

## WPLYW ZJAWISK FERROREZONANSOWYCH NA PRACĘ BEZPIECZNIKA PRZEKŁADNIKA ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Lukasz TLUSTOCHOWICZ

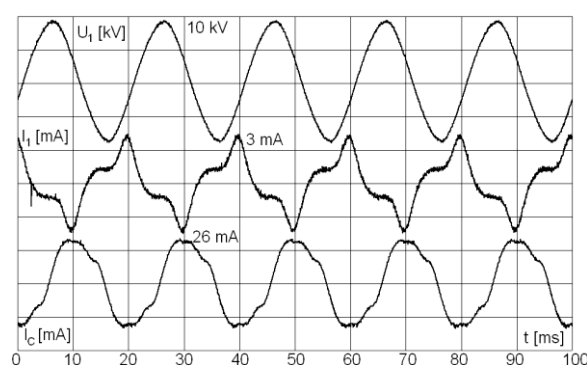
Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel: 347-20-36, fax: 347-21-36, e-mail: l.tlustochowicz@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Bezpieczniki przekładnikowe stanowią zabezpieczenia obwodów uzwojeń pierwotnych przekładników napięciowych od skutków zwarć. W praktyce eksploatacji sieci elektroenergetycznych średnich napięć z przekładnikami obserwowane są przypadki zadziałań bezpieczników przekładnikowych w następstwie zjawisk ferrozonansowych. Przyczyną zjawisk ferrozonansowych w przekładniku jest najczęściej nagły wzrost napięcia na jego uzwojeniu pierwotnym, wywołany przez przepięcia łączeniowe lub atmosferyczne. Wobec zmniejszenia się w tych warunkach indukcyjności magnesowania przekładnika może wystąpić sytuacja, w której indukcyjność ta z pojemnością doziemną systemu elektroenergetycznego stworzą obwód rezonansowy. W większości przypadków skutkuje to niekontrolowanym wzrostem prądu w obwodzie pierwotnym przekładnika, czego konsekwencją może być zadziałanie bezpiecznika przekładnika. Wieloletnia eksploatacja przekładników w systemach elektroenergetycznych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym potwierdza przypadki takich zdarzeń.

**Słowa kluczowe:** ferrozonans, bezpiecznik przekładnika, przekładnik napięciowy

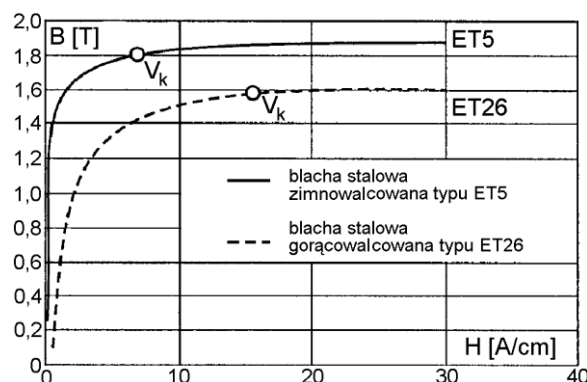
### 1. WPROWADZENIE

Obwody pierwotne przekładników napięciowych są zabezpieczone od skutków zwarć bezpiecznikami przekładnikowymi. Prądy magnesowania w przekładnikach średniego napięcia w warunkach roboczych (przy zasilaniu uzwojenia pierwotnego przekładnika napięciem znamionowym) nie przekraczają kilku miliamperów. Wartość ta zależy m. in. od własności magnetycznych zastosowanego na rdzeń przekładnika materiału. Na rysunku 1 pokazano zarejestrowane przebiegi prądu  $I_1$  w uzwojeniu pierwotnym przekładnika średniego napięcia typu UMZ10-1, prądu  $I_C$  w pojemności rezonansowej oraz napięcia  $U_1$  na uzwojeniu pierwotnym przekładnika w warunkach pracy normalnej urządzenia. Pomierzona wartość skuteczna prądu magnesowania w/w przekładnika wynosi 1,39 mA. Rdzeń przekładnika wykonano z blachy stalowej zimnowalcowanej.



Rys. 1. Zarejestrowane przebiegi prądu  $I_1$  w uzwojeniu pierwotnym przekładnika średniego napięcia typu UMZ10-1 (2 mA/dz.), prądu  $I_C$  w pojemności rezonansowej (20 mA/dz.) oraz napięcia  $U_1$  na uzwojeniu pierwotnym przekładnika (5 kV/dz.) przy zasilaniu uzwojenia pierwotnego napięciem znamionowym  $11000/\sqrt{3}$  V

Z publikacji [3] wynika, że prądy magnesowania przekładników średniego napięcia o rdzeniach z blach stalowych gorącowalcowanych są blisko trzy razy większe od prądów magnesowania przekładników, których rdzenie wykonano z blach stalowych zimnowalcowanych i wynoszą średnio 3,5 mA. Na rysunku 2 pokazano przykładowe charakterystyki magnesowania przekładników napięciowych o różnych materiałach magnetycznych rdzenia.



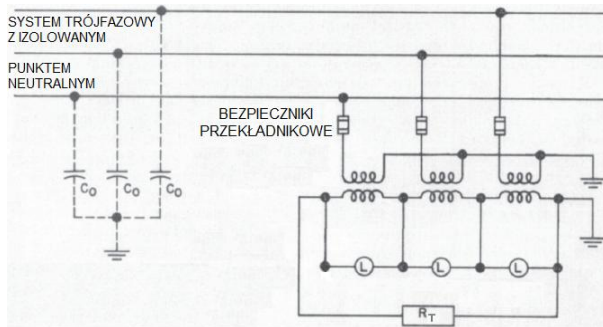
Rys. 2. Charakterystyki magnesowania przekładników napięciowych o różnych materiałach rdzenia [3];  $B$ - indukcja magnetyczna w rdzeniu,  $H$ - natężenie pola magnetycznego,  $V_k$ - napięcie kolano- we przekładnika

Ponieważ w systemach elektroenergetycznych średnich napięć pracują przekładniki napięciowe, których rdzenie wykonano z różnych materiałów magnetycznych, dlatego wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika i w bezpieczniku przekładnikowym w warunkach ferorezonansu może być zupełnie inny. Różne są wartości indukcyjności magnesowania  $L_{\mu}$  w stanie nasycenia obwodu magnetycznego stosowanych w systemie przekładników. Wobec tego drgania ferorezonansowe mogą występować dla różnych wartości pojemności doziemnej systemu elektroenergetycznego  $C_0$ . Różny jest ich charakter oraz intensywność. Z publikacji [3] wynika, że zjawiska ferorezonansowe mogą występować w systemie elektroenergetycznym średniego napięcia z przekładnikami, w którym pojemność doziemna  $C_0$  zawiera się w granicach od pojedynczych do około 40 nF na fazę.

## 2. EKSPLOATACJA PRZEKŁADNIKÓW NAPIĘCIOWYCH W SIECIACH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Problematykę związaną z eksploatacją w sieciach elektroenergetycznych średnich napięć przekładników napięciowych, przypadki występowania zjawisk ferorezonansowych oraz zadziałań bezpieczników przekładnikowych opisano przed laty w pracach Wellera [1] oraz Karlicka i Taylora [2]. W pracy [2] badania eksperymentalne rozszerzono o badania symulacyjne. Dzięki temu stworzono obszerną bazę danych dotyczącą warunków pracy przekładników napięciowych w sieci elektroenergetycznej średniego napięcia. Wyniki z tego typu badań stają się źródłem cennych informacji dla projektantów aparatury elektroenergetycznej oraz obecnych jej użytkowników.

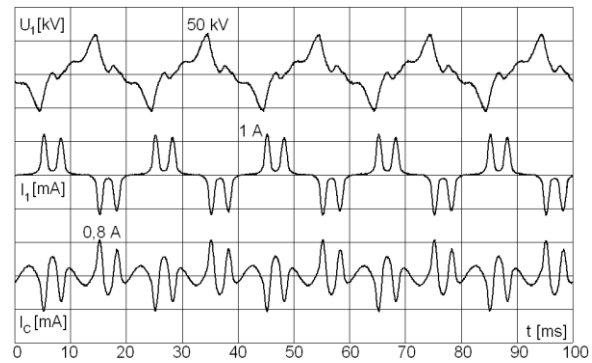
Typowy układ połączeń przekładników średniego napięcia zabezpieczonych bezpiecznikami w trójfazowej sieci elektroenergetycznej średniego napięcia z izolowanym punktem neutralnym pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Fragment systemu elektroenergetycznego średniego napięcia z przekładnikami napięciowymi [2];  $C_0$ - pojemność doziemna systemu elektroenergetycznego,  $R_T$ - oporność tłumiąca w obwodzie uzwojenia napięcia resztkowego przekładników, L- lampki kontrolne napięcia w obwodzie wtórnym przekładników

Z analizy literatury krajowej [3] i zagranicznej [1, 2] dotyczącej eksploatacji w sieciach elektroenergetycznych średnich napięć przekładników napięciowych wynika, że częstą przyczyną ich uszkodzeń są zjawiska ferorezonansowe. Powodują one powstanie w układzie z przekładnikiem stanu przejściowego, który objawia się nagłym wzrostem prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika. Zjawisko to nazwano tzw. skokiem ferorezonansowym. Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane przebiegi prądu  $I_1$  w uzwojeniu pierwotnym przekładnika, prądu  $I_C$  w pojemności rezonan-

sowej oraz przebieg napięcia  $U_1$  na uzwojeniu pierwotnym przekładnika w warunkach ferorezonansu.



Rys. 4. Zarejestrowane przebiegi prądu  $I_1$  w uzwojeniu pierwotnym przekładnika średniego napięcia (1 A/dz.), prądu  $I_C$  w pojemności rezonanowej (0,8 A/dz.) oraz napięcia  $U_1$  na uzwojeniu pierwotnym w warunkach ferorezonansu (50 kV/dz.)

Wartość skuteczna prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika często przekracza wartość setek miliamperów, co przy dłuższym utrzymywaniu się zaburzenia może prowadzić do przekroczenia wytrzymałości cieplnej uzwojenia pierwotnego. Następuje wówczas uszkodzenie pracującego urządzenia. Znane są z literatury [3] przypadki eksplozji przekładników napięciowych, zainstalowanych w nowo uruchamianych rozdzielniach średniego napięcia w następstwie zjawisk ferorezonansowych.

## 3. BEZPIECZNIKI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA PRZEKŁADNIKÓW NAPIĘCIOWYCH

Bezpieczniki przekładnikowe stanowią specjalną grupę aparatów elektrycznych, których zadaniem jest ochrona uzwojeń pierwotnych przekładników napięciowych przed skutkami zwarć. Prądy znamionowe stosowanych bezpieczników, w zależności od typu przekładnika i wielkości napięcia pracy zawierają się w granicach od 0,25 A do 5 A. Ważnym parametrem użytkowym bezpiecznika przekładnikowego jest jego charakterystyka czasowo-prądowa t-I, określająca zależność czasu przedłukowego bezpiecznika od wartości skutecznej prądu w bezpieczniku. Większość producentów bezpieczników przekładnikowych nie zamieszcza w katalogach produktów charakterystyk t-I bezpieczników.



Rys. 5. Bezpieczniki przekładnikowe średniego napięcia typu WBP/BRT produkowane przez ABB o/Przasnysz [5]

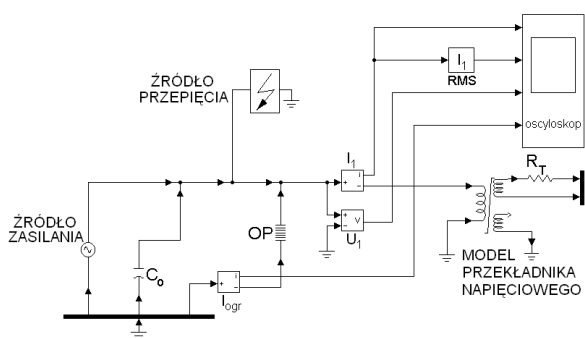
W Polsce producentem i dystrybutorem bezpieczników przekładnikowych (rys. 5.) jest m. in. ABB o/Przasnysz. Prądy znamionowe bezpieczników przekładnikowych oferowanych przez ABB, w zależności od napięcia pracy aparatu wynoszą od 0,4 A do 0,7 A. Rozszerzenie zakresu prądów znamionowych bezpieczników przekładnikowych nastąpiło po 2001 roku i miało na celu poprawę współpracy przekładnika napięciowego z bezpiecznikiem średniego napięcia. Do roku 2001 stosowano tylko jeden zakres prądowy bezpiecznika wynoszący 0,8 A.

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne z wykorzystaniem schematu zastępczego fragmentu systemu elektroenergetycznego średniego napięcia (rys. 6.) wykonano w celu określenia warunków powstawania w układzie zastępczym sieci elektroenergetycznej z modelem przekładnika napięciowego zjawisk ferorezonansowych. Starano się stwierdzić, czy wystąpienie nagłego wzrostu prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika jest na tyle duże, że mogłoby spowodować zadziałanie bezpiecznika średniego napięcia.

##### 4.1. Założenia do obliczeń

Obliczenia prądu w bezpieczniku i napięcia na uzwojeniu pierwotnym przekładnika w warunkach ferorezonansu wykonano w Matlabie. Jako model przekładnika wykorzystano dostępny w bibliotece programu model obliczeniowy transformatora jednofazowego o schemacie zastępczym typu T i rdzeniu magnetycznym nasycającym się [7] oraz dwóch uzwojeniach wtórnych. Typowy przekładnik napięciowy średniego napięcia posiada dodatkowe uzwojenie wtórne, tzw. uzwojenie napięcia resztkowego, wykorzystywane do tłumienia drgań ferorezonansowych. Schemat zastępczy obwodu zastosowany w komputerowej symulacji wpływu zjawisk ferorezonansowych na prąd w bezpieczniku przekładnika pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat obwodu wykorzystywany w symulacji;  $C_0$ - pojemność doziemna systemu elektroenergetycznego,  $I_1$ - prąd w uzwojeniu pierwotnym przekładnika,  $U_1$ - napięcie na uzwojeniu pierwotnym przekładnika,  $I_{ogr}$ - prąd w ograniczniku napięcia,  $R_T$ - oporność tłumiąca w obwodzie uzwojenia napięcia resztkowego przekładnika, OP- model ogranicznika napięcia

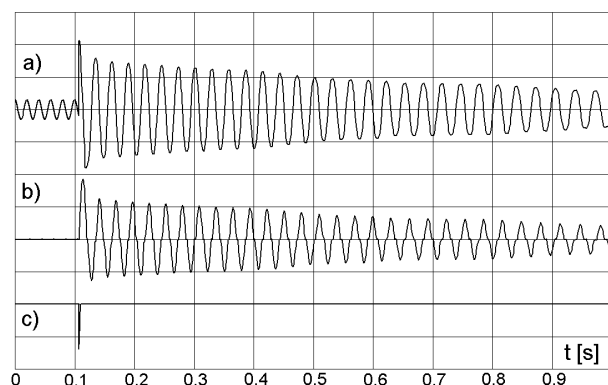
Model przekładnika napięciowego w Matlabie oparto na przekładniku średniego napięcia typu UMZ10-1, 11000/ $\sqrt{3}$ :100/ $\sqrt{3}$ :100/3 V, 50 V·A, o mocy granicznej  $S_g=400$  V·A. Widok przekładnika pokazano na rysunku 7.

Zjawiska ferorezonansowe w przekładniku średniego napięcia wywoływano poprzez zmianę napięcia na jego uzwojeniu pierwotnym. Źródłem tych zmian było przebiegi, ograniczane przez ogranicznik przeciwprzebiegowy do po-

ziomu napięcia obniżonego  $U_0$ . W symulacji obliczano prąd w uzwojeniu pierwotnym przekładnika  $I_1$ , prąd w ograniczniku napięcia  $I_{ogr}$  oraz napięcie na uzwojeniu pierwotnym przekładnika  $U_1$ . Przykładowe oscylogramy z obliczeń przedstawiono na rysunku 8 i rysunku 9.



Rys. 7. Przekładnik napięciowy typu UMZ10 11000/ $\sqrt{3}$ :100/ $\sqrt{3}$ :100/3 V, 50 V·A [4]



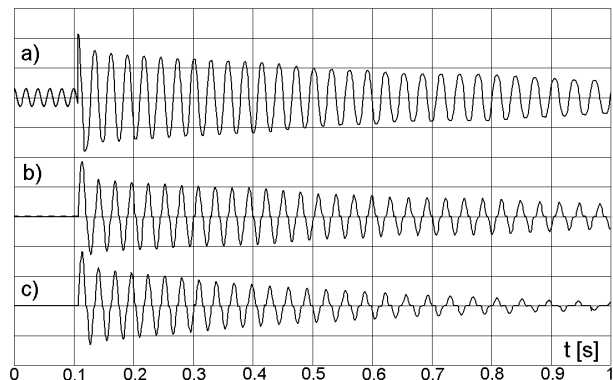
Rys. 8. Obliczone przebiegi prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika średniego napięcia (b) (1,5 A/dz.), prądu w ograniczniku napięcia (c) (1 kA/dz.) oraz napięcia na uzwojeniu pierwotnym przekładnika (a) (30 kV/dz.) w warunkach ferorezonansu powodowanego przebiegiem o wartości szczytowej 65 kV

Obliczona wartość skuteczna prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika (rys. 8 b.), w zależności od poziomu napięcia obniżonego na ograniczniku napięcia  $U_0$  wynosi od około 0,5 A do blisko 1 A i jest blisko tysiąc razy większa niż w przypadku pracy normalnej przekładnika, kiedy uzwojenie pierwotne urządzenia jest zasilane napięciem roboczym. Prąd w obwodzie pierwotnym przekładnika o wartości skutecznej 1 A może spowodować zadziałanie bezpiecznika przekładnikowego. Dotyczy to zwłaszcza bezpieczników o małych prądach znamionowych, tj. 0,25 A, 0,4 A, czy 0,5 A. Z charakterystyk czasowo-prądowych bezpieczników przekładnikowych [6] można odczytać, że prąd o wartości skutecznej 1 A płynący przez bezpiecznik spowodowałby zadziałanie bezpiecznika o prądzie znamionowym 0,25 A po czasie 2 sekund, a bezpiecznika o prądzie znamionowym 0,5 A po czasie znacznie dłuższym niż 1000 sekund.

Jednym z częściej stosowanych sposobów zapobiegających powstawaniu w przekładniku zjawisk ferorezonansowych jest użycie w obwodzie uzwojenia napięcia resztkowego opornika tłumiącego  $R_T$  [6]. Wytyczne do jego doboru zawarto między innymi w publikacji [3]. Tego typu rozwiązanie pozwala na zmniejszenie wartości skutecznej prądu

w uzwojeniu pierwotnym przekładnika i w bezpieczniku przekładnikowym (rys. 9 c.).

W celu stwierdzenia wpływu opornika  $R_T$  w obwodzie uzwojenia napięcia resztkowego przekładnika na tłumienie zjawisk ferorezonansowych wykonano obliczenia prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika, stosując w uzwojeniu wtórnym urządzenia opornik tłumiący o wartości zalecanej w [3]. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Obliczone przebiegi prądu w uzwojeniu pierwotnym przekładnika średniego napięcia: bez opornika tłumiącego (b) (1,5 A/dz.), z użyciem opornika tłumiącego w obwodzie uzwojenia napięcia resztkowego (c) (1,5 A/dz.) oraz przebieg napięcia na uzwojeniu pierwotnym z widocznym przepięciem (a) (30 kV/dz.).

## 5. PODSUMOWANIE

Zjawiska ferorezonansowe w sieciach elektroenergetycznych średnich napięć z przekładnikami napięciowymi mogą prowadzić do nagłego wzrostu prądu w uzwojeniach pierwotnych tych przekładników, a w konsekwencji do zadziałania bezpieczników przekładnikowych.

Prąd w uzwojeniu pierwotnym przekładnika i w bezpieczniku przekładnikowym w warunkach ferorezonansu może osiągać wartość blisko tysiąc razy większą niż w przypadku pracy normalnej przekładnika, przy napięciu znamio-

nowym. Jego wartość jest uzależniona od poziomu napięcia obniżonego  $U_0$  na ograniczniku przepięć.

Zastosowanie w obwodzie uzwojenia napięcia resztkowego przekładnika opornika tłumiącego  $R_T$  pozwala ograniczyć wpływ zjawisk ferorezonansowych na pracę przekładnika. Zadziałanie bezpiecznika przekładnikowego jest wówczas mało prawdopodobne. Potwierdzają to badania eksperymentalne [3] oraz symulacyjne, których wyniki przedstawiono w artykule.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Weller C. T.: Experiences of grounded-neutral, Y-connected potential transformers on ungrounded system, Transaction A. I. E. E., 1931
2. Karlicek R. F., Taylor E. R.: Ferroresonance of grounded potential transformers on ungrounded power systems, A. I. E. E. Transmission and Distribution Committee, 1959
3. Samuła J.: Przyczyny powstawania zjawisk ferorezonansowych i uszkodzeń przekładników. Wskazania środków zaradczych, Zakłady Wytwórcze Aparatury Wysokiego Napięcia, opracowanie nr 74/70, 1970
4. Przekładniki napięciowe w izolacji żywicznej typu UMZ10-1 i UMZ10, karta katalogowa nr V37/06/04, Zakłady Wytwórcze Aparatury Wysokiego Napięcia „ZWAR”, Warszawa 1986
5. Bezpieczniki przekładnikowe średniego napięcia typu WBP/BRT, karta katalogowa nr B12/06.00, katalog produktów firmy ABB, 08/2001
6. Medium voltage fuses. Potential transformer fuses (European and American fuses), katalog produktów firmy Ferraz Shawmut, 12/2004
7. Tłustochowicz Ł.: Praca bezpiecznika przekładnika średniego napięcia w warunkach ferorezonansu, XIX Seminarium „Zastosowanie Komputerów w Nauce i Technice”, Gdańsk 2009, ISSN 1425-5766

## THE EFFECT OF FERORESONANCE PHENOMENA ON OPERATION OF THE FUSE TO MEDIUM VOLTAGE MEASURING TRANSFORMER

**Key-words:** ferroresonance, voltage transformer's fuse, voltage transformer

Measuring transformer fuses are used to the protection of primary winding of voltage measuring transformers against the effects of short-circuits. In practice, under operating conditions of medium voltage networks with voltage measuring transformers, there have been observed some cases of fuse maloperation resulting from the ferroresonance phenomena. The reason of ferroresonance phenomena in voltage measuring transformer is mostly a step-wise change of voltage across its primary winding, due to switching overvoltages or lightning surges. Under these circumstances, the magnetizing inductance of voltage measuring transformer is significantly diminished, so a resonance circuit may be formed with the capacitance of power system versus earth. In most cases it results in an uncontrolled rise of the current in primary winding of voltage measuring transformer and consequently-maloperation of the fuse protection. Long-lasting observations on operation of voltage measuring transformers in medium voltage power system with isolated neutral point have confirmed the events of cases being considered in this paper.