

ROMAN GIEBUŁTOWICZ

Katedra Zabezpieczeń i Automatyki w Energetyce  
Politechniki WrocławskiejPOMIARY ASYMETRII OBCIĄŻENIA GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH  
W ELEKTROWNIACH PRZEMYSŁOWYCH

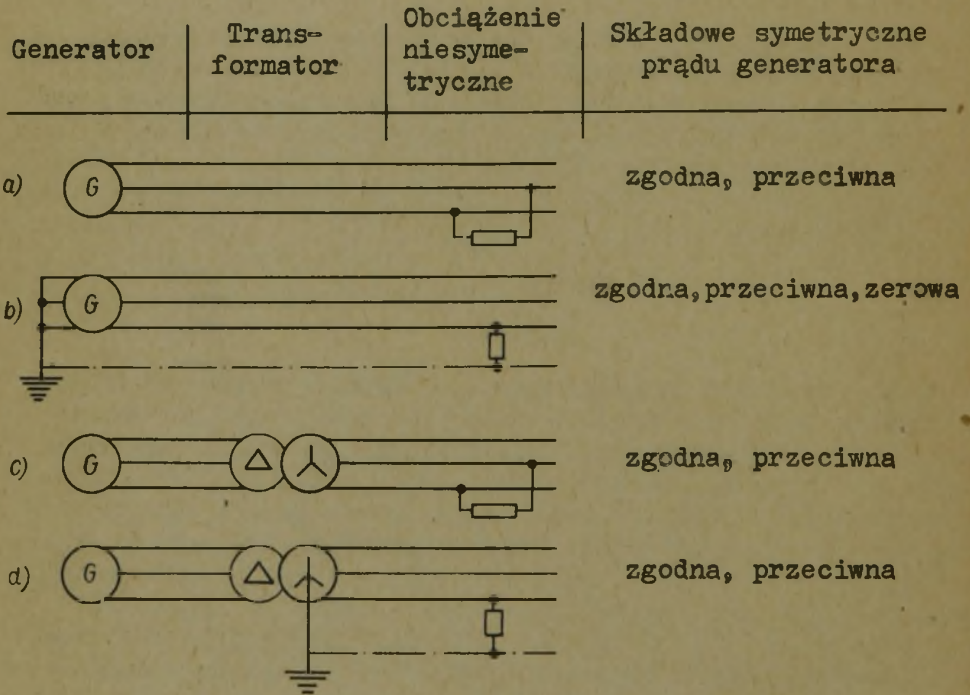
Streszczenie. Podano zasadę działania przyrządu samopiszącego do pomiaru małych wartości składowej prądu przeciwnej kolejności faz  $I_2$ . Omówiono przyrząd  $I_2$  w układzie laboratoryjnym oraz wyniki pomiarów asymetrii obciążenia dokonane tym przyrządem w elektrowni przemysłowej zakładu posiadającego niesymetryczne piece łukowe.

1. Wstęp

W elektrowniach przemysłowych zakładów posiadających asymetrię obciążenia w prądach fazowych pojawia się składową przeciwnej kolejności faz  $I_2$ . Poza tym względnie mała wartość  $I_2$  może wystąpić przy odległych zwarcjach nie wyłączonych przez zabezpieczenie. Prąd  $I_2$  powoduje niepożądane nagrzewanie wirników generatorów, asymetrię napięcia trójfazowego oraz powiększa straty przez syku energii elektrycznej. Rozmiary ujemnych skutków asymetrii obciążenia zależą od wartości prądu  $I_2$ . W celu określenia tego prądu w elektrowniach przemysłowych dokonano pomiarów w wytypowanym zakładzie, który posiada niesymetryczne piece łukowe. Na podstawie literatury, a w szczególności wyników pomiarów opublikowanych przez H.Koettnitza [1], wiadomo, że przeciętna wartość prądu  $I_2$  generatora w różnych zakładach jest zawarta w przedziale 2÷8% prądu znamionowego. Czas trwania pomiarów obejmował okres 4÷5 miesięcy. Warunki pomiarów narzucają potrzebę stosowania przyrządu  $I_2$  samopiszącego o kilku zakresach (5%, 10% i 50%). Przyrząd taki wykonano w Katedrze Zabezpieczeń i Automatyki w Energetyce Politechniki Wrocławskiej.

## 2. Definicja asymetrii obciążenia systemu elektroenergetycznego

Jeżeli w symetrycznym układzie trójfazowym oporności fazowe zastępcze skupione wszystkich odbiorów utworzą układ niesymetryczny  $\hat{Z}_a, \hat{Z}_b, \hat{Z}_c$  i wskutek tego w trzech fazach popłyną prądy trójfazowe niesymetryczne  $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$ , to mówi się, że w tym układzie powstała asymetria obciążenia. Każdy niesymetryczny zastępczy odbiór trójfazowy daje się przedstawić jako symetryczny odbiornik trójfazowy plus odbiornik jednofazowy podłączony na napięcie międzyprzewodowe lub fazowe. Na wartość asymetrii ma wpływ ten zastępczy od-



Rys.1. Typowe przypadki obciążenia niesymetrycznego generatora

biór jednofazowy oraz jego położenie w systemie elektroenergetycznym (patrz, rys.1). Każdy niesymetryczny układ trójfazowy prądów wywołany asymetrią obciążenia daje się zastąpić kombinacją trzech układów symetrycznych: kolejności

zgodnej (indeks 1), przeciwnej (indeks 2), zerowej (indeks 0). Poszczególne składowe można obliczyć znając wartości wskaźowe prądów fazowych  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$ ,  $\hat{I}_c$ .

$$\begin{vmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{vmatrix} \quad (1)$$

gdzie  $a = e^{j 120^\circ}$

W eksploatacji na podstawie odczytu amperomierzy znane są tylko moduły prądów fazowych, dlatego wzór (1) w podanej postaci jest nieprzydatny. W celu obliczenia składowej prądu przeciwnej kolejności faz  $I_2$  można wyprowadzić wzór zawierający tylko moduły prądów [1]:

$$\frac{I_2}{I_a} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{2} [1 + \alpha^2 + \beta^2 - \sqrt{6(\alpha^2 + \beta^2) - 3(\alpha^2 - \beta^2)} - 3]} \quad (2)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{I_c}{I_a}, \quad \beta = \frac{I_b}{I_a}$$

Do powyższego wzoru można sporządzić nomogram, który jednakże również nie pozwala na odpowiednio szybkie określenie prądu  $I_2$ . Wzór (2) obowiązuje w przypadku niewystępowania składowej zerowej prądu.

### 3. Zasada pomiaru prądu $I_2$

Współczesne generatory z reguły są podłączone do systemu elektroenergetycznego poprzez transformatory podwyższające w układzie trójkąt - gwiazda. W związku z tym przy każdej asymetrii w systemie w prądach generatora wystąpi tylko składowa zgodna i przeciwna a nigdy nie pojawi się składowa zerowa. Fakt ten wykorzystuje się w celu uproszczenia układu pomiarowego przyrządu do pomiaru składowej prądu przeciwnej

kolejności faz ( $I_2$ ). Pomiaru dokonuje się za pracą dwóch przekładników prądowych w fazie A i C na napięciu generatorowym. Zasada pomiaru jest prosta; układ jest filtrem prądowym kolejności przeciwnej faz. Napięcie wyjściowe filtra, proporcjonalne do  $I_2$ , mierzone jest czułym miernikiem napięcia o dużej oporności wewnętrznej. Możliwe są różne wykonania filtra prądowego. Do prototypu przyjęto filtr oporowo-kondensatorowy zasilany z pośredniczących przekładników prądowo - napięciowych (rys.2). Zaletą tego układu jest to, że rozmiary filtra są nieduże, wymagana jest mała pojemność kondensatora i mała moc oporów filtra, tak, że mogą być stosowane elementy radiotechniczne znormalizowane. Ten rodzaj filtra  $I_2$  można było przyjąć, ponieważ założono, że na wyjściu filtra do układu zostanie wprowadzony elektronowy wzmacniacz napięcia. Typ wzmacniacza został wybrany z uwagi na dużą oporność wejściową. Wzmacniacz jest w układzie konieczny z dwóch względów:

1) przyjęto samopiszący miernik napięcia posiadający względnie duży pobór mocy,

2) zaprojektowano w układzie filtr wyższych harmonicznych (dolnoprzepustowy). Należy zaznaczyć, że filtr wyższych harmonicznych jest bardzo ważnym elementem układu, bowiem zagłuszający wpływ wyższych harmonicznych jest tak duży, że uniemożliwia pomiar prądu  $I_2$ .

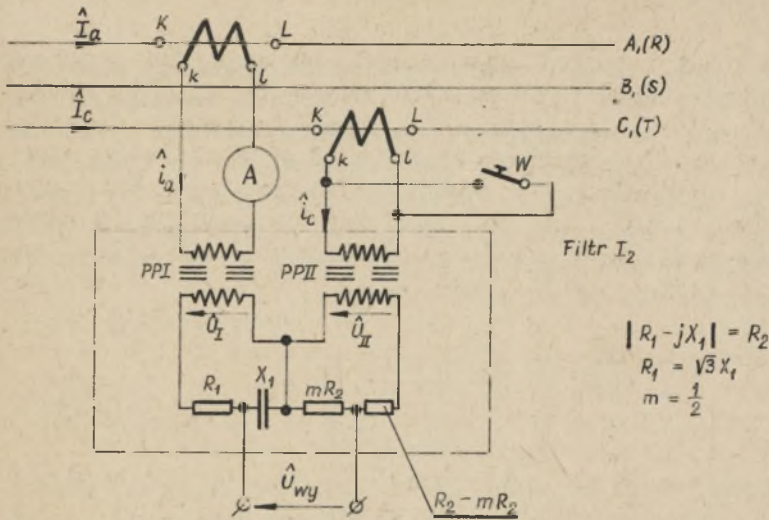
Działania filtra  $I_2$  można rozpatrywać posługując się schematem podanym na rys.2a.

Z założenia

$$\left. \begin{aligned} \hat{I}_a &= \hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2}, \\ \hat{I}_c &= a \cdot \hat{I}_{a1} + a^2 \hat{I}_{a2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

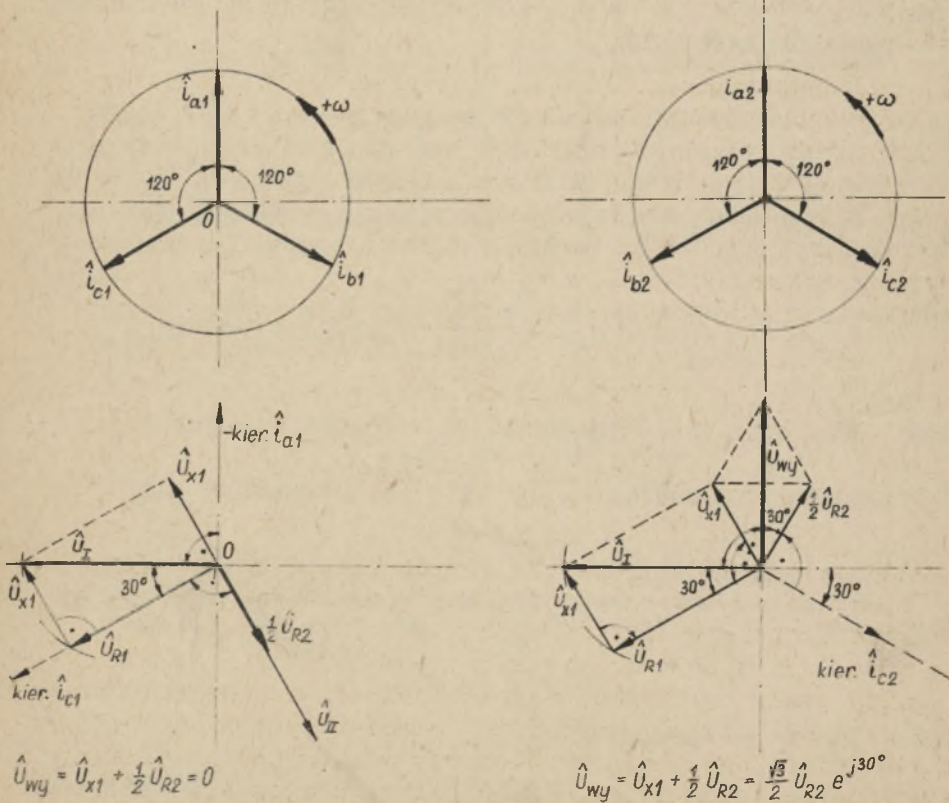
Przekładniki pośredniczące (PP I i PP II) posiadają szczelinę w obwodzie magnetycznym, aby napięcie strony wtórnej było wprost proporcjonalne do prądu po stronie pierwotnej. Przy odpowiednim doborze szczeliny powietrznej i maksymalnego punktu pracy na krzywej magnesowania obwodu magnetycznego można uzyskać prostoliniowość tej charakterystyki z założoną dokładnością. Znamionowy prąd strony pierwotnej przekładników pośredniczących wynosi 5A. Obwód magnetyczny i obciążenie przekładnika zostało tak dobrane, by prąd strony wtórnej przeliczony na stronę pierwotną wynosił zaledwie 2,5%

a)



b) Układ zgodny

Układ przeciwny



Rys.2. a) Schemat układu filtra prądowego składowej przeciwnej kolejności faz ( $I_2$ ); b) uproszczone wykresy wskazowe filtra  $I_2$  przy założeniu, że prądy tworzą 1<sup>o</sup> układ trójfazowy symetryczny zgodny 2<sup>o</sup> układ trójfazowy symetryczny przeciwny

prądu pierwotnego. Innymi słowy dążono do tego, by prąd wtórny był pomijalnie mały w porównaniu z prądem magnesującym. Obwód magnetyczny przekładnika i uzwojenie wtórne wykonano tak, by oporność rozproszenia uzwojenia wtórnego była możliwie najmniejsza. Przy takim wykonaniu praktycznie otrzymano napięcie wtórne proporcjonalne do prądu pierwotnego w zakresie 0÷5A oraz wskaz napięcia przesunięty o 90° elektrycznych względem wskaz prądu pierwotnego.

A więc

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_I &= jk \hat{i}_a \\ \hat{U}_{II} &= jk \hat{i}_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Wykresy wskazowe prądów i napięć przekładników pośredniczących (uproszczone) podano na rys.2b. Wartość współczynnika proporcjonalności  $k$  w obu równaniach (4) jest jednakowa, bo w tym celu założono

$$|R_1 - jX_1| = R_2. \quad (5)$$

Na podstawie schematu filtru  $I_2$  podanego na rys.2a

$$\hat{U}_{wy} = \hat{U}_{x1} + m \cdot \hat{U}_{R2} = \frac{\hat{U}_I}{R_1 - jX_1} (-jX_1) + \frac{\hat{U}_{II}}{R_2} mR_2.$$

gdzie  $mR_2$  jest częścią oporu  $R_2$  (patrz rys.2a).

Wykorzystując zależności (3), (4), (5) otrzymuje się

$$\hat{U}_{wy} = \hat{i}_{a1} \frac{k(R_1 \cdot X_1 + jX_1^2)}{(R_2)^2} + jkma + \hat{i}_{a2} \frac{k(R_1 \cdot X_1 + jX_1^2)}{(R_2)^2} + jka^2m.$$

Filtr  $I_2$  daje warunek

$$\frac{k(R_1 \cdot X_1 + jX_1^2)}{(R_2)^2} + jkma = 0,$$

skąd po wykorzystaniu zależności (5)

$$R_1 = \sqrt{3} X_1, \quad (6)$$

$$m = \frac{1}{2}, \quad (7)$$

$$\text{oraz } R_2 = 2X_1. \quad (8)$$

$$\text{Ostatecznie } U_{wy} = \hat{i}_{a2} \cdot k \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (9)$$

Filtr ma tę dodatkową właściwość, że wskaz napięcia wyjściowego  $\hat{U}_{wy}$  jest we fazie ze wskazem składowej prądu kolejności przeciwnej fazy  $A(i_{a2})$ .

#### 4. Przvrząd $I_0$ w układzie laboratoryjnym

Wzór (9) dotyczy przypadku wyidealizowanego. Obliczenia konstrukcyjne zostały tak dokonane, by po pierwsze przeliczony prąd strony wtórnej przekładników pośredniczących był pomijalnie mały w porównaniu z prądem magnesującym i po drugie oporność rozproszenia uzwojenia wtórnego była możliwie mała.

Rzeczywisty wykres wskazowy przekładników pośredniczących podano na rys.3b i c.

Na rys.3b

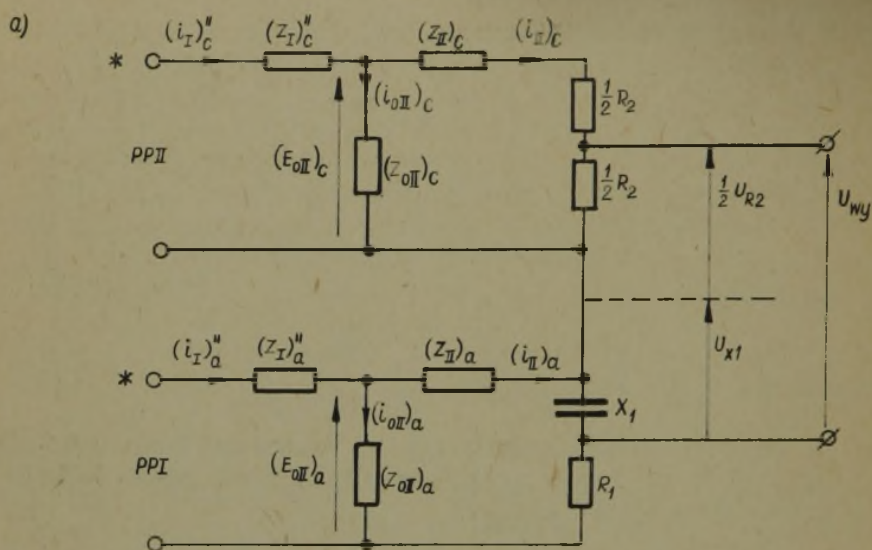
$$\text{tg } \varphi'_{3a} = \frac{-X_1 + X_{II}}{R_1 + r_{II}},$$

$$\varphi_{5a} = 30^\circ - |\varphi_{3a}|,$$

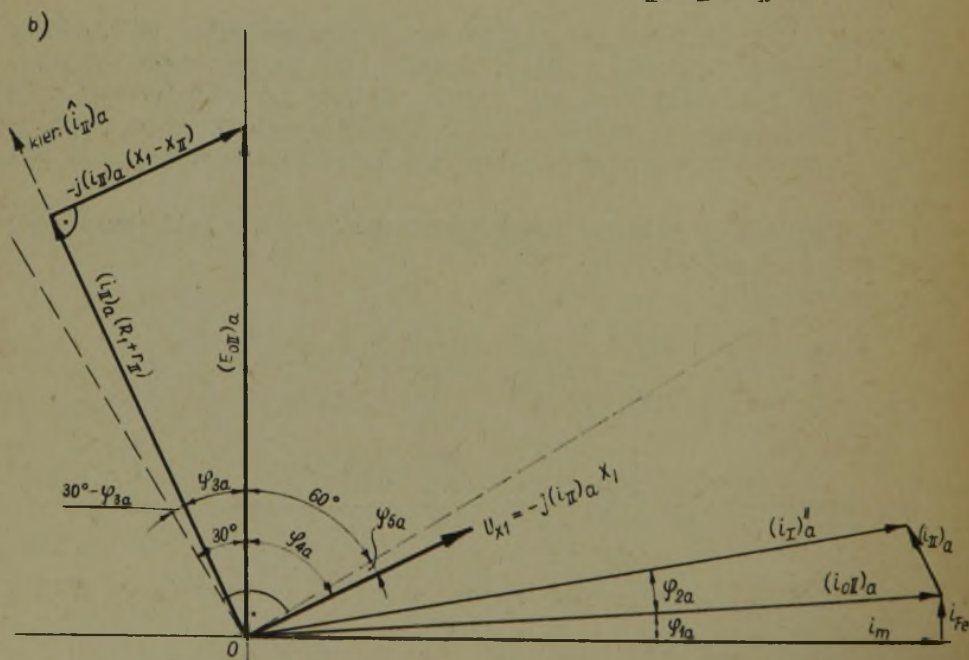
$$\text{arc tg } \frac{X_1}{R_1} = 30^\circ.$$

Na rys.3c

$$\text{tg } \varphi'_{3c} = \frac{X_{II}}{r_{II} + R_2},$$



$$Z_{II} = r_{II} + jX_{II}$$



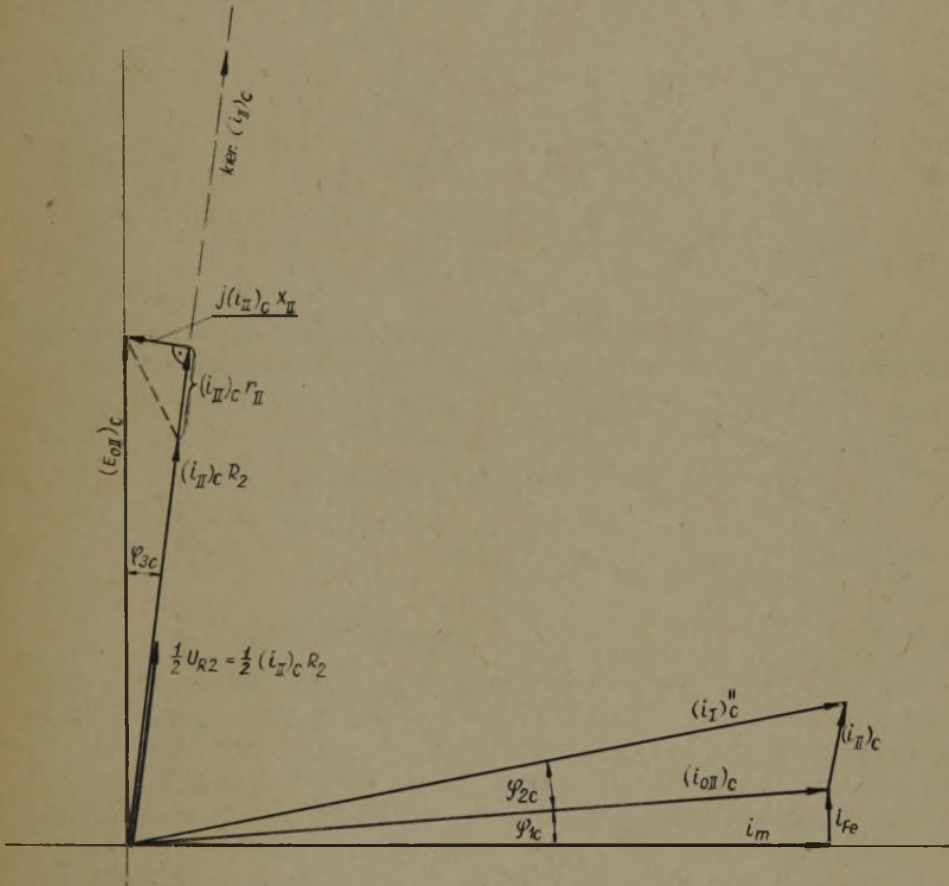
Rys.3. a) Schemat ideowy filtru  $I_2$ , b) wykres wskazowy przekładnika pośredniczącego PPI



gdzie:

$r_{II}$  - oporność czynna uzwojenia wtórnego przekładnika pośredniczącego,

$X_{II}$  - oporność rozproszenia uzwojenia wtórnego przekładnika pośredniczącego.



Rys.3c. Wykres wskazowy przekładnika pośredniczącego PPII

Prądy wtórne przekładników pośredniczących posiadają nieco inne moduły i kąty fazowe niż w przypadku przekładników idealnych. Różnice te są pomijalne bowiem założono mały prąd wtórny

$$i_{II} = 0,05 (i_I)'', \quad (10)$$

gdzie  $(i_I)''$  - prąd pierwotny przeliczony na stronę wtórną oraz

$$\begin{aligned} R_2 &\gg r_{II}', \\ X_1 &\gg X_{II}', \\ R_1 &\gg r_{II}''. \end{aligned} \quad (11)$$

Dla celów filtru  $I_2$  wystarczy wyrównanie uchybów kątowych przekładników pośredniczących, a więc spełnienie warunku

$$\varphi_{1a} + \varphi_{2a} + \varphi_{5a} \approx \varphi_{1c} + \varphi_{2c} + \varphi_{3c}$$

$$\varphi_{1a} = \varphi_{1c}, \text{ bo przekładniki są identyczne}$$

$$\varphi_{2a} \approx \varphi_{2c}, \text{ bo } i_{II} \ll (i_I)'',$$

natomiast  $\varphi_{5a} \approx \varphi_{3c} \approx 0$ , na podstawie (11).

Do zacisków wyjściowych filtru  $I_2$  podłączono dzielnik napięcia złożony z oporników radiowych. Przełącznik kołkowy pozwala na zmianę zakresu pomiarowego: 50%, 10% lub 5%. Maksymalny prąd dzielnika przy zakresie 5% wynosi około 0,5mA i stanowi 5% maksymalnego prądu wtórnego przekładnika pośredniczącego. Napięcie dzielnika napięcia jest podawane poprzez pierwszy filtr wyższych harmonicznyc R-C na siatkę wzmacniacza lampowego 75W, typu WR75,  $U_{we} = 0,15V \sim$ ,  $U_{wy} = 120 V \sim$ . Z kolei wzmacniacz zasila uniwersalny przyrząd samopiszzący na zakresie 75V $\sim$  poprzez drugi filtr wyższych harmonicznyc R-C. Filtry R-C są tak zbudowane, że można je włączać lub wyłączać bez zmiany zakresu pomiarowego, co pozwala sprawdzać wpływ wyższych harmonicznyc na fałszowanie wyników pomiaru.

Uzwojenia filtru zostały obliczone na trwały prąd znamionowy. Wytrzymałość termiczna 1 sekundowa odpowiada wymogom norm tj.  $I_{1\text{sek}} \geq 50 \cdot I_N = 50 \cdot 5 = 250 \text{ A}$ .

Sprawdzenie jakości filtru jest bardzo kłopotliwe ze względu na to, że są duże trudności w otrzymaniu regulowanego prądu trójfazowego o kształcie sinusoidalnym. Praktycznie można zaobserwować na oscyloskopie znaczne odkształcenia krzywej prądu. W związku z tym zastosowano metodę pośrednią, mianowicie dokładnie mierzono i regulowano każdy element filtru oddzielnie zgodnie z obliczeniami. Po zmontowaniu całości dokonano pomiarów prądu  $I_2$  kompletnym aparatem przepuszczając prąd jednofazowy przez uzwojenia pierwotne przekładników pośredniczących połączone szeregowo. Wyniki pomiarów odpowiadały obliczonym wartościom składowej prądu przeciwnej kolejności faz.

Opisany układ laboratoryjny posiada regulację wzmocnienia napięcia. W związku z tym przed każdym pomiarem należy przyrząd wycechować. Mianowicie w obwód pierwotny jednego przekładnika pośredniczącego włączony jest amperomierz, a obwód pierwotny drugiego przekładnika pośredniczącego jest zwarty na czas cechowania przy pomocy specjalnych zacisków (patrz rys.2). Kręcąc gałką wzmocnienia ustawia się wskazówkę przyrządu samopiszącego w położenie obliczone z wzoru

$$Y = \left( \frac{i}{i_N} \right) \cdot 115 (\%) \quad (12)$$

gdzie:

$Y$  - wychylenie przyrządu samopiszącego w procentach wychylenia maksymalnego,

$i$  - prąd odczytany na amperomierzu w  $A$ ;

$i_N$  - prąd znamionowy ( $A$ ) w stosunku do którego odnosi się procentową wartość  $i_2$  ( $i_N$  obiera się dowolnie np.  $5 \text{ A}$ ).

Cechowania dokonuje się na zakresie 50%. Wzór (12) został wyprowadzony na podstawie wykresu wskazowego i obliczeń filtru  $I_2$  przy zamkniętym wyłączniku "W" (patrz rys.2a).

### 5. Wyniki pomiarów asymetrii obciążenia

Pomiarów dokonano w elektrowni przemysłowej, która posiada niesymetryczne piece łukowe. Czas trwania pomiarów przyrzędem  $I_2$  obejmował dwie doby i był wystarczający, by porównać wyniki z pomiarami asymetrii dokonywanymi w wielu punktach elektrowni przez długi okres czasu za pomocą amperomierzy i woltomierzy samopiszących. W czasie pomiarów przyrzędem  $I_2$  układ elektrowni był następujący: generator BBC 34,6 MVA 6300 V pracował równoległe z siecią energetyczną zasilając odbiory zakładu, między innymi niesymetryczne piece łukowe.

#### Wyniki pomiarów

1) Generator o danych znamionowych 34,6 MVA 6,3 kV  $\vartheta_1 = 3500/5$  A/A. Przyjęto  $i_N = i_{Ng} = 4,57$  A. Odczyt amperomierza w czasie cechowania przyrzędu  $i = 4,15$  A.  
 $Y = \frac{4,15}{4,57} \cdot 115 = 104\%$ . Wartość 104% można nastawić, bo taśma przyrzędu samopiszącego jest szersza od skali). Wskazania przyrzędu w ciągu kilku godzin zawarte są w przedziale od 2 do 5%.

2) Kabel 6 kV w stacji 11 kII,  $\vartheta_1 = 750/5$  A/A. Przyjęto  $i_N = 5$  A. Odczyt amperomierza  $i = 1,24$  A.  $Y = \frac{1,24}{5} \cdot 115 = 28,5\%$ . Pomierzono  $I_2 = 0,65\%$  w odniesieniu do znamionowego prądu przekładnika prądowego.

3) Punkt 10:  $U_N = 6$  kV,  $\vartheta_1 = 400/5$  A/A. Przyjęto  $i_N = 5$  A. Odczyt amperomierza  $i = 1,1$  A.  $Y = \frac{1,1}{5} \cdot 115 = 25,3\%$ . Pomierzono  $I_2 = 0,8\%$  w odniesieniu do znamionowego prądu przekładnika prądowego.

4) Punkt 12: 6 kV,  $\vartheta_1 = 300/5$  A/A. Przyjęto  $i_N = 5$  A. Odczyt amperomierza  $i = 0,8$  A.  
 $Y = \frac{0,8}{5} \cdot 115 = 18,4\%$ . Pomierzono  $I_2 = 2,5\%$  w odniesieniu do prądu znamionowego przekładnika prądowego.

5) Piec łukowy Nr 5:  $\vartheta_1 = 2000/5$  A/A. Przyjęto  $i_N = 5$  A. Odczyt amperomierza  $i = 4,2$  A.  $Y = \frac{4,2}{5} \cdot 115 = 97\%$ . Pomierzono  $I_2 = (5-10)\%$  w odniesieniu do prądu znamionowego przekładnika prądowego.

## 6. Wnicski

1) Przyrząd  $I_2$  pozwala mierzyć wartości bezwzględne składowej prądu kolejności przeciwnej faz. Jest to wystarczające do określenia np. stopnia zagrożenia generatorów, natomiast w celu określenia stopnia asymetrii obciążenia ( $I_2/I_1$ ) należy stosować równocześnie dwa przyrządy z tym, że jeden powinien mierzyć  $I_2$  a drugi  $I_1$  można wykorzystać ten sam przyrząd przy odpowiednim podłączeniu do przekładników prądowych).

2) W czasie pomiarów stwierdzono, że jest konieczne stosowanie filtru wyższych harmonicznych. Przy wyłączonym filtrze pomiary  $I_2$  są praktycznie nieprzydatne z powodu dużych uchybów.

3) Z porównania charakterystyki filtrów RC zastosowanych w układzie laboratoryjnym przyrządu  $I_2$  z filtrem lampowym wyższych harmonicznych [1] wynika, że filtr RC posiada mniej stromą charakterystykę. Mimo to filtry RC wystarczająco dobrze spełniają swe zadanie.

Rękopis złożono w redakcji w marcu 1963 r.

## LITERATURA

- [1] H. K o e t t n i t z: Schiflast in Energieversorgungsnetzen. III. Internationales Kolloquium. Hochschule für Elektrotechnik Ilmenau 1958.
- [2] P. J. N o w a c k i: Składowe symetryczne. Poznań 1954 PWN.

## ИЗМЕРЕНИЯ АСИММЕТРИИ НАГРУЗКИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Приведен принцип действия самопишущего прибора для замера малых значений тока обратной последовательности фаз. Был рассмотрен прибор I<sub>2</sub> в лабораторном масштабе, а также результаты измерений асимметрии нагрузки, произведенных при помощи этого прибора в промышленной электростанции завода оборудованного асимметрическими дуговыми печами.

## LES MESURES DE L'ASYMÉTRIE DE LA CHARGE DES GÉNÉRATEURS SYNCHRONES DANS LES USINES ÉLECTRIQUES INDUSTRIELLES

On a indiqué la base du fonctionnement du dispositif enregistreur qui sert à mesurer les petites valeurs de la composante du courant de l'ordre contraire des phases.

On a discuté le dispositif d'un système de laboratoire et aussi les effets des mesures de l'asymétrie de la charge effectuées, à l'aide de ce dispositif, dans une usine industrielle d'un établissement ayant les fours à arc asymétriques.