

ANALIZA FERROREZONANSU W PRZEMYSŁOWYCH SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Bartłomiej KERCEL, Wiesław NOWAK,

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel: (012) 617 36 53 fax: (012) 417 48 25 e-mail: kercel@agh.edu.pl; wieslaw.nowak@agh.edu.pl

Streszczenie: Zjawisko ferrorezonansu jest uważane 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. W artykule przedstawiono analizę wybranych przypadków zjawiska ferrorezonansu w przemysłowych sieciach elektroenergetycznych średnich napięć, przeprowadzoną z zastosowaniem Electromagnetic Transients Program (EMTP).

Słowa kluczowe: ferrorezonans, sieci średnich napięć, przepięcia.

1. WSTĘP

W wyniku zjawiska nasycenia, jakiemu podlegać mogą rdzenie ferromagnetyczne stosowane w aparatach i maszynach elektrycznych, element indukcyjny w obwodzie elektrycznym staje się elementem nieliniowym. Z praktycznego punktu widzenia w układach elektroenergetycznych nieliniową indukcyjność stanowi najczęściej indukcyjność związana z magnesowaniem rdzenia transformatora oraz przekładników napięciowych. Nieliniowa indukcyjność magnesowania przekładników tworzy wraz z pojemnością doziemną sieci obwód, w którym mogą powstać i utrzymać się drgania relaksacyjne [1]. Z uwagi na nieliniowy charakter tych obwodów analiza tego zjawiska jest utrudniona. Znaczący postęp w analizie zjawisk ferrorezonansowych zapewniają programy obliczeniowe umożliwiające symulację komputerową obwodów nieliniowych [2].

2. FERROREZONANS W PRZEMYSŁOWYCH SIECIACH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Wystąpienie przepięć dorywczych w postaci drgań ferrorezonansowych, 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 zwrócić uwagę na dwa przypadki:

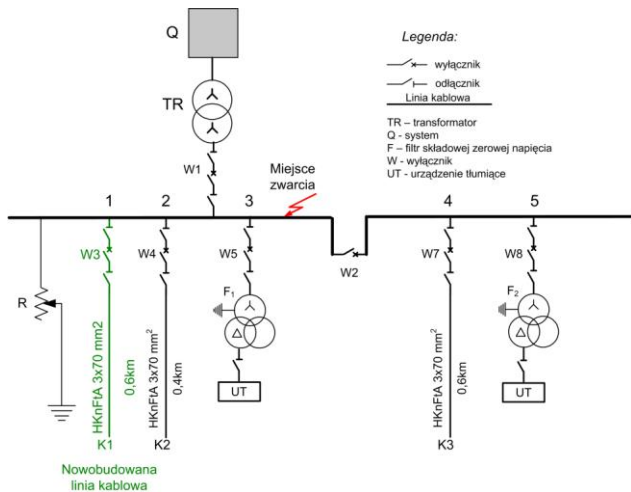
- ferrorezonans w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym,
- ferrorezonans w układach elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym.

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

W przypadku układów elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym transformatora, do ferrorezonansu może dojść w wyniku nagłej zmiany napięcia sieci będącej wynikiem np. zwarcia doziemnego. Na skutek tych zmian powstaje równoległy lub szeregowo – równoległy układ drgający [5].

3. WYBRANE PRZYPADKI ANALIZY ZJAWISKA FERROREZONANSU W KOPALNIAŃSIECI ŚREDNICH NAPIĘĆ

Do wystąpienia drgań ferrorezonansowych może dojść w złożonej strukturze elektroenergetycznych kopalnianych sieci średnich napięć (rys. 1). Przyczyną drgań napięcia punktu gwiazdowego w sieciach kopalnianych, które są sieciami o izolowanym punkcie gwiazdowym, jest duża liczba indukcyjnych przekładników napięciowych tworzących filtry składowej symetrycznej zerowej napięcia. Przekładniki tworzące filtr mają połączone w gwiazdę uzwojenia pierwotne, a punkt gwiazdowy tego połączenia jest bezpośrednio uziemiony.

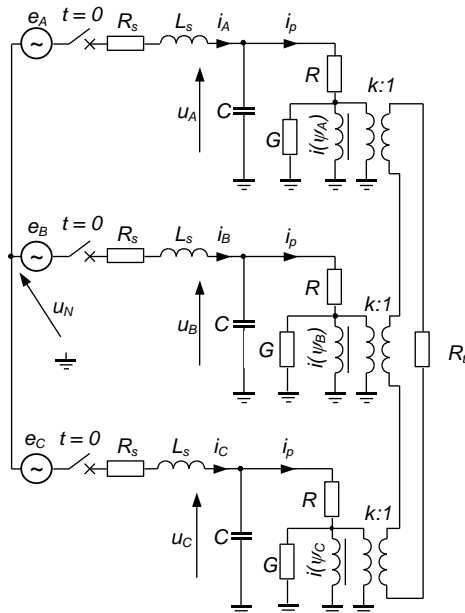


Rys. 1. Uproszczony schemat wysokonapięciowego układu sieci kopalnianej.

3.1. Model matematyczny

Na rys. 2 przedstawiony został schemat elektryczny trójfazowej sieci elektroenergetycznej z izolowanym punktem neutralnym w skład, którego wchodzi [3, 6, 7]:

- rezystancja R_S oraz indukcyjności L_S odwzorujące impedancję zwarciovą układu zasilającego,
- pojemności doziemne sieci C ,
- rezystancje R uzwojeń pierwotnych przekładników,
- konduktancje G reprezentujące straty w rdzeniu,
- nieliniowe indukcyjności magnesowania przekładników określone charakterystyką $i(\Psi)$ prądu i od strumienia Ψ ,
- transformatory idealne o przekładni $k:1$ (uzwojenia dodatkowe przekładników) połączone po stronie wtórnej w otwarty trójkąt rezystancją tłumiącą R_t .



Rys. 2. Schemat elektryczny trójfazowego układu z izolowanym punktem neutralnym [3].

Po zamknięciu wyłączników obwód z rys. 2 opisany jest przez równania różniczkowe [7]:

$$[A] \frac{d}{dt} [x(t)] = [B][x(t)] + [C][e(t)]$$

gdzie $x(t)$ jest wektorem stanu:

$$[x(t)] = [i_A(t), i_B(t), i_C(t), \psi_A(t), \psi_B(t), \psi_C(t), u_A(t), u_B(t), u_C(t)]^T \quad (1)$$

gdzie $e(t)$ jest wektorem wymuszeń

$$[e(t)] = [e_A(t), e_B(t), e_C(t), 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

$$\begin{cases} e_A(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) \\ e_B(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ e_C(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi - 4\pi/3) \end{cases}$$

gdzie $[A]$, $[B]$, $[C]$ – macierze, których elementy określone są przez parametry obwodu.

Warunek początkowy dla układu (1) przyjmuje, zatem następującą postać:

$$[x(0)] = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

Prądy przekładników $i_p(t)$ oraz napięcie punktu neutralnego $u_N(t)$ związane są z wektorem stanu zależnościami:

$$\begin{cases} i_{pA}(t) = \frac{1}{R_p} \left[u_A(t) - \frac{d\psi_A(t)}{dt} \right] \\ i_{pB}(t) = \frac{1}{R_p} \left[u_B(t) - \frac{d\psi_B(t)}{dt} \right] \\ i_{pC}(t) = \frac{1}{R_p} \left[u_C(t) - \frac{d\psi_C(t)}{dt} \right] \end{cases} \quad (2)$$

$$u_N(t) = e_A(t) - R_S i_A(t) - L_S \frac{di_A(t)}{dt} - i_{pA}(t) R_p - \frac{d\psi_A(t)}{dt} \quad (3)$$

Do analizy zjawiska ferorezonansu w praktycznych przypadkach przekładników napięciowych średniego napięcia, zgodnie z uzasadnieniem zawartym w [3,6,7], wykorzystywany jest model o nieliniowej funkcji wielomianowej:

$$i = a\psi + b\psi^n + c\psi^l \quad (4)$$

gdzie: i – prąd w uzwojeniu przekładnika, Ψ – strumień skojarzony, a, b, c, n, l – stałe.

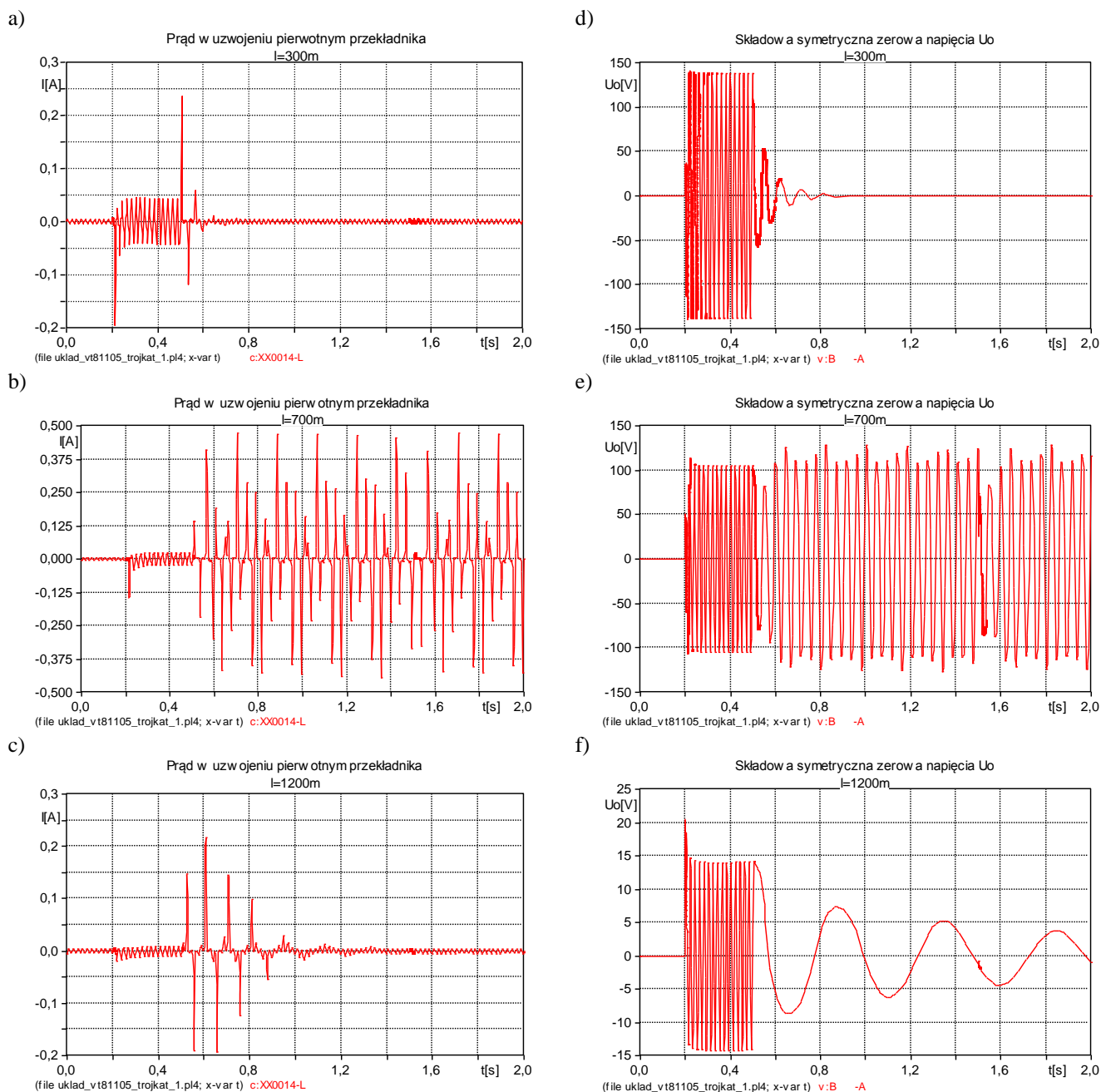
3.2. Model układu w programie EMTP

Do przeprowadzenia analizy wpływu zmiany konfiguracji sieci na możliwość inicjacji drgań relaksacyjnych, wykorzystano przedstawiony schemat układu elektroenergetycznego z rys. 1.

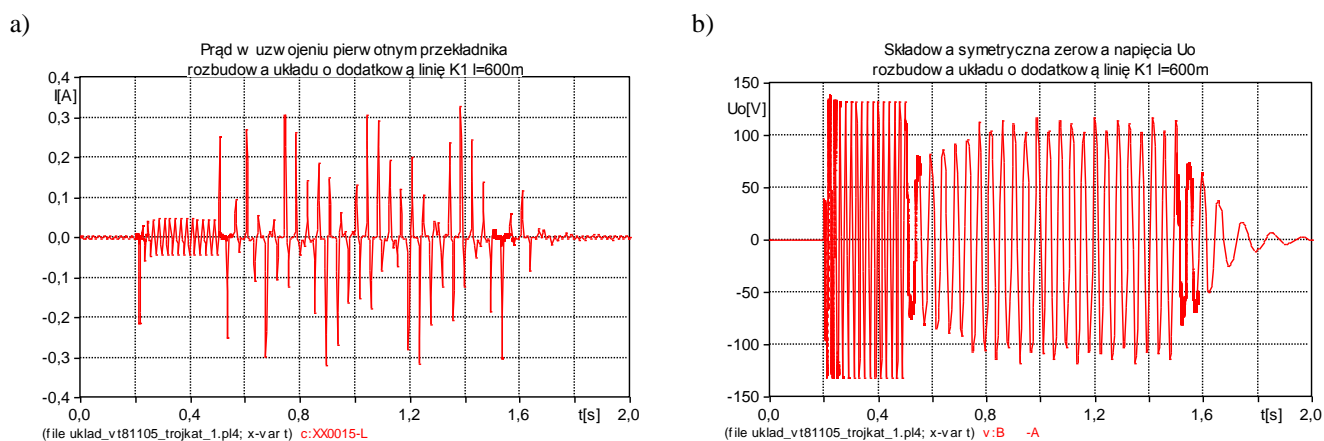
Charakterystyka magnesowania zamodelowanego zamodelowanego w układzie przekładnika UZ6-1T została wyznaczona na podstawie pomiarów laboratoryjnych.

Poniżej przedstawiono istotne z punktu widzenia analizy narażenia przekładników napięciowych, przebiegi czasowe prądu płynącego w obwodzie pierwotnym (rys. 3a-c). Natomiast z punktu widzenia prawidłowego działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, obserwacji poddano również przebieg składowej symetrycznej zerowej napięcia U_0 (rys. 3d-f).

Celem sprawdzenia zakresu długości linii kablowych, przy których możliwe jest wystąpienie drgań relaksacyjnych było bardzo duże, pierwszy przypadek przeprowadzonej analizy polegał na zmianie długości linii kablowej K2 (pojemności doziemnej sieci), linia kablowa K1 (odłączona). Nasylenie rdzenia przekładników uzyskano poprzez doziemienie jednej fazy w zakresie czasu przeprowadzonej symulacji od $t = 0,2s$ do $t = 0,5s$.



Rys. 3. Przebieg prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika napięciowego oraz składowej symetrycznej zerowej napięcia U_0 dla długości linii kablowej K2: a, d) $l = 300\text{m}$; b, e) $l = 700\text{m}$; c, f) $l = 1200\text{m}$;



Rys. 4. Przebieg prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika napięciowego oraz składowej symetrycznej zerowej napięcia U_0 dla długości linii kablowej K2: a, b) $l = 600\text{m}$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w momencie inicjacji drgań ferorezonansowych dla odcinków linii kablowych z zakresu $l = 400 - 1000$ m, prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym przekładnika osiąga wartości prawie sto razy większe niż w przypadku pracy normalnej.

Kolejny przypadek obejmował analizę rozbudowy układu o linię kablową *KI*. Celem było sprawdzenie możliwości tłumienia zjawiska ferorezonansu poprzez zmianę jego konfiguracji. Włączenia linii kablowej *KI* dokonano w czasie $t = 1,5$ s (rys.4).

Na podstawie wyników z przeprowadzonej analizy przypadku drugiego można stwierdzić, że zainicjowane w wyniku doziemienia jednej fazy drgania relaksacyjne, w momencie załączenia linii kablowej *KI* w czasie $t = 1,5$ s uległy wytłumieniu.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Znamionowe prądy płynące po stronie pierwotnej przekładników napięciowych średnich napięć osiągają wartości rzędu miliamperów podczas normalnej pracy. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w sieciach średnich napięć pracujących z izolowanym punktem neutralnym transformatora, w chwili inicjacji nieliniowych drgań relaksacyjnych prąd płynący po stronie pierwotnej przekładnika osiąga wartość prawie stukrotnie większą, co może doprowadzić do termicznego jego uszkodzenia.

Zjawisko ferorezonansu jest groźnym zakłóceniem w pracy sieci. Na skutek towarzyszącym temu zjawisku przepięciom i przetężeniom, możliwe jest uszkodzenie elementów sieci tj. przekładników napięciowych, czy linii kablowych. Ponadto ferorezonans podnosi potencjał punktu neutralnego układu, co powoduje pojawienie się składowej zerowej napięcia, mogącej fałszować działania układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Przedstawione na rys. 3 i 4 przebiegi napięć i prądów wyraźnie uwidaczniają niestabilny charakter drgań relaksacyjnych. Natomiast zaobserwowane podczas symulacji wartości napięć i prądów w momencie wystąpienia ferorezonansu, stanowią poważne zagrożenie dla przekładników i mogą być przyczyną ich uszkodzenia termicznego i mechanicznego.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Błaż J., Cholewa A., Krasucki F.: Powstawanie i tłumienie drgań relaksacyjnych w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 1990, nr 4-5, pp. 91-93
2. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Luto M., Nowak W.: Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, 2007, no. 4, pp. 2362-2369, ISSN 0885-8977
3. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahomen P., Luto M., Nowak W.: Ferroresonance involving voltage transformers In medium voltage networks. 14th International Symposium on High Voltage Engineering ISH2005, Beijing, China, 2005, paper F-19
4. Nowak W., Kercel B.: Modelowanie zjawiska ferorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć. *Elektrotechnika i Elektronika*, tom 26, 2007, zeszyt 1-2, pp. 54-59, ISSN 1640-7202
5. Nowak W., Kercel B., Pająk P.: Komputerowa analiza zjawiska ferorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2008, nr 25, pp. 107- 110, ISSN 1425-5766
6. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Nowak W., Luto M.: Zapobieganie zjawisku ferorezonansu z udziałem przekładników napięciowych w sieciach ŚN z izolowanym punktem neutralnym. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje, 2005, X Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”*, pp. 197- 200,
7. Florkowski M., Luto M., Nowak W., Piasecki W.: Ferorezonans z udziałem przekładników napięciowych w sieci średniego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje, 2003, IX Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”*, pp. 78- 81,

ANALYSIS OF FERRORESONANCE IN MV INDUSTRIAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Key-words: feroresonance, EMTP, MV industrial electrical power systems

This paper presents computer modeling and analysis of feroresonance in the MV industrial electrical power systems. It has got essential importance in designing and exploitation of electrical power systems. Presented problem was analyzing by Electromagnetic Transients Program (EMTP).