

Mieczysław ZIELICHOWSKI<sup>1)</sup>, Remigiusz MYDLIKOWSKI<sup>2)</sup>

## PRZEPIĘCIA ZIEMNOZWARCIOWE W GENERATORACH BLOKOWYCH Z IZOLOWANYM PUNKTEM GWIAZDOWYM UZWOJEŃ STOJANA

**Streszczenie.** Określono przebiegi ziemnozwarciowe w blokach generator-transformator podczas łukowych, przerywanych zwarcí doziemnych w uzwojeniach stojanów generatorów z izolowanym punktem gwiazdowym, w układach z pojemnościami doziemnymi wyłączników generatorowych oraz układach bez pojemności wyłącznikowych.

### GROUND-FAULT OVERVOLTAGES IN UNIT-CONNECTED GENERATOR WITH NEUTRAL UNGROUNDED

**Summary.** The ground-fault overvoltages during interrupted arcing ground-fault in the stator winding of the unit-connected generator with the neutral ungrounded, equipped with generator breakers with additional capacitances to ground and in the unit without these capacitances were determined.

**Key words:** unit-connected generator, ground – fault overvoltages

#### 1. WSTĘP

Łukowe zwarcie doziemne w izolacji głównej stojana generatora ma charakter przerywany i w jednym półokresie częstotliwości przemysłowej następują wielokrotne zapłony łuku, przy czym czas palenia się łuku w krótkotrwałym stanie nieustalonym pomiędzy kolejnym zapłonem i zgaśnięciem łuku jest rzędu ułamka milisekundy [2,4,7]. W pewnych warunkach, w tym krótkotrwałym stanie nieustalonym, a więc po czasie bardzo krótkim, licząc od chwili przebicia izolacji, mogą już powstać znaczne przebiegi ziemnozwarciowe. Jeżeli przebiegi te spowodują drugie przebicie izolacji uzwojenia, to już po czasie krótszym niż 1 ms doziemienie przekształca się w zwarcie międzyfazowe lub zwojowe i przez rdzeń stojana popłynie ogromny prąd zwarciovowy, który nawet przy prawidłowym działaniu układów zabezpieczeń może znacznie zniszczyć generator. W dużej mierze rozmiar uszkodzeń uzależniony jest od zastosowanych układów odwzbudzania i parametrów bloku [1,5,6]. Jednakże nawet przy najszybszych układach odwzbudzania skutki takich zwarcí są bardzo rozległe i eliminują praktycznie generator z dalszej eksploatacji, a koszty koniecznego remontu są ogromne.

Ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji bloków generator-transformator znajomość przebiegów ziemnozwarciowych ma zasadnicze znaczenie, zwłaszcza w blokach wyposażonych w wyłączniki generatorowe z dodatkowymi pojemnościami doziemnymi [8].

W artykule przedstawiono wyniki badań ziemnozwarciowych zagrożeń przebiegów podczas łukowych, przerywanych zwarcí doziemnych w uzwojeniach stojanów generatorów 200 MW z izolowanym punktem gwiazdowym, wyposażonych w wyłączniki generatorowe firmy ABB z dodatkowymi pojemnościami doziemnymi. W oparciu o badania symulacyjne z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów bloku generator-transformator, w tym mechanizmu powstawania przerywanego zwarcia doziemnego i rezystancji dynamicznej kanału ziemnozwarciowego w izolacji głównej uzwojenia stojana, które wyznaczono w badaniach eksperymentalnych, określono maksymalne wartości przebiegów ziemnozwarciowych podczas tych zwarcí. Stwierdzono, że w

<sup>1)</sup> Prof. Politechnika Wroclawska Instytut Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel.: (071) 3203562, fax.: (071) 3203596, e-mail: zielicho@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

<sup>2)</sup> Politechnika Wroclawska Instytut Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel.: (071) 3203379, fax.: (071) 3203596, e-mail: mydlik@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

generatorach z izolowanym punktem gwiazdowym zagrożenia przepięciowe zwiększają się maksymalnie o kilkanaście procent w porównaniu z tymi w generatorach z uziemionym punktem gwiazdowym przez rezystor [8].

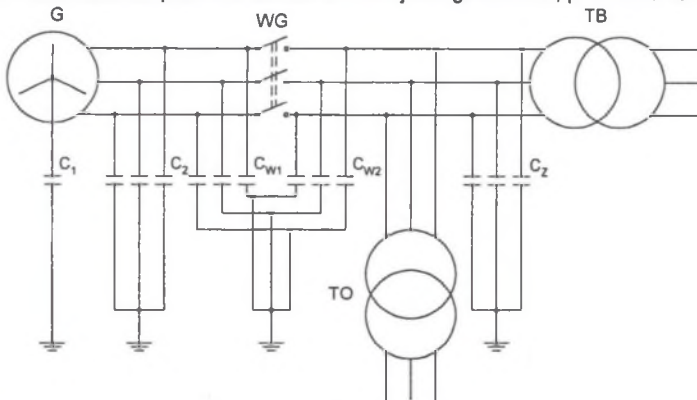
## 2. ZAKRES I METODOLOGIA BADAŃ

Ziemnozwarciowe zagrożenia przepięciowe podczas łukowych zwarcí doziemnych w uzwojeniach stojanów generatorów z izolowanymi punktami gwiazdowymi określono w oparciu o badania symulacyjne, w których uwzględniono wszystkie istotne elementy układu, wpływające na przepięcia ziemnozwarciowe, w tym zwłaszcza mechanizm przerywanego zwarcia doziemnego, rezystancję dynamiczną łuku ziemnozwarciowego oraz warunki jego zapłonu i gaśnięcia. Badaniami objęto bloki o mocy 200 MW, aktualnie eksploatowane w systemie energetycznym.

Właściwości łuku ziemnozwarciowego w krótkotrwałych stanach nieustalonych, towarzyszących kolejnym jego zapłonem, wartość rezystancji dynamicznej łuku pomiędzy kolejnym zapłonem i zgaśnięciem oraz charakter jej zmian w dłuższym przedziale czasowym zwarcia doziemnego, tj. uwzględniającym przerwy bezprądowe i kolejne zapłony, były zgodne z rzeczywistymi, określonymi w badaniach eksperymentalnych, w warunkach rzeczywistych [2].

Przyjęte w badaniach symulacyjnych parametry łuku ziemnozwarciowego, tj. zmianę jego rezystancji dynamicznej w krótkotrwałym stanie nieustalonym, w przedziale czasowym pomiędzy kolejnym zapłonem i zgaśnięciem, jej wartość w czasie przerwy bezprądowej oraz wartość napięć kolejnych zapłonów łuku, zamieszczono w pracy [8].

Wszystkie istotne elementy pojemnościowe bloku generator-transformator, wpływające na przepięcia ziemnozwarciowe podczas doziemień w stanie generatora, pokazano na rys. 1.



Rys.1. Schemat zastępczy bloku generator-transformator, uwzględniający pojemności doziemne, mające wpływ na przebiegi ziemnozwarciowe: G – generator blokowy, WG – wyłącznik generatorowy, TB – transformator blokowy, TO – transformator odczepowy

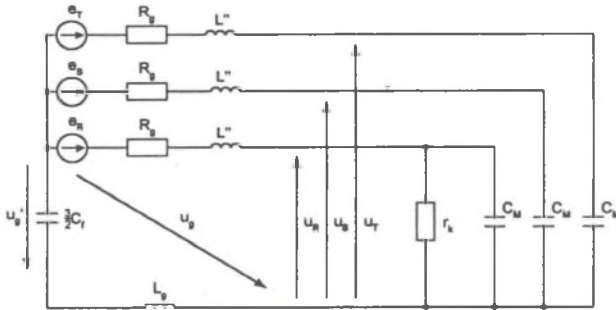
Fig.1. Equivalent diagram of a unit-connected generator with capacitances to ground influencing the ground-fault transients: G – generator, WG – generator breaker, TB – main transformer, TO – unit auxiliary transformer

Poszczególne pojemności na rys.1 oznaczają:

- C<sub>1</sub> – pojemność zastępcza uzwojeń stojana generatora względem ziemi w punkcie gwiazdowym,
- C<sub>2</sub> – pojemność zastępcza uzwojenia fazy układu względem ziemi, uwzględniająca generator wraz z połączeniami do wyłącznika generatorowego,
- C<sub>W1</sub>, C<sub>W2</sub> – pojemności doziemne wyłącznika generatorowego, odpowiednio od strony generatora i transformatora blokowego,
- C<sub>Z</sub> – pojemność zastępcza fazy układu zewnętrznego względem ziemi, widziana z zacisków otwartego wyłącznika generatorowego, uwzględniająca transformator blokowy, transformator odczepowy i połączenia wyłącznika generatorowego z tymi elementami.

Przeprowadzona analiza rzeczywistych wartości poszczególnych pojemności układu wykazała, że wartość pojemności  $C_2$  jest zbliżona do wartości określonej przez pojemność fazy uzwojenia stojana generatora względem ziemi  $C_1$ , a pojemność  $C_2$  wynosi maksymalnie kilkanaście procent pojemności  $C_1$ . W dalszej analizie przyjęto, że pojemność  $C_2$  wynosi 12% pojemności  $C_1$ , a pojemność  $C_2$  jest równa 0,5 pojemności  $C_1$ .

Po przekształceniach schemat z rys.1, umożliwiający analizę przepięć ziemnozwarciowych przy zwarciu doziemnym w stojanie generatora, przyjmuje postać pokazaną na rys.2.



Rys.2. Schemat zastępczy bloku z izolowanym punktem gwiazdowym generatora, po przekształceniach Fig.2. Equivalent diagram of a unit-connected generator with the neutral ungrounded after transformation

Poszczególne parametry na rys.2 oznaczają:

$e_R, e_S, e_T$  – siły elektromotoryczne indukowane w uzwojeniach stojana generatora,  
 $R_g, L''$  – odpowiednio, rezystancja i indukcyjność zastępcza generatora w stanie nadprzebiegowym [7],

$r_k$  – rezystancja dynamiczna kanału ziemnozwarciowego w izolacji głównej uzwojenia stojana generatora,

$L_g$  – indukcyjność w schemacie zastępczym bloku, określona zależnością:

$$L_g = \frac{1}{3}(L_0 - L''), \quad (1)$$

$L_0$  – indukcyjność generatora dla prądów kolejności zerowej,

$C_M$  – pojemność w schemacie zastępczym bloku, określona wyrażeniem:

$$C_M = \frac{C_t}{2} + C_S, \quad (2)$$

przy czym pojemność  $C_S$  wynosi:

a) w bloku bez wyłączników generatorowych:

$$C_S = C_Z, \quad (3)$$

b) w bloku z wyłącznikami generatorowymi:

– przy otwartym wyłączniku generatorowym:

$$C_S = C_{W0} = C_{W1}, \quad (4)$$

– przy zamkniętym wyłączniku generatorowym:

$$C_S = C_{Wz} + C_Z = C_{W1} + C_{W2} + C_Z, \quad (5)$$

gdzie :

$C_{W0}$  – pojemność fazy wyłącznika generatorowego względem ziemi w stanie otwartym, widziana od strony generatora,

$C_{Wz}$  – pojemność fazy wyłącznika generatorowego względem ziemi w stanie zamkniętym.

Zależności pomiędzy prądami  $i_R, i_S, i_T$  w poszczególnych fazach generatora i napięciami tych faz  $u_R, u_S, u_T$  względem ziemi, przy łukowym zwarciu doziemnym w pobliżu zacisków wyjściowych generatora (przypadek najniekorzystniejszy), określa następujący układ równań:

$$e_n = L'' \frac{di_n}{dt} + i_n R_g + u_n + u_g, \quad (6)$$

$$u_g = L_g \frac{di_0}{dt} + u_g' \quad (7)$$

$$i_0 = \frac{du_g'}{dt} \cdot \frac{3C_f}{2} \quad (8)$$

$$i_0 = \sum_{n=R}^T \frac{du_k}{dt} C_M + \frac{u_R}{r_k} \quad (9)$$

gdzie:

- $n = R, S, T$  – symbol oznaczający odpowiednio fazy R, S, T,  
 $e_n$  – siła elektromotoryczna indukowana w poszczególnych fazach generatora,  
 $u_n$  – napięcie poszczególnych faz generatora względem ziemi,  
 $i_n$  – prąd w poszczególnych fazach generatora.

Po przekształceniach otrzymuje się następujące zależności opisujące przebiegi ziemnozwarciowe napięć w obwodzie ziemnozwarciowym:

$$e_R = L'' \left( \frac{d^2 u_R}{dt^2} C_M + \frac{du_g}{dt} \frac{1}{r_k} \right) + \left( \frac{du_R}{dt} C_M + \frac{u_R}{r_k} \right) R_g + u_R + u_g \quad (10)$$

$$e_S = L'' \frac{d^2 u_S}{dt^2} C_M + \frac{du_S}{dt} C_M R_g + u_S + u_g \quad (11)$$

$$e_T = L'' \frac{d^2 u_T}{dt^2} C_M + \frac{du_T}{dt} C_M R_g + u_T + u_g \quad (12)$$

$$u_g = \frac{L_g}{L_0} \left[ u_R \left( 1 + \frac{R_g}{r_k} \right) + u_S + u_T + \left( \frac{du_R}{dt} + \frac{du_S}{dt} + \frac{du_T}{dt} \right) C_M \right] + 3u_g' \left( \frac{L_0 - L_g}{L_0} \right) \quad (13)$$

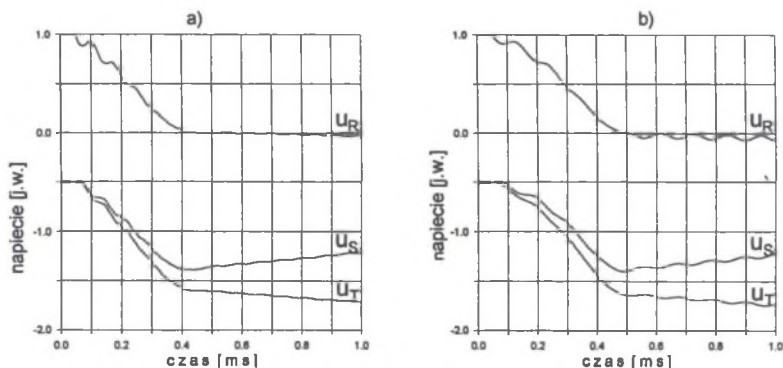
$$\frac{du_g'}{dt} = \left( \frac{du_R}{dt} + \frac{du_S}{dt} + \frac{du_T}{dt} \right) \frac{2C_M}{3C_f} + \frac{2}{3C_f} \frac{u_R}{r_k} \quad (14)$$

Zwarcie doziemne modelowano w warunkach najniekorzystniejszych, tj. na zaciskach wyjściowych generatora. Przebieg nastąpił w fazie R.

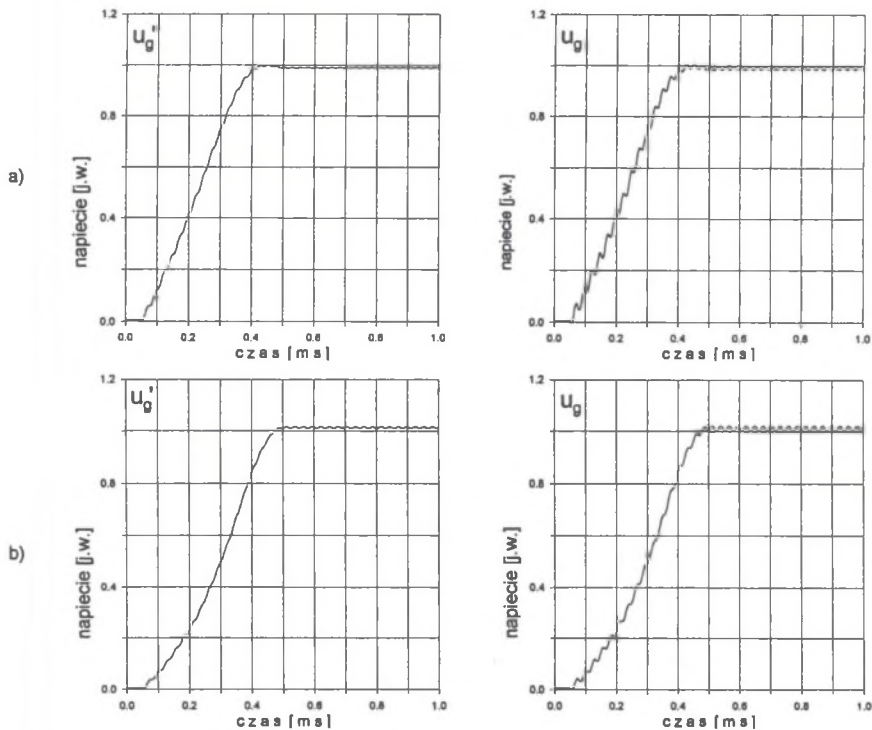
### 3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Aby ułatwić analizę porównawczą przebiegów ziemnozwarciowych napięć w obwodach generatora, podczas przerywanego łukowego zwarcia doziemnego w stojanie generatora z izolowanym punktem gwiazdowym, z tymi w generatorze z uziemionym punktem gwiazdowym przez rezystor [8], badania symulacyjne wykonano w takich samych warunkach pracy wyłącznika generatorowego i podobnych przedziałach czasowych zwarcia doziemnego. Stwierdzono, że:

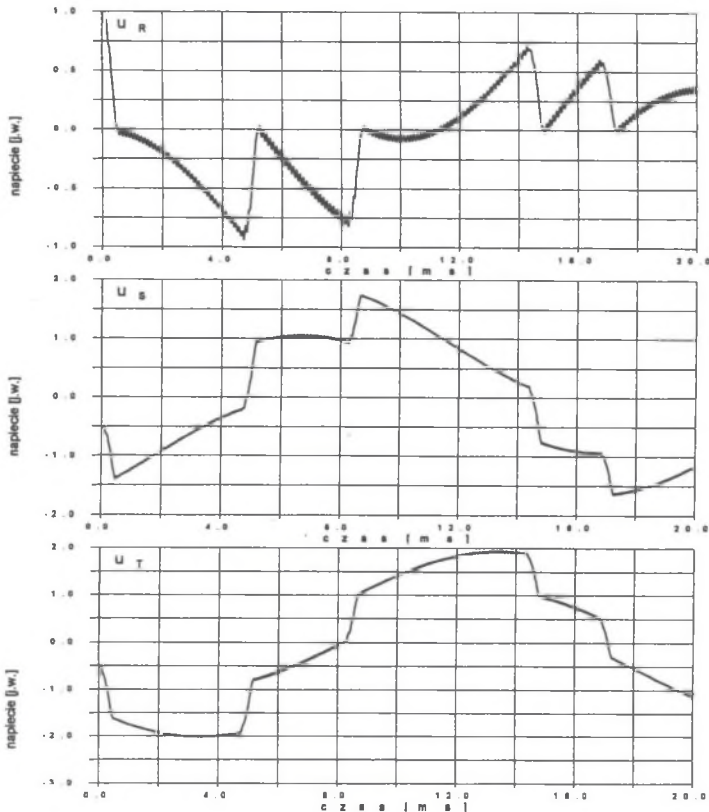
1. Spadki napięć na rezystancjach uzwojeń generatora, wywołane przepływem ziemnozwarciowego prądu przejściowego, są pomijalnie małe i nie wpływają na przepięcia ziemnozwarciowe.
2. Spadki napięć na indukcyjnościach  $L''$  generatora podczas łukowego zwarcia doziemnego wynoszą od ok. 9 do 22% amplitudy napięcia fazowego generatora, przy czym wartość maksymalna dotyczy bloku, przy nieuwzględnieniu pojemności  $C_z$ , która w warunkach rzeczywistych zawsze występuje.
3. Wpływ składowej oscylacyjnej, w napięciu punktu gwiazdowego generatora względem ziemi, na przepięcia ziemnozwarciowe jest pomijalny.



Rys. 3. Napiecia przejściowe w krótkotrwałym stanie nieustalonym po pierwszym zapłonie łuku ziemnozwarciowego w izolacji głównej uzwojeń stojana generatora blokowego; wyłącznik generatorowy: a) otwarty, b) zamknięty  
 Fig. 3. Ground-fault fast transients of phase voltages in a unit-connected generator; generator breaker: a) open; b) closed



Rys. 4. Napiecia przejściowe punktu gwiazdowego generatora po pierwszym zapłonie łuku ziemnozwarciowego w izolacji głównej uzwojeń stojana generatora blokowego; wyłącznik generatorowy: a) otwarty, b) zamknięty  
 Fig. 4. Fast transients voltages of the generator neutral in a unit-connected generator; generator breaker: a) open; b) closed



Rys.5. Napięcia poszczególnych faz w procesie doziemienia w układzie z wyłącznikiem generatorowym zamkniętym  
Fig.5. Voltages during interrupted arcing ground fault in a unit-connected generator; closed-generator breaker

4. Również na przepięcia ziemnozwarciowe nie ma istotnego wpływu składowa oscylacyjna w napięciach poszczególnych faz generatora względem ziemi, gdyż jest ona szybko tłumiona, a jej maksymalne wartości wynoszą kilkanaście procent amplitudy napięcia fazowego.

5. Różnice przebiegów napięć przejściowych w badanych blokach, powodowane wpływem ich parametrów własnych, są mało istotne z punktu widzenia przebiegów napięć ziemnozwarciowych. Dotyczy to również wpływu pojemności wyłącznikowych.

Przebiegi ziemnozwarciowe napięć przy łukowym, przerywanym zwarciu doziemnym w stojanach generatorów blokowych z izolowanym punktem gwiazdowym, w blokach z generatorami typu 50WT20H-100, przedstawiono na rysunkach od 3 do 5. Poszczególne napięcia na tych rysunkach są zgodne z oznaczeniami napięć na schemacie zastępczym bloku (rys.2).

Można stwierdzić, że przebiegi ziemnozwarciowe napięć, w krótkotrwałym stanie nieustalonym pomiędzy kolejnym zapłonem i zgaśnięciem łuku, podczas zwarcia doziemnego w stojanie generatora z izolowanym punktem gwiazdowym charakteryzują się podobnymi właściwościami jak te w generatorach z uziemionym punktem gwiazdowym przez rezystor o wartościach od 900 do 1150  $\Omega$  [8]. Dotyczy to:

- napięć na indukcyjnościach  $L''$  uzwojeń stojana generatora,
- napięć punktu gwiazdowego generatora względem ziemi,
- napięć poszczególnych faz generatora względem ziemi.

Jednakże w przedziale czasowym pomiędzy zgaśnięciem łuku w krótkotrwałym stanie przejściowym i jego ponownym zapłonem, przebiegi napięć poszczególnych faz generatora i punktu

gwiazdowego względem ziemi są inne w generatorach z izolowanym punktem gwiazdowym, niż w generatorach z uziemionym punktem gwiazdowym przez rezystor.

W przypadku izolowanego punktu gwiazdowego, jego napięcie względem ziemi po zgaśnięciu łuku do czasu ponownego zapłonu pozostaje praktycznie stałe, gdyż udział składowej oscylacyjnej w tym napięciu jest pomijalnie mały, a konduktancja izolacji głównej uzwojeń generatora jest bardzo duża. Z tego względu napięcia poszczególnych faz generatora względem ziemi, w czasie przerwy bezłukowej, osiągają wyższe wartości w generatorach z izolowanym punktem gwiazdowym niż w generatorach z uziemionym przez rezystor.

W blokach z izolowanym punktem gwiazdowym generatora wartości maksymalne tych napięć są zbliżone do podwójnej wartości amplitudy napięcia fazowego generatora.

W oparciu o przeprowadzone badania symulacyjne przebiegów ziemnozwarciowych napięć w obwodach bloków generator-transformator, podczas przerywanych łukowych zwarc doziemnych w uzwojeniach stojanów generatorów z izolowanym punktem gwiazdowym, można stwierdzić, że maksymalne przepięcia ziemnozwarciowe w tych układach mogą wynosić 2-krotną wartość amplitudy napięcia fazowego generatora.

Wynika stąd, że w porównaniu z generatorami z uziemionym punktem gwiazdowym przez rezystor, w których przepięcia wynoszą maksymalnie 1,75 amplitudy napięcia fazowego [8], przepięcia w generatorze z izolowanym punktem gwiazdowym zwiększają się maksymalnie o ok. 0,25 amplitudy napięcia fazowego generatora.

#### 4. WNIOSKI

1. Zarówno w blokach z pojemnościami wyłącznikowymi, jak i w blokach bez tych pojemności, maksymalne wartości przepięć podczas łukowych zwarc doziemnych w uzwojeniach stojanów generatorów z izolowanym punktem gwiazdowym są zbliżone do 2-krotnej wartości amplitudy napięcia fazowego generatora.
2. Wylączenie z obwodu bloku rezystora uziemiającego punkt gwiazdowy uzwojeń stojana generatora powoduje wzrost przepięć ziemnozwarciowych o około 14 procent. Przy łącznej ocenie wpływu rezystora na zagrożenia ziemnozwarciowe należy uwzględnić fakt istotnego zmniejszenia się prądów ziemnozwarciowych, w generatorach z izolowanym punktem gwiazdowym, a tym samym zagrożeń powodowanych energią łuku ziemnozwarciowego [3]. Z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji bloków generator-transformator, przy spełnieniu pewnych warunków, układy bez rezystorów uziemiających punkty gwiazdowe generatorów mogą być korzystniejsze niż układy z tymi rezystorami.
3. Ocena wpływu rezystora uziemiającego punkt gwiazdowy generatora na zagrożenia ziemnozwarciowe winna być dokonana w oparciu o analizę możliwości przekształcenia się zwarcia doziemnego w zwarcie silnoprądowe, tj. międzyfazowe lub zwowe, przy uwzględnieniu wszystkich czynników wpływających na przebieg tego zjawiska. Dotyczy to także stanu izolacji uzwojenia stojana generatora.

#### LITERATURA

1. Gulachenski E.M., Courville E.W.: New England electric's 39 years of experience with resonant neutral-grounding of unit-connected generators, IEEE Transients on Power Delivery, Vol.6, No.3, 1991, pp.1016-1024.
2. Zielichowski M.: Current-voltage transients in the breakdown channel during earth-faults in stator windings of turbogenerators, Archiwum Elektrotechniki, Vol.37, No.1/4, 1988, pp.141-147.
3. Zielichowski M.: Erosion du circuit magnetique des stators de turbogeneraterus pendant les courts-circuits à la terre, Revue Electricité, Vol.9, No 11-12, 1980, pp. 226-234.
4. Zielichowski M.: Mechanism of earth-fault are quenching in the main isolation of the turbogenerators, Proc. of the first European Conf. On Power Systems Transients, Instituto da Energia INTERG, Lisbon, 1993, pp.33-38.
5. Zielichowski M., Fulczyk M.: Ground-fault fast transients in the generator stator windings, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering ISH'95, Institute of High Voltage Engineering Graz University of Technology, Graz, 1995, pp.6796-1-6796-4.

6. Zielichowski M., Fulczyk M., Mydlikowski R.: Ground-fault overvoltage danger in modern unit-connected generators, 8th Int. Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, Brussels, Belgium, 1998, pp.144-147.
7. Zielichowski M., Fulczyk M., Mydlikowski R.: Ground-fault overvoltage danger in modern unit-connected generators, European Transactions on Electrical Power Engineering. Vol.10, No.3, 2000, pp.171-178.
8. Zielichowski M., Mydlikowski R.: Ziemnozwarciowe przebiegi przejściowe w generatorach wielkich mocy, Badania maszyn elektrycznych. XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych. Badania, diagnostyka, modelowanie maszyn elektrycznych. SME 2000. Szklarska Poręba, 13-17 czerwca 2000, pp.113-121.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Bytnar

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lutego 2001 r.

### Abstract

In order to protect effectively unit-connected generators against the effects of ground-faults in their stator windings the phenomena that accompany these faults must be fully investigated. Overvoltages during arcing ground-faults close to the generator terminals are the greatest danger to the main insulation of the generator windings. Appropriately high overvoltages are accompanied by a significant increase in electrical stresses in the winding main insulation. These stresses weaken the insulation and can cause secondary faults.

Since the ground-fault arc has interrupted character, multiple ignitions and quenching accompanied by fast transients occur in the ground-fault process. These phenomena have a marked influence on the ground-fault overvoltage values.

The voltage-current fast transients during ground-faults in the stator of a unit-connected generator depend on the parameters in its zero-sequence circuit and on the mechanism of the interrupted ground-fault. This applies mainly to the elements grounding the generator neutral, the elements connected to its terminals, the resistance of the ground-fault arc and the mechanism of its quenching.

The ground-fault overvoltages during interrupted arcing ground-fault in the stator winding of a unit-connected generator with a neutral ungrounded, equipped with generator breakers with additional capacitances to ground and in the unit without these capacitances were determined.

As a result of simulation tests the ground-fault voltages in the fast transients after the first arc ignition and in the whole ground-fault process were determined. The interrupted ground-fault was modelled on the generator terminals of the R phase. The first breakdown occurred when the  $e_R$  voltage reached the maximum. The obtained voltages are given in relative units in relation to the  $U_{fm}$  amplitude of the  $e_R$  generator phase voltage.

The studies have shown that capacitances to ground of a generator breaker has the negligible influence on the values of overvoltages during ground faults in the stator windings of a unit-connected generator.

In real conditions the maximum ground-fault overvoltages in the tested generators with the neutral points ungrounded did not exceed the double value of the phase voltage amplitude (Fig.5).

The grounding resistor improves the overvoltage conditions in comparison with those which exist in generators with ungrounded neutral. According to the grounding resistor parameters and the character of an interrupted ground fault, the reduction in overvoltage can be from several to 14 per cent.