

## Ferroresonance Phenomenon in Power Plant Auxiliary Grids

### Author

Maciej Łosiński

### Keywords

Medium voltage auxiliary grid of power plant, ferroresonance, ferroresonance suppression

### Abstract

The paper discusses the problem of the ferroresonance phenomenon occurring in a medium voltage grid with an ungrounded neutral point of the supply transformer. Results of a study of ferroresonance in the auxiliary grid at Żarnowiec Pumped Storage Power Plant are presented. Analysis of the study results has led to the development and implementation of an effective method of preventing the adverse ferroresonance phenomenon.

**DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015105**

### 1. Introduction

Medium voltage auxiliary grids at power plants are usually operated as 3-phase systems with ungrounded neutral point of the supply transformer (Fig. 1). Lack of effective grounding of the neutral point causes many adverse effects and difficulties in the grids' operation. One of them is the possibility of parallel ferroresonance [3, 4, 5].

Factors that play an important role in the formation of oscillatory vibrations are: voltage  $U_0$  between the star point of the grid and the earth, and the nonlinear inductances  $L$  of voltage transformers

with ferromagnetic cores, entering the resonance with capacitances to earth  $C$  of switching busbars and cables (Fig. 1).

Voltage  $U_0$  appears in the system at all switching operations (e.g. switching on the supply transformer, ATS system operations) and at line-to-earth short-circuits. Voltage  $U_0$  generates an additional magnetic flux in the voltage transformers independently from the fluxes induced by phase voltages  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  [2]. Nonlinear voltage transformer magnetizing characteristics are the reason for the generation of voltage and current components with frequencies different from grid voltage frequency. Due to the

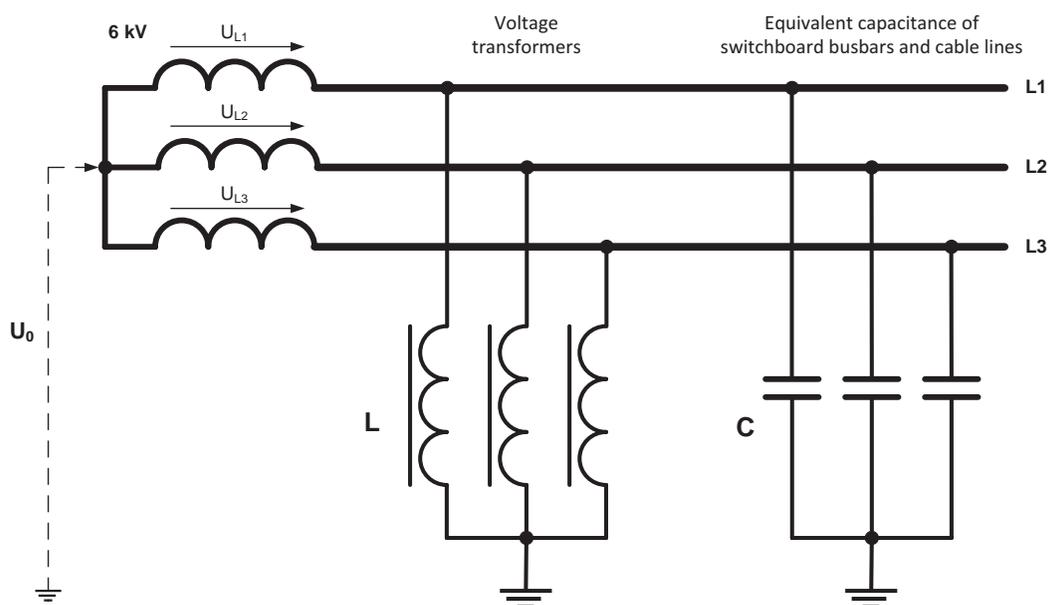


Fig. 1. Diagram of a medium-voltage power grid with ungrounded neutral point of the supply transformer and grounded inductive voltage transformers, in which parallel ferroresonance can occur

nonlinear magnetizing characteristics the impedances of individual voltage transformers decrease with increasing voltage, and represent different values for the frequency components. For these reasons, the voltage transformer magnetizing currents differ depending on the voltage conditions. The magnetizing currents and their waveforms in each phase depend also on the connected voltage's phase angle and the residual fluxes in voltage transformer cores.

All the above factors result in the system's asymmetry, which in turn can lead to ferroresonance oscillations involving components with different frequencies.

The frequency at which the ferroresonance can occur depends on the operating conditions of the switching substation and the loads connected to it. In practice ferroresonance can be triggered even by the temporary introduction of the core into saturation, e.g. resulting from an operation of switching the voltage to the substation's busbars or a change in the voltage resulting from an earth fault.

Ferroresonance is a phenomenon that is the source of interference and failures in the power plant's auxiliary grid, as well as in medium-voltage distribution grids. This phenomenon is dangerous in the first place because of the ferromagnetic core's substantial saturation occurring in its course, which may lead to thermal destruction of the voltage transformers' primary windings. Also likely are long-term ferroresonance surges that threaten the insulation of the grid and the devices connected to it. Furthermore, the neutral point's increased potential also induces the zero sequence voltage component's appearance, which can falsify the operation of the power system's line-to-earth short-circuit protection devices.

The development of the ferroresonance oscillations in a grid can be evidenced by the phase voltages asymmetry and/or distortion, emergence of voltage with  $0.5f_n$  frequency in open delta circuits.

Various solutions are currently used for suppressing ferroresonance oscillations. The most common is the inclusion of an additional resistance in the open delta circuits of voltage transformer secondary windings. The additional resistance can be included permanently or automatically upon ferroresonance detection. Additional resistance may be automatically included by programmable digital relays on the basis of voltage induced in the open delta circuits.

Damping resistance should be selected for each object independently because of the variety of the switching substation's possible configurations, and of its equipment specifications (voltage transformer types, magnetization characteristics, cable capacitance to earth, load types). Information can be found in the literature that adding a 20–100  $\Omega$  resistance is advisable. However in many cases even a 20  $\Omega$  resistance may be too high for effective suppression of ferroresonance oscillations [1]. The most effective damping resistor selection method involves a research experiment consisting in the induction of ferroresonance oscillations in a specific object, and the selection of an appropriate resistance, which will effectively eliminate unwanted resonance oscillations. Such an experiment was carried out at Żarnowiec Pumped Storage Power Plant.

Further in this paper results are presented of the ferroresonance study at 6 kV auxiliary substation of Żarnowiec Pumped Storage Power Station. As a result of the object study an effective method of ferroresonance elimination was proposed and implemented.

## 2. Study object description

The 6 kV auxiliary substation of Żarnowiec Pumped Storage Power Plant (Fig. 2) consists of 34 bays, and is a double busbar substation, whereby each busbar can be divided into two sections. The substation is supplied from two 25 MVA auxiliary transformers connected by 110 kV lines to 400 kV/110 kV Żarnowiec substation. In normal configuration the busbars are not divided into sections, and each busbar is supplied from a dedicated auxiliary transformer. The two busbars can be connected by coupling bay No. 17–18 (longitudinal transverse coupler). The two 110/6 kV transformers' parallel operation is not allowed due to the limitations resulting from the busbars' allowable short-circuit power.

Loads powered from the substation include (Fig. 3):

- four 15 MW asynchronous start-up motors
- 0.4 kV unit auxiliary switchboards supplied by 1000 kVA transformers
- 0.4 kV shared auxiliary switchboards
- auxiliary switchboards of the plant's upper reservoir supplied by 2 x 2 km 6 kV cables
- Żarnowiec substation's auxiliaries supplied by 2 x 3 km 6 kV cables
- four voltage measurement bays with GE12 inductive voltage transformers (dry insulation - epoxy resin, manufactured by former DDR).

The ferroresonance phenomenon has repeatedly occurred at the auxiliary switchboard since the Żarnowiec power station's launch in 1983. It typically occurred at a switching operation to reconfigure the switchboard with a momentary voltage interruption (ATS operation). The ferroresonance oscillations emergence symptoms were activation of line-to-earth short-circuit relays, and unstable indications of busbar voltage measuring instruments. In such a case the power plant personnel used to disconnect the voltage measurement bays in order to eliminate the ferroresonance. As a rule no resonant oscillations reappeared after the measurement bays' reconnection.

Any emergence of this adverse condition at the switchboard always required its personnel's intervention, which, if delayed, could lead to the voltage transformers' damage due to thermal overload of their primary windings, and could lead to a damage of the apparatus and equipment insulation.

Therefore it was necessary to implement such a solution at the switchboard, which would allow eliminating the dangerous ferroresonance oscillations automatically, without manual intervention.

## 3. Description and results of the ferroresonance study

An object study completed a few years ago had allowed selecting the appropriate damping resistance to be included in the open

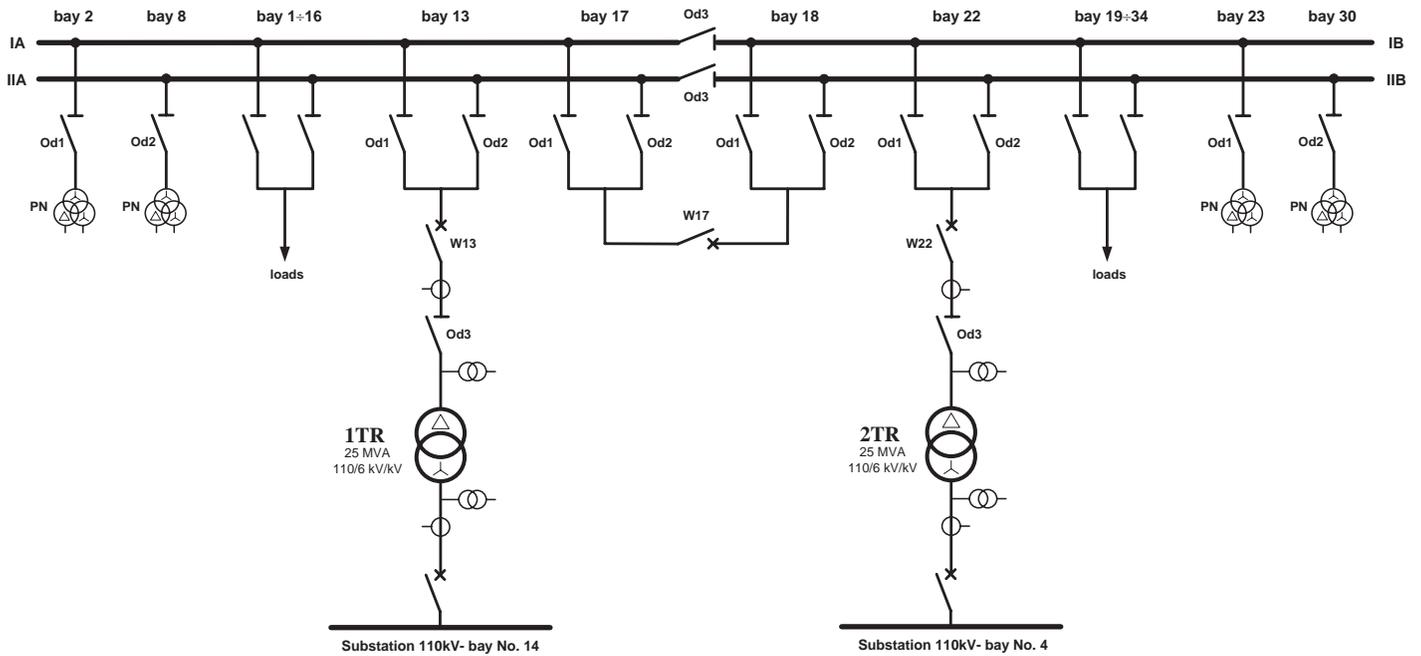


Fig. 2. Simplified diagram of 6 kV auxiliary substation at Żarnowiec Pumped Storage Power Plant

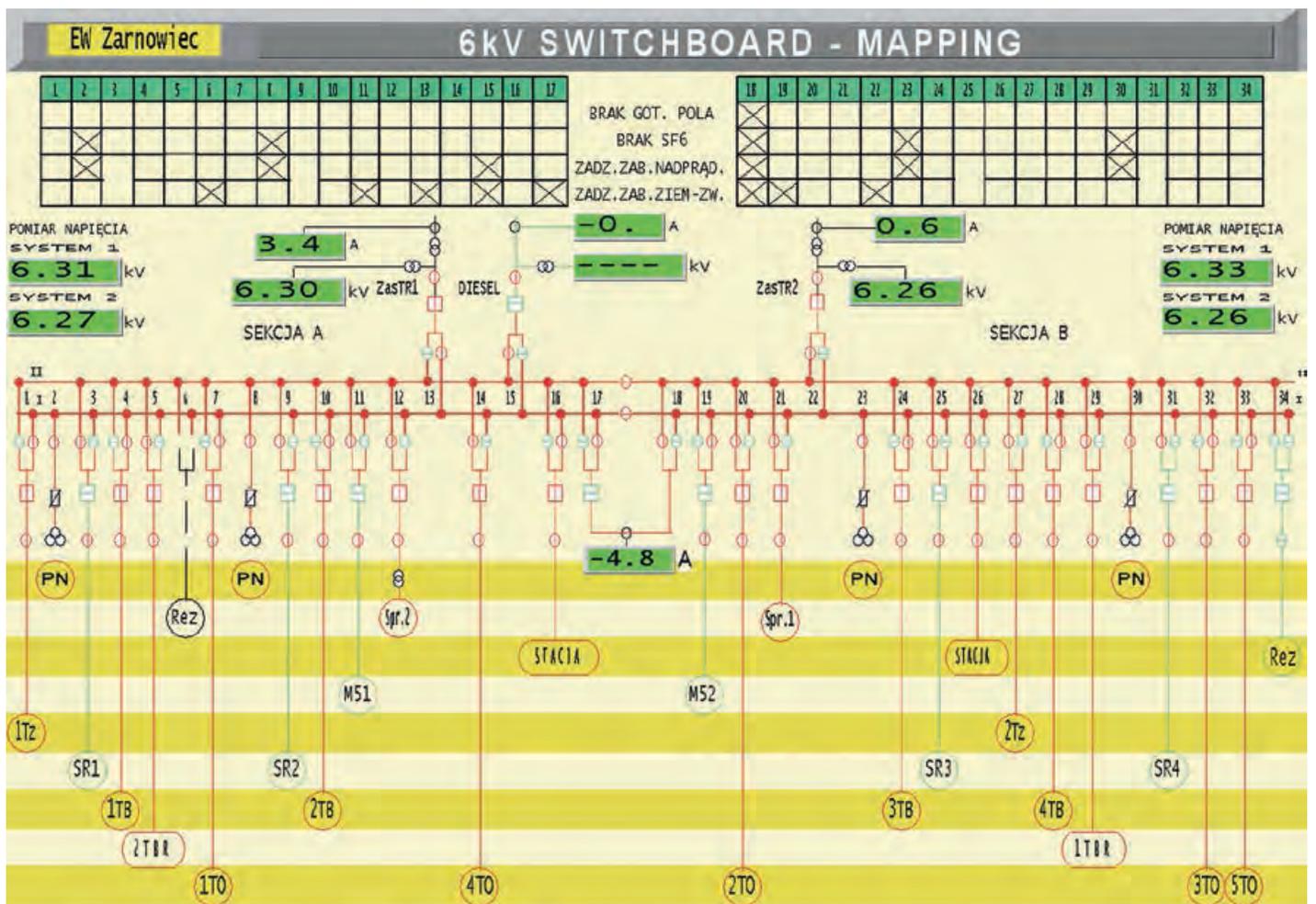


Fig. 3. Diagram of 6 kV auxiliary substation at Żarnowiec Pumped Storage Power Plant

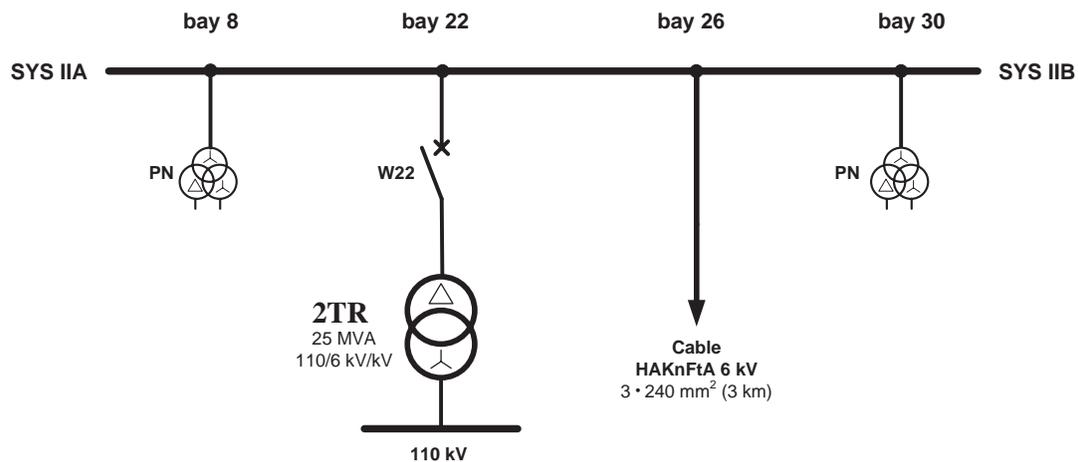


Fig. 4. Switchboard configuration for the ferroresonance study

delta circuits of the secondary windings of the voltage transformers in the measurement bays.

For the purpose of the experiment a switchboard busbar (busbar II) was separated, to which two voltage measurement bays (bays No. 8 and 30) and an unloaded 3 km cable line were connected. With this switchboard configuration, in the absence of active power loads the ferroresonance developed virtually every time a voltage was applied to the switchboard busbars through feeder bay No. 22. The switchboard configuration for the experiment is shown in Fig. 4.

A measurement system for recording voltage and current waveforms during ferroresonance was installed in voltage measurement bay No. 8 (Photo 1). The measurement system consisted of high-voltage probes connected to the switchboard busbars, current clamps to measure the current in the voltage transformers' primary windings, and a digital recorder. The recorder was also fed with measurement signals from the voltage transformers' secondary windings in the form of phase voltage, line-to-line voltage, and zero sequence voltage from the open-delta circuit.



Photo 1. Voltage transformers with measuring probes and clamps for primary voltage and current recording

Once resonant oscillation was triggered by powering the busbars (closing the circuit breaker in feeder bay No. 22), in measurement bay No. 8 the following resistors were manually included in the voltage transformers' open delta circuit: 100  $\Omega$ , 47  $\Omega$ , 30  $\Omega$ , and 15  $\Omega$ . In all conducted tests neither 100  $\Omega$ , nor 47  $\Omega$  resistor damped the resonance oscillations, whereas 30  $\Omega$  and 15  $\Omega$  resistors effectively suppressed them.

The following figures show the voltage and current waveforms recorded on the voltage transformers' primary and secondary sides. These waveforms illustrate: the ferroresonance start following the feeder bay circuit breaker closure (Fig. 5); oscillations during ferroresonance (Fig. 6); ferroresonance oscillation suppression following  $R = 30 \Omega$  resistor inclusion (Fig. 7 and 8), ferroresonance oscillation suppression following  $R = 15 \Omega$  resistor inclusion (Fig. 9).

#### 4. Summary and conclusions

The study results presented here show that during ferroresonance oscillations the phase voltages are strongly deformed, and on the primary side their amplitude may even exceed 10 kV, whereas in the rated conditions it should not exceed 5 kV. This more than two-fold increase above the rated voltage is a major threat to the insulation strength of the switchboard and the loads connected to it. Distortions in the line-to-line voltage waveforms are hardly noticeable, which indicates that the phase voltages are distorted with a component with zero-sequence characteristics and a frequency different than 50 Hz. It can be concluded from analysis of the  $3U_0$  voltage waveform in the open delta circuit that this component was a sine wave with frequency of 25 Hz (Fig. 10).

Current waveforms in the voltage transformer primary windings during ferroresonance oscillations were strongly distorted, and their amplitudes exceeded the normal steady-state values many times. (e.g. Fig. 7). This indicates that during ferroresonance the voltage transformers operated at saturation. A voltage transformer's prolonged operation in such conditions can thermally damage its primary winding.

Ferroresonance oscillations at the 6 kV auxiliary substation of Żarnowiec Pumped Storage Power Plant are effectively

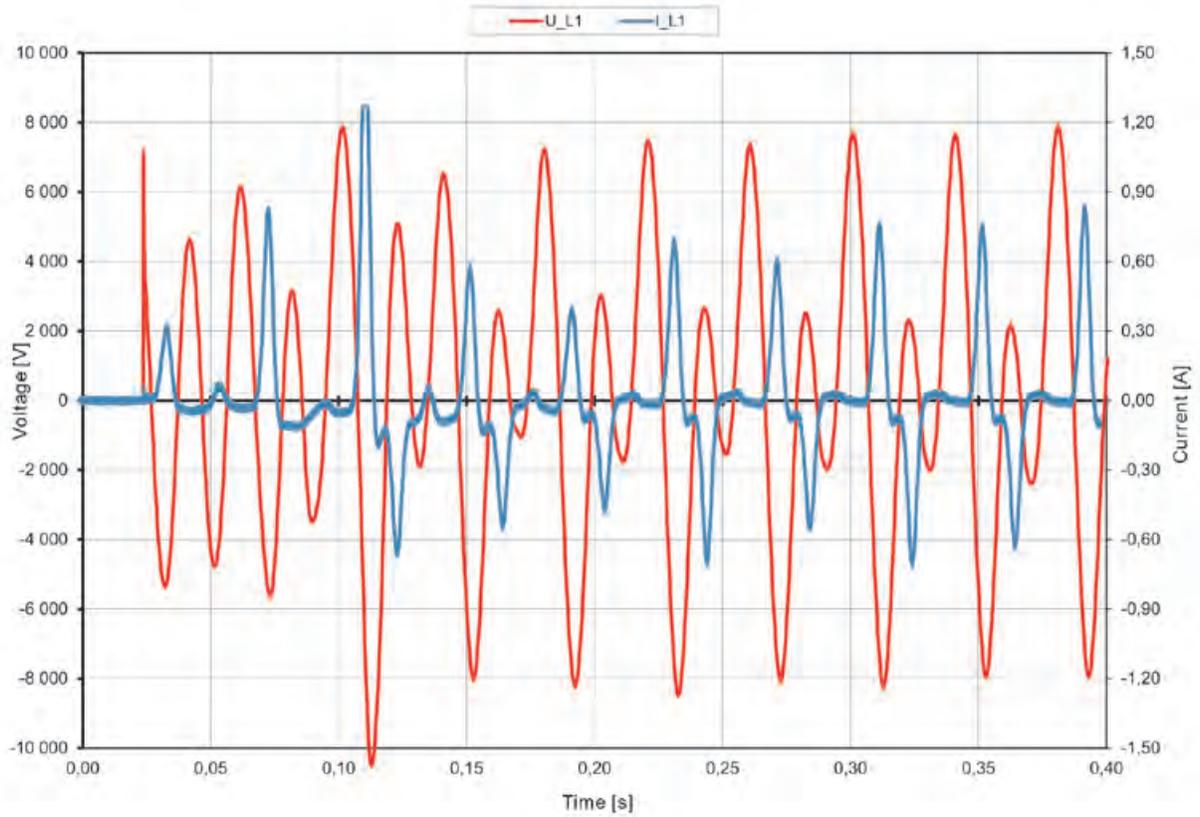


Fig. 5. Voltage and current waveforms on the voltage transformers' primary side in phase L1 after powering RG 6kV switchboard busbars (closing the circuit breaker in bay No. 22). Ferroresonance oscillation triggering

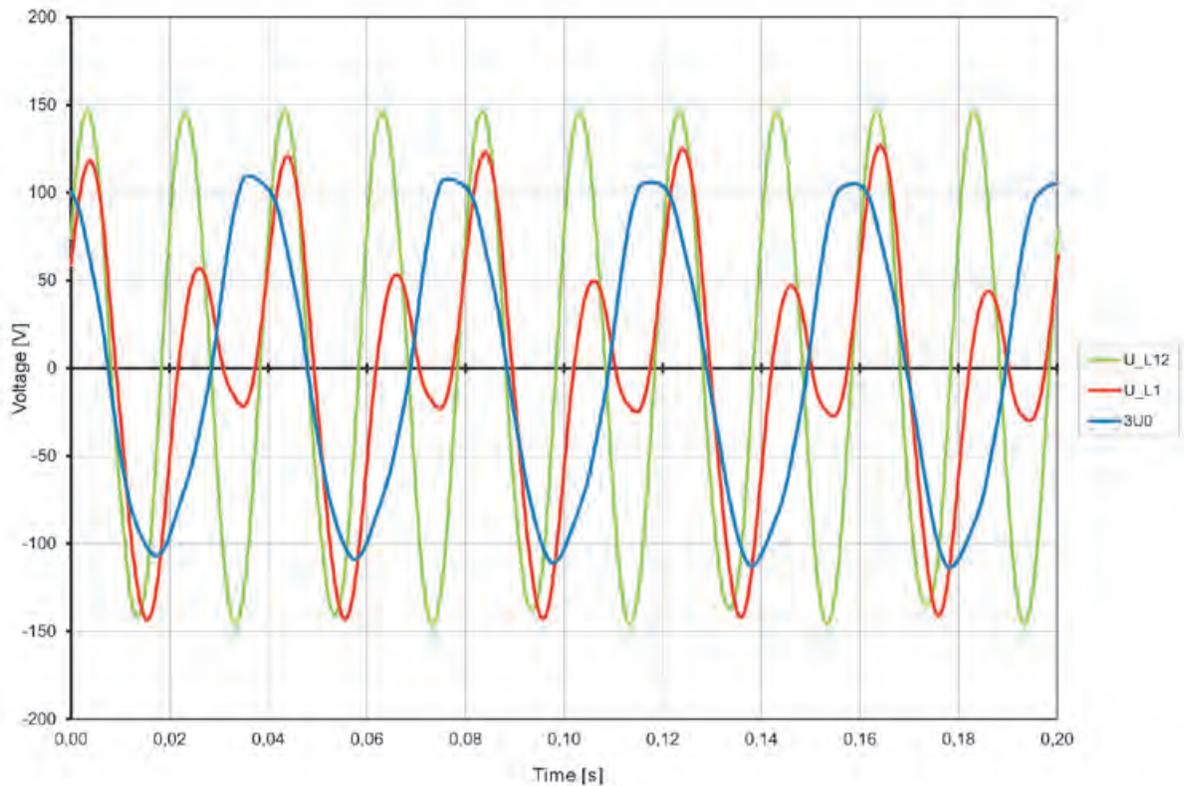


Fig. 6. Voltage waveform recorded on the voltage transformers' secondary side during ferroresonance.  $3U_0$  – open delta circuit voltage,  $U_{L1}$  – phase voltage,  $U_{L12}$  – line-to-line voltage

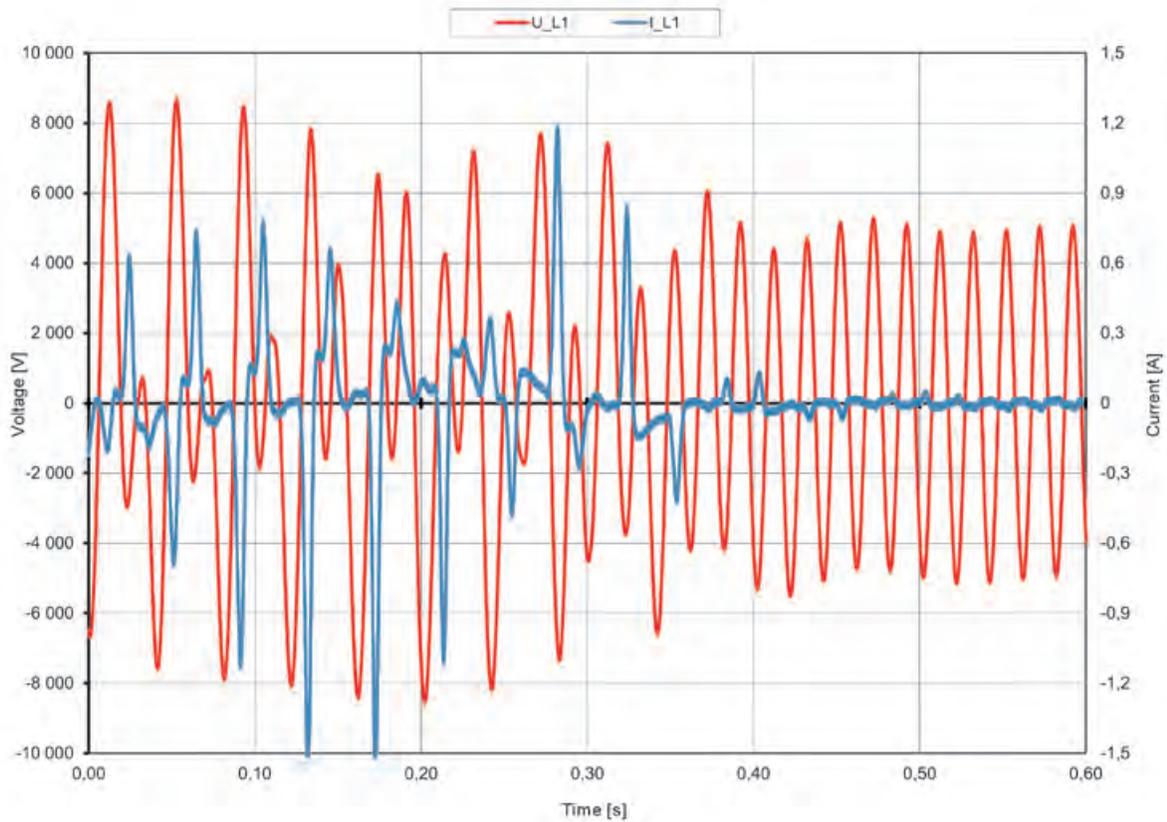


Fig. 7. Voltage and current waveforms on the voltage transformers' primary side after inclusion of  $R = 30 \Omega$  switching resistor in the open delta circuit. Ferroresonance suppression

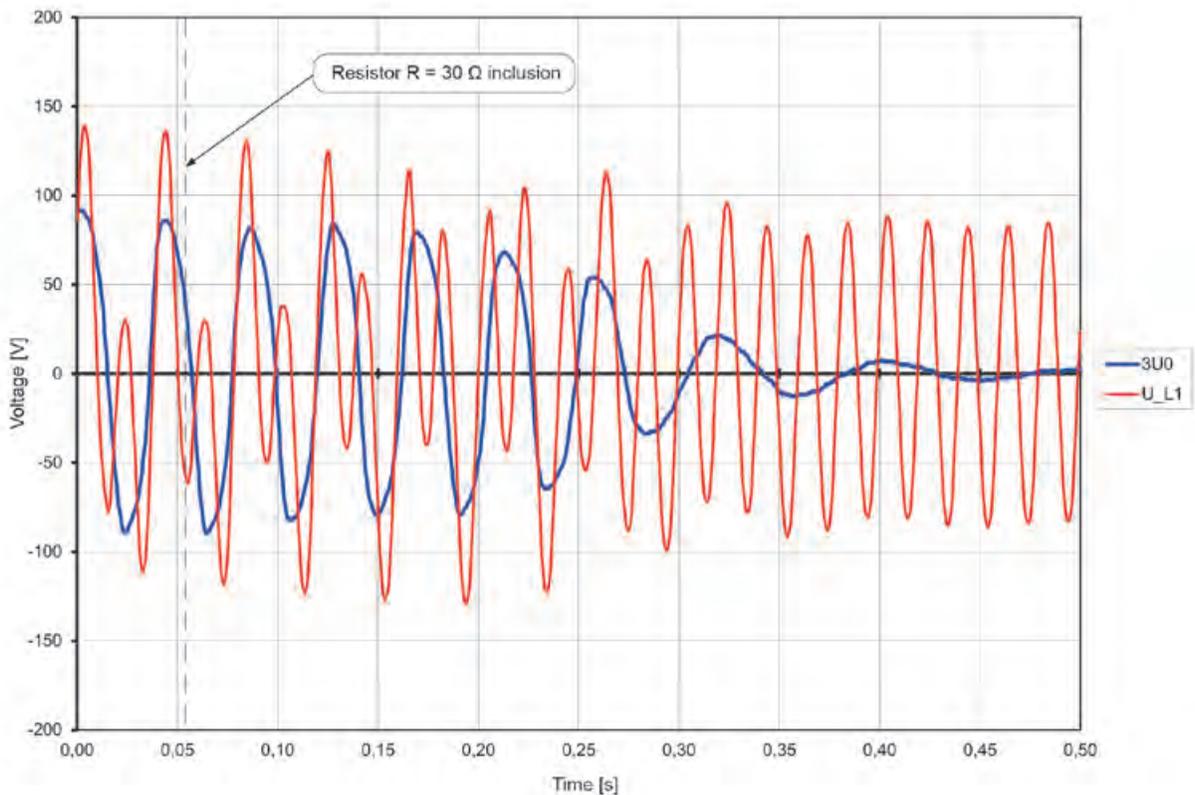


Fig. 8. Voltage waveform on the voltage transformers' secondary side. Manual inclusion of  $R = 30 \Omega$  damping resistor in the open delta circuit.  $3U_0$  – open delta circuit voltage,  $U_{L1}$  – phase voltage

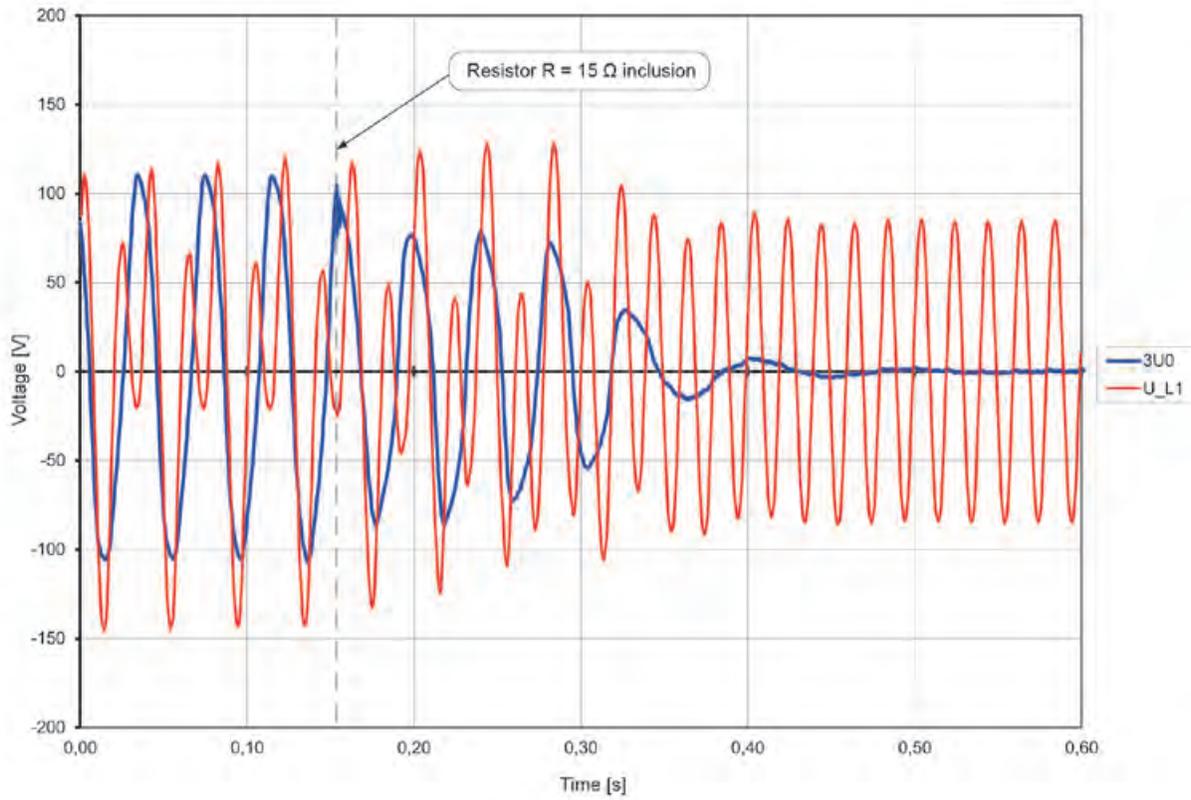


Fig. 9. Voltage waveform on the voltage transformers' secondary side. Manual inclusion of  $R = 15 \Omega$  damping resistor in the open delta circuit.  $3U_0$  – open delta circuit voltage,  $U_{L1}$  – phase voltage

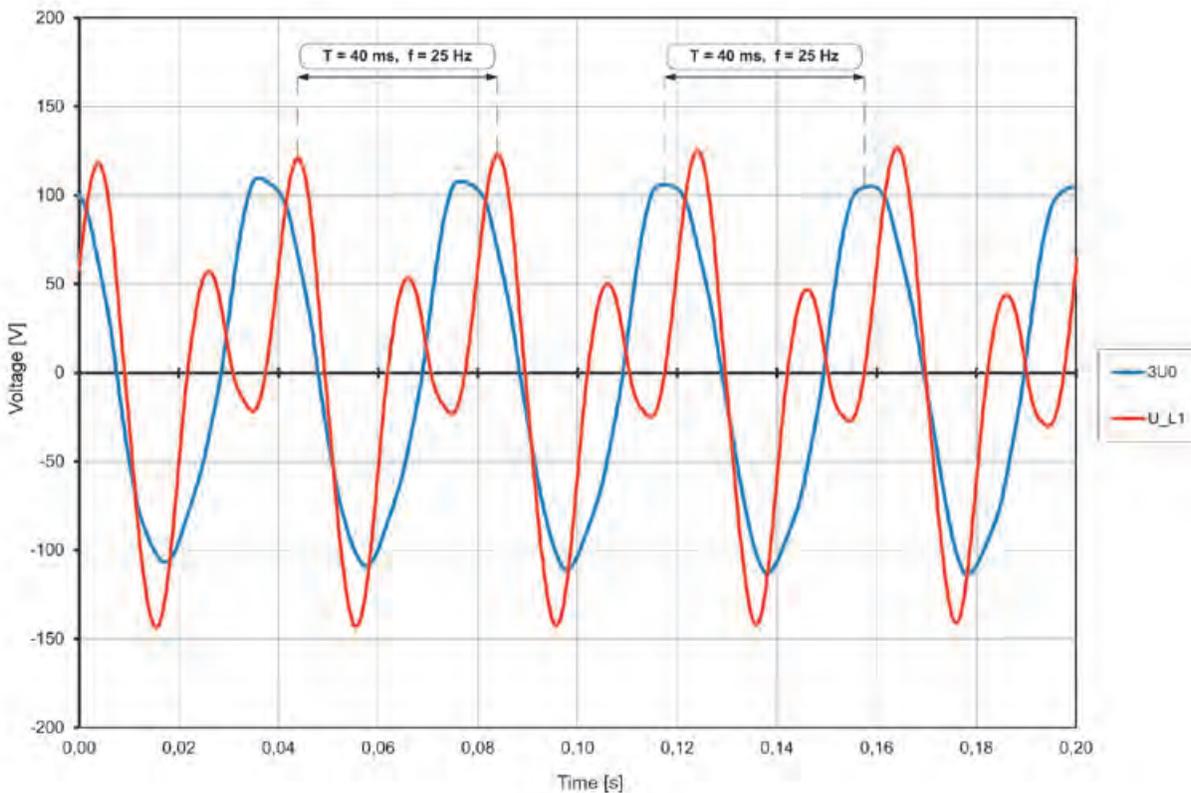


Fig. 10. Voltage waveform recorded on the voltage transformers' secondary side during ferroresonance.  $3U_0$  – open delta circuit voltage,  $U_{L1}$  – phase voltage in phase L1

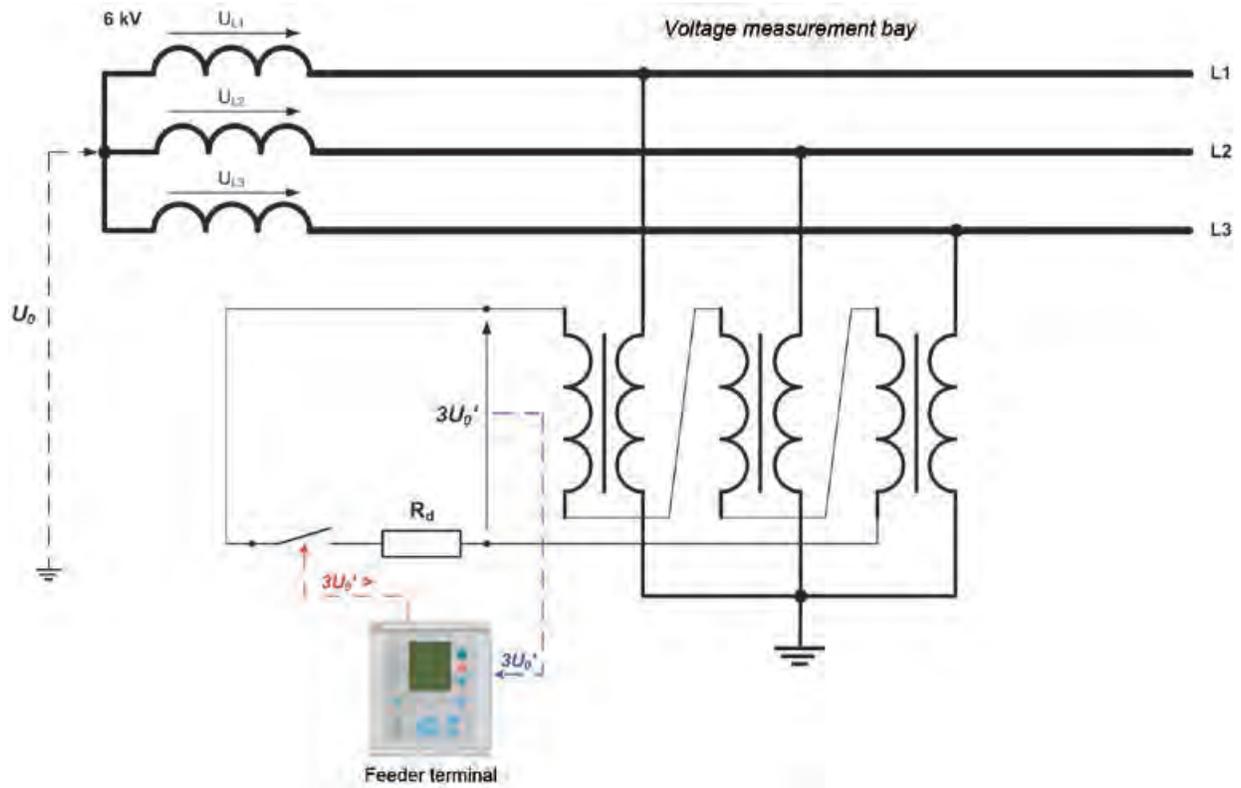


Fig. 11. Adding a resistance by a bay controller in the open delta circuit of a voltage transformer

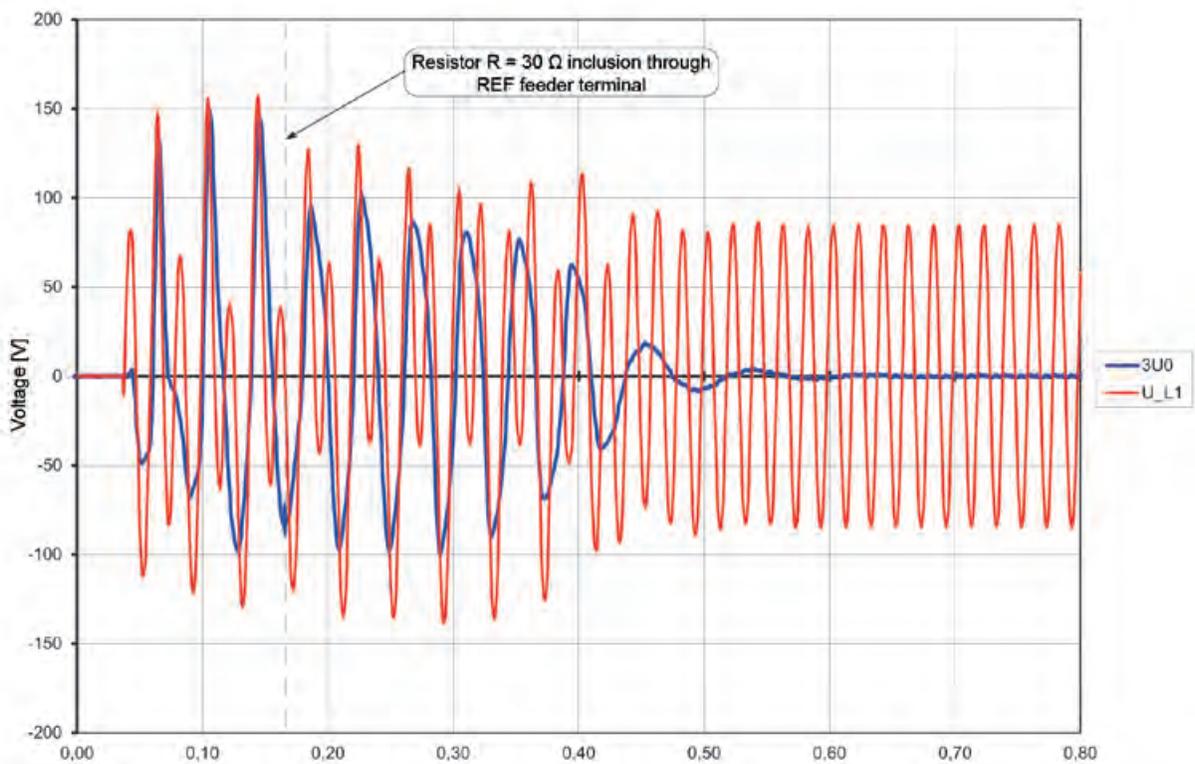


Fig. 12. Voltage waveform on the voltage transformers' secondary side Emergence of ferroresonance after powering the feeder bay, and its suppression by way of the feeder terminal's inclusion of damping resistor  $R = 30 \Omega$  in the open delta circuit.  $3U_0$  – open delta circuit voltage,  $U_{L1}$  – phase voltage



eliminated by less than  $30 \Omega$  resistances included in the open delta circuit. It should be emphasized here that when selecting the damping resistor, especially if it were to be included permanently, the voltage transformer's thermal properties resulting from its windings' permissible load (power limit) should be taken into account. The additional load must not lead to an excess over the permissible winding temperature. A voltage transformer with a damping resistor of a relatively low value is the most endangered by the overload in the case of prolonged line-to-earth short-circuit [1].

If a voltage transformer's limit power is less than the load from the additional resistance, damping systems can be used to casually load the transformer. Such casual inclusion for a specified period of time, or until the ferroresonance is found to be suppressed, can be done by relays capable of analysing the voltage appearing in the open delta circuit. It is important here to define measurement criteria under which ferroresonance can be distinguished from line-to-earth short-circuit. The criterion that can be used to distinguish ferroresonance oscillations from line-to-earth short-circuit is  $3U_0$  voltage frequency, which can be measured in the voltage transformer open delta circuits. In the course of the tests it was found in all cases that the frequency of the voltage component appearing during ferroresonance is 25 Hz ( $0,5 f_n$ ). Unfortunately the bay controllers in the 6 kV switchboard at Żarnowiec Pumped Storage Power Plant cannot measure the  $3U_0$  component frequency. Therefore, the additional  $30 \Omega$  damping resistance is automatically connected for a specified period of time (2 seconds) every time when  $3U_0$  voltage exceeds a preset threshold (Fig. 11). Fig. 12 shows a situation whereby the bay controller finds an excess over the preset  $3U_0$  voltage and switches on the additional resistance that effectively dampens the ferroresonance.

At this point it is worthwhile appealing to manufacturers of digital relays designed for medium voltage grids, so they provide the devices with zero sequence frequency measuring capabilities. From the technical point of view this shouldn't be a problem, and owing to this solution it might be possible to selectively and clearly identify if the phenomenon at hand is ferroresonance.

## REFERENCES

1. Anderson E., Karolak J., Zjawiska ferorezonansowe w sieciach elektroenergetycznych [Ferroresonance in power grids], *Przegląd Elektrotechniczny* 2009, issue 9.
2. Cichoń H., Praktyczne sposoby eliminacji ferorezonansu w sieciach elektroenergetycznych [Practical ways of ferroresonance elimination in power grids] Training and Publishing Centre of SEP Association of Polish Electrical Engineers, Warsaw 2005.
3. Moskwa S., Nowak W., Tarko R., Modelowanie i analiza układu sieci średniego napięcia dla oceny warunków i skutków występowania ferorezonansu oraz sposobów jego eliminacji [Modelling and analysis of medium voltage grids for the assessment of ferroresonance conditions and effects, and of methods of its elimination], *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2009, No. 26.
4. Nowak W. et al., Ferorezonans z udziałem przekładników napięciowych w sieci średniego napięcia [Ferroresonance involving voltage transformers in medium voltage grids], *Przegląd Elektrotechniczny – Conferences, Proceedings of IX Symposium: Operation Problems of High Voltage Insulation Systems*, 2003.
5. Tarko R. et al., Ferorezonans jako źródło zakłóceń i awarii w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć [Ferroresonance as a source of disturbance and faults in medium voltage distribution grids], *Proceedings of XV International Scientific Conference CURRENT PROBLEMS IN POWER ENGINEERING*, Jurata, 2011.
6. Wiśniewski J., Anderson E., Karolak J., Wrażliwość sieci potrzeb własnych elektrowni na możliwość wystąpienia ferorezonansu [Sensitivity of power plant auxiliary grids to the ferroresonance emergence possibility], *Proceedings of XVI International Scientific Conference CURRENT PROBLEMS IN POWER ENGINEERING*, Jurata, 2013.

## Maciej Łosiński

Żarnowiec Pumped Storage Power Plant

e-mail: m.losinski@post.pl

After graduating from the Faculty of Electrical and Control Engineering at Gdańsk University of Technology he joined the staff of Żarnowiec Pumped Storage Power Plant (1998). Currently the station's Automation, Protections and Communications Manager. He attained the Doctor of Engineering degree at his alma mater (2005). His research interests focus on issues related to power system automatic protections, and on modelling and analysis of power systems operation with particular emphasis on problems of voltage and reactive power flow regulation. Winner in the competition for the best doctoral thesis organized by ABB (2006). Co-author of monograph "Mathematical models for power system security testing" (2012).

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 57–65. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Zjawisko ferorezonansu w sieci potrzeb własnych elektrowni

### Autor

Maciej Łosiński

### Słowa kluczowe

sieć potrzeb własnych średniego napięcia elektrowni, zjawisko ferorezonansu, tłumienie ferorezonansu

### Streszczenie

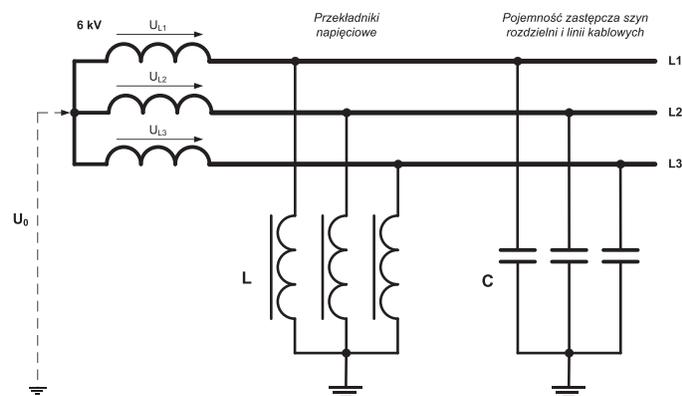
W artykule przybliżono problem zjawiska ferorezonansu występującego w sieciach średnich napięć, pracujących z nieziemionym punktem neutralnym transformatora zasilającego. Zaprezentowane zostały wyniki badań zjawiska ferorezonansu w sieci potrzeb własnych na terenie Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec. Efektem przeprowadzonych analiz wyników badań było opracowanie i wdrożenie skutecznego sposobu eliminacji niekorzystnego zjawiska ferorezonansu.

### 1. Wstęp

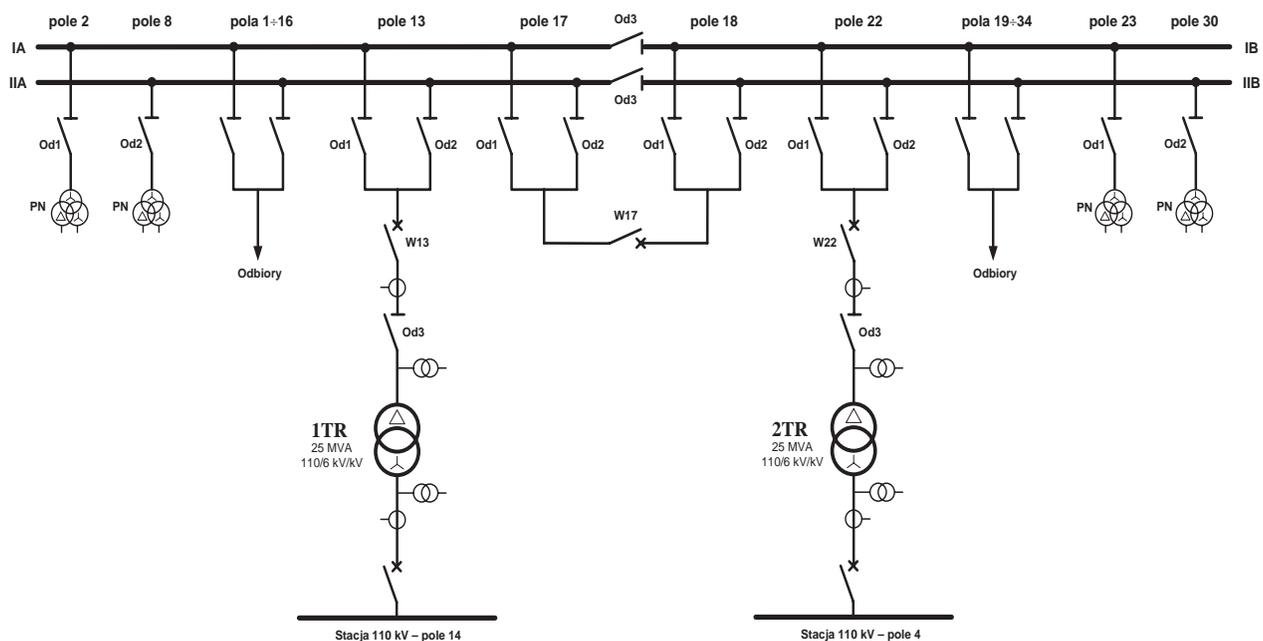
Sieci potrzeb własnych średniego napięcia w elektrowniach najczęściej pracują jako układy 3-fazowe z nieziemionym punktem neutralnym transformatora zasilającego (rys. 1). Brak skutecznego uziemienia punktu neutralnego powoduje wiele niekorzystnych zjawisk i trudności w trakcie eksploatacji tych sieci. Jednym z nich jest możliwość wystąpienia ferorezonansu równoległego [3, 4, 5].

Czynnikami odgrywającymi istotną rolę w powstawaniu drgań oscylacyjnych są: napięcie  $U_0$  między punktem gwiazdowym sieci a ziemią oraz nieliniowe indukcyjności  $L$  przekładników z rdzeniami ferromagnetycznymi, wchodzące w rezonans z pojemnościami doziemnymi  $C$  szyn rozdzielni i kabli (rys. 1).

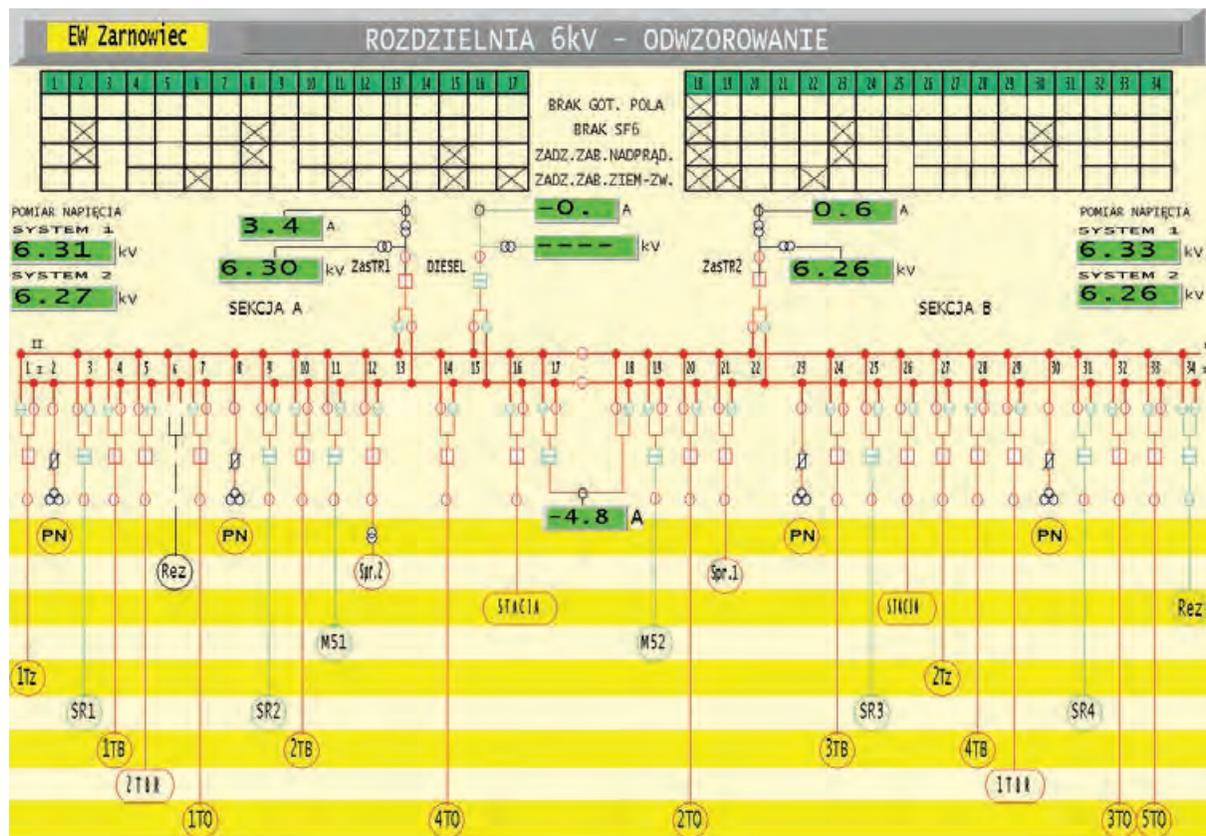
Napięcie  $U_0$  pojawia się w układzie podczas wszelkich operacji łączeniowych (np. załączanie transformatora zasilającego, działanie układów SZR) oraz przy



Rys. 1. Schemat sieci elektroenergetycznej średniego napięcia z nieziemionym punktem neutralnym transformatora zasilającego i z uziemionymi indukcyjnymi przekładnikami napięciowymi, w której możliwe jest wystąpienie ferorezonansu równoległego



Rys. 2. Uproszczony schemat rozdzielni potrzeb własnych 6 kV w Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec

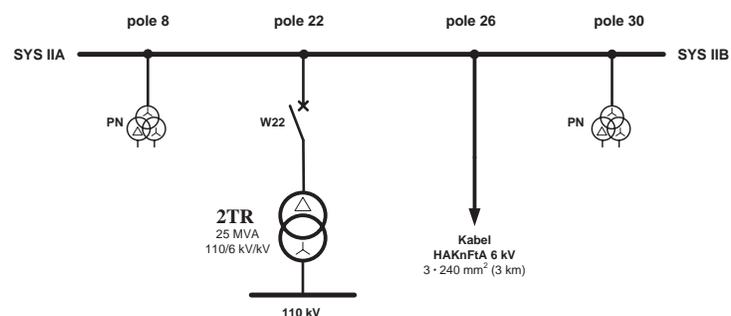


Rys. 3. Schemat rozdzielni potrzeb własnych 6 kV w Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec

zwarciach doziemnych. Napięcie  $U_0$  powoduje powstanie dodatkowego strumienia magnetycznego w przekładnikach niezależnie od strumieni wywołanych przez napięcia fazowe  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$ ,  $U_{L3}$  [2]. Nieliniowe charakterystyki magnesowania przekładników są powodem powstania składowych napięcia i prądu o częstotliwościach różnych od częstotliwości napięcia sieciowego. Z powodu nieliniowej charakterystyki magnesowania impedancje poszczególnych przekładników maleją ze wzrostem napięcia oraz stanowią różne wartości dla składowych częstotliwości. Z tych powodów prądy magnesowania przekładników mają różne wartości w zależności od warunków napięciowych. O wartości i przebiegu prądów magnesujących w poszczególnych fazach decyduje także kąt fazowy załączanego napięcia oraz strumienie szczątkowe w rdzeniach przekładników.

Wszystkie wymienione powyżej czynniki powodują niesymetrię układu, co w efekcie może doprowadzić do powstania oscylacji ferorezonansowych z udziałem składowych o różnych częstotliwościach.

Częstotliwość, przy której może wystąpić ferorezonans, jest uzależniona od warunków pracy rozdzielni i przyłączonych do niej odbiorów. W praktyce ferorezonans może zostać zainicjowany nawet przez chwilowe wprowadzenie rdzenia w nasycenie, np. w wyniku czynności łączeniowych polegających na podaniu napięcia na szynę rozdzielni lub zmiany wartości napięcia na skutek doziemienia.



Rys. 4. Konfiguracja rozdzielni w trakcie badania zjawiska ferorezonansu

Ferorezonans jest zjawiskiem, które jest źródłem zakłóceń i awarii zarówno w sieciach potrzeb własnych elektrowni, jak i w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia. Zjawisko to jest niebezpieczne przede wszystkim z powodu znacznego nasycenia w trakcie jego trwania rdzenia ferromagnetycznego, co może doprowadzić do termicznego zniszczenia uzwojenia pierwotnego przekładników napięciowych. Może także dochodzić do długotrwałych przepięć ferorezonansowych, które zagrażają izolacji sieci i przyłączonych do niej urządzeń. Ponadto wzrost potencjału punktu neutralnego powoduje, że pojawia się składowa zerowa napięcia, która może fałszować działanie układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

O powstaniu w sieci oscylacji ferorezonansowych świadczyć mogą m.in.: asymetria napięć fazowych, zniekształcenie napięć fazowych, pojawienie się w obwodach otwartego trójkąta napięcia o częstotliwości  $0,5f_n$ .

Do wytlumienia drgań ferorezonansowych są stosowane obecnie różne rozwiązania. Najczęściej stosowane jest włączanie dodatkowej rezystancji w obwód otwartego trójkąta uzwojeń strony wtórnej przekładników. Dodatkową rezystancję można włączać trwale lub automatycznie po wykryciu zjawiska ferorezonansu. Włączanie automatyczne dodatkowej rezystancji może być zrealizowane za pomocą programowalnych przełączników cyfrowych na podstawie analizy napięcia indukowanego w obwodach otwartego trójkąta.

Dobór wartości rezystancji tłumiącej należy dla każdego obiektu wykonywać niezależnie, ze względu na różne możliwe konfiguracje rozdzielni oraz parametry zastosowanych urządzeń (typy przekładników, charakterystyki magnesowania, pojemności doziemne kabli, rodzaje odbiorów). W literaturze można się doszukać informacji, że zaleca się włączanie rezystancji w zakresie 20–100  $\Omega$ . Jednak w wielu przypadkach może się okazać, że nawet wartość rezystancji 20  $\Omega$  może być zbyt wysoka do skutecznego wy tłumienia oscylacji ferorezonansowych [1]. Najskuteczniejszą metodą doboru rezystora tłumiącego jest przeprowadzenie eksperymentu badawczego polegającego na wywoływaniu oscylacji ferorezonansowych na konkretnym obiekcie i wyborze odpowiedniej wartości rezystancji, która skutecznie będzie likwidować niepożądane oscylacje rezonansowe. Tego typu badania przeprowadzono na terenie Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań zjawiska ferorezonansu na terenie rozdzielni potrzeb własnych 6 kV w Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec. W efekcie przeprowadzonych badań obiektowych została zaproponowana i wdrożona skuteczna metoda eliminacji zjawiska ferorezonansu.

## 2. Charakterystyka badanego obiektu

Rozdzielnia potrzeb własnych 6 kV na terenie Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec (rys. 2) składa się z 34 pól i jest rozdzielnią dwusystemową z możliwością podziału każdego z systemów na dwie sekcje. Zasilanie rozdzielni zrealizowane jest za pośrednictwem dwóch transformatorów potrzeb własnych o mocy 25 MVA każdy, które przyłączone są za pomocą linii 110 kV do stacji 400/110 kV/kV Żarnowiec. W układzie normalnym systemy pracują niepodzielone na sekcje, zaś każdy z systemów zasilany jest z własnego transformatora potrzeb własnych. Istnieje możliwość połączenia obu systemów za pomocą pola sprzęgła nr 17–18 (sprzęgło podłużno-poprzeczne). Praca równoległa obu transformatorów 110/6 kV/kV nie jest dozwolona ze względu na ograniczenia wynikające z dopuszczalnej wartości mocy zwarciowej na szynach rozdzielni.

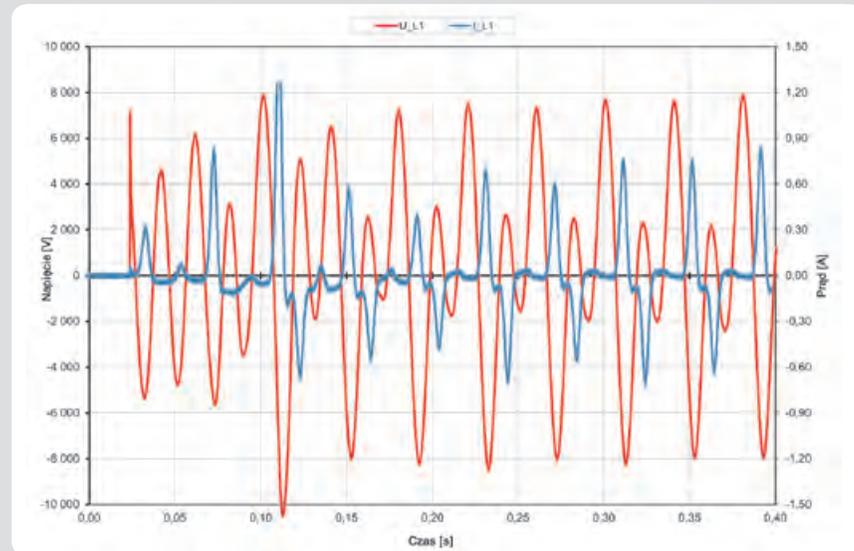
Z rozdzielni zasilane są m.in. (rys. 3):

- cztery asynchroniczne silniki rozruchowe o mocy każdy 15 MW
- blokowe rozdzielnie potrzeb własnych 0,4 kV za pośrednictwem transformatorów 1000 kVA
- rozdzielnie ogólne potrzeb własnych 0,4 kV
- rozdzielnie potrzeb własnych zbiornika górnego elektrowni za pośrednictwem kabli 6 kV o długości 2 x 2 km
- potrzeby własne stacji Żarnowiec za pomocą kabli 6 kV o długości 2 x 3 km
- cztery pola pomiaru napięcia wyposażone w indukcyjne przekładniki napięciowe typu GE12 (izolacja sucha – żywica epoksydowa, produkcja DDR).

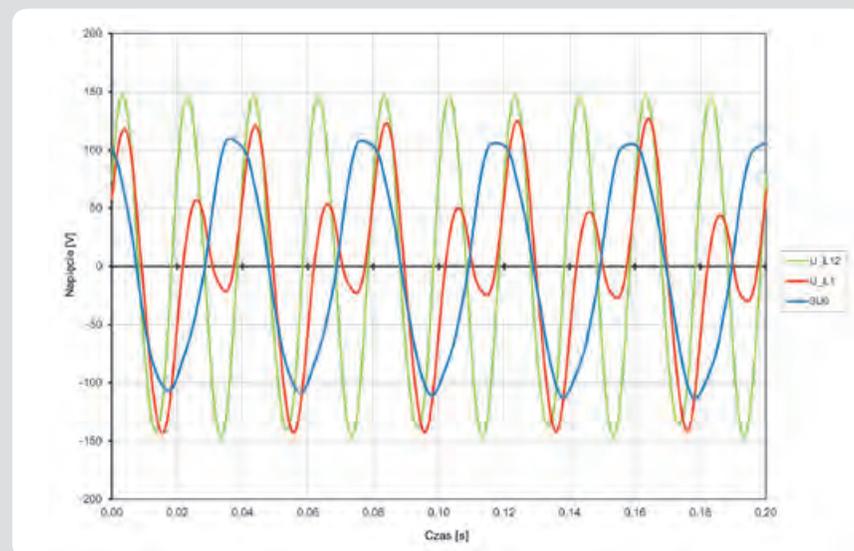
Od momentu uruchomienia ESP Żarnowiec w 1983 roku na terenie rozdzielni potrzeb własnych wielokrotnie występowało zjawisko ferorezonansu. Okolicznością, przy której najczęściej pojawiał się ferorezonans, były



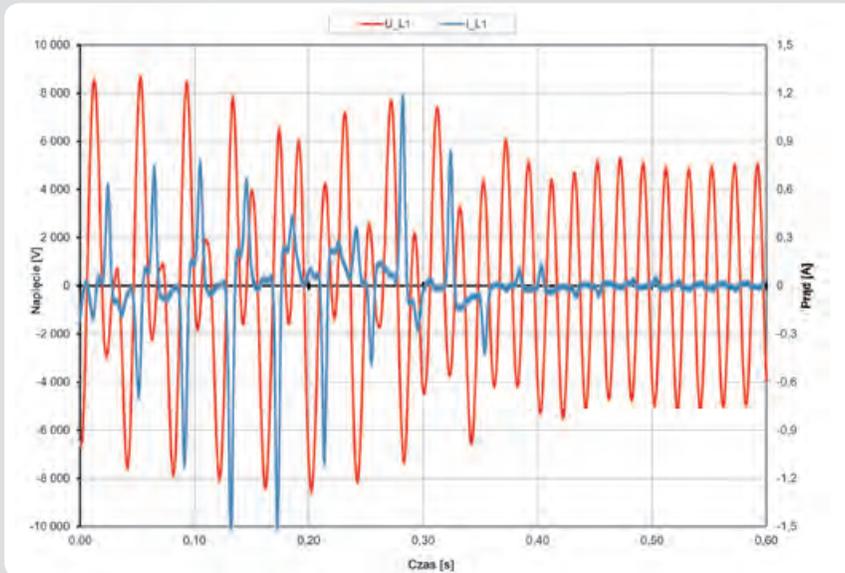
Fot. 1. Przekładniki napięciowe wraz z sondami i cęgami pomiarowymi do rejestracji napięć i prądów po stronie pierwotnej



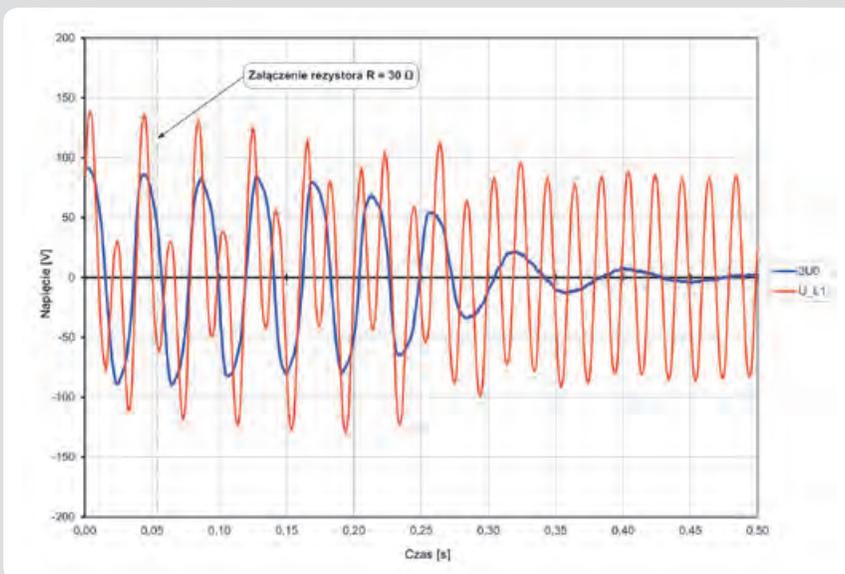
Rys. 5. Przebieg napięcia i prądu po stronie pierwotnej przekładników napięciowych w fazie L1 po podaniu napięcia na szynę rozdzielni RG 6 kV (zamknięcie wyłącznika w polu 22). Wywołanie oscylacji ferorezonansowych



Rys. 6. Przebieg napięcia zarejestrowany po stronie wtórnej przekładników napięciowych w trakcie ferorezonansu.  $3U_0$  – napięcie w obwodzie otwartego trójkąta,  $U_{L1}$  – napięcie fazowe,  $U_{L12}$  – napięcie międzyprzewodowe



Rys. 7. Przebieg napięcia i prądu po stronie pierwotnej przekładników napięciowych po załączeniu rezystora  $R = 30 \Omega$  w obwodzie otwartego trójkąta. Wytlumienie ferorezonansu



Rys. 8. Przebieg napięcia po stronie wtórnej przekładników napięciowych. Manualne załączenie rezystora tłumiącego  $R = 30 \Omega$  w obwód otwartego trójkąta.  $3U_0$  – napięcie w obwodzie otwartego trójkąta,  $U_{L1}$  – napięcie fazowe

operacje łączeniowe polegające na zmianie konfiguracji rozdzielni z krótką przerwą napięciową (praca układu SZR). Objawami, które wskazywały na pojawienie się oscylacji ferorezonansowych, było pobudzenie się przekładników ziemnozwarciowych oraz niestabilne wskazania przyrządów służących do pomiaru napięcia na szynach rozdzielni. W takiej sytuacji obsługa elektrowni wyłączała pola pomiaru napięcia w celu likwidacji ferorezonansu. Po ponownym uruchomieniu pól pomiarowych z reguły nie następowała ponowna generacja oscylacji rezonansowych.

Pojawienie się niekorzystnego zjawiska na terenie rozdzielni zawsze wymagało interwencji obsługi, co w przypadku zbyt wolnej reakcji mogło doprowadzić do uszkodzeń przekładników z powodu przeciążeń termicznych uzwojeń strony pierwotnej oraz

mogło doprowadzić do uszkodzeń izolacji pracującej aparatury i urządzeń.

W związku z tym konieczne było wprowadzenie takiego rozwiązania na teren rozdzielni, które umożliwiłoby likwidowanie niebezpiecznych oscylacji ferorezonansowych w sposób automatyczny, bez interwencji obsługi.

### 3. Przebieg i wyniki badań zjawiska ferorezonansu

Przeprowadzone kilka lat temu badania obiektowe umożliwiły dobór odpowiedniej wartości rezystancji tłumiącej włączanej w obwody otwartego trójkąta uzwojeń wtórnych przekładników napięciowych w polach pomiarowych.

Na czas eksperymentu wydzielony został jeden z systemów rozdzielni (system II), do którego przyłączono dwa pola pomiaru

napięcia (pole 8 i 30) oraz nieobciążoną linię kablową o długości 3 km. Przy takiej konfiguracji rozdzielni, przy braku odbiorów mocy czynnej ferorezonans występował praktycznie przy każdym podaniu napięcia na szynę rozdzielni za pośrednictwem pola zasilającego nr 22. Układ rozdzielni w trakcie badań został pokazany na rys. 4. Układ pomiarowy umożliwiający rejestrację przebiegów prądów i napięć w trakcie ferorezonansu został zainstalowany w polu pomiaru napięcia nr 8 (fot. 1). W skład zestawu pomiarowego wchodziły sondy wysokonapięciowe podłączone do szyn rozdzielni, cęgi prądowe do pomiaru prądu przepływającego przez stronę pierwotną przekładników oraz rejestrator cyfrowy. Do rejestratora doprowadzone zostały także sygnały pomiarowe ze strony wtórnej przekładników w postaci napięcia fazowego, napięcia międzyprzewodowego oraz napięcia składowej zerowej z obwodu otwartego trójkąta.

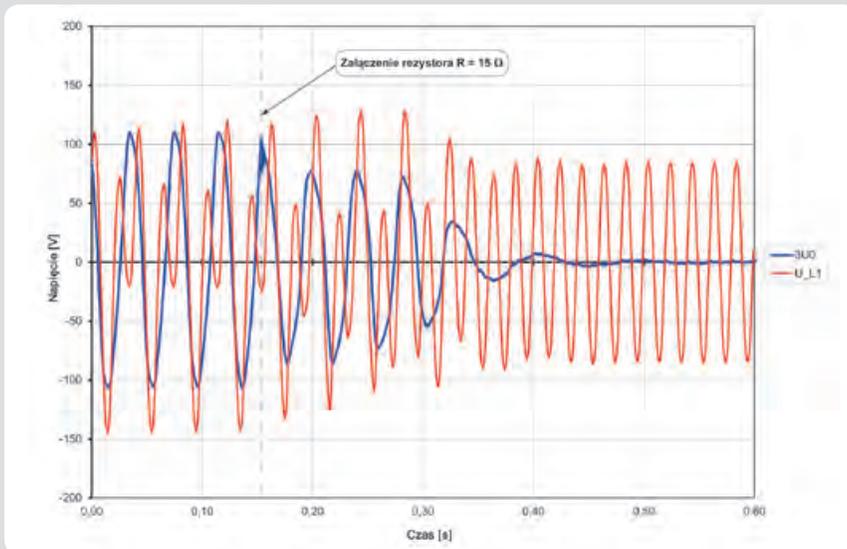
Po wyzwoleniu oscylacji rezonansowych przez podanie napięcia na szynę rozdzielni (zamknięcie wyłącznika w polu zasilającym nr 22) w polu pomiarowym nr 8 w obwód otwartego trójkąta przekładników załączane były manualne rezystory o następujących wartościach:  $100 \Omega$ ,  $47 \Omega$ ,  $30 \Omega$ ,  $15 \Omega$ . We wszystkich przeprowadzonych próbach rezystory o wartościach  $100 \Omega$ ,  $47 \Omega$  nie powodowały wytlumienia drgań rezonansowych, zaś rezystory o parametrach  $30 \Omega$ ,  $15 \Omega$  skutecznie likwidowały powstałe oscylacje.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono przebiegi napięć i prądów zarejestrowane po stronie pierwotnej i wtórnej przekładników napięciowych. Przebiegi te obrazują: inicjację ferorezonansu po zamknięciu wyłącznika w polu zasilającym (rys. 5), przebieg oscylacji w trakcie ferorezonansu (rys. 6), wytlumienie oscylacji ferorezonansowych po załączeniu rezystora  $R = 30 \Omega$  (rys. 7 i 8), wytlumienie oscylacji ferorezonansowych po załączeniu rezystora  $R = 15 \Omega$  (rys. 9).

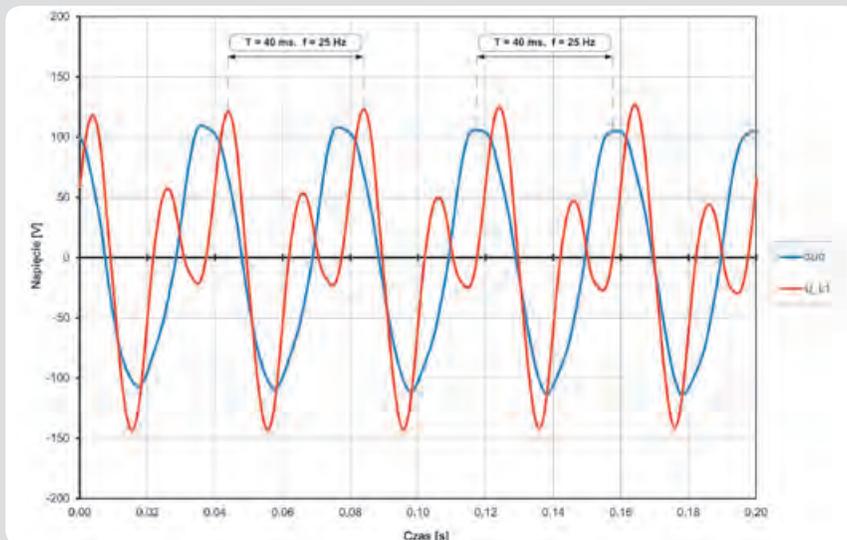
### 4. Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowane w referacie wyniki badań pokazują, że w trakcie występowania oscylacji ferorezonansowych bardzo mocno odkształcone są napięcia fazowe, a ich amplituda nawet może przekraczać po stronie pierwotnej 10 kV, gdzie w warunkach znamionowych amplituda nie powinna przekraczać 5 kV. Ponad dwukrotny wzrost napięcia powyżej wartości znamionowej stanowi duże zagrożenie dla wytrzymałości izolacji rozdzielni oraz przyłączonych do niej odbiorów. W przebiegach napięcia międzyprzewodowego zniekształcenia praktycznie nie są zauważalne, co świadczy o tym, że napięcia fazowe zniekształcone są składową o charakterze składowej zerowej o częstotliwości różnej od 50 Hz. Z analizy przebiegów napięcia  $3U_0$  w obwodzie otwartego trójkąta można stwierdzić, że składowa ta ma przebieg sinusoidalny o częstotliwości 25 Hz (rys. 10).

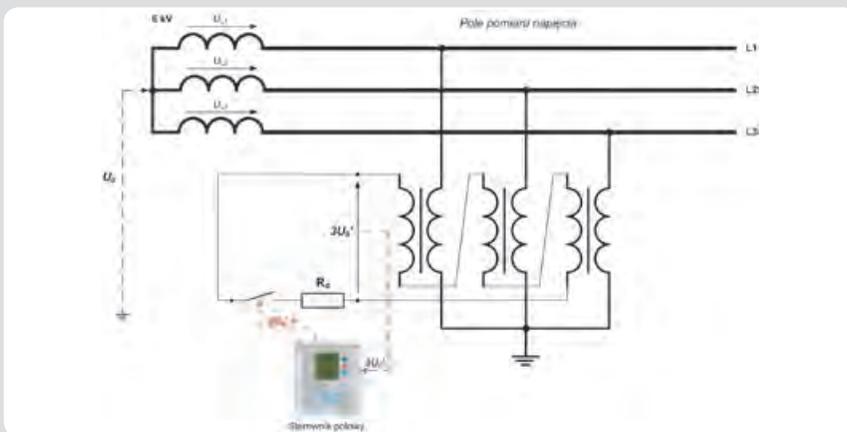
Przebiegi prądów w uzwojeniach strony pierwotnej przekładników w trakcie oscylacji ferorezonansowych są silnie zniekształcone, a amplituda wielokrotnie przekracza wartość występującą w warunkach ustalonych w stanie normalnym (np. rys. 7). Świadczy to o tym, że w trakcie



Rys. 9. Przebieg napięcia po stronie wtórnej przekładników napięciowych. Manualne załączenie rezystora tłumiącego  $R = 15 \Omega$  w obwód otwartego trójkąta.  $3U_0$  – napięcie w obwodzie otwartego trójkąta,  $U_{L1}$  – napięcie fazowe



Rys. 10. Przebieg napięcia zarejestrowany po stronie wtórnej przekładników napięciowych w trakcie ferorezonansu.  $3U_0$  – napięcie w obwodzie otwartego trójkąta,  $U_{L1}$  – napięcie fazowe fazy L1



Rys. 11. Załączenie dotykowej rezystancji przez sterownik polowy w obwodzie otwartego trójkąta przekładników napięciowych

ferorezonansu przekładniki pracują w stanie nasycenia. Praca przez dłuższy czas przekładnika w takich warunkach może doprowadzić do zniszczenia termicznego uzwojenia strony pierwotnej.

Na terenie rozdzielni potrzeb własnych 6 kV w ESP Żarnowiec skuteczną likwidację oscylacji ferorezonansowych zapewniają rezystancje włączane w obwód otwartego trójkąta o wartości poniżej  $30 \Omega$ . Należy tu podkreślić, że przy doborze wartości rezystora tłumiącego, szczególnie gdyby rezystancja ta miała być włączana na stałe, trzeba uwzględnić własności cieplne przekładnika wynikające z dopuszczalnego obciążenia uzwojeń (moc graniczna). Dodatkowe obciążenie nie może doprowadzić do przekroczenia dopuszczalnych temperatur uzwojeń. Przekładnik napięciowy z przyłączonym rezystorem tłumiącym o dość niskiej wartości najbardziej jest zagrożony przeciążeniem w sytuacji długo trwającego zwarcia doziemnego [1].

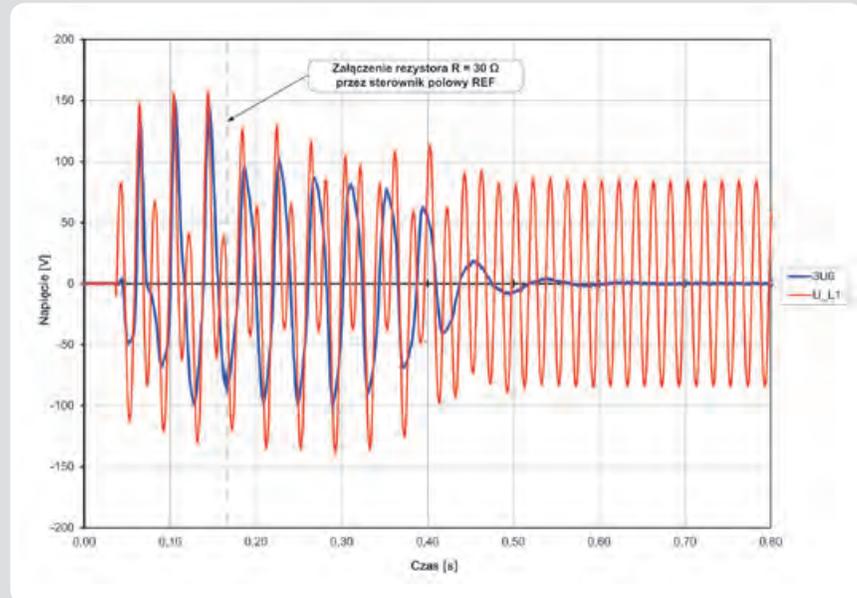
W przypadku, gdy moc graniczna przekładnika jest mniejsza niż jego obciążenie wywołane dodatkową rezystancją, można zastosować układy tłumiące, które dorywczo dociągają przekładniki. Takie dorywcze włączanie na określony czas lub do momentu stwierdzenia wytłumienia ferorezonansu można realizować za pomocą przełączników, które potrafią analizować napięcie pojawiające się w obwodzie otwartego trójkąta. Istotne jest tu określenie kryteriów pomiarowych, na których podstawie będzie można rozróżnić zjawisko ferorezonansu od zwarcia doziemnego. Kryterium, które może zostać wykorzystane do rozróżnienia drgań ferorezonansowych od zwarcia doziemnego, jest częstotliwość napięcia  $3U_0$ , którą można mierzyć w obwodach otwartego trójkąta przekładników. W trakcie badań we wszystkich przypadkach stwierdzono, że częstotliwość napięcia składowej pojawiającej się w trakcie ferorezonansu wynosi 25 Hz ( $0,5f_n$ ). Sterowniki polowe pracujące na terenie rozdzielni 6 kV w ESP Żarnowiec, niestety, nie mają możliwości pomiaru częstotliwości składowej  $3U_0$ . Dlatego dodatkowa rezystancja tłumiąca o wartości  $30 \Omega$  jest włączana automatycznie na określony czas (2 s) za każdym razem, gdy napięcie  $3U_0$  przekroczy nastawiony próg (rys. 11). Na rys. 12 pokazano sytuację, w której sterownik polowy stwierdza przekroczenie nastawionej wartości napięcia  $3U_0$  i załącza dodatkową rezystancję, która skutecznie wytłumia powstały ferorezonans.

W tym miejscu warto skierować apel do producentów przełączników cyfrowych, które przeznaczone są do pracy w sieciach średniego napięcia, aby wprowadzić do nich możliwość pomiaru częstotliwości składowej zerowej. Z technicznego punktu widzenia nie powinno to stanowić żadnego problemu, a dzięki takiemu rozwiązaniu można by selektywnie i jednoznacznie stwierdzać, czy mamy do czynienia z ferorezonansem.

#### Bibliografia

1. Anderson E., Karolak J., Zjawiska ferorezonansowe w sieciach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2009, nr 9.

2. Cichoń H., Praktyczne sposoby eliminacji ferorezonansu w sieciach elektroenergetycznych, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2005.
3. Moskwa S., Nowak W., Tarko R., Modelowanie i analiza układu sieci średniego napięcia do oceny warunków i skutków występowania ferorezonansu oraz sposobów jego eliminacji, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2009, nr 26.
4. Nowak W. i in., Ferorezonans z udziałem przekładników napięciowych w sieci średniego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, Materiały IX Sympozjum: Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia*, 2003.
5. Tarko R. i in., Ferorezonans jako źródło zakłóceń i awarii w sieciach dystrybucyjnych średnich napięć, *Materiały XV Międzynarodowej Konferencji Naukowej AKTUALNE PROBLEMY W ELEKTROENERGETYCE*, Jurata, 2011.
6. Wiśniewski J., Anderson E., Karolak J., Wrażliwość sieci potrzeb własnych elektrowni na możliwość wystąpienia ferorezonansu, *Materiały XVI Międzynarodowej Konferencji Naukowej AKTUALNE PROBLEMY W ELEKTROENERGETYCE*, Jurata 2013.



Rys. 12. Przebieg napięcia po stronie wtórnej przekładników napięciowych. Powstanie ferorezonansu po załączeniu pola zasilającego oraz jego wytłumienie przez załączenie rezystora tłumiącego  $R = 30 \Omega$  w obwodzie otwartego trójkąta za pomocą sterownika polowego.  $3U_0$  – napięcie w obwodzie otwartego trójkąta,  $U_{L1}$  – napięcie fazowe

### Maciej Łosiński

dr inż.

Elektrownia Szczytowo-Pompowa Żarnowiec

e-mail: m.losinski@post.pl

Po ukończeniu studiów na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej rozpoczął pracę w Elektrowni Szczytowo-Pompowej Żarnowiec (1998). Obecnie zajmuje tam stanowisko kierownika Wydziału Automatyki, Zabezpieczeń i Łączności. Stopień doktora nauk technicznych zdobył na swoim macierzystym wydziale (2005). Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień związanych z elektroenergetyczną automatyką zabezpieczeniową oraz modelowaniem i analizą pracy systemów elektroenergetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki regulacji napięcia i rozplywu mocy biernej. Został laureatem w konkursie na najlepszą pracę doktorską, organizowanym przez firmę ABB (2006). Jest współautorem monografii „Modele matematyczne do badania bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego” (2012).