

Gerard BARTODZIEJ,
Wiktor KIŚ, Edmund PIĘTKA

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

KONCEPCJA POMIARU WIELKICH PRĄDÓW W TORACH WIELKOPRĄDOWYCH PIECÓW ŁUKOWYCH I ŁUKOWO-OPOROWYCH

Streszczenie. Przedstawiono koncepcję zastosowania cewki Rogowskiego do pomiaru prądu w torze wielkoprądowym pieca łukowego oraz jej wykorzystania w układach sterowania pracą pieca, w celu symetryzacji mocy wydzielanych w otoczeniu elektrod.

1. WPROWADZENIE

Poprawna eksploatacja dużych odbiorników elektrotermicznych, jak piece łukowe i łukowo-oporowe posiada duże znaczenie ekonomiczne, m.in. z uwagi na ich znaczne moce i zużycie energii. Piece łukowe i łukowo-oporowe o prądach dużych w torze wielkoprądowym znacznie przekraczających 10 kA z reguły nie są wyposażone w urządzenia umożliwiające kontrolę takich prądów, głównie z powodu braku odpowiednich przekładników prądowych. Pomiar prądu w torze wielkoprądowym jest jednak niezbędny dla uzyskania pożądanej symetrii mocy wydzielanych w poszczególnych fazach pieca. Ma to duże znaczenie dla procesu technologicznego, wpływając na poprawę równomierności rozkładu temperatury w wannie pieca, tym samym na ilość oraz jakość produktu [1].

Pomiary prądu i mocy po stronie wysokiego napięcia w układzie zasilania pieca są niewystarczające, gdyż nie pozwalają na bezpośrednie określenie prądów i mocy fazowych pieca, z uwagi na grupy połączeń transformatorów piecowych (najczęściej DY lub Yd). Realizacja prostego układu do pomiaru prądów przemiennych rzędu kilkudziesięciu kA może mieć duże znaczenie praktyczne dla umożliwienia poprawnej regulacji pracy pieca zarówno ręcznej, jak i automatycznej, np. w celu stabilizacji mocy wydzielanej w otoczeniu poszczególnych elektrod pieca w określonych fazach cyklu technologicznego.

2. KONCEPCJA POMIARU PRĄDU W TORZE WIELKOPRĄDOWYM PIECA

Realizacja pomiaru prądu w torze wielkoprądowym - bez jego demontażu dla instalowania urządzeń - może być oparta na wykorzystaniu cewki Rogowskiego, specjalnie dobranej do wymiarów toru wielkoprądowego i natężenia mierzonego prądu [2]

Pomiar natężenia prądu cewką Rogowskiego opiera się na podstawowej zależności (rys. 1):

$$\oint H dl = I \quad (1)$$

Napięcie indukowane w cewce elementarnej o przekroju dF i długości dl wynosi:

$$du = \frac{d\psi}{dt} = w_1 dl dF \frac{dB}{dt} = \mu_0 \mu_r w_1 dl dF \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

Dla cewki o przekroju elementarnym dF i długości l , tworzącej zamknięty obwód wokół przewodu z prądem I , uzyskuje się:

$$du = \mu_0 \mu_r w_1 dF \oint \frac{dH}{dt} dl, \quad (3)$$

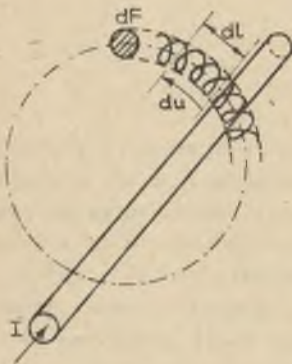
czyli zgodnie z (1):

$$du = \mu_0 \mu_r w_1 dF \frac{dI(t)}{dt}, \quad (4)$$

natomiast dla cewki rzeczywistej o przekroju rdzenia F :

$$u = \int du = \mu_0 \mu_r w_1 F \frac{dI(t)}{dt} \quad (5)$$

Rys. 1. Schemat ilustrujący zależności (1)..(11)



Zależność (5) jest ważna, jeśli można dla całego przekroju rdzenia cewki przyjąć $B = \text{const}$. Praktycznie oznacza to konieczność budowy cewek o małych przekrojach rdzenia. Dokładność zależności (5) zwiększy się w praktyce, jeśli cewka będzie układana w miejscach o możliwie małym gradiencie indukcji.

Dla prądu o przebiegu sinusoidalnym można zapisać:

$$I(t) = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad (6)$$

uzyskując

$$u(t) = \mu_0 \mu_r w_1 F \sqrt{2} I \omega \cos \omega t, \quad (7)$$

Wartość skuteczna napięcia:

$$U = \mu_0 \mu_r w_1 F \omega I = k I, \quad (8)$$

gdzie k oznacza stałą cewki Rogowskiego:

$$k = \mu_0 \mu_r w_1 F \omega \quad (9)$$

Przy prądzie odkształconym, dla składowej harmoniczej h , o przebiegu:

$$I_h(t) = \sqrt{2} I_h \sin h \omega t \quad (10)$$

uzyska się stałą cewki:

$$k_h = h k \quad (11)$$

Fakt ten stanowi istotną niedogodność cewki Rogowskiego przy pomiarze prądów odkształconych. Można zatem wykorzystać następujące możliwości:

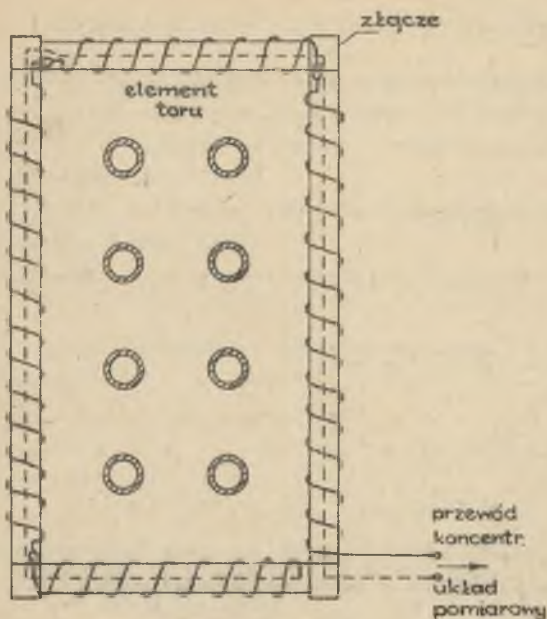
- a) ograniczyć się do pomiaru pierwszej harmoniczej prądu,
- b) odtworzyć wartość skuteczną prądu w oparciu o pomiar kilku harmonicznym o największej amplitudzie.

3. REALIZACJA CEWKI ROGOWSKIEGO DLA POMIARU PRĄDU W TORZE WIELKOPRĄDOWYM PIECA

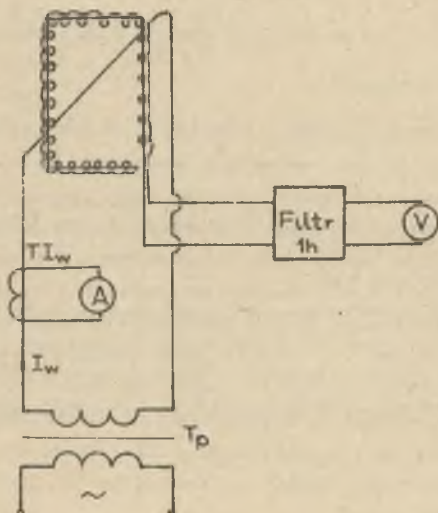
Z uwagi na znaczne rozmiary poprzeczne jednej fazy toru wielkoprądowego, złożonej z kilku - kilkunastu szyn, np. rurowych, proponuje się wykonanie cewki Rogowskiego w postaci sztywnej ramy prostokątnej o przekroju kołowym (rys. 2). "Koniec" cewki jest wyprowadzony razem z jej "początkiem", tak by cewka nie tworzyła zwoju sprzężonego z mierzonym prądem.

Parametry cewki: średnica rdzenia i ilość zwojów na jednostkę długości i wynikającą stąd średnicę drutu nawojowego można obliczyć w oparciu o wzór (8) zakładając wymaganą stałą cewki k . Długość cewki może być w zasadzie dowolna. Wpływa ona jedynie na rezystancję cewki. Dopuszczalna wartość rezystancji cewki zależy od rezystancji wewnętrznej zastosowanego miernika. Można dopuścić wysokie wartości rezystancji cewki (dużą długość cewki), jeśli pomiar napięcia będzie realizowany woltomierzem o wysokiej rezystancji wewnętrznej np. elektronicznym.

Zastosowanie rdzenia ferromagnetycznego możliwe z uwagi na zasadę pomiaru i pozwalające na uzyskanie wysokich wartości stałej k jest utrudnione możliwością powstania znacznych błędów pomiarowych przy niecałkowitym zamknięciu obwodu magnetycznego, a także nieliniowością związaną z na-



Rys. 2. Konstrukcja sztywnej cewki Rogowskiego z oknem prostokątnym



Rys. 3. Schemat wzorcowania cewki Rogowskiego dla 1 fazy prądem I_w mierzonym za pomocą przekładnika wzorcowego klasycznego $T I_w$,

T_p - transformator pomocniczy

syeniem rdzenia przy określonym natężeniu pola magnetycznego. Dlatego też w praktyce można zalecić wykonanie cewek na rdzeniu o przenikalności względnej równej 1. Cewki takie mogą być wzorcowane przy małych natężeniach prądu (kilkadziesiąt-kilkaset A) za pomocą np. amperomierza wzorcowego lub przekładnika prądowego z amperomierzem (rysunek 3) o odpowiedniej dokładności i stosowane do pomiaru dużych prądów (nawet kilkadziesiąt kA lub więcej) zachowując tę samą wyznaczoną wartość stałej k .

W praktyce przy poprawnie wykonanej i wzorcowanej cewce (o stałej średnicy rdzenia rzędu 10 mm, jednakowej gęstości uzwojenia w_1 na całej długości cewki) można osiągać dokładność pomiaru nie gorszą od 5%, co wystarcza dla szeregu zastosowań eksploatacyjnych.

Połączenia cewki Rogowskiego z układem pomiarowym winno być wykonane przewodem koncentrycznym dla wyeliminowania napięć pasożytniczych indukowanych w przewodzie pod wpływem działającego pola elektromagnetycznego.

Przykładowe parametry cewki Rogowskiego dla 1 fazy pieca łukowo-oporowego:

- wymiary okna cewki 1500 x 400 mm,
- średnica uzwojenia $d = 1$ om; $F = 0,785$ cm²,
- ilość zwojów $w_1 = 50$ 1/om, drut nawojowy DNE-0,2,
- stała cewki:

$$K = 4\pi \cdot 10^{-7} w_1 F w = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 10^2 \cdot 0,785 \cdot 10^{-4} \cdot 314 =$$

$$= 0,154 \cdot 10^{-3} \text{ V/A} = 0,154 \text{ mV/A.}$$

Napięcie na wyjściu cewki nieobciążonej przy $I = 50$ kA:

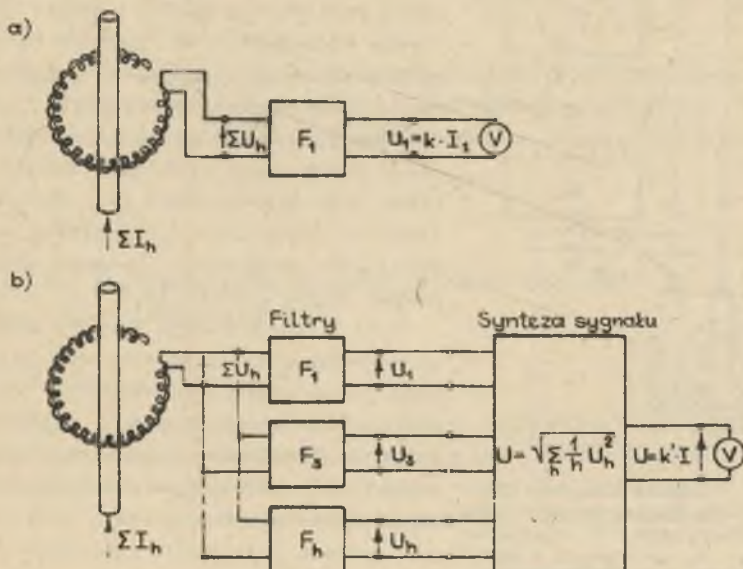
$$U = K I = 0,154 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^3 = 7,7 \text{ V}$$

Odpowiednio dla uzyskanego napięcia należy dobrać woltomierz. Pożądane jest, aby rezystancja woltomierza R_v była znacznie większa od rezystancji cewki R_o . Woltomierz wskaże napięcie:

$$U_v = \frac{U R_o}{R_o + R_v} \tag{12}$$

Wpływ rezystancji cewki na wskazania woltomierza może być uwzględniany przy wzorcowaniu układu pomiarowego.

Z uwagi na odkształcenie przebiegu czasowego prądu w torze wieloprądowym pieca niezbędne jest zastosowanie jednego z układów przedstawionych na rys. 4.



Rys. 4. Schematy układów pomiarowych z cewką Rogowskiego

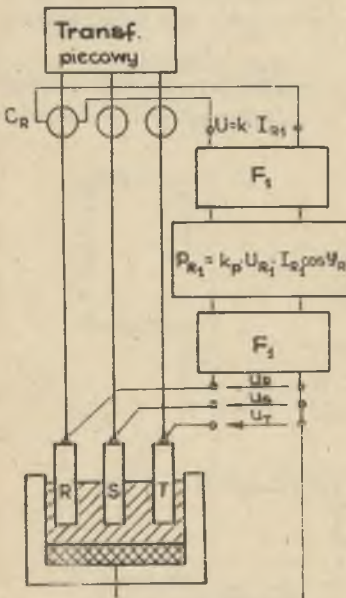
a - pomiar harmonicznej podstawowej prądu, b - pomiar wybranych harmonicznych prądu i przybliżone wyznaczenie wartości skutecznej prądu

Pomiar wartości skutecznej prądu przy użyciu cewki Rogowskiego wymagałby syntezy sygnałów pochodzących od poszczególnych harmonicznych prądu (rys. 4b) zgodnie z zależnością:

$$U = k' I = \sqrt{\sum_{h=1}^n \frac{1}{h} U_h^2} \quad (13)$$

Realizacja takiej syntezy sygnału jest technicznie możliwa dla ograniczonej liczby harmonicznych. Stąd też pomiar wartości skutecznej prądu opisanym sposobem może być dokonany z błędami zależnymi od udziału wyższych harmonicznych, pominiętych w układzie pomiarowym, w wartości skutecznej prądu.

Dla prawidłowej eksploatacji pieca istotne znaczenie posiada asymetria obciążenia poszczególnych faz pieca. Informacja o stopniu asymetrii może być uzyskana w oparciu o pomiar harmonicznych podstawowych prądów, jeśli widmo częstotliwości przebiegów prądu w trzech fazach pieca jest jednokowe.



Rys. 5. Schemat blokowy układu pomiaru składowej mocy czynnej dostarczonej do elektrody fazy R, związanej z harmonicznymi podstawowymi prądem i napięciem

W praktyce, jeśli przebiegi czasowe procesu technologicznego w otoczeniu każdej elektrody pieca są jednakowe, można uznać za dopuszczalne ograniczenie pomiaru do harmonicznej podstawowej prądu (rys. 4a).

Układ pomiarowy mierzący 1 harmoniczną prądu jest bardzo prosty i tani. Jego praktyczne zastosowanie w dowolnym układzie toru wielkopiędowego pieca nie nastęrcza istotnych problemów konstrukcyjnych.

Wyduje się w pełni możliwe wykorzystanie cewek Rogowskiego również w układach do pomiaru mocy dostarczonej do poszczególnych elektrod pieca (rys. 5), a przynajmniej składowej mocy związanej z harmonicznymi podstawowymi prądem i napięciem.

Dalszą konsekwencją pomiaru prądu lub mocy w poszczególnych fazach toru wielkopiędowego pieca byłoby wprowadzenie indywidualnej regulacji automatycznej napięcia i położenia elektrod poszczególnych faz pieca. Umożliwiłoby to zwiększenie wydajności pieców, poprawienie jakości produktu oraz zmniejszenie zużycia elektrod i wymurówki pieca.

4. PODSUMOWANIE

Zaproponowano wykorzystanie cewki Rogowskiego do pomiaru wielkich prądów w torach wielkoprądowych pieców łukowych i łukowo-oporowych, w których nie zainstalowano przekładników prądowych. Prostota konstrukcji i możliwość dopasowania cewek do dowolnego ukształtowania toru przemawia za celowością szerokiego rozpowszechnienia proponowanych rozwiązań.

LITERATURA

- [1] Strunskij B.A.: Korotkije seti električeskich pečej. Metalurgizdat 1962.
- [2] Bartodziej G., Wierzbicki A.: Zastosowanie cewki Rogowskiego w niektórych pomiarach w elektroenergetyce hutniczej. Postępowanie Techniczne w Energetyce Hutniczej. Kraków 1977. Materiały Konferencyjne.

Wpłynęło do Redakcji dnia 20.VI.1980 r. Recenzent:

Prof. dr inż. Eugeniusz Horoszkowski

КОНЦЕПЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ БОЛЬШИХ ТОКОВ В КОРОТКИХ СЕТЯХ
ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ И ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПРЯМОГО НАГРЕВА

Р е з ю м е

Представлена концепция применения катушки Rogowskiego для измерения тока в короткой сети дуговой печи, а также ее использование в системах управления работой печи с целью симметрирования мощностей, выделяемых вблизи электродов.

THE CONCEPT OF MEASURING HIGH CURRENTS IN SHORT NETWORKS
OF ARC AND ARC-RESISTANCE FURNACES

S u m m a r y

The article presents a method of applying Rogowski coil for measuring the current in a short network of an arc furnace. Rogowski coil may also be used in systems controlling the furnace operation in order to achieve balancing powers emitted in the area surrounding the electrodes.