

KOMPUTEROWA ANALIZA ZJAWISKA FERROREZONANSU W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Wiesław NOWAK¹, Bartłomiej KERCEL², Piotr PAJĄK³

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: (12) 617 36 53 fax: (12) 634 57 21
1. e-mail: 1. wieslaw.nowak@agh.edu.pl; 2. kercel@agh.edu.pl; 3. ppajak@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono komputerowe modelowanie i analizę ferrorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć, mające istotne znaczenie przy rozpoznawaniu tego zjawiska i uwzględnieniu go w praktyce projektowej oraz eksploatacyjnej. Analizę przeprowadzono z zastosowaniem Electromagnetic Transients Program (EMTP).

Słowa kluczowe: układy elektroenergetyczne wysokich napięć, ferrorezonans, EMTP.

1. WSTĘP

W układach elektroenergetycznych zawierających nieliniowe elementy indukcyjne możliwe jest wystąpienie drgań ferrorezonansowych. Z praktycznego punktu widzenia nieliniową indukcyjność stanowi najczęściej indukcyjność odwzorowująca magnesowanie rdzenia transformatorów lub przekładników napięciowych.

Ferrorezonans uważany jest za główną przyczynę uszkodzeń przekładników napięciowych instalowanych w układach elektroenergetycznych. Dodatkowym, negatywnym jego skutkiem, jest także powstawanie przepięć dorywczych w postaci ferrorezonansowych drgań napięć, stanowiących narażenia dla pozostałych elementów układów elektroenergetycznych.

Nieliniowość układów elektroenergetycznych utrudnia analizę zjawiska ferrorezonansu, ze względu na odkształcenia przebiegów prądów i napięć [1, 2, 3, 5]. Istotne znacznie mają zatem opracowywane modele matematyczne oraz przeprowadzane z ich wykorzystaniem symulacje komputerowe, szczególnie z zastosowaniem programu EMTP (Electromagnetic Transients Program). Przedstawione w artykule wybrane wyniki analizy komputerowej pozwoliły na określenie potencjalnego zagrożenia, co może być istotnym elementem projektowania i eksploatacji układów elektroenergetycznych.

Problem ferrorezonansu jest rozpatrywany praktycznie od początku elektroenergetyki, jednakże do dnia dzisiejszego nie zostały jednoznacznie określone kryteria jego powstawania, ani nie opracowano skutecznych metod jego eliminacji.

2. FERROREZONANS W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

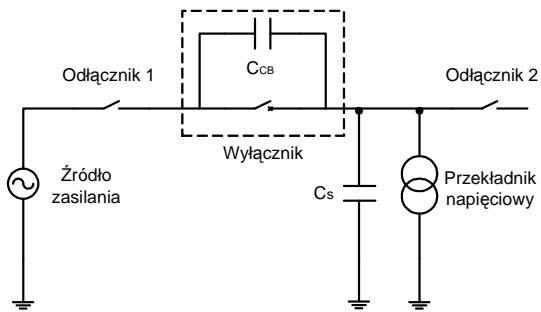
Szeregowe lub równoległe połączenie liniowej pojemności oraz nieliniowej indukcyjności, może być przyczyną wystąpienia w układzie elektroenergetycznym drgań ferrorezonansowych. W zależności od sposobu połączenia elementów układu, dochodzi w przypadku połączenia szeregowego do ferrorezonansu napięć, natomiast przy połączeniu równoległym do ferrorezonansu prądów.

Wystąpienie ferrorezonansu prądów lub napięć jest uzależnione przede wszystkim od konfiguracji układu elektroenergetycznego oraz od parametrów jego poszczególnych elementów. Zasadniczą rolę odgrywa sposób połączenia punktu neutralnego układu z ziemią. Rozpatrując to zjawisko w wysokonapięciowych układach elektroenergetycznych, należy więc zwrócić uwagę na dwa przypadki:

- ferrorezonans w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym,
- ferrorezonans w układach elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym.

W układach wysokich napięć pracujących z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym, drgania ferrorezonansowe mogą wystąpić przede wszystkim wtedy, gdy w wyniku pewnych czynności łączeniowych powstanie szeregowy lub szeregowo – równoległy układ drgający.

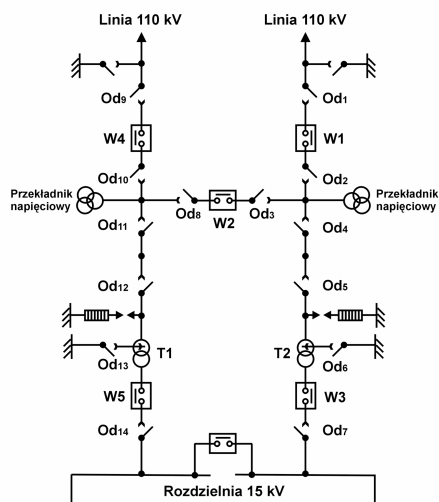
Na rysunku 1 przedstawiono schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej 110/ŚN, złożony z elementów odzwierciedlających pole liniowe oraz pole pomiaru napięcia (przy wyłączonym transformatorze). W wyniku wyłączenia szyn zbiorczych w stacji elektroenergetycznej za pomocą wyłącznika wielokomorowego wyposażonego w kondensatory bocznikujące, powstaje połączenie wypadkowej pojemności kondensatorów sterujących wyłącznika, sumarycznej pojemności doziemnej elementów układu elektroenergetycznego oraz nieliniowej indukcyjności przekładnika napięciowego, tworzących szeregowo – równoległy układ oscylacyjny.



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej [1] (C_S – sumaryczna pojemność doziemna elementów układu elektroenergetycznego, C_{CB} – wypadkowa pojemność kondensatorów sterujących wyłącznika)

3. ANALIZA FERROREZONANSU W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ Z ZASTOSOWANIEM EMTP

Analizę ferreozonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uzemionym punktem neutralnym przeprowadzono na przykładzie stacji 110/15 kV w układzie H3 (rys. 2), który został odwzorowany w programie EMTP-ATP.

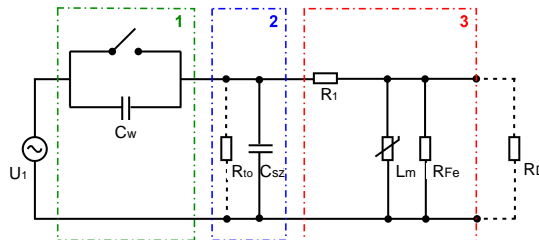


Rys. 2. Schemat stacji 110/15kV w układzie H3.

Rysunek 3 przedstawia uproszczony schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej 110/ŚN, w której poprzez sekwencję czynności ruchowych może powstać układ drgający.

W analizie rozpatrywanego przypadku istotny wpływ ma uwzględnienie pojemności kondensatorów sterujących wyłącznika oraz sumaryczna pojemność doziemna odcinka szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego.

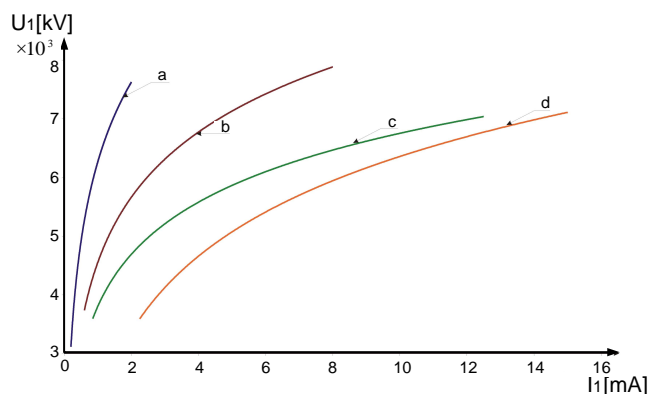
Analizę ferreozonansu w rozdzielni wykonano dla 4 wariantów, w których zmianie ulegały wartości takich parametrów jak: sumaryczna pojemność doziemna odcinka szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego – C_{SZ} oraz wypadkowa pojemność kondensatorów sterujących wyłącznikiem – C_W .



Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej 110/ŚN w warunkach ferreozonansu [4]. 1 – wyłącznik, 2 – odcinek szyn zbiorczych między wyłącznikiem a przekładnikiem napięciowym, 3 – przekładnik napięciowy (C_W – wypadkowa pojemność kondensatorów sterujących wyłącznikiem, C_{SZ} – sumaryczna pojemność doziemna odcinka szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego, R_1 – rezystancja uzwojeń przekładnika, R_{Fe} – zastępcza rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu przekładnika, R_D – rezystancja obciążenia uzwojeń wtórnych przekładnika, R_{TO} – zastępcza rezystancja odwzorowująca tłumienie obwodu wynikające z upływności, ulotu, L_m – indukcyjność przekładnika)

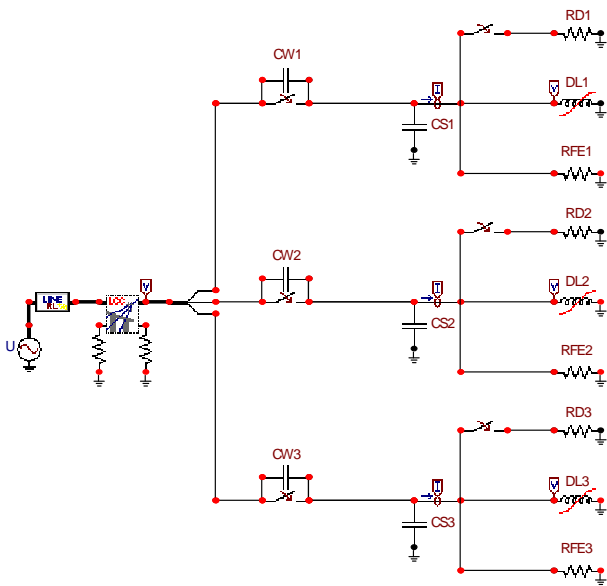
W schemacie modelowym do badań i symulacji ferreozonansu w rozdzielni 110 kV przyjęto:

- wyłącznik WMS – 110/10/35/-V,
- przekładnik napięciowy UO – 110a o charakterystyce prądowo – napięciowej przedstawionej na rys. 4 (krzywa c) :
 - a) moc znamionowa: 200 VA,
 - b) moc grzejna: 2400 VA,
 - c) $z_1=35000$, $z_2=32$ – liczba zwojów strony pierwotnej i wtórnej, S_Z moc zwarcia systemu: 1000 MVA,
- C_W pojemność kondensatorów sterujących: 325 pF, 650 pF,
- C_{SZ} sumaryczna pojemność doziemna odcinka szyn, wyłącznika oraz przekładnika napięciowego: 130 pF, 1130 pF,
- R_{FE} rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu przekładnika: 83 MΩ,
- R_D rezystancja obciążenia uzwojeń wtórnych przekładnika: 8,9 MΩ (przeliczona), włączana do obwodu po 0,4 s od momentu inicjacji drgań ferreozonansowych.



Rys. 4. Charakterystyki napięciowo – prądowe przekładników napięciowych : a) UO-110b (49 200 i 47 100 zwojów), b) UO – 110b (39 440 zwojów), c) UO – 110a (35 000 zwojów), d) U- 110a (33 000 zwojów) [4].

Na rysunku 5 przedstawiony został schemat modelowy do badań i symulacji ferorezonansu w rozdzielni 110 kV.



Rys. 5. Schemat modelowy do badań i symulacji ferorezonansu w rozdzielni 110 kV opracowany dla preprocesora ATPDraw.

Elementy schematu przedstawionego na rysunku 5, stanowią odwzorowanie elementów analizowanego układu:

- U - źródło oraz układ sieci,
- $CW1 - CW3$ - wyłączniki małoolejowe WMS-110/10/35-V4 wraz z kondensatorami sterującymi,
- $DL1 - DL3$ - indukcyjności nieliniowe odwzorowujące indukcyjność magnesowania przekładnika napięciowego UO-110a, do których wprowadzono charakterystykę magnesowania utworzoną na bazie charakterystyki napięciowo – prądowej przekładnika UO – 110a (35 000 zwojów),
- $RFE1 - RFE3$ - rezystancje reprezentujące straty w rdzeniu przekładników,
- $CS1 - CS3$ - sumaryczne pojemności doziemne odcinków szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego,
- $RD1 - RD3$ - rezystancje do tłumienia zjawiska ferorezonansu.

4. WYNIKI KOMPUTEROWEJ SYMULACJI

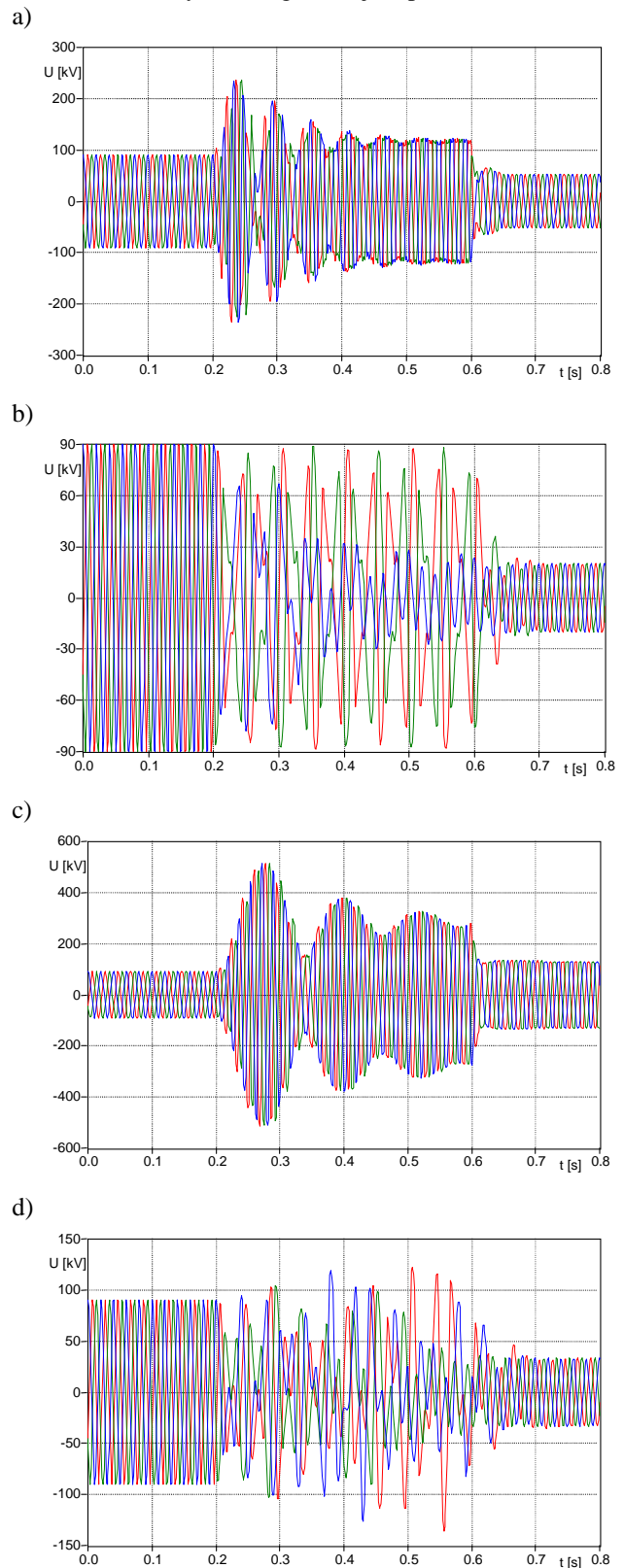
Na rysunkach 7 i 8 zestawiono istotne narażenia przekładników napięciowych, jakie stanowią przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach uzwojeń pierwotnych przekładników oraz prądów płynących w ich obwodach pierwotnych.

W początkowej fazie symulacji, w przedziale czasu od 0 do 0,2 s, wyłączniki $CW1 - CW3$ pozostają zamknięte, natomiast oporniki tłumiące $RD1 - RD3$ pozostają odłączone. W chwili $t = 0,2$ s następuje wyłączenie wyłączników $CW1 - CW3$ i sprzężenie pozostałej części układu ze źródłem za pomocą kondensatorów sterujących wyłączników. W czasie $t = 0,6$ s, następuje załączenie rezystorów tłumiących $RD1 - RD3$.

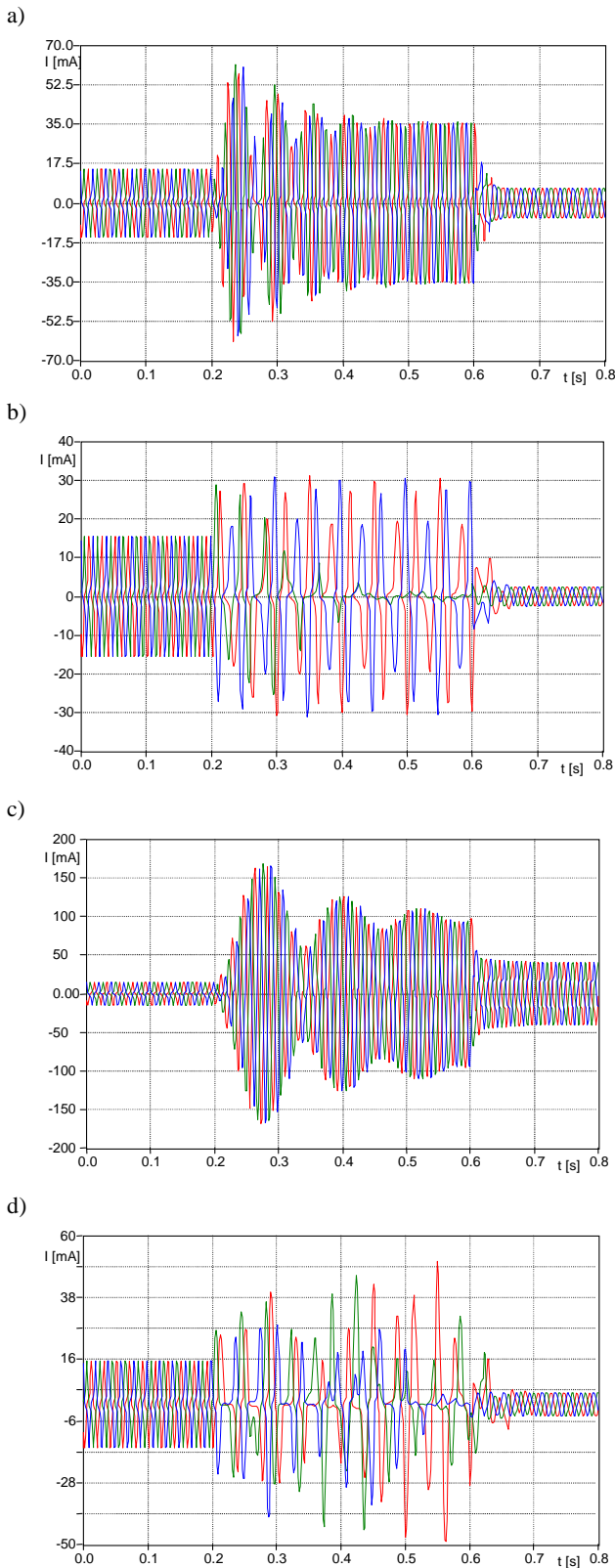
Na podstawie otrzymanych wyników symulacji komputerowych (rys. 7, 8), można zauważyć zależność pomiędzy poziomem przebiegów oraz przetężeń, a wartością pojemności C_W i C_{SZ} .

Na rysunkach 7a i 7c przedstawione zostały wyniki komputerowych symulacji, na których zaobserwowano w

momencie inicjacji drgań oscylacyjnych kilkakrotny wzrost chwilowych wartości napięcia na zaciskach uzwojenia pierwotnego indukcyjnego przekładnika napięciowego, co może skutkować uszkodzeniem jego izolacji. Natomiast w przypadku analizowanych wariantów dla $C_{SZ} = 1130$ pF (rys. 7b, 7d), uwidoczniony został chaotyczny charakter drgań ferorezonansowych o niegasnącej amplitudzie.



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach uzwojenia pierwotnego przekładnika napięciowego dla: a) $C_W = 325$ pF, $C_{SZ} = 130$ pF; b) $C_W = 325$ pF; $C_{SZ} = 1130$ pF; c) $C_W = 650$ pF; $C_{SZ} = 130$ pF; d) $C_W = 650$ pF; $C_{SZ} = 1130$ pF.



Rys. 8. Przebiegi czasowe prądu płynącego w obwodzie pierwotnym przekładnika dla: a) $C_W = 325$ pF, $C_{SZ} = 130$ pF; b) $C_W = 325$ pF; $C_{SZ} = 1130$ pF; c) $C_W = 650$ pF; $C_{SZ} = 130$ pF; d) $C_W = 650$ pF; $C_{SZ} = 1130$ pF.

COMPUTER ANALYSIS OF FERRORESONANCE IN HV ELECTRICAL POWER SYSTEM

Keywords: ferroresonance, EMTP, HV electrical power systems.

The paper presents the computer simulations of ferroresonance in the HV electrical power system which has got essential importance to show risk at the moment when it arising. Ferroresonance phenomena in HV electrical power system was analyzing by *Electromagnetic Transients Program (EMTP)*.

Istotnym elementem z punktu widzenia zagrożenia występującego podczas inicjacji drgań ferorezonansowych, jest analiza przebiegów czasowych prądu płynącego w obwodzie pierwotnym przekładnika. Również w tym przypadku zaobserwowano istotny wpływ wartości pojemności C_W oraz C_{SZ} na poziom przetężeń.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza komputerowa pozwala stwierdzić, że możliwe jest powstanie ferorezonansu w analizowanym układzie stacji elektroenergetycznej 110/ŚN. W rozważanych przypadkach następuje wzrost napięcia na zaciskach uzwojenia pierwotnego indukcyjnego przekładnika napięciowego w wyniku, czego może dojść do jego uszkodzenia. Rozpatrywane warianty analizy pozwalają stwierdzić, że wartość sumarycznej pojemności doziemnej odcinka szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego oraz pojemności kondensatorów sterujących, ma istotny wpływ na wielkość przepięć i przetężeń powstałych w momencie wystąpienia drgań ferorezonansowych.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Emin Z., Al Zahawi B. A. T., Tong Y. K. : Core Loss Effects on the Ferroresonant Behavior of Wound Voltage Transformers. ISH '97, Montreal, Quebec, Canada 1997
2. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Nowak W. : Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks. IEEE trans., PD vol. 20, 2007r., pp. 2362-2369, ISSN 0885-8977
3. Nowak W., Kerzel B. : Modelowanie zjawiska ferorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo – Dydaktyczne AGH, Elektrotechnika i Elektronika, tom 26, s. 54-59, ISSN 1640-7202
4. Mazuś J., Stachowski W., Wieczorek G. : Eksperymentalne badania ferorezonansu w układzie wyłącznik – przekładnik napięciowy 110 kV. Energetyka, Nr11, 1984r. , s. 485-488
5. Florkowski M., Luto M., Nowak W. : Ferrorezonans z udziałem przekładników napięciowych w sieci średniego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, Materiały konferencyjne EUI 2003, s. 78-81, ISSN 1731-6103