

MODELOWANIE ZJAWISKA FERROREZONANSU W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono komputerowe symulacje ferrorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć, mające istotne znaczenie dla określenia zagrożeń wynikłych w momencie jego powstania. Do analizy zjawiska ferrorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć zastosowano program *Electromagnetic Transients Program (EMTP)*.

Słowa kluczowe: układy elektroenergetyczne, ferrorezonans, modelowanie

MODELLING FERRORESONANCE IN HV ELECTRICAL POWER SYSTEM

The paper presents computer's simulations of ferroresonance in 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)*.

Keywords: power systems, ferroresonance, modelling

1. WSTĘP

W układach elektrycznych zawierających nieliniowe elementy indukcyjne możliwe jest wystąpienie drgań ferrorezonansowych. Z praktycznego punktu widzenia w układach elektroenergetycznych nieliniową indukcyjność stanowi najczęściej indukcyjność odwzorowująca zjawisko magnesowania rdzenia transformatora oraz przekładników napięciowych.

Zjawisko ferrorezonansu jest uważane za główną przyczynę uszkodzeń przekładników napięciowych instalowanych w układach elektroenergetycznych. Skutkiem ferrorezonansu jest znaczne nasycenie rdzenia przekładnika oraz wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym, prowadzące w efekcie do termicznego zniszczenia układu izolacyjnego. Dodatkowym negatywnym skutkiem jest także powstawanie przepięć dorywczych w postaci ferrorezonansowych drgań napięć, stanowiących narażenia dla pozostałych elementów 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. Istotne znacznie mają więc opracowywane modele matematyczne zjawiska ferrorezonansu oraz przeprowadzane z ich wykorzystaniem symulacje komputerowe. W artykule przedstawiono wybrane wyniki symulacji komputerowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym, w których wystąpił ferrorezonans. Zastosowanie programu EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) pozwoliło na określenie potencjalnego zagrożenia, a otrzymane wyniki analizy mogą być istotnym elementem przy projektowaniu i eksploatacji układów elektroenergetycznych.

2. FERROREZONANS

W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ Z BEZPOŚREDNIO UZIEMIANYM PUNKTEM NEUTRALNYM

Drgania ferrorezonansowe mogą wystąpić w obwodach, w których istnieje możliwość szeregowego lub równoległego połączenia liniowej pojemności oraz nieliniowej indukcyjności. W przypadku połączenia szeregowego tych elementów zachodzi ferrorezonans napięć, natomiast przy połączeniu równoległym – ferrorezonans prądów.

Wystąpienie ferrorezonansu prądów lub napięć jest uzależnione w głównej mierze od konfiguracji układu elektroenergetycznego oraz od wartości jego poszczególnych elementów. Główną rolę w tym przypadku odgrywa sposób połączenia punktu neutralnego transformatora z ziemią. Rozpatrując to zjawisko w układach elektroenergetycznych, należy zwrócić uwagę na dwa przypadki:

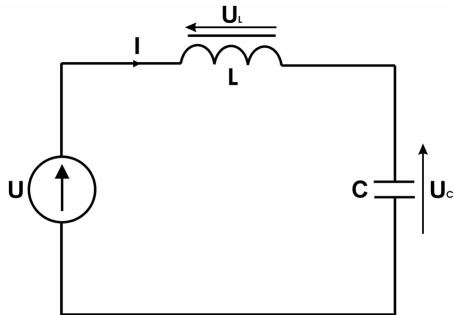
- 1) ferrorezonans w układach elektroenergetycznych wysokich napięć (WN) z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym;
- 2) ferrorezonans w układach elektroenergetycznych średnich napięć (SN) z izolowanym punktem neutralnym.

Drgania ferrorezonansowe w układach WN, pracujących z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym, mogą wystąpić wtedy, gdy na skutek czynności łączeniowych powstaje szeregowy (rys. 1) lub szeregowo-równoległy układ drgający. Rysunek 2 przedstawia charakterystyki napięciowo-prądowe elementów obwodów z rysunku 1.

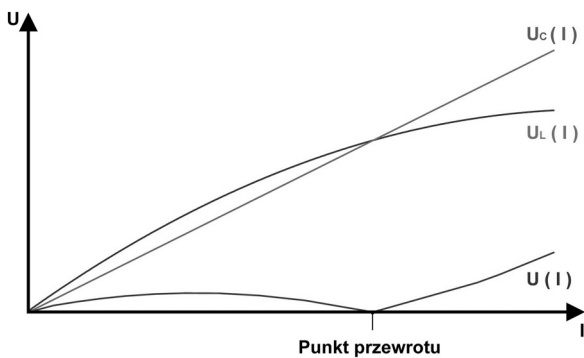
W układach WN do ferrorezonansu napięć może dojść w przypadku, gdy na skutek wyłączenia szyn zbiorczych w stacji elektroenergetycznej, za pomocą wyłącznika wie-

* Katedra Elektroenergetyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

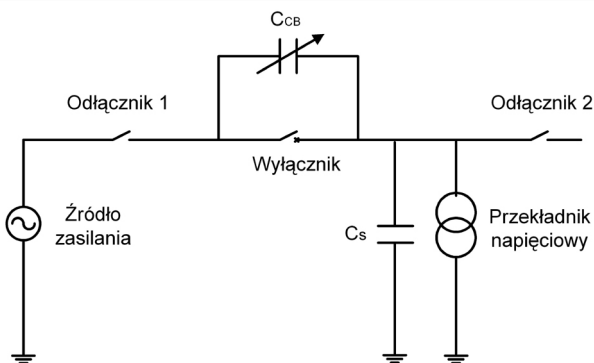
lokomorowego wyposażonego w kondensatory bocznikujące oraz dołączonego do nich przekładnika napięciowego, powstaje szeregowy układ drgający. Uproszczony schemat wysokonapięciowej stacji elektroenergetycznej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy do analizy ferorezonansu napięć



Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe elementów obwodu przedstawionego na z rysunku 1

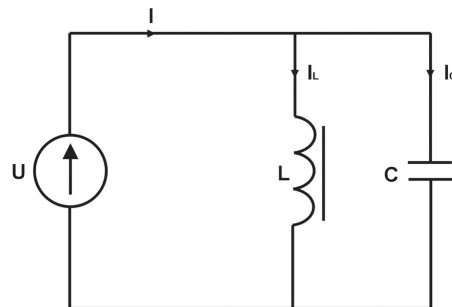


Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej [1, 3]. (C_{CB} – wypadkowa pojemność kondensatorów sterujących wyłącznika, C_S – sumaryczna pojemność doziemna elementów układu elektroenergetycznego)

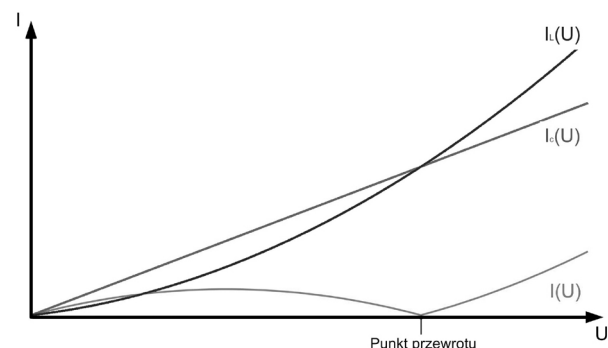
Zjawisku temu towarzyszy skokowa zmiana fazy i amplitudy prądu w obwodzie. Gwałtowny wzrost prądu magnesującego w uzwojeniu pierwotnym przekładnika, w wyniku nadmiernego nagrzania, może doprowadzić do uszkodzenia jego izolacji. Przy ponownym zamknięciu wyłącznika, może dojść zatem do jednofazowego zwarcia z ziemią, które

zazwyczaj przekształca się w zwarcie trójfazowe. W następstwie tych narażeń często dochodzi do eksplozji przekładników napięciowych. W analizie rozpatrywanego przypadku istotny wpływ ma uwzględnienie pojemności doziemnej przekładnika napięciowego i innych aparatów podłączonych do szyn zbiorczych. Ma ona wpływ na kształt, poziom i szybkość tłumienia drgań ferorezonansowych.

W przypadku układów elektroenergetycznych średniego napięcia z izolowanym punktem neutralnym transformatora, do ferorezonansu może dojść w wyniku nagłej zmiany napięcia sieci. Na skutek tych zmian powstaje równoległy (rys. 4) lub szeregowo-równoległy układ drgający. Rysunek 5 przedstawia charakterystyki prądowo-napięciowe elementów obwodu przedstawionego na rysunku 4.



Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy do analizy ferorezonansu prądów

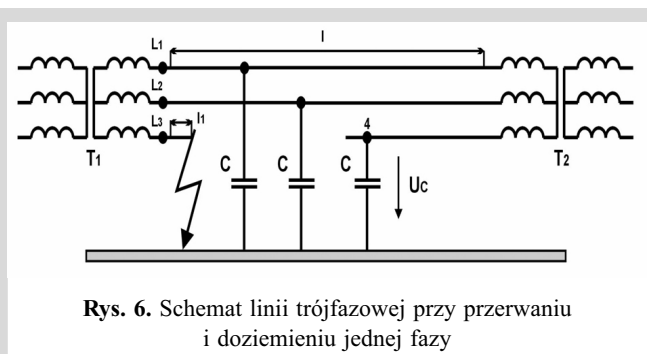


Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe elementów obwodu przedstawionego na rysunku 4

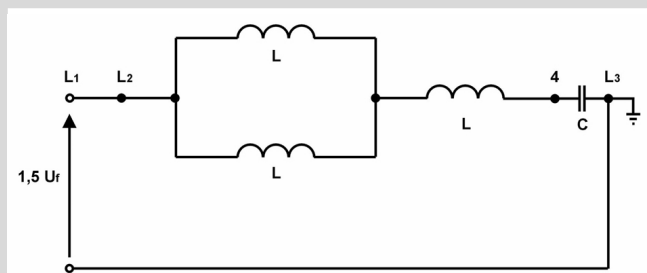
Przyczyn nagłej zmiany napięcia w układach elektroenergetycznych średniego napięcia, poza zwarcie doziemnym (rys. 6), może być wiele.

Do głównych można zaliczyć [8]:

- zastosowanie w sieci mniej niż trzech przekładników izolowanych biegunowo,
- niejednoczesne włączenie lub wyłączenie przekładników napięciowych przy użyciu odłączników jednobiegunowych,
- przerwa w jednym obwodzie grupy trzech przekładników spowodowana przepaleniem jednego z bezpieczników,
- zastosowanie przekładników o różnych charakterystykach magnesowania,
- niesymetryczne obciążenie przekładników napięciowych lub sieci zasilającej.



Rys. 6. Schemat linii trójfazowej przy przerwaniu i doziemieniu jednej fazy



Rys. 7. Schemat zastępczy układu przedstawionego na rysunku 6

Schemat zastępczy układu z rysunku 6 przedstawiono na rysunku 7.

3. CHARAKTERYSTYKA FRAGMENTU UKŁADU ELEKTROENERGETYCZNEGO I JEGO MODELU W PROGRAMIE EMTP-ATP

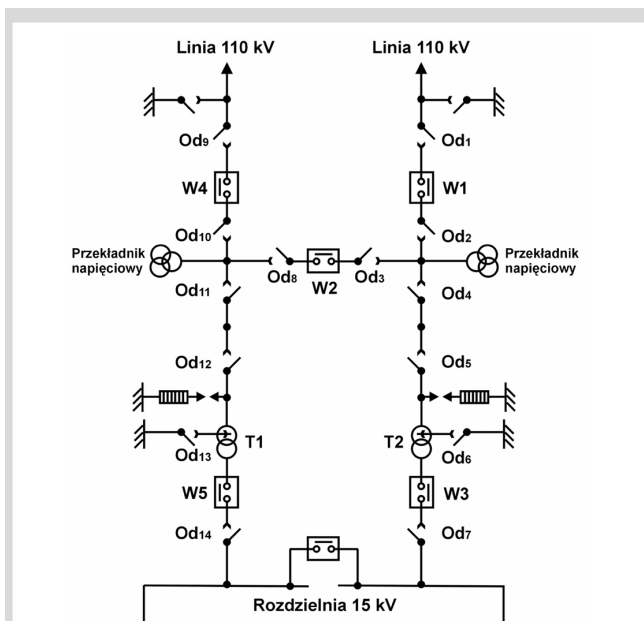
Systemy elektroenergetyczne, w których istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska ferorezonansu, są układami nieliniowymi i dynamicznymi. Nieliniowy charakter tych obwodów utrudnia analizę tego zjawiska, ze względu na odkształcenia przebiegów prądów i napięć, w momencie jego wystąpienia. Przy analizie ferorezonansu przeprowadzane są zatem odpowiednie symulacje komputerowe, mające istotne znaczenie dla określenia zagrożenia, na jakie są narażone układy elektroenergetyczne.

Analizę ferorezonansu w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym przeprowadzono na przykładzie stacji 110/15 kV w układzie H3 (rys. 8). Rysunek 9 przedstawia uproszczony schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej 110/15 kV, w której w wyniku czynności ruchowych powstaje układ drgający.

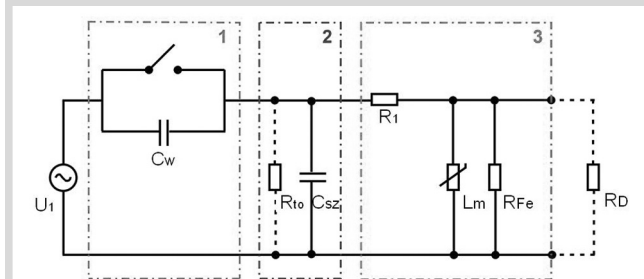
Szeregowy układ drgający w tym przypadku tworzony jest poprzez kondensatory sterujące wyłącznika oraz indukcyjny przekładnik napięciowy.

Zainteresowanie tym przypadkiem zrodziło się w momencie, gdy w eksploatacji rozdzielni wysokiego napięcia w wielu krajach (w tym również w Polsce), stwierdzono występowanie uszkodzeń indukcyjnych przekładników napięciowych, poprzedzone wyłączeniem szyn rozdzielni [5, 6].

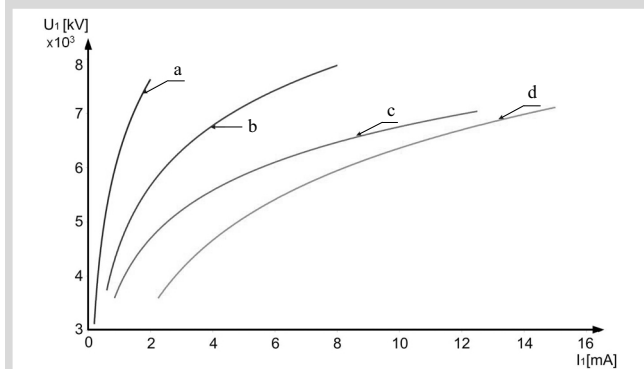
Na rysunku 10 przedstawiono charakterystyki napięciowo-prądowe zamodelowanego w układzie przekładnika UO-110a.



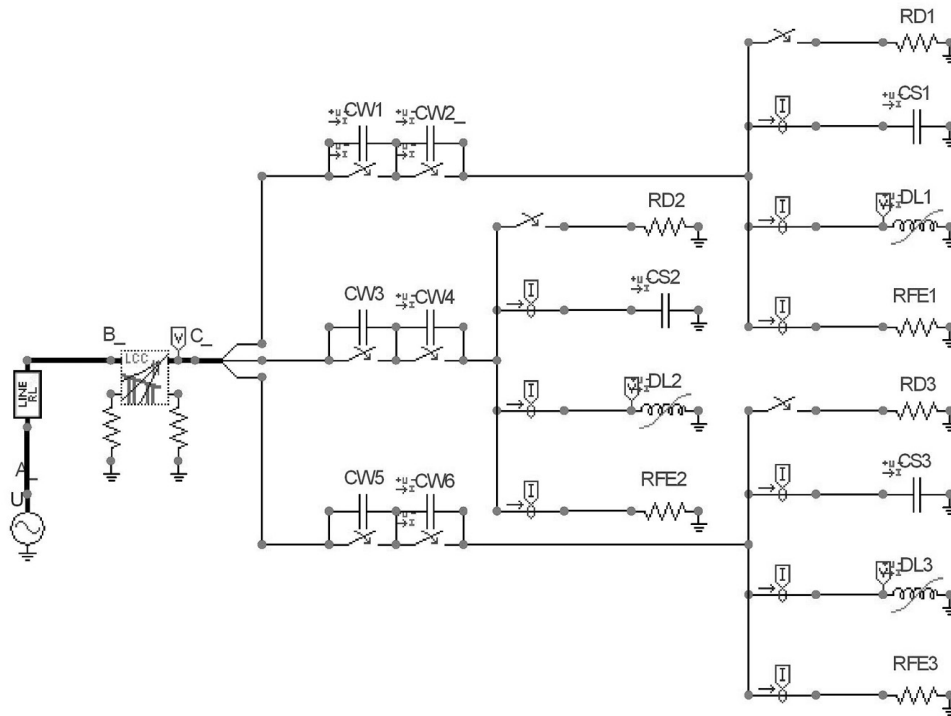
Rys. 8. Schemat stacji 110/15 kV w układzie H [5]



Rys. 9. Uproszczony schemat zastępczy fragmentu stacji elektroenergetycznej 110/15 kV w warunkach ferorezonansu [6]. 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 tłumienie obwodu wynikające z upływności, ulotu, L_m – indukcyjność przekładnika)



Rys. 10. 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) [6]



Rys. 11. Schemat modelowy do badań i symulacji ferorezonansu w rozdzielni 110 kV, gdzie poszczególne elementy układu oznaczają: DL1-3 – przekładniki napięciowe UO-110a; CW1-6 – wyłączniki małaolejowe WMS-110/10/35-V4 wraz z bocznikującą pojemnością wyłącznika; CS1-3 – układ sumarycznej pojemności doziemnej odcinka szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego; RFE1-3 – rezystancja reprezentująca straty w rdzeniu przekładników; RD1-3 – rezystancja reprezentująca elementy służące do tłumienia zjawiska ferorezonansu; U, SIEC – źródło oraz układ sieci

Utworzony w programie EMTP modelowy schemat do analizy ferorezonansu w rozdzielni H3 został przedstawiony na rysunku 11.

Analizę ferorezonansu w rozdzielni wykonano dla trzech wariantów, w których zmieniana była długość linii zasilającej oraz pojemności szyn zbiorczych:

- wariant 1 – długość linii zasilającej $l = 0,1$ km oraz dla trzech przypadków zależnych od pojemności $C_{S1} = 130$ pF, $C_{S2} = 630$ pF, $C_{S3} = 1130$ pF;
- wariant 2 – długość linii zasilającej $l = 40$ km oraz dla trzech przypadków zależnych od pojemności $C_{S1} = 130$ pF, $C_{S2} = 630$ pF, $C_{S3} = 1130$ pF;
- wariant 3 – długość linii zasilającej $l = 100$ km oraz dla trzech przypadków zależnych od pojemności $C_{S1} = 130$ pF, $C_{S2} = 630$ pF, $C_{S3} = 1130$ pF.

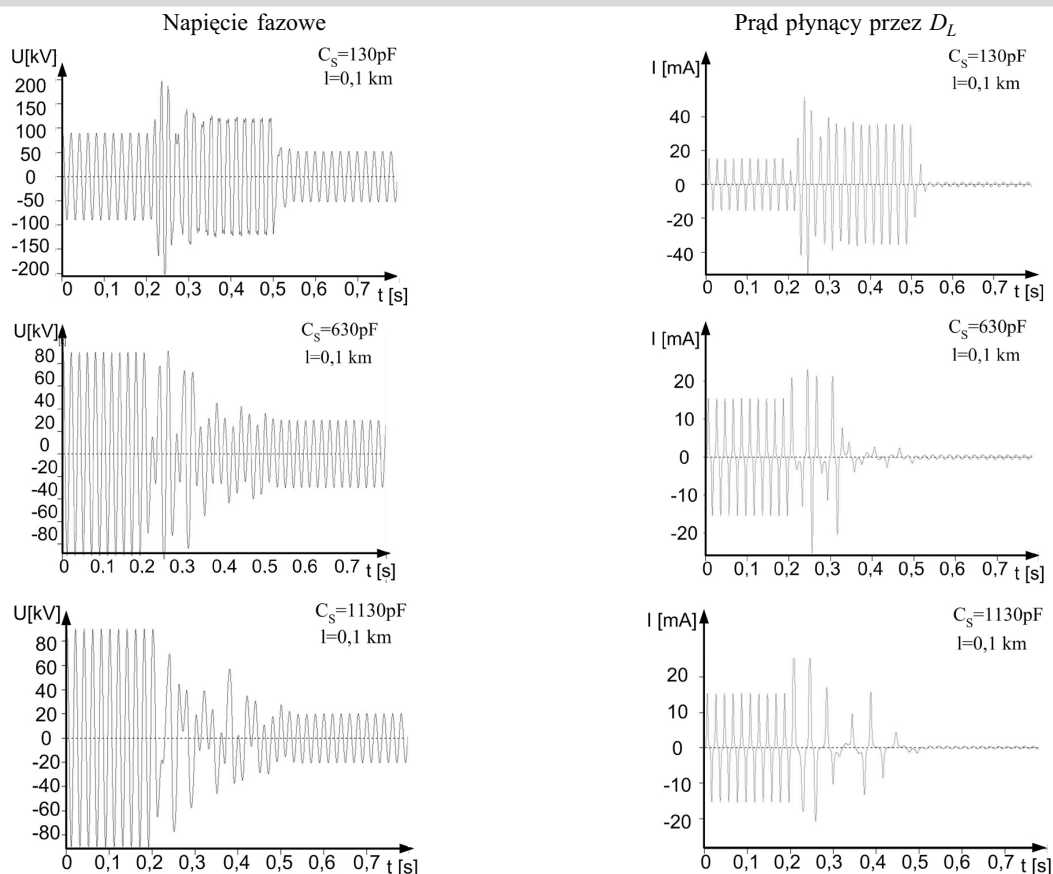
4. WYNIKI KOMPUTEROWEJ SYMULACJI

Na skutek wystąpienia w układzie elektroenergetycznym ferorezonansu, uszkodzeniu mogą ulec zainstalowane

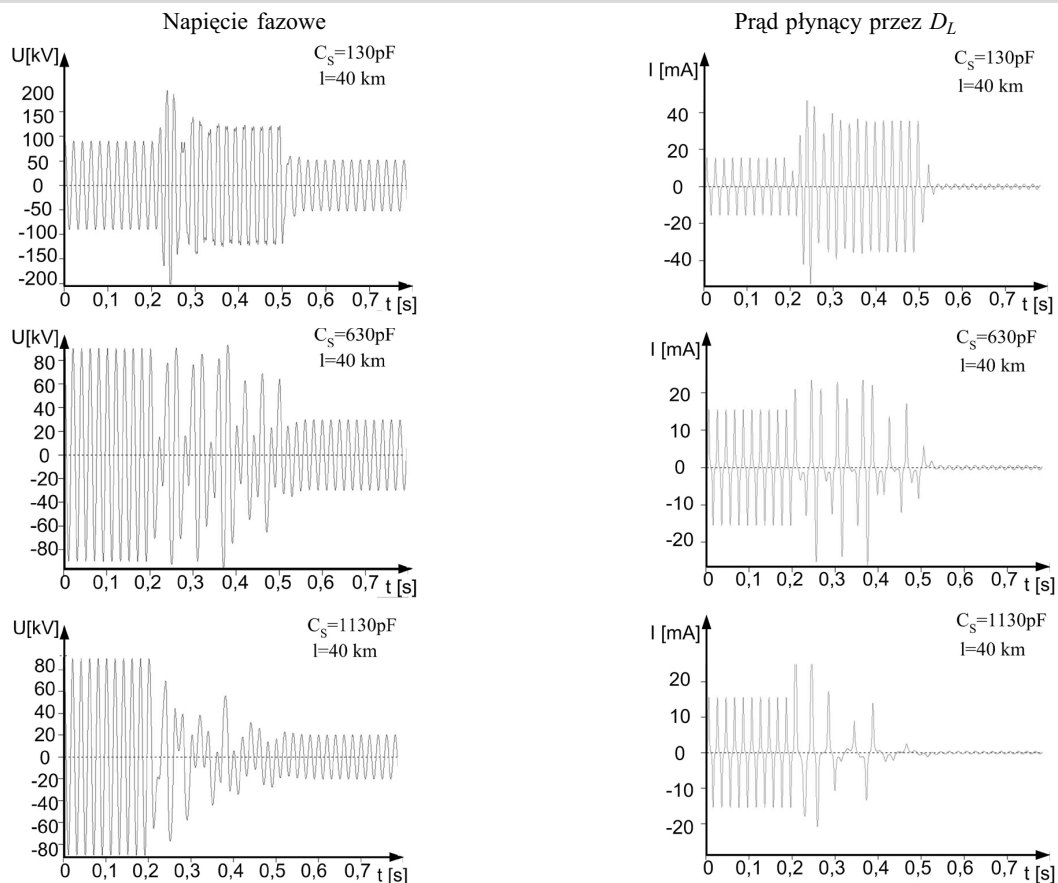
w nim przekładniki napięciowe. Zagrożenie to może wystąpić w wyniku znacznego nasycenia rdzenia prowadzącego do cieplnego zniszczenia uzwojenia pierwotnego przekładnika napięciowego oraz uszkodzenia jego izolacji na skutek zaistniałych przepięć o charakterze dorywczym. Poniżej przedstawiono istotne z punktu widzenia analizy narażenia przekładników napięciowych, przebiegi czasowe prądu płynącego w obwodzie pierwotnym oraz napięć fazowych na szynach rozdzielni.

Na rysunkach 12, 13 i 14 pokazano przebiegi czasowe prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne przekładnika napięciowego D_L oraz napięcia na szynach rozdzielni dla jednej z faz. Zmianie ulegały długości linii zasilającej (0,1 km; 40 km; 100 km) oraz pojemności $C_{S1} = 130$ pF, $C_{S2} = 630$ pF, $C_{S3} = 1130$ pF.

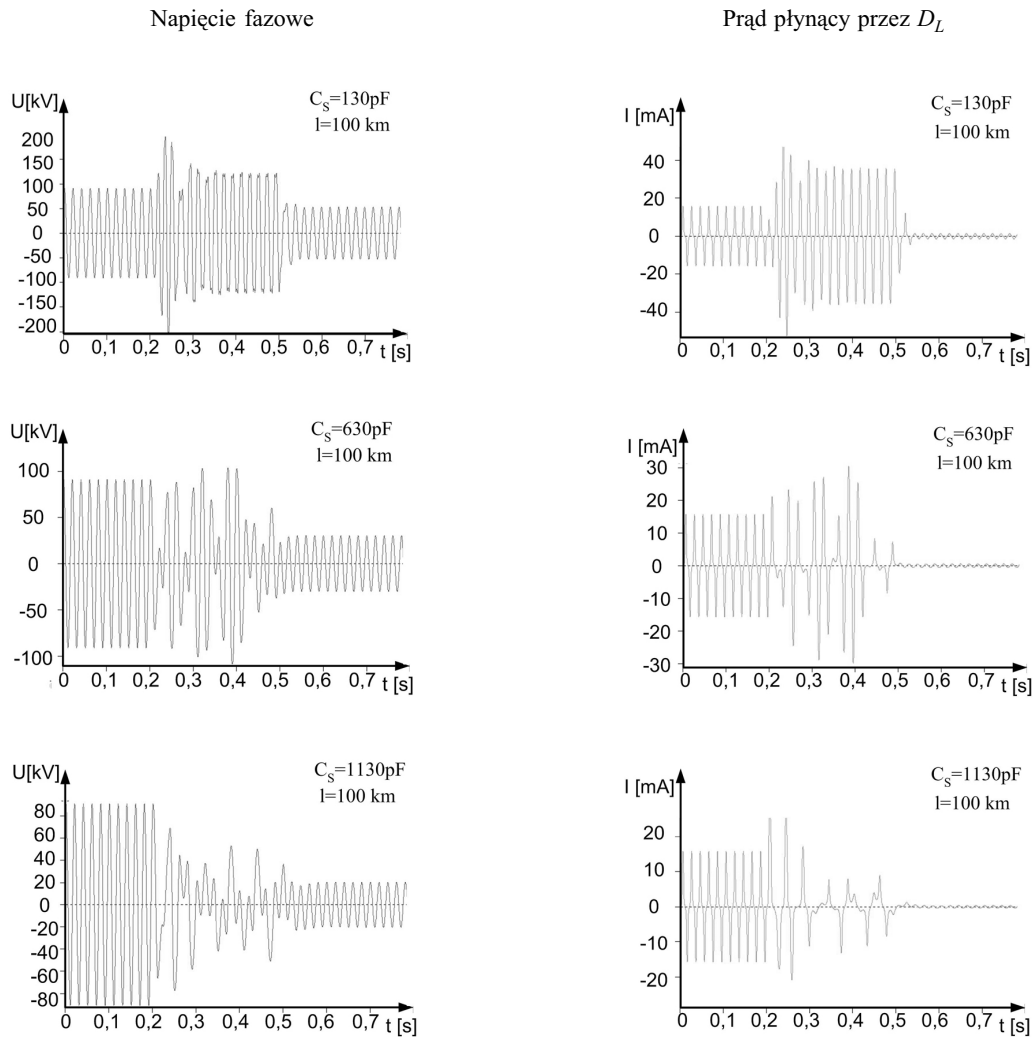
Zmiana wypadkowej doziemnej pojemności C_S odcinka szyn, wyłącznika oraz przekładnika napięciowego, istotnie wpływa na wielkość i charakter drgań ferorezonansowych. Dla małych wartości pojemności C_S , prąd płynący przez uzwojenie pierwotne przekładnika napięciowego w momencie wystąpienia ferorezonansu wzrasta ponad dwukrotnie. Ze wzrostem wartości pojemności C_S drgania ferorezonansowe mają charakter przejściowy i następuje ich tłumienie. Natomiast zmiana odcinka długości linii zasilającej ma nieznaczny wpływ na poziom drgań ferorezonansowych.



Rys. 12. Przebiegi napięcia fazowego oraz prądów płynących przez D_L przy długości linii zasilającej 0,1 km i zmiennej pojemności C_S



Rys. 13. Przebiegi napięcia fazowego oraz prądów płynących przez D_L przy długości linii zasilającej 40 km i zmiennej pojemności C_S



Rys. 14. Przebiegi napięcia fazowego oraz prądów płynących przez D_L przy długości linii zasilającej 100 km i zmiennej pojemności C_S

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje pozwalają stwierdzić, że możliwe jest powstanie ferorezonansu w analizowanym układzie stacji elektroenergetycznej 110/15 kV. W rozważanych przypadkach następuje znaczny wzrost prądu płynącego przez przekładnik napięciowy w wyniku, czego może dojść do uszkodzenia indukcyjnego przekładnika napięciowego. Rozpatrywane warianty analizy pozwalają stwierdzić, że sumaryczna pojemność doziemna odcinka szyn, wyłącznika i przekładnika napięciowego ma istotny wpływ na wielkość przepięć i przetężeń powstałych w momencie wystąpienia drgań ferorezonansowych w układach elektroenergetycznych wysokich napięć z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym.

Literatura

- [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] Kiény C.: *Application of the bifurcation theory in studying and understanding the global behaviour of a ferroresonant electric power circuit*. IEEE trans., PD-6, 1991, 866–872
- [3] Auckland D.W., Emin Z., Al Zahawi B.A.T., Tong Y.K.: *Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers: A study based on nonlinear dynamics*. IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 144, No. 4, 1997, 384–387
- [4] Wiszniewski A.: *Przekładniki w elektroenergetyce*. Warszawa, WNT 1982
- [5] Sikorski J.: *Gaszenie przebiegów ferorezonansowych w przekładnikach napięciowych UO-110*. Energetyka, nr 2, 1986, 71–73
- [6] Mazuś J., Stachowski W., Wiczorek G.: *Eksperymentalne badania ferorezonansu w układzie wyłącznik – przekładnik napięciowy 110 kV*. Energetyka, nr 11, 1984, 485–488
- [7] *Zjawisko ferorezonansu w transformatorach rozdzielczych*. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 9, 2000, 818
- [8] Nowicz R.: *Przekładniki napięciowe*. Łódź, WPL 2003
- [9] Florkowski M., Luto M., Nowak W., Piasecki W.: *Ferorezonans z udziałem przekładników napięciowych w sieci średniego napięcia*. Przegląd Elektrotechniczny, Materiały konferencyjne EUI 2003

Wpłynęło: 20.04.2007



Wiesław NOWAK

Urodził się w Krakowie w 1963 roku. Tytuł zawodowy magistra inżyniera oraz stopnie naukowe doktora i doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika uzyskał w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, odpowiednio w 1988, 1995 i 2006 roku.

Od 1987 roku jest pracownikiem Katedry Elektroenergetyki AGH. Jest członkiem International Council on Large Electric Systems (CIGRE), International Lightning Protection Club (ILPC) oraz Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS). Jego główne zainteresowania badawcze dotyczą problemów koordynacji izolacji, a także komputerowego modelowania i analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych w układach elektroenergetycznych. Jest autorem i współautorem pięciu książek i ponad 70 publikacji z zakresu elektroenergetyki.

e-mail: wiesla@agh.edu.pl



Bartłomiej KERCEL

Urodził się w Chrzanowie w 1978 roku. Tytuł magistra inżyniera o specjalności elektroenergetyka uzyskał w roku 2003 na WEAIiE AGH. W roku 2003 ukończył również studia podyplomowe o specjalności zarządzanie personelem na WZ AGH. W latach 2003–2004 pracownik firmy Elteco Poland. W roku 2004 pracował w Zakładach Remontowych Energetyki Kraków, a następnie w latach 2004–2005 w Enion S.A. Oddział w Krakowie ZEK. Od roku 2005 pracownik Katedry Elektroenergetyki na WEAIiE AGH.

e-mail: kercel@agh.edu.pl
