

FERROREZONANS JAKO ŹRÓDŁO ZAKŁÓCEŃ I AWARII W SIECIACH DYSTRYBUCYJNYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

dr inż. Rafał Tarko / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
dr hab. inż. Wiesław Nowak / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
dr inż. Waldemar Szpyra / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
mgr inż. Mariusz Benesz / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
mgr inż. Andrzej Makuch / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

1. WSTĘP

Zjawisko ferrorezonansu ma miejsce, gdy rdzeń ferromagnetyczny wewnątrz urządzeń elektroenergetycznych – przede wszystkim przekładników napięciowych oraz nieobciążonych transformatorów – pracuje w warunkach nasycenia, a indukcyjność staje się w tej sytuacji elementem nieliniowym. W praktyce ferrorezonans może zostać zainicjowany nawet przez chwilowe wprowadzenie rdzenia w nasycenie, np. w wyniku czynności łączeniowych lub zmiany wartości napięcia wskutek doziemienia. Pomimo że zjawisko to znane jest w elektroenergetyce od lat 30. ubiegłego wieku, to do chwili obecnej nie sprecyzowano skutecznych kryteriów diagnozowania możliwości jego występowania oraz sposobów przeciwdziałania [1, 2].

Ferrorezonans stanowiący istotne źródło zakłóceń i awarii w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć, np. [3], jest groźny w skutkach z dwóch zasadniczych powodów:

- znacznego nasycenia rdzenia, co może prowadzić np. do cieplnego zniszczenia uzwojenia pierwotnego przekładników napięciowych
- powstawania (niejednokrotnie długotrwałych) przebiegów ferrorezonansowych o charakterze dorywczym.

Ponadto wzrost potencjału punktu neutralnego powoduje również, że w układzie pojawia się składowa zerowa napięcia, mogąca fałszować działania układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych [4].

W referacie przedstawiono analizę ferrorezonansu, który wystąpił w sieci rozdzielczej o napięciu 6 kV i doprowadził do zakłóceń w pracy tej sieci. Analizę przeprowadzono na podstawie opracowanych dla programu EMTP-ATP modeli układu sieci oraz wyników badań symulacyjnych, mających na celu określenie warunków i skutków występowania ferrorezonansu, jak i sposobów jego eliminacji.

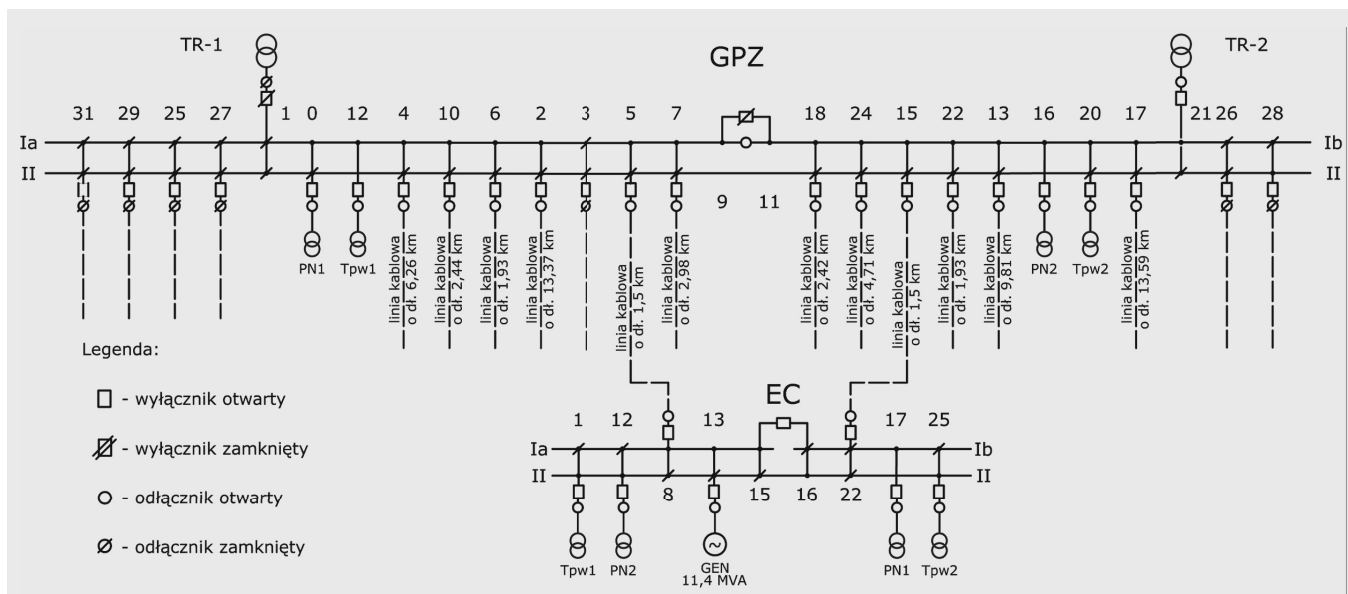
2. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO UKŁADU – GENEZA PROBLEMU

Przedmiotem analizy jest fragment sieci elektroenergetycznej o napięciu 6 kV, zasilany ze stacji 110/6 kV (GPZ) oraz z elektrociepłowni (EC). Uproszczony schemat rozdzielni SN przedstawiono na rys. 1. GPZ zasilany jest przez transformatory o przekładni $115 \pm 10\%/6,3$ kV (TR-1) oraz $115 \pm 10\%/6,6$ kV (TR-2) o mocy 16 MVA każdy. W elektrociepłowni pracuje generator o mocy 11,4 MVA. Łączna długość linii kablowych SN w tym układzie wynosi ponad 60 km. Analizowana sieć pracuje z izolowanym punktem neutralnym, przy czym wartość prądu ziemnozwarciowego sieci zasilanej w układzie normalnym z transformatora nr 1 wynosi $I_{c1} = 52,05$ A, natomiast dla sieci zasilanej z transformatora nr 2 wartość ta wynosi $I_{c2} = 40,99$ A.

Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy sieci elektroenergetycznych średnich napięć, która przeprowadzona została w celu rozpoznania warunków eksploatacji w aspekcie występowania ferrorezonansu. Zaprezentowano udokumentowany przypadek wystąpienia ferrorezonansu, który doprowadził

do uszkodzenia przekładników napięciowych. Analizę przeprowadzono na podstawie opracowanego modelu układu sieci oraz wyników badań symulacyjnych, mających na celu określenie warunków i skutków występowania ferrorezonansu, jak i sposobów jego eliminacji.



Rys. 1. Uproszczony schemat rozdzielni SN analizowanej sieci

W sieci 6 kV miało miejsce zakłócenie, które doprowadziło do awarii (eksplozji) przekładników napięciowych w polach pomiarowych (pola 0 i 16), w rozdzielni 6 kV GPZ oraz w rozdzielni elektrociepłowni (pola 12 i 17).

Przyczyną tego zakłócenia było zwarcie w linii kablowej zasilanej z GPZ (pole 24) i otwarcie wyłącznika w tym polu, na skutek zadziałania zabezpieczenia przetężeniowego oraz ziemnozwarciowego. Kilka minut po wyłączeniu linii nastąpiło wyłączenie transformatora nr 2 w wyniku zadziałania zabezpieczenia zwarciego oraz przetężeniowego. W wyniku zadziałania automatyki SZR sieć została przełączona na zasilanie z transformatora nr 1.

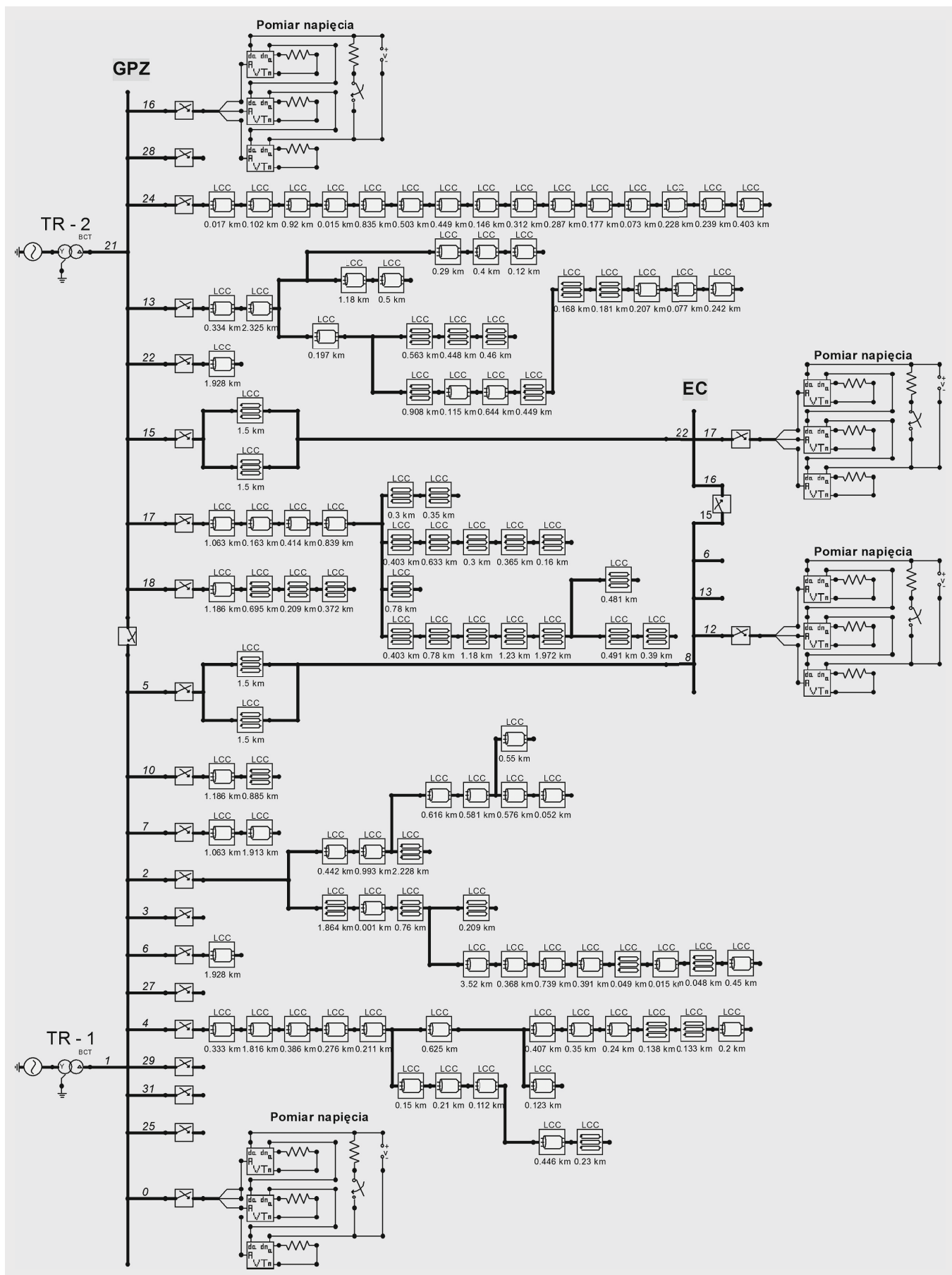
Na podstawie tego pasma zdarzeń można postawić hipotezę, że w linii kablowej doszło początkowo do zwarcia doziemnego, które przerodziło się w zwarcie dwufazowe z ziemią. Natomiast po odłączeniu uszkodzonej linii kablowej w sieci wzbudził się nietłumiony (długotrwały) ferrorrezonans, który spowodował poważne przeciążenie uzwojeń pierwotnych przekładników napięciowych, włączonych doziemnie, i w konsekwencji ich uszkodzenie. Rozerwanie przekładników w rozdzielni 6 kV w GPZ (po kilku minutach od odłączenia uszkodzonej linii kablowej) doprowadziło do zwarcia szyn w polu pomiarowym i zadziałania automatyki SZR, która zmieniła układ pracy rozdzielni z normalnego na awaryjny (zasilany z transformatora TR-1).

Analiza wyników obliczeń symulacyjnych, zaprezentowana w dalszej części artykułu, dowodzi prawdziwości postawionej tezy o przyczynach awarii zaistniałej w sieci 6 kV.

3. MODEL KOMPUTEROWY ANALIZOWANEJ SIECI 6 kV

Model analizowanej sieci 6 kV został opracowany w programie symulacyjnym EMTP-ATP (ang. *ElectroMagnetic Transients Program*). Ponieważ wstępna analiza zakłóceń w GPZ wskazywała na zjawisko ferrorrezonansu jako przyczynę uszkodzeń przekładników napięciowych, dlatego w opracowywanym modelu uwzględniono nieliniową zależność od napięcia prądu magnesowania rdzeni przekładników napięciowych. Na podstawie danych rzeczywistej sieci oraz na podstawie przygotowanych modeli przekładników napięciowych opracowano model układu 6 kV (rys. 2), w skład, którego wchodzi:

- GPZ
- linie kablowe 6 kV wychodzące z GPZ
- rozdzielnia 6 kV elektrociepłowni EC.



Rys. 2. Model analizowanej sieci 6 kV w programie ATPDraw

Parametry odwzorowanych elementów układu zostały zaimplementowane na podstawie szczegółowych planów sieci elektroenergetycznej, kart katalogowych zainstalowanych w niej urządzeń oraz pomiarów laboratoryjnych przekładnika napięciowego pracującego w analizowanej sieci SN. Realizacja celu analizy wymagała dokładnego odwzorowania wszystkich elementów sieci mogących mieć wpływ na przebiegi napięć i prądów w stanach nieustalonych, a więc mogących wywołać zaistniałą awarię przekładników. Elementami odwzorowanymi w modelu są w szczególności:

- system elektroenergetyczny 110 kV
- transformatory 110/6 kV zainstalowane w GPZ, odwzorowane w procedurze BCTRAN
- linie kablowe łączące poszczególne stacje zasilane z GPZ, odwzorowane w procedurze CABLE CONSTANTS
- przekładniki napięciowe
- układ do tłumienia ferorezonansu.

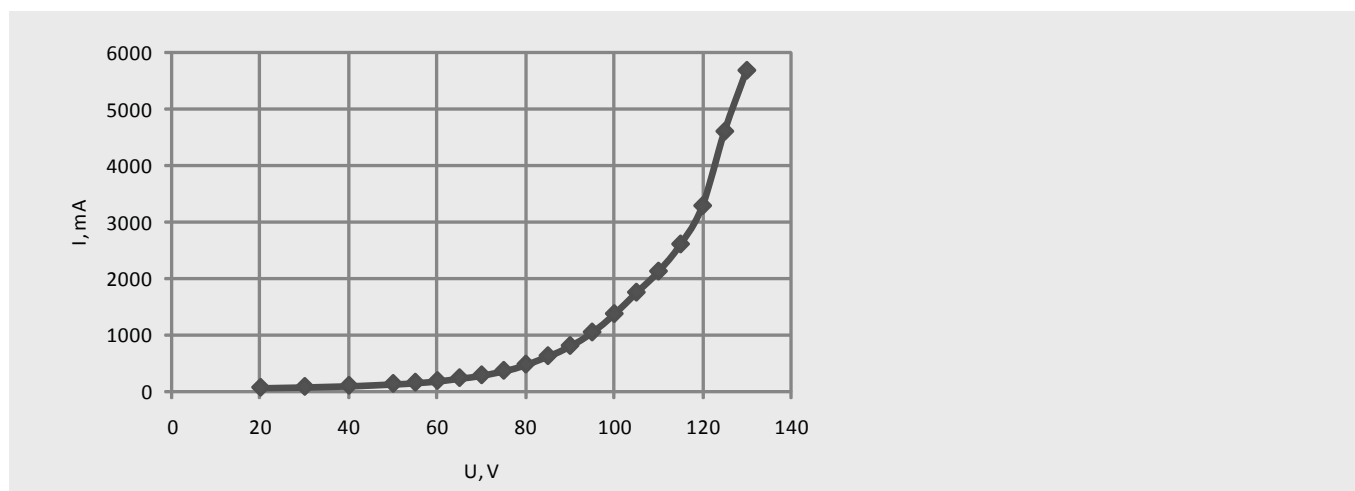
Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów przekładników napięciowych 6 kV opracowano model komputerowy, będący podstawą do dalszej analizy pracy sieci i badań symulacyjnych. Na potrzeby opracowania modelu wykonano pomiary charakterystyk magnesowania oraz napięć zwarcia przekładnika napięciowego 6 kV (takiego samego typu jak przekładniki zainstalowane w rozdzielni) o następujących danych znamionowych:

- napięcie znamionowe uzwojenia pierwotnego $U_{1n}: 6000/\sqrt{3} V$
- napięcie znamionowe uzwojenia wtórnego $U_{2n}: 100/\sqrt{3} V$
- napięcie znamionowe uzwojenia dodatkowego $U_{2dn}: 100/3 V$
- klasa: 0,5
- moc znamionowa: 50 VA.

W tab. 1 przedstawiono wyniki pomiarów prób zwarcia pomiędzy poszczególnymi parami uzwojeń. Natomiast zmierzona od strony uzwojenia wtórnego charakterystykę magnesowania przekładnika przedstawiono na rys. 3.

Tab. 1. Wyniki prób zwarcia przekładnika napięciowego 6 kV

Zaciski A – N uzwojenia pomiarowego	Zaciski a – n uzwojenia wtórnego	Zaciski da – dn uzwojenia dodatkowego	U, V	I, A	P, W	$\cos\varphi$
zwarte	zasilane	rozwarne	5,48	2,93	14,18	0,96
rozwarne	zasilane	zwarte	6,88	3,36	22	0,88
zwarte	rozwarne	zasilane	2,78	1,93	4,76	0,89

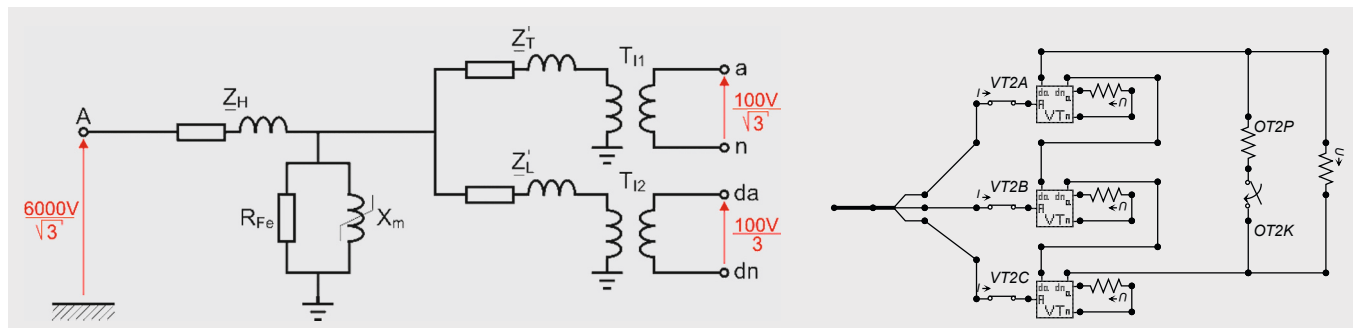


Rys. 3. Charakterystyka prądowo-napięciowa magnesowania przekładnika napięciowego 6 kV (zmierzona po stronie wtórnej)

Schemat modelu przekładnika napięciowego przedstawiono na rys. 4. W skład modelu wchodzi następujące elementy:

- impedancja rozproszenia Z_H uzwojenia pierwotnego

- impedancja rozproszenia $\underline{Z}'_T$ uzwojenia wtórnego, sprowadzona na stronę pierwotną
- impedancja rozproszenia $\underline{Z}'_L$ uzwojenia dodatkowego, sprowadzona na stronę pierwotną
- rezystancja R_{Fe} reprezentująca straty w rdzeniu przekładnika
- nieliniowa reaktancja X_m odwzorowująca charakterystykę magnesowania
- transformatory idealne T_{I1} , T_{I2} .



Rys. 4. Schemat modelu przekładnika napięciowego

Rys. 5. Schemat trójfazowego układu trzech przekładników napięciowych w programie ATPDraw

Wartości parametrów powyższych elementów wyznaczone zostały na podstawie pomiarów przedstawionych w tab. 1 i na rys. 3. Natomiast schemat trójfazowego układu trzech przekładników napięciowych w programie ATPDraw przedstawiono na rys. 5.

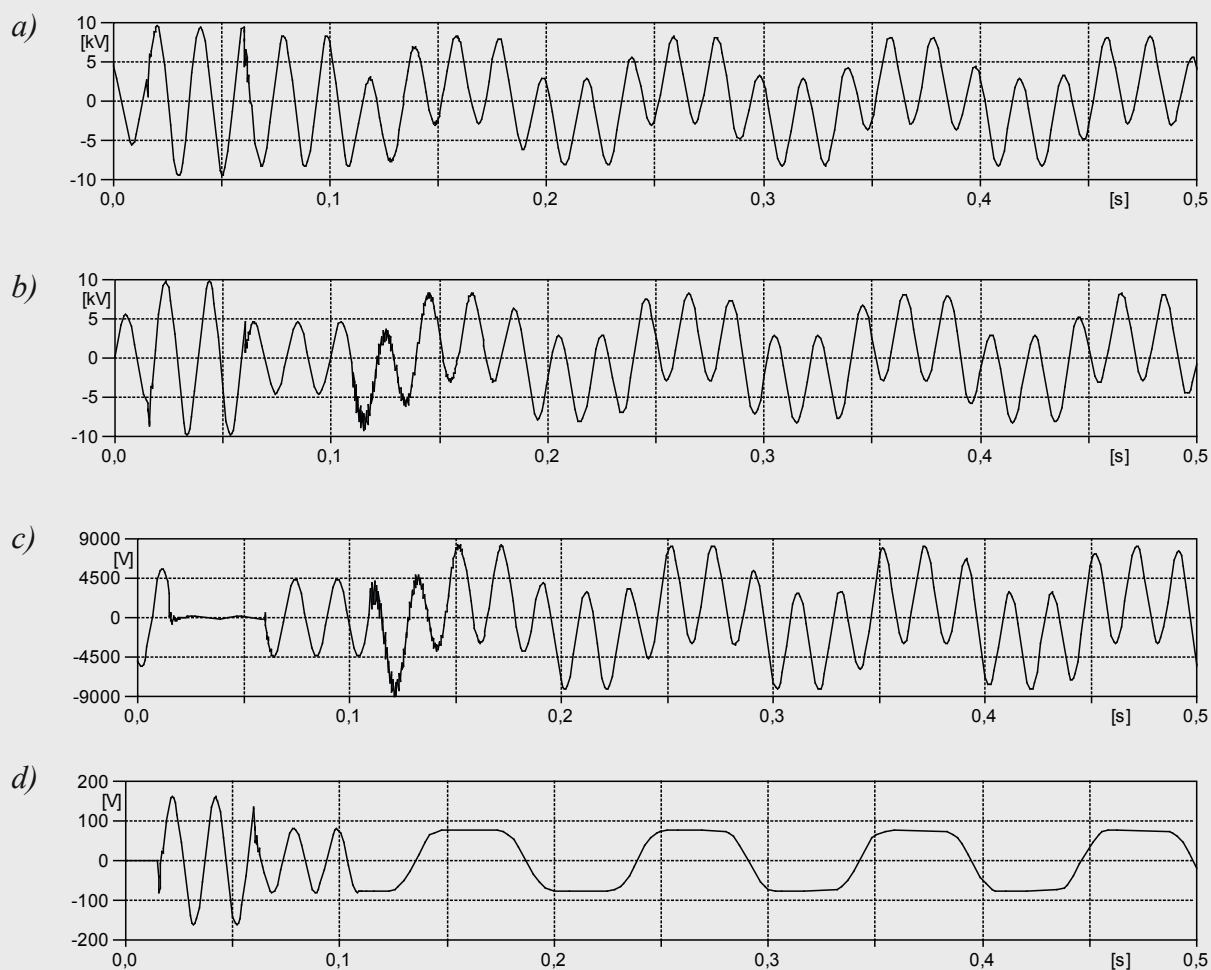
Układ ten stanowią trzy bloki VT , w których zaimplementowano modele przekładników przedstawione na rys. 4.

4. BADANIA SYMULACYJNE ANALIZOWANEJ SIECI

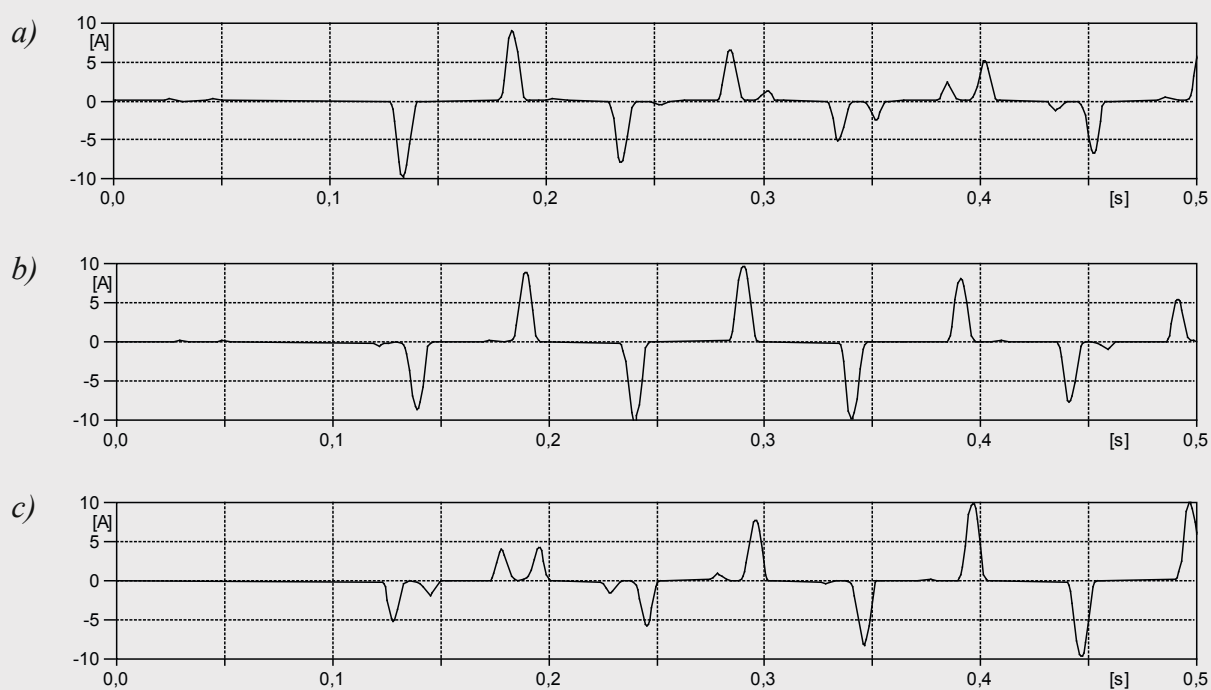
Przedstawione wyniki symulacji zawierają przebiegi napięć i prądów istotnych z punktu widzenia działania automatyki zabezpieczeniowej oraz zagrożenia ferrorezonansem elementów sieci 6 kV. Z uwagi na zadziałanie (pobudzenie) podczas zwarcia, zarówno zabezpieczeń ziemnozwarciowych, jak i nadprądowych, założono, że doszło początkowo do doziemienia jednej fazy, które po pewnym czasie przekształciło się w zwarcie dwufazowe z ziemią. Odtworzenie stanu zakłócenieniowego, zadziałanie zabezpieczeń w GPZ oraz wzbudzenie zjawiska ferrorezonansu w układzie modelowym dokonano przy następujących założeniach:

- do pierwszego zaburzenia (doziemienia fazy L3 w polu 24) dochodzi po upływie 15 ms od rozpoczęcia symulacji
- do drugiego zaburzenia (doziemienia fazy L2, a w konsekwencji do zwarcia międzyfazowego w polu 24) dochodzi po upływie 60 ms od rozpoczęcia symulacji
- do otwarcia wyłącznika w polu 24, w którym pojawiło się podwójne zwarcie, dochodzi po upływie 100 ms od rozpoczęcia symulacji.

Otrzymane przebiegi napięć fazowych oraz napięcia składowej zerowej na szynach rozdzielni 6 kV w GPZ przedstawiono na rys. 6. Z kolei na rys. 7 przedstawiono przebiegi prądów płynących po stronie pierwotnej przekładników napięciowych.



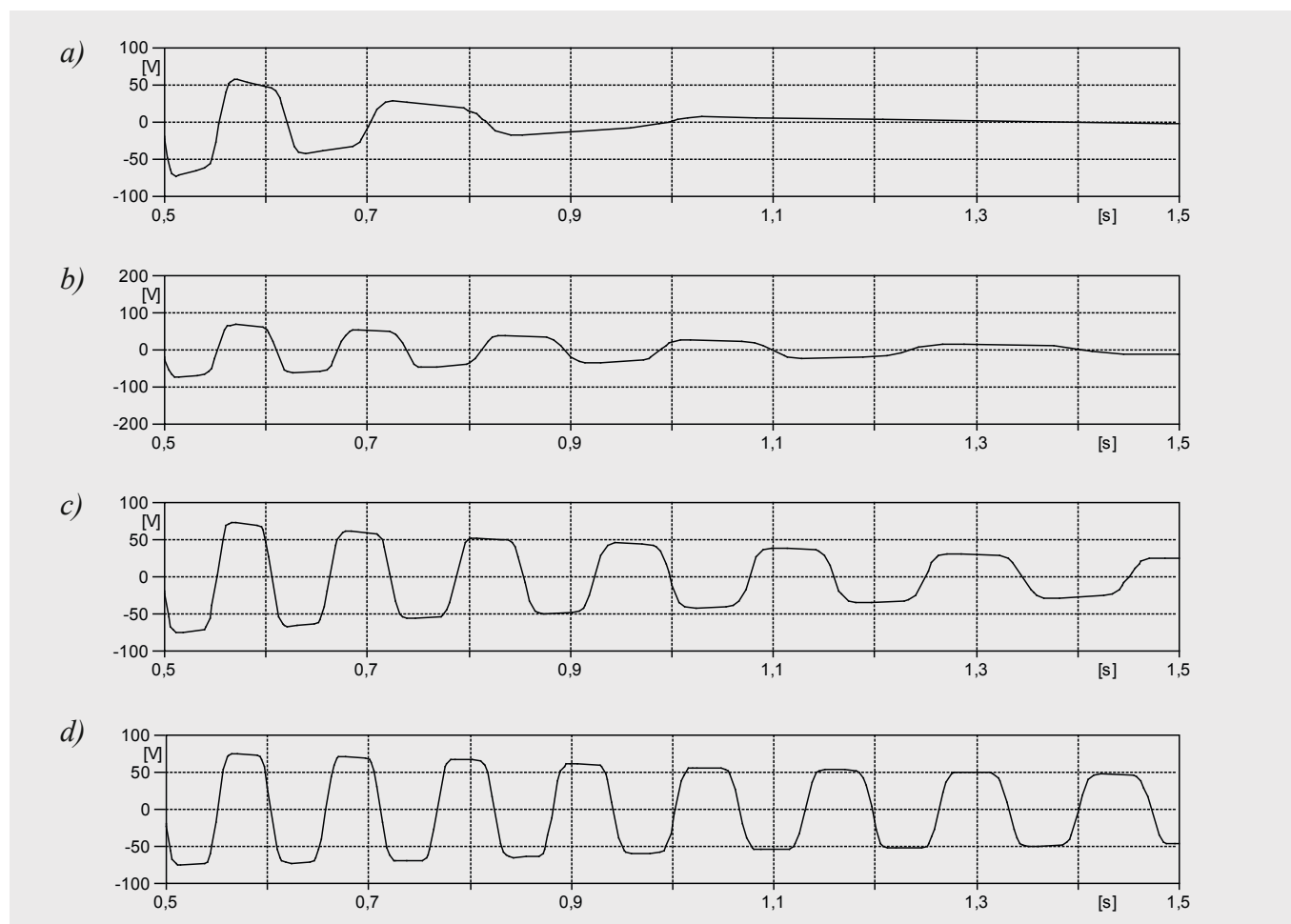
Rys. 6. Przebiegi napięć po wyłączeniu zwarcia: a) U_{L1} ; b) U_{L2} ; c) U_{L3} ; d) $3U_0$



Rys. 7. Przebiegi prądów po stronie pierwotnej PN po wyłączeniu zwarcia: a) I_{L1} ; b) I_{L2} ; c) I_{L3}

Po wyłączeniu zwarcia w polu 24 wzbudzany został ferorezonans o charakterze trwałym. O wystąpieniu tego zjawiska świadczy pojawienie się charakterystycznych przebiegów napięć fazowych (rys. 6a÷6c) oraz składowej zerowej napięcia (rys. 6d). Towarzyszy temu duży wzrost wartości prądów płynących po stronie pierwotnej przekładników napięciowych (rys. 7). Wartości szczytowe prądów po wystąpieniu ferorezonansu dochodzą do 10 A. Tak duży prąd niewątpliwie stanowi poważne zagrożenie dla przekładników i mógł spowodować ich uszkodzenie.

Możliwości wytłumienia ferorezonansu w analizowanej sieci sprawdzono poprzez dołączenie dodatkowej rezystancji do uzwojeń dodatkowych przekładników napięciowych, połączonych w układ otwartego trójkąta. Załączenie dodatkowej rezystancji odbywa się po upływie 500 ms od rozpoczęcia symulacji (rys. 8). Przeanalizowano warianty zakładające dołączenie rezystancji o wartościach: 5 Ω , 10 Ω , 20 Ω oraz 50 Ω .



Rys. 8. Przebiegi napięć $3U_0$ po włączeniu rezystora: a) $R = 5 \Omega$; b) $R = 10 \Omega$; c) $R = 20 \Omega$; d) $R = 50 \Omega$

W analizowanym zakresie dołączanej rezystancji tłumiącej uwidacznia się możliwość wytłumienia zjawiska ferorezonansu w analizowanej sieci. Wartość dołączanej rezystancji wpływa jednak na czas, w którym dochodzi do wytłumienia ferorezonansu – wraz ze zwiększeniem dołączanej rezystancji wydłuża się czas wytłumienia, a przy znacznych wartościach ($R > 50 \Omega$) może dojść do sytuacji, w której ferorezonans nie będzie tłumiony. Z przeprowadzonej analizy wynika, że optymalną wartością dołączanej rezystancji jest wartość 10 Ω (czas wytłumienia wynosi ok. 1 s).

5. PODSUMOWANIE

Zjawiska ferorezonansowe z udziałem przekładników napięciowych najczęściej występują w sieciach z izolowanym punktem neutralnym, dlatego eksploatacja przekładników napięciowych w sieciach rozdzielczych średniego napięcia niesie niebezpieczeństwo ich uszkodzenia na skutek wzrostu prądu w uzwojeniu pierwotnym.

Opracowany model sieci 6 kV pozwolił na przeprowadzenie badań symulacyjnych i analizy, z których wynikają następujące wnioski:

- możliwe jest wzbudzenie ferorezonansu w wyniku takich stanów zakłóceń jak zwarcia
- możliwe jest długotrwałe utrzymywanie się ferorezonansu, prowadzące w efekcie do zniszczenia przekładników napięciowych
- możliwe jest tłumienie ferorezonansu poprzez zastosowanie odpowiednich urządzeń tłumiących.

Skuteczne tłumienie stanów ferorezonansowych, poprzez zastosowanie rezystora tłumiącego, wymaga doboru rezystancji o bardzo małej wartości. Jest to często wartość zbyt mała z punktu widzenia wymaganej odporności przekładników na stan długotrwałego zwarcia doziemnego w sieci. Z tego powodu w praktyce stosuje się rezystory o rezystancji na poziomie 20 Ω , zapewniające tłumienie stanów ferorezonansowych w większości typowych sytuacji, lecz niezapewniające stuprocentowej skuteczności. W celu rozwiązania tego problemu niektórzy producenci oferują urządzenia tłumiące, zastępując tradycyjnie stosowany rezystor przez układ, którego rezystancja dostosowuje się aktywnie do warunków pracy.

Urządzenia te działają w następujący sposób [3]: gdy składowa zerowa ma niewielką wartość (wynikającą z asymetrii w warunkach normalnej pracy sieci), urządzenie reprezentuje bardzo dużą rezystancję. Gdy pojawia się składowa zerowa na poziomie przewyższającym strefę nieczułości urządzenia, rezystancja spada do poziomu skutecznie wytłumiającego stan ferorezonansowy. W przypadku, gdy składowa zerowa, obecna w obwodzie otwartego trójkąta, utrzymuje się przez czas dłuższy, urządzenie samoczynnie przechodzi w stan wysokoomowy, nie stanowiąc zbędnego obciążenia dla przekładników. Po ustąpieniu przyczyny asymetrii urządzenie samoczynnie powraca do stanu początkowego.

BIBLIOGRAFIA

1. Irvani M.R. i wsp., Modeling and analysis guidelines for slow transients – Part III, The study of ferroresonance, *IEEE Trans. on PWRD*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 255–265
2. Ben-Tal A., Kirk V., Wake G., Banded chaos in power systems, *IEEE Trans. on PWRD*, 2001, vol. 16, no. 1, pp. 105–110.
3. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Luto M., Nowak W., Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks, *IEEE Trans. on PWRD*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 2362–2369.
4. Moskwa S., Nowak W., Tarko R., Modelowanie i analiza układu sieci średniego napięcia dla oceny warunków i skutków występowania ferorezonansu oraz sposobów jego eliminacji, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2009, nr 26, s. 101–104.