

## PROBLEMY EKSPLOATACJI ELEKTROENERGETYCZNYCH SIECI ROZDZIELCZYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA W ASPEKcie NIEZAWODNOŚCI ELEKTROENERGETYCZNEJ AUTOMATYKI ZABEZPIECZENIOWEJ

dr hab. inż. Wiesław Nowak / Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

dr inż. Szczepan Moskwa / Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

dr inż. Rafał Tarko / Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

### 1. WSTĘP

Eksploatacji układów elektroenergetycznych towarzyszą różnorodne stany zakłóceniami, uniemożliwiające lub utrudniające ich normalną pracę. Jednym z zakłóceń o podstawowym znaczeniu są zwarcia, których skutki mogą mieć zarówno charakter lokalny (przede wszystkim narażenia cieplne i dynamiczne elementów układu oraz zagrożenie porażeniowe), jak i charakter globalny, np. możliwość utraty stabilności systemu elektroenergetycznego. Należy przy tym zaznaczyć, iż praktyka eksploatacyjna wykazuje, że wśród zakłóceń około 70–80 proc. to zwarcia jednofazowe doziemne. Wykrywanie oraz eliminacja zakłóceń lub innych nienormalnych warunków występujących w systemie elektroenergetycznym jest zadaniem elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ). Jednym z podstawowych wymagań stawianych układom EAZ jest ich niezawodność. Działanie EAZ może być prawidłowe albo nieprawidłowe, przy czym wśród działań nieprawidłowych wyróżnia się zarówno działania brakujące, jak i działania zbędne.

W odróżnieniu od elektroenergetycznych układów przesyłowych wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN), sieci rozdzielcze średnich napięć (SN) eksploatowane są jako układy trójfazowe z punktem neutralnym izolowanym, uziemionym przez dławik (tzw. sieć skompensowana) albo uziemionym przez rezystor. Niezależnie od sposobu eksploatacji sieci SN, ich wspólną cechą są relatywnie małe w stosunku do układów WN i NN wartości prądów doziemień (zwarć jednofazowych doziemnych), nieprzekraczające na ogół wartości kilkunastu, kilkudziesięciu amperów w sieciach z izolowanym punktem neutralnym i skompensowanych oraz wartości rzędu kilkuset amperów w sieciach uziemionych przez rezystor.

Pomimo że prądy doziemień w sieciach średnich napięć nie stanowią narażeń cieplnych oraz dynamicznych urządzeń i aparatów elektroenergetycznych, to zakłócenia te powinny być odpowiednio szybko eliminowane przede wszystkim ze względu na wynikające z doziemienia zagrożenie porażeniowe. Jednak brak skutecznego uziemienia punktu neutralnego implikuje wiele niekorzystnych warunków i trudności w realizacji skutecznych zabezpieczeń ziemnozwarciowych [np. 1, 2, 3]. Problemy te są przedmiotem niniejszego artykułu, w którym przedstawiono wyniki badań dwóch wybranych przypadków nieprawidłowego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w elektroenergetycznych sieciach SN:

1. działania brakującego w warunkach wysokorezystancyjnego zwarcia doziemnego
2. działania zbędnego w warunkach powstania ferorezonansu.

### 2. ANALIZA WARUNKÓW DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH W PRZYPADKU WYSOKOREZYSTANCYJNYCH ZWARĆ Z ZIEMIĄ

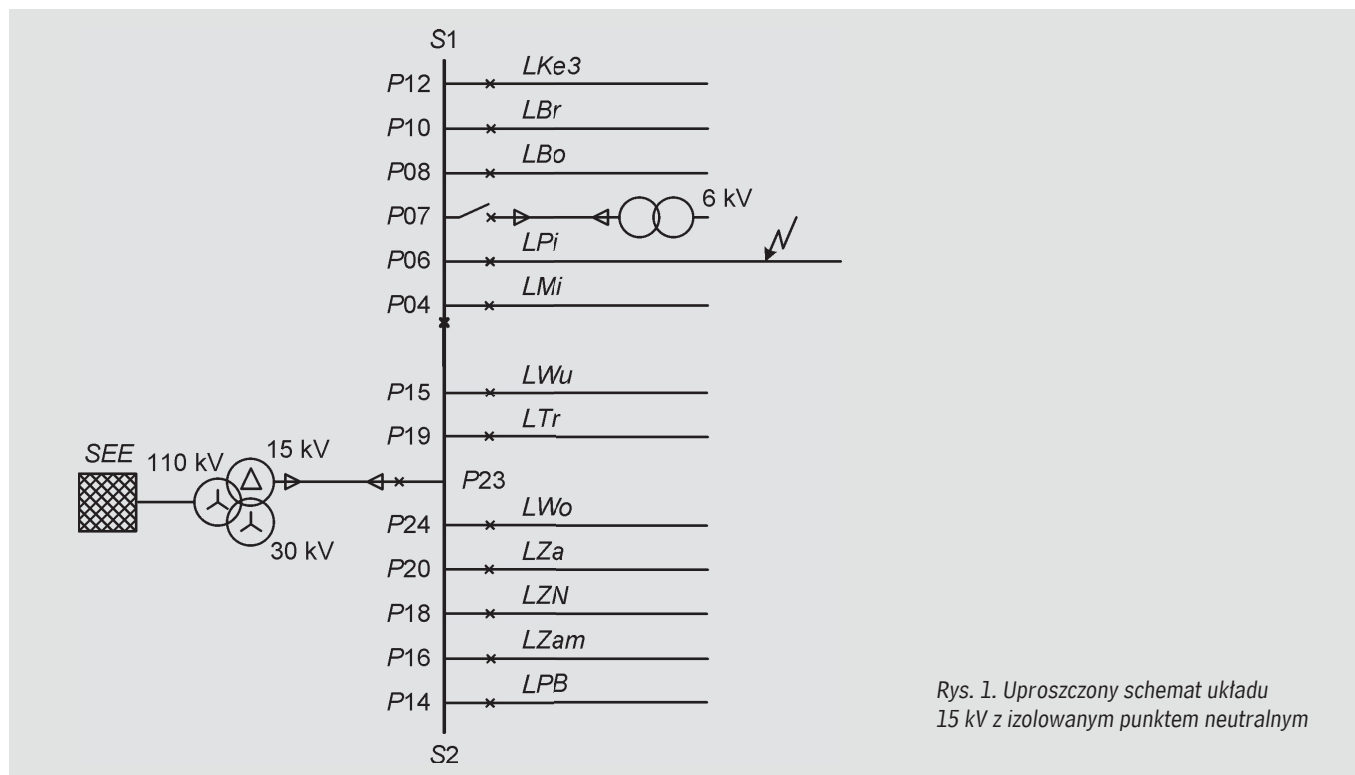
Przedmiotem badań był układ elektroenergetyczny z izolowanym punktem neutralnym o napięciu 15 kV (rys. 1), eksploatowany przez jedną ze spółek dystrybucyjnych na terenie kraju. Na linii LPi przyłączonej w polu

#### Streszczenie

Artykuł wpisuje się w problematykę eksploatacji sieci rozdzielczych średniego napięcia w aspekcie prawidłowego działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Zaprezentowano w nim dwa udokumentowane przypadki nieprawidłowego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Przedstawiono również wyniki analiz opartych na pomiarach w rozpatrywanych

sieciach rozdzielczych oraz obliczeniach z wykorzystaniem symulacyjnego programu EMTP-ATP. Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy mają nie tylko charakter indywidualny, specyficzny dla rozważanego zdarzenia zakłócenia, ale również charakter ogólny dla zabezpieczeń ziemnozwarciowych zainstalowanych w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć.

P06 rozdzielni 15 kV wystąpiło zakłócenie w postaci zwarcia wielofazowego, które spowodowało powalone na linię drzewo. Zakłócenie to zostało efektywnie wyeliminowane w wyniku działania zabezpieczenia nadmiarowo-prądowego zwłocznego. Linia jednak została ponownie załączona przez automatykę SPZ (samoczynnego ponownego załączania).



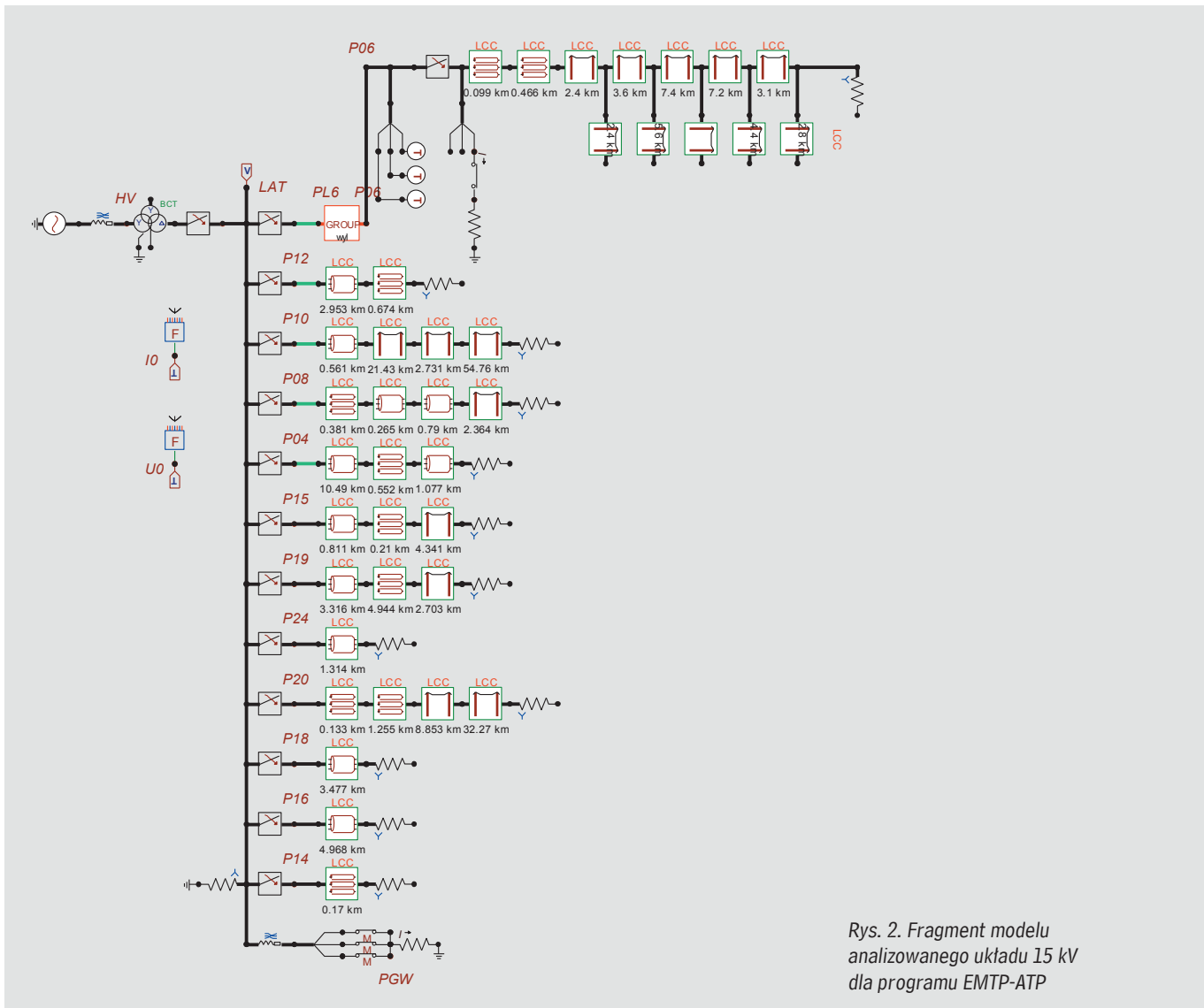
Cztery godziny po zaistniałym zdarzeniu dyspozytor Rejonu Dystrybucji odebrał zgłoszenie o zerwanym i dotykającym ziemi przewodzie rozważanej linii. Przybyłe na miejsce służby energetyczne stwierdziły wypaloną na długości ok. kilkunastu metrów ziemię przez leżący na niej zerwany przewód linii. Przewód ten do momentu zdalnego wyłączenia linii przez dyspozytora cały czas pozostawał pod napięciem, stwarzając zagrożenie porażeniowe dla osób, które mogły znaleźć się w pobliżu zerwanego przewodu.

Na podstawie wstępnej analizy stwierdzono, że podczas zwarcia międzyfazowego doszło do upalenia, zerwania i opadnięcia na ziemię przewodu linii, co jednak nie spowodowało zadziałania zabezpieczenia ziemnozwarciowego. Założono, że prawidłowe działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych uniemożliwia zbyt duża rezystancja przejścia w miejscu zetknięcia się przewodu fazowego z ziemią.

Przeprowadzone badania własności elektrycznych gruntu w miejscu zdarzenia wykazały, że wartości jego rezystywności zawierają się w zakresie od 8,9 do 12,3 kΩm. Są to wartości typowe dla suchych gruntów żwirowych i piaszczystych. W celu określenia możliwej rezystancji przejścia, mogącej wystąpić po zerwaniu się i opadnięciu przewodu na powierzchnię ziemi, wykorzystano dziesięciometrowy odcinek linki stalowo-aluminiowej typu AFL-6 70 mm<sup>2</sup>. Otrzymane wartości rezystancji przejścia przekroczyły wartość 20 kΩ. Wykazano więc, że ze względu na specyficzne własności geoelektryczne gruntu w miejscu rozważanego zakłócenia mogą występować w przypadku doziemień rezystancje przejścia rzędu kilku tysięcy omów.

W celu określenia napięciowych i prądowych warunków działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych rozważanego układu, opracowano jego model w Electromagnetic Transients Program (EMTP-ATP) – rys. 2. Analizowano istotne z punktu widzenia działania automatyki ziemnozwarciowej, zależności następujących wielkości od rezystancji przejścia  $R_d$  w miejscu doziemienia:

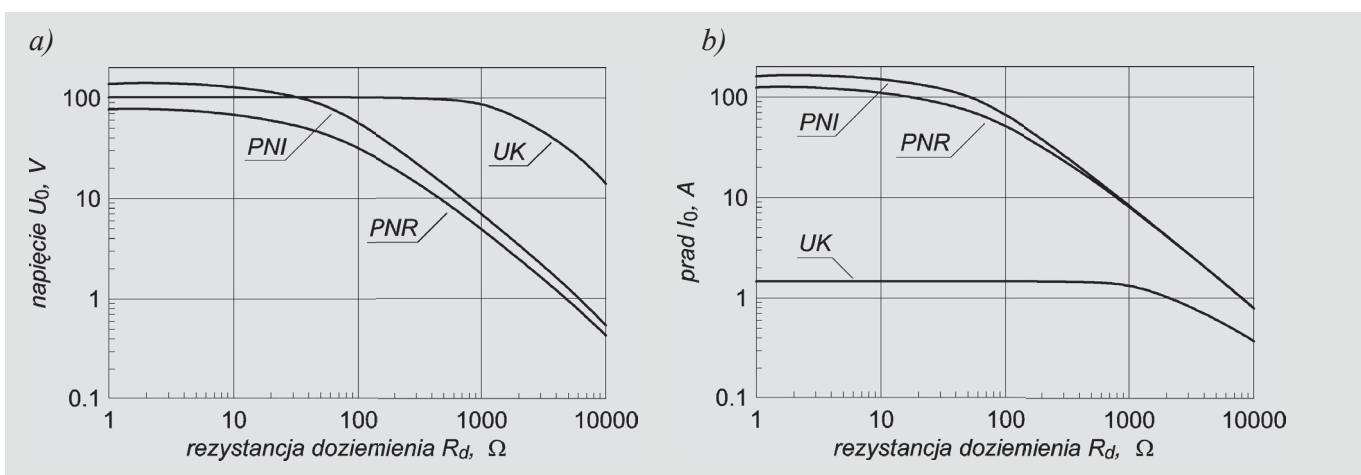
- składowa zerowa  $U_0$  napięć fazowych na szynach rozdzielni 15 kV zasilającej doziemioną linię (napięcie otwartego trójkąta przekładników tworzących filtr składowej zerowej napięcia)
- składowa zerowa  $I_0$  prądów w polu zasilającym doziemioną linię (suma geometryczna prądów fazowych mierzona przez przekładnik prądu zerowego lub układ Holmgreena, przeliczona na stronę pierwotną).



Rys. 2. Fragment modelu analizowanego układu 15 kV dla programu EMTP-ATP

Na rys. 3 przedstawiono zależności  $U_0 = f(R_d)$  oraz  $I_0 = f(R_d)$  otrzymane dla trzech wariantów eksploatacji układu:

1. z punktem neutralnym izolowanym
2. z punktem neutralnym uziemionym przez dławik o reaktancji  $75 \Omega$  (założenie kompensacji sieci o rozstrojeniu  $S = 2\%$ )
3. z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor o oporności  $56,8 \Omega$ .



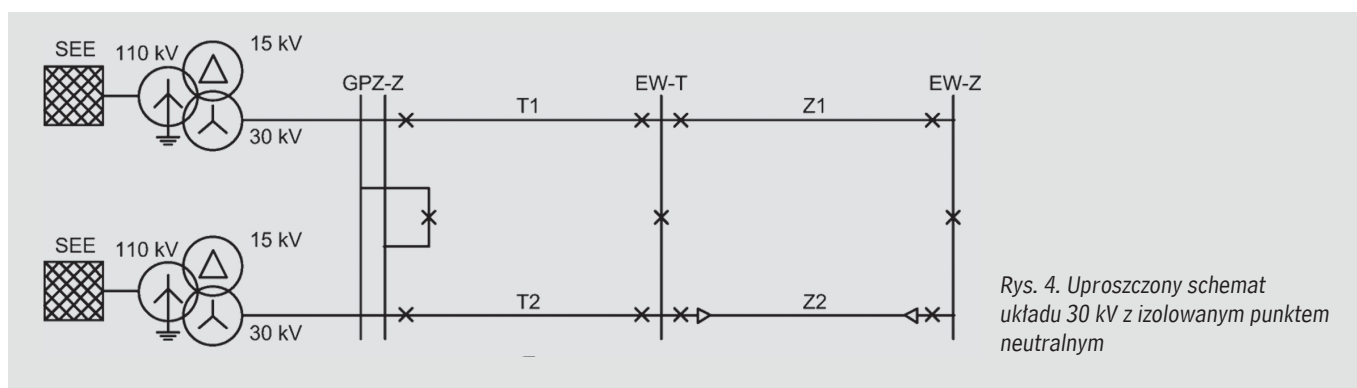
Rys. 3. Zależność napięcia  $U_0$  składowej zerowej (a) oraz prądu  $I_0$  składowej zerowej (b) w zależności od rezystancji doziemienia  $R_d$ : PNI – punkt neutralny izolowany, PNR – punkt neutralny uziemiony przez rezystor, UK – układ kompensowany

Przeprowadzona analiza wartości sygnałów wejściowych ( $U_0$ ,  $I_0$ ) zabezpieczeń ziemnozwarciowych wykazała, że już przy wartościach rezystancji przejścia w miejscu zwarcia powyżej kilkuset omów może nie nastąpić pobudzenie zainstalowanego cyfrowego zespołu zabezpieczeniowego EX-BEL, który wyposażony jest w moduł zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego z następującymi nastawami: wartość rozruchowa napięcia  $U_0 = 15$  V; wartość rozruchowa prądu  $I_0 = 6$  A; czas zadziałania 0,5 s.

Niezależnie od struktury sieci oraz sposobu pracy punktu neutralnego, w sytuacjach doziemień wysokooporowych, takich jakie było przedmiotem niniejszych badań, nie jest praktycznie możliwe prawidłowe i niezawodne działanie obecnie stosowanych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, a tym samym wykrycie zaistniałego w tych warunkach doziemienia.

### 3. ANALIZA WPŁYWU FERROREZONANSU NA DZIAŁANIE ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH

Przedmiotem badań był układ o napięciu 30 kV, który eksploatowany jest z izolowanym punktem neutralnym. Uproszczony schemat tego układu przedstawiono na rys. 4.



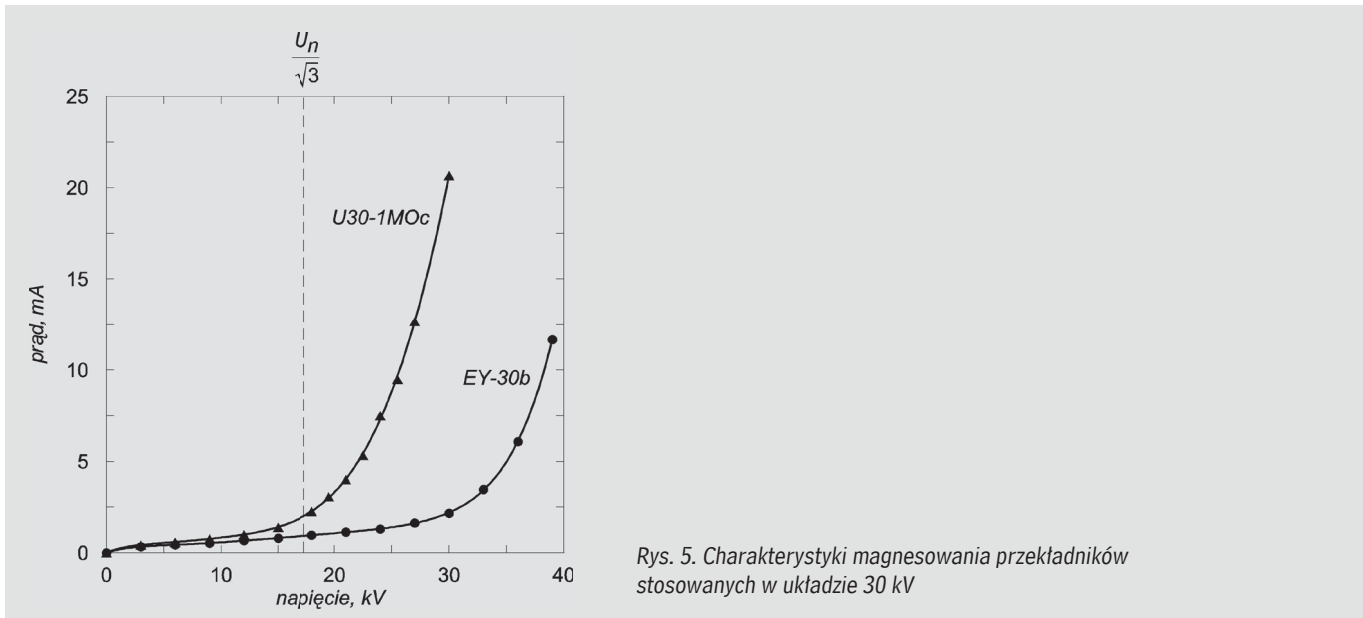
W wydzielonej części układu, w stacjach *GPZ-Z*, *EW-T* oraz *EW-Z* znajdują się trzy rozdzielnie 30 kV, połączone ze sobą liniami *T1* i *T2* oraz *Z1* i *Z2*. Linie *T1* i *T2* są liniami napowietrznymi o długości ok. 8,9 km, prowadzonymi jako linia dwutorowa na wspólnych konstrukcjach wsporczych. Linia *Z1* również jest linią napowietrzną o długości ok. 5,5 km, natomiast linia *Z2* jest linią kablową o długości ok. 5,1 km.

W układzie zainstalowane są cyfrowe zabezpieczenia odległościowe serii 7SA511 oraz 7SA610 firmy Siemens, wyposażone w funkcję czułego zabezpieczenia ziemnozwarciowego dla sieci izolowanych. Dzięki rejestracji przez te zabezpieczenia przebiegów napięć i prądów, w analizowanym układzie stwierdzone zostały stany zakłócenia związane z wyłączeniem doziemień. Jednym z takich zdarzeń było doziemienie linii kablowej *Z2*, które zostało poprawnie wyeliminowane przez zabezpieczenie w polu linii *Z2* w rozdzielni *EW-T*. Po wyłączeniu linii *Z2* na szynach rozdzielni 30 kV w stacji *GPZ-Z* zarejestrowany został wzrost napięć fazowych do wartości ok. 50 kV, utrzymujący się przez dłuższy czas, jak również nastąpiło zbędne wyłączenie linii *T2*. Zarejestrowane podczas tego zakłócenia przebiegi napięć wskazywały, że jego przyczyną jest zjawisko ferorezonansu.

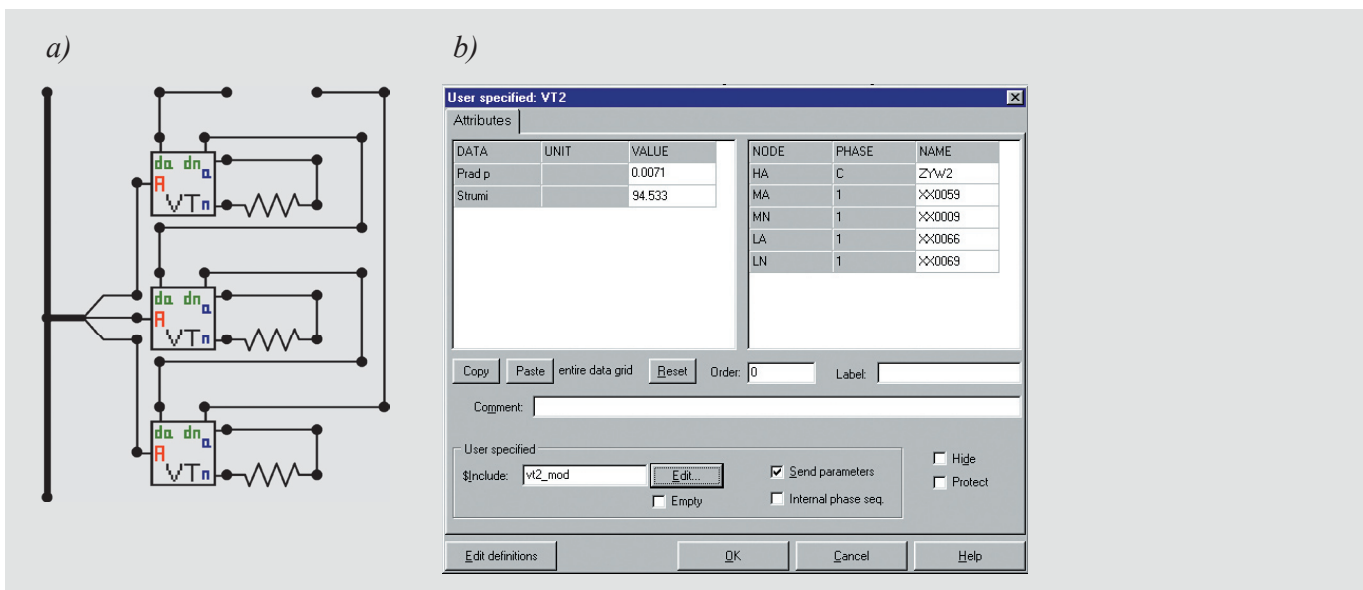
Zjawisko ferorezonansu ma miejsce, gdy rdzenie ferromagnetyczne urządzeń elektroenergetycznych – przede wszystkim przekładników napięciowych – pracują w warunkach nasycenia, a indukcyjność magnesująca staje się w takim przypadku elementem nieliniowym (rys. 5). W przeciwieństwie do rezonansu liniowego, gdzie częstotliwość rezonansowa jest ściśle określona, ferorezonans może wystąpić dla częstotliwości uzależnionej od warunków pracy układu. W praktyce ferorezonans może zostać zainicjowany nawet przez chwilowe wprowadzenie rdzenia w stan nasycenia. Może to nastąpić np. w przypadku czynności łączeniowej lub przy zmianie wartości napięcia zasilającego, np. wskutek doziemienia.

Ferorezonans stwarza istotne zagrożenie przepięciowe dla układów izolacyjnych, stanowi poważne narażenie prądowe uzwojeń pierwotnych włączonych doziemnie przekładników napięciowych, jak i podnosi potencjał punktu neutralnego układu [np. 4, 5, 6]. Podniesienie potencjału punktu neutralnego powoduje również pojawienie się składowej zerowej napięcia, mogącej fałszować działanie układów zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Na podstawie badań przeprowadzonych w układzie rzeczywistym opracowano model w programie EMTP-ATP dla analizy warunków wzbudzenia ferorezonansu i określenia sposobów jego tłumienia.



Analiza wymagała dokładnego odwzorowania wszystkich elementów sieci, mogących mieć wpływ na przebiegi napięć i prądów w stanach nieustalonych, a więc mogących wywołać nieprawidłowe działania układu automatyki zabezpieczeniowej. Szczególnie istotnymi elementami decydującymi o wystąpieniu ferorezonansu są przekładniki napięciowe zainstalowane na szynach rozdzielni 30 kV. Do opracowania ich adekwatnych modeli matematycznych wykorzystano wyniki pomiarów nieliniowych charakterystyk prądowo-napięciowych, o których kształcie decyduje zjawisko nasycania się rdzenia ferromagnetycznego (rys. 5). Na podstawie tych charakterystyk oraz badań przekładników w stanie zwarcia wyznaczono modele przekładników napięciowych w programie EMTP-ATP. Przykładowy model przekładnika typu U30-1MOc przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Model przekładnika typu U30-1MOc w programie EMTP-ATP:

- a) schemat grupy trójfazowej
- b) okno dialogowe przekładnika



```

KARD 3 3 4 4 5 5 6 6 6 37 38 39 41 42 42 43 44 44
KARG 1 -1 -1 -2 -1 -3 6 7 -1 5 3 -1 -2 2 3 -3 4 5
KBEG 3 9 3 9 3 9 27 33 3 3 3 3 3 21 27 3 21 27
KEND 8 14 8 14 8 14 32 38 8 8 8 8 8 26 32 8 26 32
KTEX 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
$ERASE
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  HA___MAG___                20685.31143.                0
  MAG___TM___                19446.                .21362                0
  MAG___TL___                1.29E568355.                0
C BUS1->BUS2->BUS3->BUS4-><-CURR<-FLUX<.....
93MAG___                CUR___FLU___                0
                0.0                0.0
                5.00027E-5                5.
                1.00087E-4                10.
                1.5066E-4                15.
                2.0278E-4                20.
                2.58485E-4                25.
                3.21114E-4                30.
                3.95636E-4                35.
                4.88975E-4                40.
                6.10336E-4                45.
                7.71531E-4                50.
                9.87304E-4                55.
                0.00128                60.
                0.00166                65.
                0.00216                70.
                0.00281                75.
                0.00365                80.
                0.00471                85.
                0.00603                90.
                0.00767                95.
                0.00969                100.
                0.01214                105.
                0.01509                110.
                0.01863                115.
                0.02282                120.
                0.02777                125.
                0.03356                130.
                0.04031                135.
                0.04813                140.
                9999
  LN___                1.E6                0
  MN___                1.E6                0
  MAG___                1.4E7                0
/SOURCE
14TM___                1.E-20                50.                -1.                10.
18                300.MA___MN___
14TL___                1.E-20                50.                -1.                10.
18                519.615LA___LN___
$EOF User-supplied header cards follow.                16-Dec-08 13:38:46
ARG, HA___, MA___, MN___, LA___, LN___, CUR___, FLU___
NUM, CUR___, FLU___
DUM, MAG___, TM___, TL___

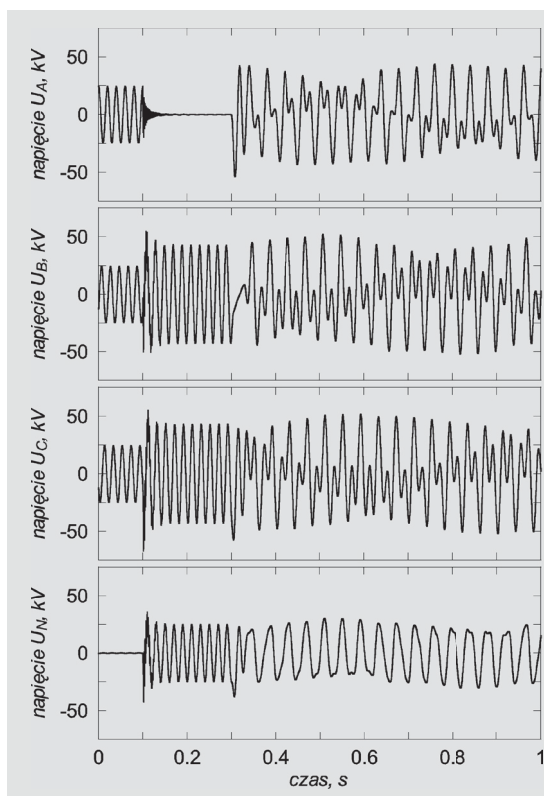
```

Rys. 7. Zawartość pliku vt2\_mod.lib dołączonego w oknie dialogowym z rysunku 6b

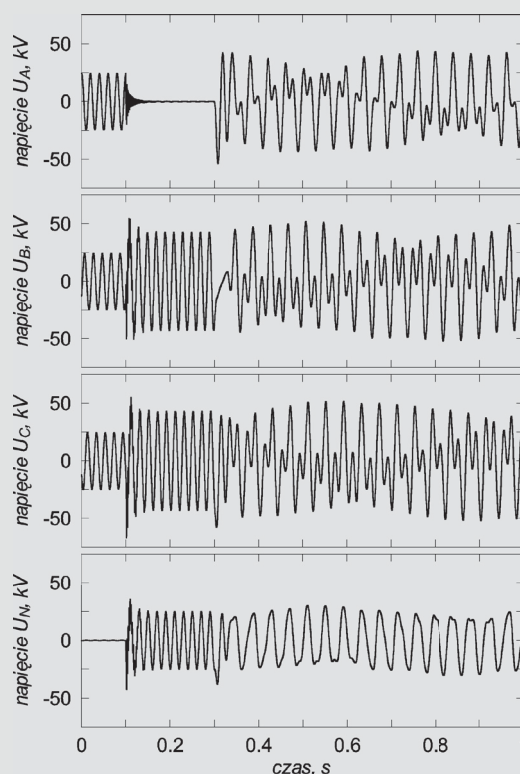


Analiza potwierdziła możliwość wzbudzenia ferorezonansu związaną z wyłączeniem doziemień. Jednym z takich zdarzeń było doziemienie linii kablowej Z2. Na rys. 8 przedstawiono przykładowe przebiegi napięć fazowych  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  oraz napięcia punktu neutralnego  $U_N$  w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z, otrzymane przy założeniu doziemienia fazy A linii Z2 w chwili  $t = 0,1$  s, a następnie wyłączenia doziemionej linii w chwili  $t = 0,3$  s. Wyłączeniu temu towarzyszy wzbudzenie ferorezonansu, który jest powodem drgań zarówno napięć fazowych, jak i napięcia punktu neutralnego, stanowiącego jednocześnie składową zerową  $U_0$  napięć fazowych.

Ponieważ funkcja czułego zabezpieczenia ziemnozwarciowego zainstalowanych zabezpieczeń realizowana jest w wyniku ich pobudzenia przez napięcie składowej zerowej, to powstające w układzie drgania ferorezonansowe są przyczyną zbędnych działań EAZ, w efekcie których następuje odłączenie nieuszkodzonej linii T2.



Rys. 8. Przebiegi napięć fazowych  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  oraz napięcia punktu neutralnego  $U_N$  w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z



Rys. 9. Przebiegi napięć fazowych  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  oraz napięcia punktu neutralnego  $U_N$  w rozdzielni 30 kV stacji GPZ-Z w warunkach tłumienia ferorezonansu

Analiza pozwoliła wyznaczyć potencjalnie możliwe stany zakłócenia (doziemienia) oraz stany normalnych łączy, których zaistnienie może prowadzić do zjawiska ferorezonansu, a więc w konsekwencji do nieprawidłowego działania zabezpieczeń. Zaproponowano również rozwiązania zmierzające do tłumienia ferorezonansu w analizowanym układzie 30 kV, które mogłyby poprawić działanie zabezpieczeń. Jednym z nich jest dołączanie do obwodu otwartego trójkąta, który tworzą połączone szeregowo uzwojenia dodatkowe przekładników (rys. 6a) rezystora tłumiącego. Przykładowe wyniki symulacji dla rezystora o oporności  $10 \Omega$  (załączonego w czasie 0,6 s, a następnie odłączonego w czasie 0,9 s), potwierdzają efektywność takiego rozwiązania (rys. 9).

Innym analizowanym rozwiązaniem było zastosowanie urządzenia o nazwie VTGuard firmy ABB, którego rezystancja dostosowuje się aktywnie do warunków pracy [7]. W przypadku występowania składowej zerowej o niewielkiej wartości, wynikającej z dopuszczalnych asymetrii w warunkach normalnej pracy, urządzenie reprezentuje bardzo dużą rezystancję i nie powoduje obciążenia cieplnego zarówno przekładników, jak i samego urządzenia. W przypadku pojawienia się składowej zerowej na poziomie przewyższającym strefę nieczułości urządzenia, VTGuard staje się rezystorem o wartości rezystancji, skutecznie wytłumiającej stan ferorezonansowy, co zostało potwierdzone zarówno metodą symulacji komputerowych, jak i eksperymentalnie. Jeśli składowa zerowa obecna w obwodzie otwartego trójkąta utrzymuje się przez czas dłuższy, co może wynikać np. z dużej asymetrii w sieci, spowodowanej np. zwarcie doziemnym, urządzenie samoczynnie przechodzi w stan wysokoomowy, nie stanowiąc zbędnego obciążenia dla przekładników. Po ustąpieniu przyczyny asymetrii urządzenie samoczynnie powraca do stanu początkowego.



## 4. PODSUMOWANIE

Zapewnienie odpowiedniej jakości dostawy energii elektrycznej uwarunkowane jest opanowaniem wielu zagadnień o charakterze technicznym. W obszar tych zagadnień wpisuje się problematyka zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach rozdzielczych średnich napięć.

W artykule przedstawiono dwa udokumentowane przez służby eksploatacji przypadki nieprawidłowego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Jednak wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy mają nie tylko charakter indywidualny, specyficzny dla rozważanego zdarzenia zakłóceniewego, ale również charakter ogólny dla zabezpieczeń ziemnozwarciowych zainstalowanych w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć.

Niezależnie od struktury sieci oraz sposobu pracy punktu neutralnego, w sytuacjach doziemień wysokooporowych, takich jakie przedstawiono w artykule, nie jest praktycznie możliwe prawidłowe i niezawodne działanie obecnie stosowanych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, a tym samym wykrycie zaistniałego w tych warunkach doziemienia. Wniosek ten musi skłaniać do poszukiwania efektywnych i uzasadnionych pod względem ekonomicznym rozwiązań technicznych tego problemu.

Specyfika sieci rozdzielczych średniego napięcia, wynikająca z ich eksploatacji przy nieskutecznie uzziemionym punkcie neutralnym, implikuje również możliwość powstawania ferorezonansu, który może istotnie wpływać na działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Pomimo że pierwsze publikacje dotyczące ferorezonansu ukazały się na początku wieku XX, to do dzisiaj nie sprecyzowano efektywnych w praktyce kryteriów jego występowania, jak i sposobów przeciwdziałania. Wśród prac badawczych prowadzonych w tym obszarze wyróżnić można takie grupy zagadnień, jak analiza stanów ferorezonansowych (w tym od lat 90. ubiegłego wieku z wykorzystaniem nieliniowej dynamiki i teorii chaosu), rozpoznanie skutków ferorezonansu w układach elektroenergetycznych czy przeciwdziałanie powstawaniu ferorezonansu. Istotnym elementem tych badań są modele komputerowe układów elektroenergetycznych i zachodzących w nich zjawisk dynamicznych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe, Poznań, Komitet Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2007.
2. Nowak W., Moskwa S., Tarko R., Analiza warunków działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w przypadku wysokorezystancyjnych zwarć z ziemią. Materiały Konferencji Naukowej nt. Wysokorezystancyjne zwarcia z ziemią w sieciach napowietrznych średniego napięcia, SEP, Tarnów, 3 grudnia 2008.
3. Nowak W., Tarko R., Moskwa S., Gawryał A., Cich W., Analiza warunków działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieci średniego napięcia, *Archiwum Energetyki*, tom XXXIX, 2009, nr 1, s. 135–145.
4. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen 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.
5. Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Nowak W., Preventing the risk of ferroresonance involving Voltage Transformers in MV ungrounded networks, 3rd International Symposium on Modern Electric Power (MEPS'06) under auspices of IEEE, Poland, Wrocław, September 6–8, 2006, pp. 398–401.
6. 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.