

## Analiza efektywności tłumienia ferorezonansu w sieciach elektroenergetycznych SN – studium przypadku

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono rezultaty badań efektywności tłumienia ferorezonansu w rozdzielczej sieci elektroenergetycznej średniego napięcia. Przedstawione badania potwierdziły efektywność dostępnych komercyjnie urządzeń tłumiących, jednak przy prawidłowej koordynacji ich działania z elektroenergetyczną automatyką zabezpieczeniową. Pokazały również, że znajomość algorytmów działania układów sterujących urządzeń tłumiących jest istotna dla uzyskania ich efektywnego działania.

**Abstract.** This article presents the results of a study of the effectiveness of ferroresonance damping in a medium-voltage distribution power network. The presented studies have confirmed the effectiveness of commercially available damping devices, but with proper coordination of their operation with the electrical power protection. They also showed that knowledge of the control algorithms of the damping devices is important to achieve their effective operation. (**Analysis of ferroresonance attenuation efficiency in MV power networks - a case study.**)

**Słowa kluczowe:** system elektroenergetyczny, zwarcia doziemne, przebiecia dorywcze, koordynacja izolacji.

**Keywords:** power systems, line-to-earth faults, temporary overvoltages, insulation coordination.

### Wstęp

Ferorezonans jest zjawiskiem, które może wystąpić w obwodach elektrycznych zawierających pojemności i nieliniowe indukcyjności [1]. W sieciach elektroenergetycznych są to indukcyjności urządzeń zawierających w swojej budowie rdzenie ferromagnetyczne, na przykład: przekładniki napięciowe, dławiki czy transformatory energetyczne. Ferorezonans jest groźnym zakłóceniem w sieciach elektroenergetycznych [2]. Wynika to z nasycania rdzeni ferromagnetycznych urządzeń, które może prowadzić do znacznego przetężenia prądowego w ich uzwojeniach (przede wszystkim przekładników napięciowych), a w konsekwencji do termicznego uszkodzenia ich izolacji [3]. Innym skutkiem ferorezonansu są przebiecia dorywcze oraz odkształcenie napięć fazowych [4]. Ponadto ferorezonans może być przyczyną błędnego działania zabezpieczeń [5].

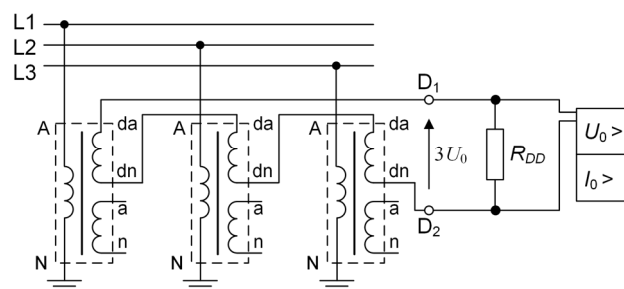
Pomimo, że pierwsze publikacje dotyczące ferorezonansu ukazywały się już na początku ubiegłego wieku, to do dzisiaj nie sprecyzowano jednoznacznych kryteriów występowania, jak i uniwersalnych sposobów przeciwdziałania ferorezonansowi [6]. Wynika to z indywidualnego charakteru tego zjawiska, co skutkuje koniecznością indywidualnej analizy możliwości wystąpienia ferorezonansu w danym układzie pracy sieci.

Najczęściej stosowaną metodą eliminacji ferorezonansu jest zastosowanie rezystorów tłumiących (rys. 1). W sieciach elektroenergetycznych z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym rezystor tłumiący  $R_{DD}$  włączany jest w obwód otwartego trójkąta uzwojeń dodatkowych przekładników napięciowych, służącego do pomiaru składowej zerowej  $3U_0$  napięć fazowych w sieci [7]. Napięcie  $3U_0$  stanowi jeden z sygnałów wejściowych dla zabezpieczenia ziemnozwarciowego. W stanie normalnej pracy sieci wartość  $3U_0 \approx 0$  V, natomiast w stanach zakłóceń, takich jak zwarcia doziemne czy ferorezonans wartość ta wzrasta. Jeżeli przyczyną tego wzrostu było zwarcie to powinno ono być wyeliminowane przez zabezpieczenie, a jeżeli przyczyną był ferorezonans, to powinien on być stłumiony przez rezystor  $R_{DD}$  o odpowiednio dobranej wartości.

Wy tłumienie ferorezonansu możliwe jest dla wartości rezystancji  $R_{DD} \leq R_{DDmax}$ , przy czym proces ten przebiega tym szybciej, im mniejsza jest wartość  $R_{DD}$ . Wartość  $R_{DDmax}$  zależna jest od parametrów sieci i przekładników. Z drugiej

strony, rezystancja ta powinna spełnić warunek  $R_{DD} \geq R_{DDmin}$ , gdzie  $R_{DDmin}$  jest minimalną wartością rezystancji wynikającą z dopuszczalnej obciążalności uzwojeń przekładników i ilości energii wydzielanej w rezystorze. W celu zapewnienia jak najefektywniejszego tłumienia ferorezonansu pożądane jest stosowanie rezystorów o jak najmniejszych wartościach (nawet rzędu kilku  $\Omega$ ), jednak nie mogą być one przyłączone do przekładników w sposób trwały. Z powyższych względów zastosowanie znajdują zaawansowane urządzenia tłumiące, których działanie dostosowywane jest – za pomocą układu sterującego – do stanu pracy sieci [8]. Pozwala to, w czasie wystąpienia ferorezonansu, samoczynnie zmieniać wartość wypadkową rezystancji układu z wysokiego poziomu na niski, skuteczny do wytłumienia ferorezonansu. W stanie normalnej pracy sieci urządzenie ma znaczną rezystancję, która nie stwarza dużego obciążenia dla przekładników.

Celem artykułu jest analiza możliwości



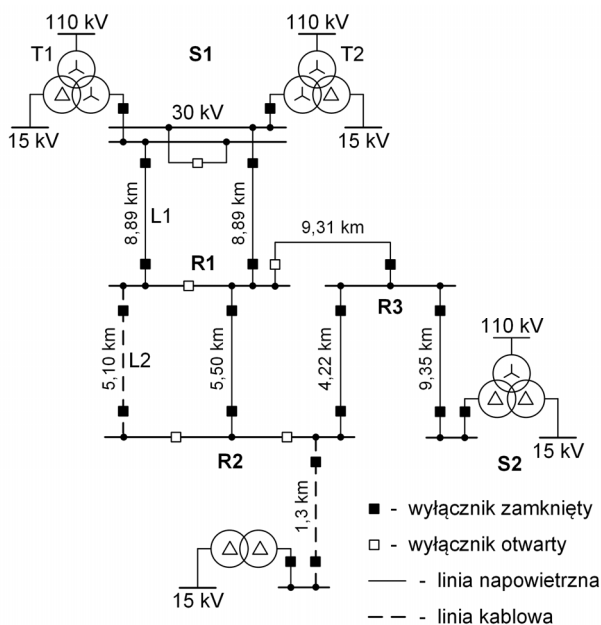
Rys.1. Układ do pomiaru składowej zerowej napięć fazowych sieci: A-N – uzwojenia pierwotne przekładników napięciowych, a-n – uzwojenia wtórne, da-dn – uzwojenia dodatkowe,  $R_{DD}$  – rezystor tłumiący ferorezonans, ( $U_0 >$ ,  $I_0 >$ ) – zabezpieczenie ziemnozwarciowe,  $3U_0$  – napięcie na otwartym trójkącie połączonych uzwojeń dodatkowych

występowania ferorezonansu w sieci o napięciu 30 kV i ocena efektywności jego tłumienia. Przedstawiono opracowany model sieci wraz z modelem urządzenia tłumiącego, który zastosowano do oceny efektywności jego działania.

### Obiekt badań i jego model

Przedmiotem rozważań jest sieć elektroenergetyczna o napięciu 30 kV z izolowanym punktem neutralnym, której

schemat przedstawiono na rysunku 2. Sieć ta zasilana jest ze stacji S1 i S2 o górnym napięciu 110 kV, a jej strukturę tworzą linie napowietrzne i kablowe łączące stacje zasilające S1, S2 z rozdzielni R1, R2 i R3.



Rys.2. Schemat analizowanej sieci 30 kV

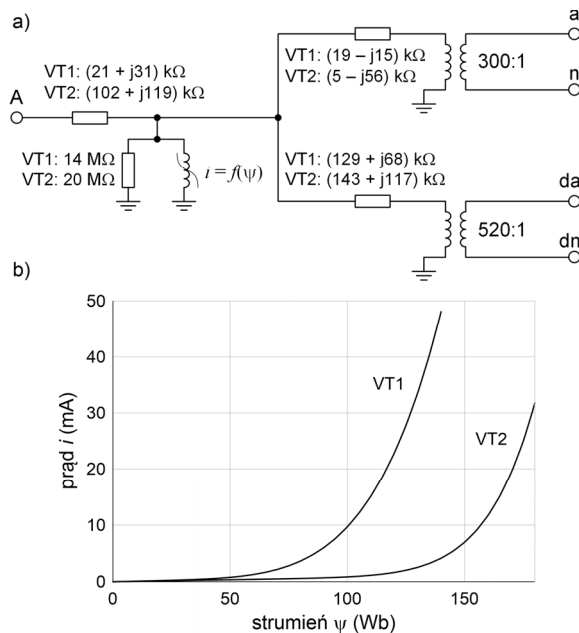
W wydzielonej części sieci, którą stanowią transformator T1, linia napowietrzna L1 i linia kablowa L2 wystąpiło doziemienie linii kablowej, które zostało wyeliminowane przez zabezpieczenie ziemnozwarciowe w rozdzielni R1. Po wyłączeniu uszkodzonej linii L2, w stacji S1 zaobserwowano znaczny i utrzymujący się trwale wzrost napięć fazowych do wartości szczytowej około 50 kV. Zarejestrowane podczas tego zakłócenia przebiegi wskazywały, że jego przyczyną mogło być zjawisko ferorezonansu.

Dla potwierdzenia powyższej hipotezy opracowano model analizowanej sieci w programie EMT-ATP. Główny nacisk położono na dokładne odwzorowanie krytycznych ze względu na omawiane zjawisko elementów systemu którymi są przekładniki napięciowe w stacji S1 (VT1) oraz w rozdzielni R1 (VT2). Przekładniki te zamodelowane zostały przy wykorzystaniu parametrów otrzymanych z wcześniej wykonanych na nich badaniach. Wynikiem tych prac jest przedstawiony na rysunku 3 schemat zastępczy przekładników z podanymi wartościami parametrów które przyjęto w symulacji. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunku 4. Przedstawiono na nim przebiegi napięć i prądów wywołane wystąpieniem doziemienia w linii L2 (czas symulacji 0,1 s), a następnie jego wyłączeniem (czas symulacji 0,6 s) w polu linii L2 w rozdzielni R1, potwierdzają powstanie ferorezonansu. Pojawienie się zjawiska ferorezonansu skutkuje:

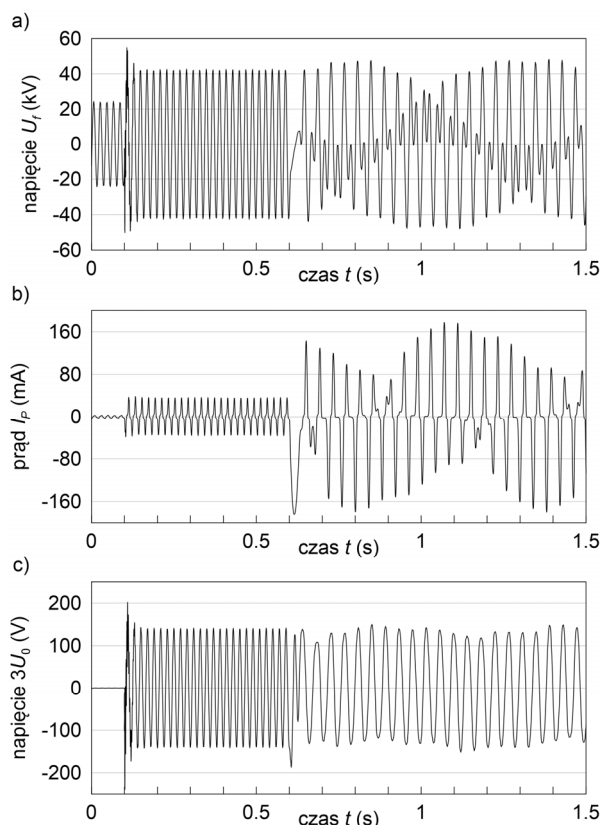
- odkształceniem i wzrostem wartości napięć fazowych  $U_f$ , stanowiących przepięcia dorywcze o wartościach szczytowych sięgających około 50 kV (rys. 4a),
- odkształceniem i wzrostem wartości prądów  $I_p$  w uzwojeniach pierwotnych przekładników fazowych, stanowiących przetężenia prądowe o wartościach szczytowych sięgających około 180 mA (rys. 4b),
- utrzymywaniem się napięcia  $3U_0$  stanowiące sygnał zabezpieczeń ziemnozwarciowych, co może być przyczyną ich błędnego działania (rys. 4c).

Przedstawione powyżej wyniki badań symulacyjnych potwierdzają że przebiegi zakłócenia zarejestrowane w

opisywanej sieci elektroenergetycznej spowodowane były wystąpieniem zjawiska ferorezonansu.



Rys.3. Schemat zastępczy przekładników VT1, VT2 (a) oraz charakterystyki  $i = f(\psi)$  indukcyjności nieliniowych (b)

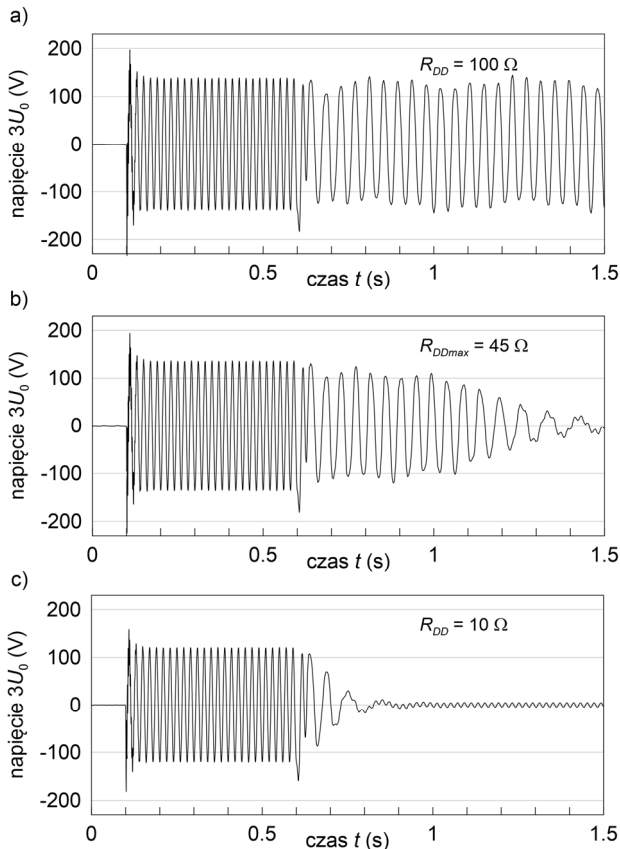


Rys.4. Przebiegi napięć i prądów wywołane doziemieniem ( $t = 0,1$  s) w układzie z rysunku 1 i jego wyłączeniem ( $t = 0,6$  s): a) napięcie fazowe  $U_f$ , b) prąd  $I_p$  w uzwojeniu pierwotnym przekładników, c) potrójona wartość napięcia  $3U_0$  składowej zerowej napięć fazowych

Opracowany model został również użyty do badań możliwości eliminacji ferorezonansu poprzez zastosowanie rezystora tłumiącego. Wyniki badań efektywności takiego rozwiązania przedstawiono w rozdziale kolejnym.

### Analiza efektywności tłumienia ferorezonansu

Na rysunkach 5a÷c przedstawiono wybrane przebiegi napięć  $3U_0$  podczas rozpatrywanego zakłócenia, dla wartości rezystora  $R_{DD}$  z zakresu  $5\div 100\ \Omega$ , przyłączonego do przekładników VT1 w stacji S1. Przebiegów te pokazują, że tłumienie ferorezonansu występuje dla  $R_{DD} \leq 45\ \Omega$  (rys. 5b) i jest tym szybsze im wartość ta jest mniejsza. Zależność czasu  $t_{DD}$  tłumienia ferorezonansu od wartości  $R_{DD}$  przedstawiono na rysunku 6a.

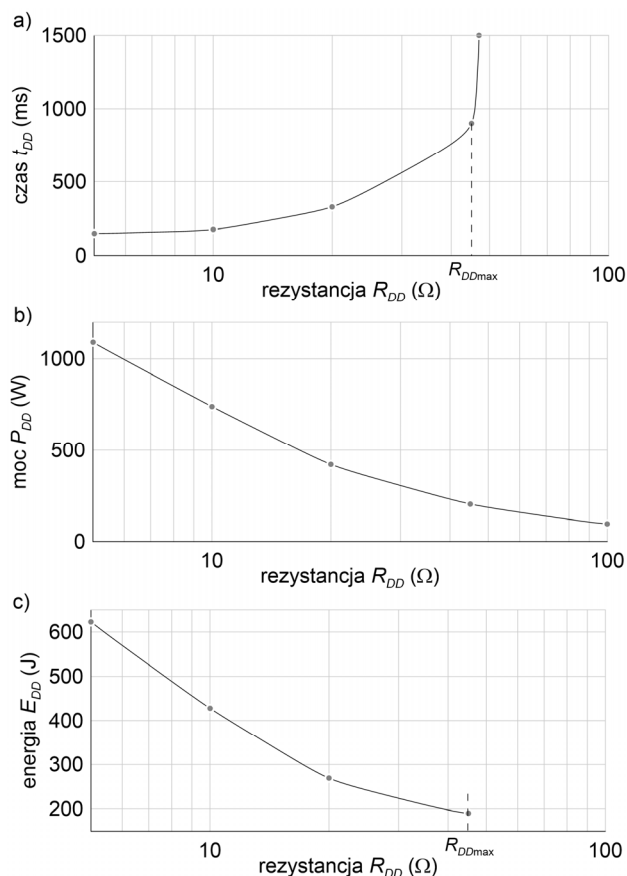


Rys.5. Przebiegi napięć  $3U_0$  składowej zerowej napięć fazowych dla wybranych wartości rezystancji  $R_{DD}$ : a)  $100\ \Omega$ , b)  $45\ \Omega$ , c)  $10\ \Omega$

Na rysunku 6b przedstawiono wartości mocy  $P_{DD}$  wydzielanej w rezystorze tłumiącym, a na rysunku 6c wartości rozpraszanej energii dla założonego czasu trwania zwarcia  $0,5\ s$ . Ze względu na wielkość tej energii – tym większej, im mniejsza jest wartość rezystancji  $R_{DD}$  – rezystor tłumiący nie może być przyłączony w sposób trwały do zacisków przekładników. W dostępnych komercyjnie urządzeniach, załączenie rezystora następuje po przekroczeniu wartości progowej napięcia  $U_{tr}$  z opóźnieniem  $t_d$ , na czas wynikający z mocy znamionowej zastosowanego rezystora. Takie rozwiązanie urządzenia tłumiącego pozwala na jego miniaturyzację i instalację w obwodach wtórnych rozdzielnic SN na listwie DIN 35. Typowe wartości napięcia  $U_{tr}$  wynoszą  $20\div 30\ V$ , a czasów  $t_d$  wynoszą  $0\div 5\ s$ . Metody ograniczania wydzielanej w tych urządzeniach energii realizowane są w różny sposób [9].

Do badań przyjęto urządzenie tłumiące, którego model przedstawiono na rysunku 7. Model składa się z rezystora  $R_{DD}$  o rezystancji  $6,6\ \Omega$  oraz połączonych z nim szeregowo dwóch wyłączników Sw1 (normalnie otwarty) i Sw2 (normalnie zamknięty). Wyłącznik Sw1 jest zamykany przez zaimplementowany w programie ATPDraw blok o kodzie 59, który stanowi model przekaźnika nadprądowego zwłocznego o nastawach: napięcie progowe  $U_{tr}$  i zwłoka czasowa  $t_d$ . Sygnałem wejściowym jest wartość skuteczna napięcia pomiędzy zaciskami D1-D2 układu otwartego

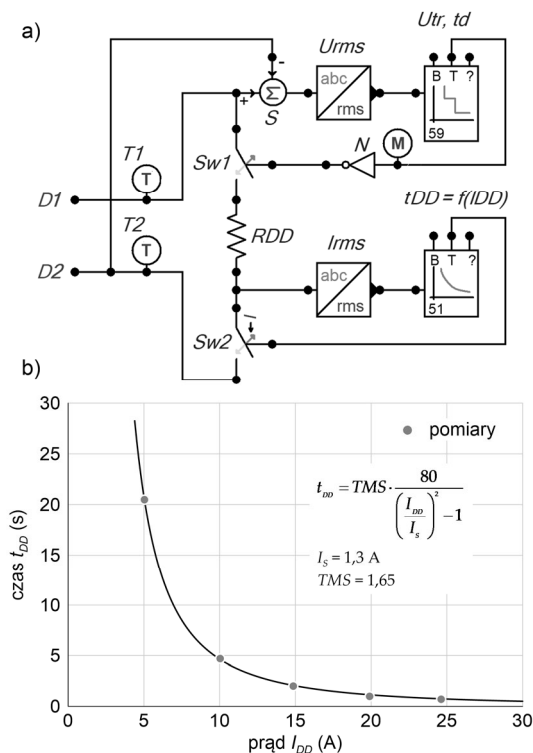
trójkąta przekładników napięciowych. Natomiast wyłącznik Sw2 jest otwierany przez blok o kodzie 51, który jest modelem przekaźnika nadprądowego zwłocznego o charakterystyce typu EI (Extremely Inverse) według normy IEC 60255.



Rys.6. Zależności czasu  $t_{DD}$  tłumienia ferorezonansu (a), mocy  $P_{DD}$  wydzielanej (b) i energii  $E_{DD}$  rozpraszanej (c) w rezystorze tłumiącym od wartości rezystancji  $R_{DD}$

Na rysunku 8a przedstawiono przebieg napięcia  $3U_0$  przy zastosowaniu powyższego urządzenia tłumiącego i założeniu natychmiastowego jego działania (brak zwłoki czasowej  $t_d = 0$ ). Relatywnie mała wartość  $R_{DD}$  wynosząca  $6,6\ \Omega$  powoduje prawie natychmiastowe wytłumienie ferorezonansu. Tym samym można uznać, że urządzenie spełniać będzie stawiane mu zadanie, ale pod warunkiem, że czas zwarcia  $t_F$  będzie krótszy niż czas  $t_{DD}$  działania urządzenia. Jeżeli nie będzie to spełnione, to urządzenie wyłączy się podczas trwania zwarcia, co będzie skutkowało wzbudzeniem ferorezonansu, tak jak przedstawiono na rysunku 8b dla czasu trwania zwarcia  $t_F = 1\ s$ . Z tego powodu, w praktycznych sytuacjach koordynacji współdziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych i urządzeń tłumiących, celowe jest wprowadzenie opóźnienia działania  $t_d > 0$ , co ilustruje rysunek 8c dla  $t_F = 1\ s$  i opóźnienia  $t_d = 0,5\ s$  załączania rezystora tłumiącego. Przy takiej koordynacji nastaw urządzeń zabezpieczających osiągnięte jest efektywne wytłumienie ferorezonansu.

Należy jednak nadmienić, że nadmierna miniaturyzacja urządzeń tłumiących skutkuje ograniczonymi możliwościami dyssypacji energii w rezystorze tłumiącym, a tym samym możliwością osiągnięcia temperatury granicznej, nawet pomimo ograniczania czasu przepływu prądu  $I_{DD}$ . W efekcie urządzenie może nie być w stanie stłumić ferorezonansu np. w przypadku wielokrotnych doziemień [9].



Rys. 7. Model w programie ATPDraw urządzenia do tłumienia ferorezonansu [9]: a) schemat, b) charakterystyki sterowania wyłącznikiem Sw2; 59 – blok przełącznika nadnapięciowego zwłocznego; 51 – blok przełącznika nadprądowego zwłocznego o charakterystyce typu EI; T1, T2 – próbniki do konwersji napięć węzłowych na sygnały TACS (Transient Analysis Control Systems); S – sumator; abc/rms – bloki obliczające wartości skuteczne; M – próbnik do konwersji sygnału TACS na sygnał języka MODELS; N – negator;  $t_{DD}$  – czas otwarcia;  $I_{DD}$  – prąd w rezystorze  $R_{DD}$ ;  $I_s$ ,  $TMS$  – nastawy bloku 51; D1-D2 – zaciski układu otwartego trójkąta przekładników napięciowych

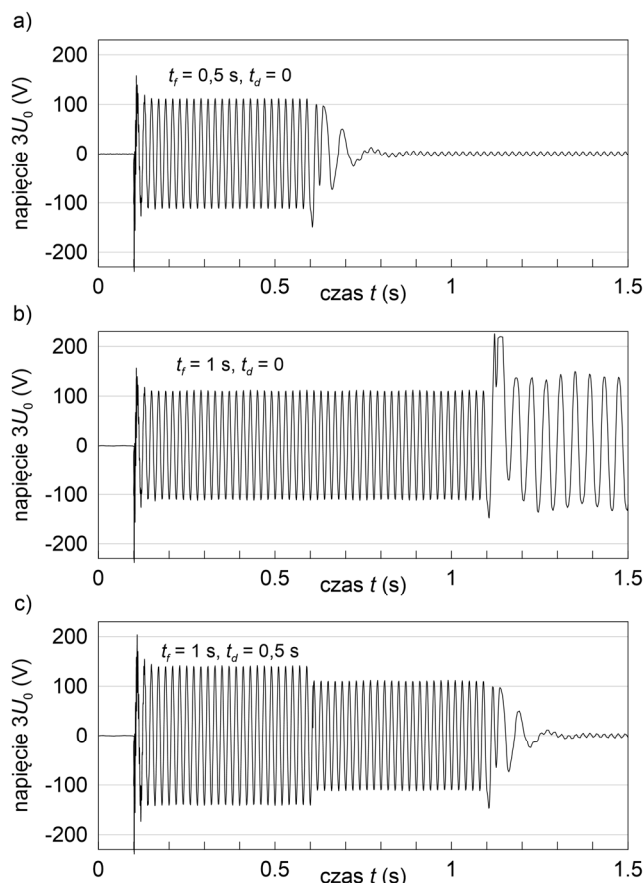
## Posumowanie

Ferorezonans jest groźnym zakłóceniem w sieciach elektroenergetycznych, dlatego też konieczne jest stosowanie środków i sposobów zapobiegania oraz eliminacji tego zjawiska. Najpowszechniejszą metodą jest zastosowanie rezystorów tłumiących, przyłączanych do uzwojeń wtórnych przekładników napięciowych. W celu zapewnienia efektywnego tłumienia ferorezonansu pożądane jest stosowanie rezystorów o jak najmniejszych wartościach, nawet rzędu kilku  $\Omega$ . Z tego względu, w praktyce zastosowanie znajdują zaawansowane urządzenie tłumiące, których działanie dostosowywane jest do stanu pracy sieci. Ich efektywność będzie zapewniona pod warunkiem znajomości algorytmu jego działania, a także koordynacji ich parametrów z nastawami elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

**Autorzy:** dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH, AGH w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl; dr inż. Rafał Tarko, AGH w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: rtarko@agh.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] Barbisio E., Bottauscio O., Chiampi M., Crotti G., Giordano D., Parameters Affecting Ferroresonance in LCR Electric Circuits, *IEEE Trans. Magn.*, 44 (2008), 870-873, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.916314>
- [2] International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Resonance and Ferroresonance in Power Networks, *Technical Brochure*, 569 (2014)



Rys. 8. Przebiegi napięć  $3U_0$  składowej zerowej napięć fazowych dla różnych wartości czasu  $t_f$  trwania zwarcia i czasu  $t_d$  opóźnienia działania urządzenia tłumiącego: a)  $t_f = 0,5 \text{ s}$ ,  $t_d = 0$ , b)  $t_f = 1 \text{ s}$ ,  $t_d = 0$ , c)  $t_f = 1 \text{ s}$ ,  $t_d = 0,5 \text{ s}$

- [3] Mikhak-Beyranvand M., Faiz J., Rezaei-Zare A., Rezaeealam B., Electromagnetic and thermal behavior of a single-phase transformer during ferroresonance considering hysteresis model of core, *Electrical Power & Energy Systems*, 121 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106078>
- [4] Pordanjani I. R., Liang X., Wang Y., Schneider A., A. Single-Phase Ferroresonance in an Ungrounded System During System Energization, *IEEE Trans. Ind Appl.*, 57 (2021), 3530-3537, <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3079878>
- [5] Rezaei S., Impact of Ferroresonance on protective relays in Manitoba Hydro 230 kV electrical network, *Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, Italy, (2015), 1694-1699, <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165427>
- [6] Heidary A., Rouzbehi K., Radmanesh H., Pou J., Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device, *IEEE Trans. Power Del.*, 35 (2020), 2731-2733, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3005321>
- [7] Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Luto M., Nowak W., Preiss O., Ironing out resonance Ferroresonance prevention in MV voltage transformers, *ABB Review*, 4 (2005), 870-873, 42-46, <https://library.e.abb.com/public/6ca5a3f4bb0ee0ecc1257beb002ba3e3/VT%20Guard-Ironing%20out%20resonance.pdf>
- [8] Piasecki W., Florkowski M., Fulczyk M., Mahonen P., Nowak W., Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks, *IEEE Trans. Power Del.*, 22 (2007), 2362-2369, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905383>
- [9] Tarko R., Nowak W., Gajdzica J., Czapp S., Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations, *Energies* (17) 2024-2423, <https://doi.org/10.3390/en17102423>