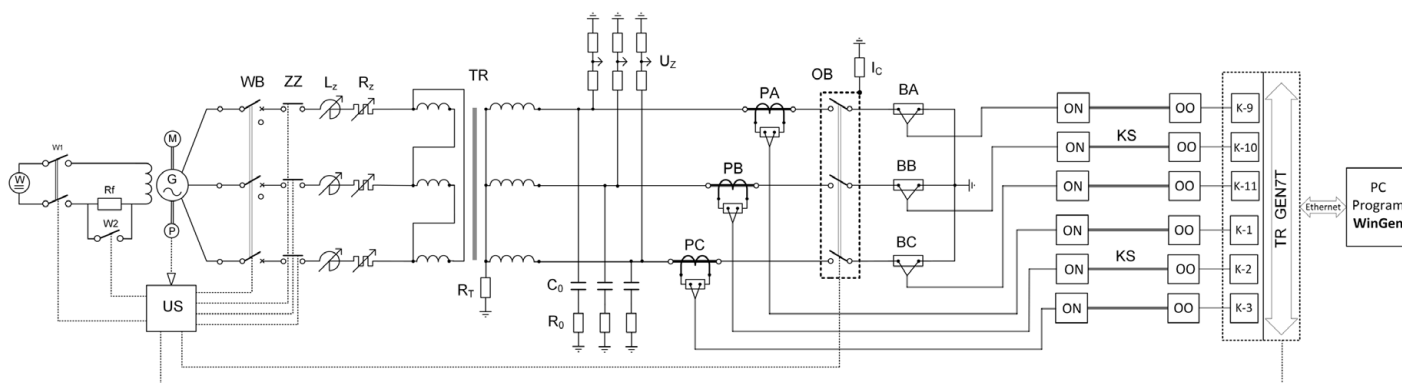
Tab. 2. Parametry znamionowe przekładników



Rys. 1. Schemat uzwojeń przekładnika typu PL-30/E1



Rys. 2. Schemat uzwojeń przekładnika typu PL-30/E2

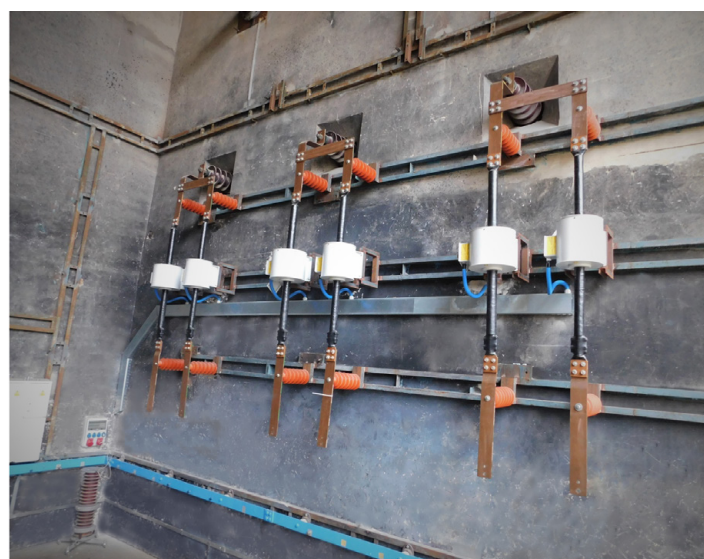


G – generator zwarciový o mocy 31,5 MVA (500 MVA) lub 100 MVA (2500 MVA); M – silnik generatora; P – pilot generatora; W – wzbudnica generatora; Rf – zespół rezystorów w obwodzie wzbudzenia; W1, W2 – wyłączniki w obwodzie wzbudzenia; WB – wyłącznik bezpieczeństwa; ZZ – załączniki zwarciový; Rz – zespół regulowanych rezystorów; Lz – zespół regulowanych dławików; Rt – rezystor 5 kΩ; TR – zespół trzech transformatorów zwarciových 3 x 33,3 MVA (3 x 750 MVA); R0, C0 – układ do regulacji parametrów napięcia powrotnego; BA, BB, BC – boczniki koncentryczne WSM-6000 – Hilo-Test; PA, PB, PC – przekładniki prądowe PL-30/E1, PL-30/E2 – Transformex; Uz – dzielniki WN; US – urządzenie sterujące próbą i pomiarami; OB – obiekt badany; ON – nadajnik optoelektroniczny; OO – odbiornik optoelektroniczny; KS – kabel światłowodowy; TR GEN7t – Transient Recorder typu GEN7t-2 GENESIS rejestrator (14–16 bit, 25MHz, RAM 200 MB/kanal); PC komputer z oprogramowaniem WinGen

Rys. 3. Układ probierczy i pomiarowy stosowany do badań zdolności łączeniowej aparatury rozdzielczej w Związku IEL, w którym przeprowadzono sprawdzenie dokładności przetwarzania prądów zwarciových przez przekładniki

3. Założenia i wybór konstrukcji przekładników

W laboratorium zwarciovým Instytutu Elektrotechniki, gdy jest to tylko możliwe, wykonuje się pomiary prądu zwarciových za pomocą boczników. Uzasadnione to jest wysokimi walorami pomiarowymi boczników – bezproblemowy pomiar prądów probierczych stałych, w tym składowej stałej prądu zwarciových, oraz przemiennej. Kiedy w układzie nie można zamontować i bezpośrednio uziemić boczników, konieczny jest pomiar prądu pod wysokim potencjałem, a więc np. za pomocą przekładników. W Związku IEL założono, że w procesie projektowania przekładników prądowych do modernizowanego układu probierczego nie będą się one nasyciły przy przepływie prądu probierczego w pełnym zakresie pomiarowym (tab. 2), dla maksymalnej wartości stałej czasowej $\tau = 60$ ms.



Fot. 1. Układ przekładników zamontowanych w obwodzie zwarciovým IEL (komora VI)

Opracowano i wykonano przekładniki, po 2 szt. na każdą fazę, o tak dobranych parametrach znamionowych, aby obejmowały pełen zakres prądów probierczych, bez potrzeby rozmontowywania toru prądowego. Tor probierczy ma dwie gałęzie równoległe, z zaciskami do przyłączenia obiektu badanego (fot. 1). Jedna gałąź służy do badań prądem symetrycznym o wartości od 50 A do 2500 A, a druga od 1 kA do 65 kA. Obciążenie przekładników stanowią bezindukcyjne boczniki o rezystancji 50 mΩ.

4. Opis konstrukcji przekładnika

Przekładniki zaprojektowane i wykonane w firmie Transformex mają konstrukcję przepustową, rdzenie pierścieniowe bezszczelinowe. Uzwojenia pierwotne stanowią przepusty na napięcie znamionowe 30 kV i prąd zwarciový 1 sek. 65 kA. Przełączanie zakresów znamionowego prądu pierwotnego każdego przekładnika odbywa się po stronie wtórnej, w skrzynce przełączeniowej zainstalowanej w korytarzu szynowym zwarciových. Przyjęte wartości znamionowych prądów pierwotnych I_{1n} oraz zakresy pomiarowe przekładników (tab. 2) umożliwiają, w zależności od rodzaju próby, właściwy dobór przekładni przekładników i dokładny pomiar prądu zwarciových w bardzo szerokim zakresie prądów probierczych zwarciových, tj. od 50 A do 65 kA.

5. Układ badawczy i pomiarowo-rejestrujący

W celu sprawdzenia dokładności przetwarzania prądów zwarciových przez przekładniki zastosowano typowy układ probierczy i pomiarowy, eksploatowany w Związku IEL podczas badań zdolności łączeniowej aparatury rozdzielczej tych konkretnych wyłączników. Układ przedstawiono schematycznie na rys. 3. Laboratorium zwarciové IEL dysponuje dwoma generatorami zwarciovými G o mocy typowej 31,5 MVA oraz 100 MVA i odpowiednio o mocy zwarciových 500 MVA oraz 2500 MVA. Generatory napędzane są silnikiem M (pierścieniowy indukcyjny z wielostopniowym samoczynnym rozruchem wiropędowym), którego zadaniem jest doprowadzenie generatora do znamionowej prędkości synchronicznej i utrzymanie go w ruchu na biegu jałowym.

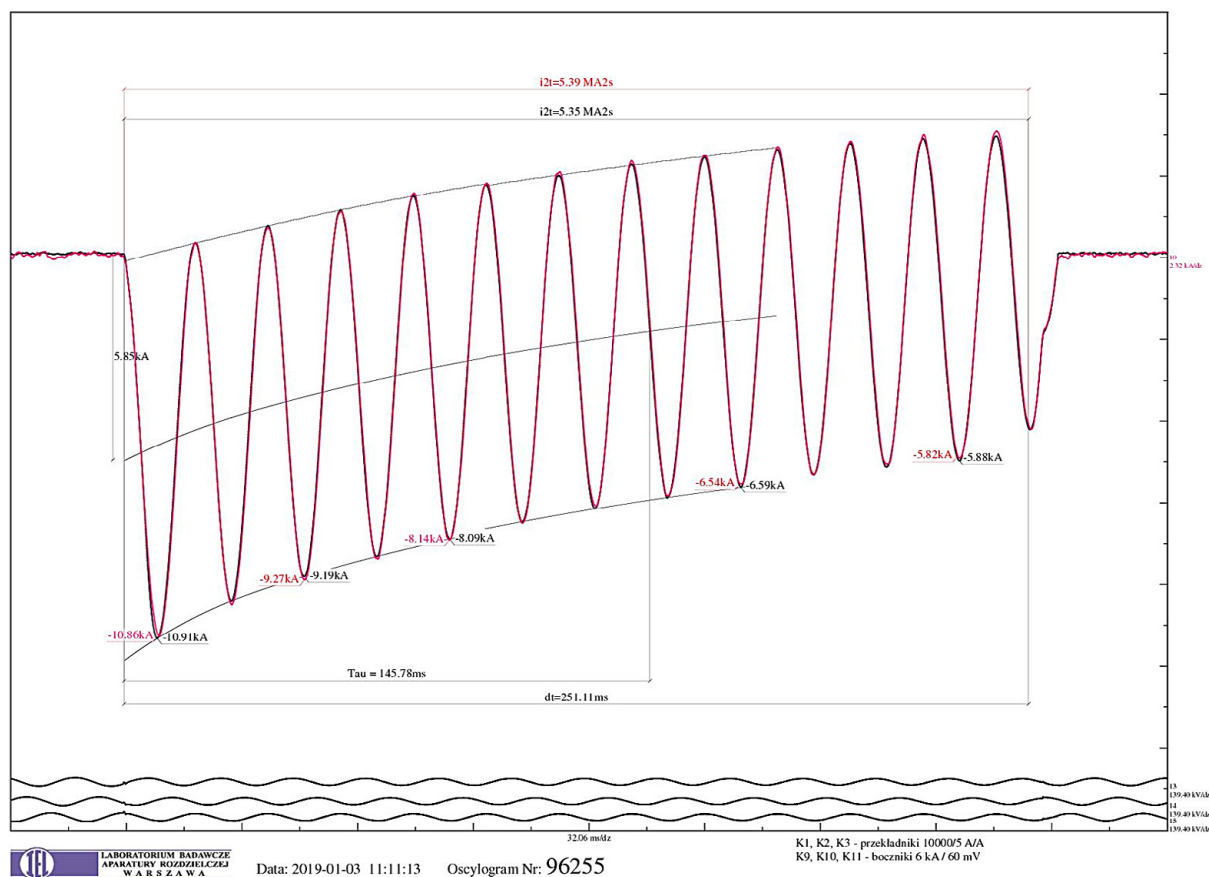
Energia elektryczna potrzebna do uzyskania żądanych parametrów probierczych uzyskiwana jest kosztem energii kinetycznej mas wirujących (ok. 45 ton) układu generator – silnik napędowy. Z wałem generatora sprzężona jest mała prądnica P (tzw. pilot generator), która współpracuje z urządzeniem synchronizującym próby (US). 24-kanalowe urządzenie synchronizujące US wysyła impulsy w odpowiednio wybranej fazie napięcia zasilania i służy do sterowania urządzeniami zwarciozni. W celu zapewnienia stabilnego przebiegu prądu zwarcioowego stosuje się układ forsowania wzbudzenia oraz koło zamachowe w układzie napędowym wzbudnicy. Do nastawiania prądu probierczego i współczynnika mocy służy zespół dławików powietrznych L_z oraz rezystorów R_z . Parametry probiercze mogą być również zmieniane poprzez odpowiednie połączenie transformatorów zwarcioowych TR i dobór przekładni transformatorów. Transformatory – trzy jednostki 1-fazowe, każda o mocy nominalnej 33,3 MVA i mocy zwarciowej 750 MVA oraz uzwojeniach 10 kV/15–30–60–120 kV, mogą być różnie kojarzone w układach 3 – i 1-fazowych (w sumie można uzyskać kilkadziesiąt różnych przekładni). Pomiary wykonano w układzie pomiarowym, jaki jest stosowany – jak wspomniano wyżej – podczas badań zdolności łączeniowej aparatury, wykonywanych w laboratorium zwarciowym IEL. Podstawowymi elementami układu są: przetworniki światłowodowe (ON – nadajnik, OO – odbiornik), zespół światłowodów KŚ, 24-kanalowy Transient Recorder typu GEN7T-2 GENESIS firmy HBM Inc. USA (wzmacniacz DIF25M128, wejście różnicowe 20 mV-100 V, 14/16 bit, 200MB RAM, próbkowanie 25 Ms/s).

Przekładnik PL-30/E2 – zakres 10 kA. Oscylogram nr 96255			
Mierzona wielkość	Przekładnik	Bocznik	Błąd [%]
Wartość szczytowa I_p	10,91 kA	10,86 kA	0,46
Wartość skuteczna I_1	3,77 kA	3,79 kA	0,26
Współczynnik udaru k	2,886	2,885	0,73
Wartość $i2t$	5,35 MA ² s	5,39 MA ² s	0,75
Wartość początkowa składowej nieokresowej I_{do}	5,83 kA	5,85 kA	0,35
Przekładnik PL-30/E2 – zakres 2 kA. Oscylogram nr 96264			
Wartość szczytowa I_p	9,19 kA	9,25 kA	0,65
Wartość skuteczna I_1	3,22 kA	3,25 kA	0,93
Współczynnik udaru k	2,863	2,846	0,59
Wartość $i2t$ *)	1,59 MA ² s	1,57 MA ² s	1,26
Wartość początkowa składowej nieokresowej I_{do}	4,80 kA	4,76 kA	0,83

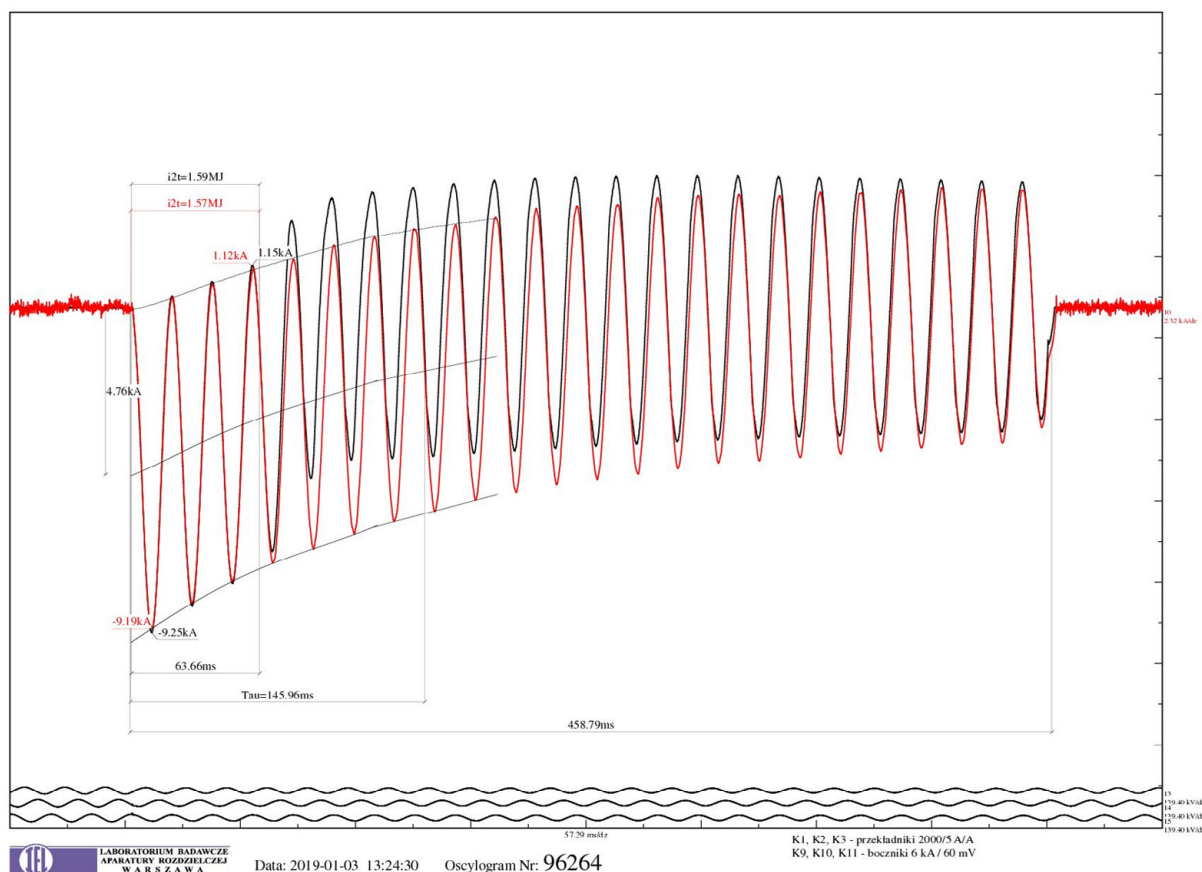
*) wartość wyznaczona dla czasu $t = 63$ ms

Tab. 3. Zestawienie wybranych wyników pomiarów. Stała czasowa obwodu $\tau = 146$ ms

Rejestrator poprzez łącze Ethernet jest połączony z komputerem. Obróbka danych, oscylogramów i tworzenie dokumentacji odbywa się za pomocą autorskiego oprogramowania WinGen. W tle programu WinGen pracuje program Perception (dostarczony przez producenta) obsługujący rejestrator.



Rys. 4. Oscylogram z próby sprawdzania dokładności pomiarowej przekładników przy braku nasycenia



Rys. 5. Oscylogram z próby sprawdzania dokładności pomiarowej przekładników w przypadku nasycenia

6. Wyniki badań

Badania przeprowadzono w układzie probierczym 3-fazowym (rys. 3) przy różnych stałych czasowych obwodu. Dla poszczególnych zakresów wykonano po dwie próby, w tym jedną dla wartości prądu bliskiej maksymalnej danego zakresu, łącznie wykonano ponad 20 prób. Mierzono następujące wielkości: wartość szczytową (udar) – I_p , wartość skuteczną prądu symetrycznego (1 okres) – i_1 , wartość początkową prądu asymetrycznego – I_{d0} , współczynnik udaru – k oraz wartość – i^2t dla wybranego przedziału. Przykładowe wyniki dla pomiarów przekładnikiem oraz bocznikiem, wraz z błędami pomiaru, zestawiono w tab. 3. Wybrano przypadek nienasycenia (oscylogram nr 96255) i nasycenia (oscylogram nr 96264) się przekładnika.

Na zamieszczonych oscylogramach zaprezentowano tylko pomiary 1 fazy, tej w której wystąpił najwyższy udar, przebiegi umieszczono na wspólnej osi czasowej – przebieg z bocznika (kolor czerwony) i przebieg z przekładnika (kolor czarny). Gdy wartość mierzonego prądu jest stosunkowo mała, przekładnik mierzy prąd poprawnie w całym rejestrowanym przedziale, mimo że stała czasowa obwodu przekracza założoną wartość (rys. 4) – wizualnie przebiegi praktycznie się pokrywają w całym rejestrowanym przedziale. Dla mierzonych wartości bliskich maksymalnego zakresu przekładnik już mierzy poprawnie (z założonym błędem), tylko w przedziale dla założonej stałej czasowej (60 ms). Można zaobserwować, że po zakończeniu stanów przejściowych przekładnik „wychodzi” z nasycenia – przebiegi zaczynają się pokrywać (rys. 5).

7. Wnioski końcowe

Przeprowadzane badania i pomiary prądu zwarciovego w laboratorium zwarciovym IEL, za pomocą wielozakresowych przekładników prądowych, potwierdziły poprawność rejestracji przebiegów w granicach założonych parametrów. Układ pomiarowy został wdrożony i jest eksploatowany.

Poprawiły się parametry eksploatacyjne zwiarciovni, wzrosła jakość wykonywanych pomiarów, zdecydowanie skrócił się czas przygotowania układów probierczych do badań.

The System of Measurement of Symmetrical and Asymmetric Short Circuit Current with Multi Range Current Transformers in Conditions of Short-Circuit Testing Laboratory

Keywords

short-circuit tests, short-circuit current measurements, current transformer

Abstract

The article contains an overview of various requirements for the parameters of the Short-Circuit Testing Laboratory: symmetrical and asymmetrical short-circuit currents, time constant for the disappearance of the constant short-circuit component, asymmetrical peak factor and various types of short-circuit tests

performed on various devices operating in power systems, contained in different subject standards. The equipment of the Short-Circuit Testing Laboratory of the Electrotechnical Institute and the modernized test chamber No. 6 is described, equipped with new multi range current transformers and a modern measuring system for short-circuit current. The method of checking the accuracy of current transformers for measuring

short-circuit currents is described and example oscillograms are given. The values of the adopted parameters of the transformers and the way of designing the test track are highlighted, enabling the simplification of preparatory works to carry out short-circuit tests and research organization. The article contains electrical diagrams of measurement systems, diagrams of transformer windings and photograph of modernized test chamber No. 6.

KONTAKT

Michał Babiuch

Instytut Elektrotechniki w Warszawie

tel.: +48 604 579 722

e-mail: m.babiuch@iel.waw.pl

Jan Olak

Transformex sp. z o.o. w Warszawie

tel.: +48 502 360 346

e-mail: janolak@transformex.pl