

Marian MIKRUT  
Zygmunt PILCH  
Marian SAUCZEK

## NIETYPOWE ZAKŁÓCENIE PODCZAS PROCESU SYNCHRONIZACJI BLOKU ENERGETYCZNEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę przyczyn uszkodzenia wyłącznika zainstalowanego po stronie 400 kV bloku energetycznego podczas przygotowania tego bloku do synchronizacji oraz omówiono zachowanie się elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej w czasie tego zdarzenia.

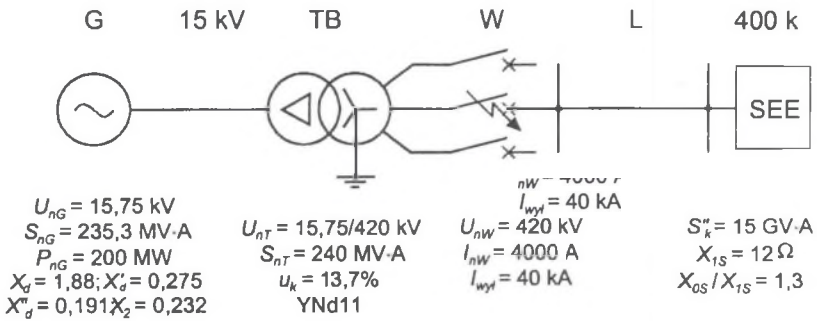
## NON-TYPICAL FAULT DURING PROCESS OF POWER UNIT SYNCHRONIZATION

**Summary.** An analysis of reasons of failure of a circuit breaker installed on 400 kV side of power unit during preparation of pulling the unit into step has been presented in the paper. A behaviour of power protection during this event has been also discussed.

### 1. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO UKŁADU

Rozpatrywany blok elektroenergetyczny, w skład którego wchodzi generator synchroniczny typu TWW-200-2 o mocy 200 MW i transformator blokowy typu TWB 240000/400 o mocy 240 MV·A, jest połączony krótką, jednotorową linią 400 kV ze stacją sieciową o takim samym napięciu. W polu transformatora blokowego stacji 400 kV elektrowni zainstalowany jest wyłącznik z sześciofluorkiem siarki o napięciu znamionowym 420 kV i prądzie znamionowym 4000 A. Wyłącznik ten, ze względu na brak wyłącznika generatorowego, wykorzystywany jest w procesie synchronizacji bloku z systemem elektroenergetycznym.

Uproszczony schemat ideowy układu połączeń rozpatrywanego bloku z systemem elektroenergetycznym (SEE), wraz z podstawowymi danymi technicznymi poszczególnych urządzeń, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat ideowy układu połączeń bloku z systemem elektroenergetycznym

Fig. 1. Simplified equivalent scheme of connection of the power unit to the power system

## 2. OPIS PRZEBIEGU ZAKŁÓCENIA I JEGO OBJAWY

Przebieg zakłócenia został odtworzony na podstawie:

- zapisu rejestratora zdarzeń i zakłóceń,
- wyników pomiaru przez układ rejestracji wartości wielkości elektrycznych podczas zakłócenia,
- dokumentacji poawaryjnej.

Z danych tych wynikało, że podczas przygotowywania do synchronizacji bloku 200 MW nastąpiło pobudzenie zabezpieczenia zerowoprądowego, reagującego na składową zerową prądu płynącego w przewodzie uziemiającym punkt neutralny transformatora blokowego po stronie 400 kV. Po upływie ok. 3 s od chwili pobudzenia tego zabezpieczenia pobudziło się i zadziało zabezpieczenie generatora od zwarć zewnętrznych (podimpedancyjne), powodując samoczynne odzwbudzenie generatora oraz odcięcie dopływu pary do turbiny, a po upływie dalszych 11 s nastąpiło wyłączenie bloku wskutek zadziałania zabezpieczeń linii 400 kV w stacji sieciowej.

W wyniku przeprowadzonej wizji lokalnej po zaistniałym zakłóceniu stwierdzono, że całkowitemu zniszczeniu uległy komory gaszeniowe bieguna fazy L2 wyłącznika synchronizowanego bloku po stronie 400 kV.

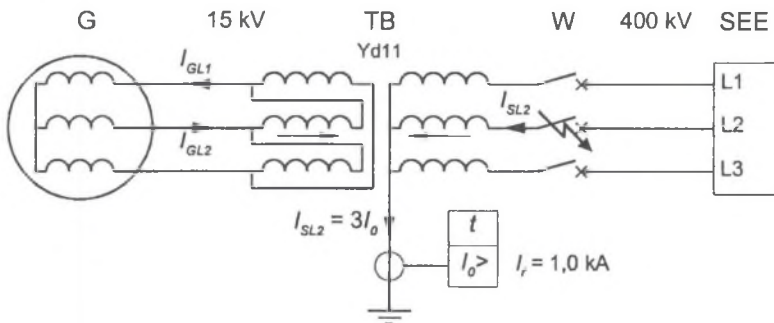
## 3. ANALIZA STANU ZAKŁÓCENIOWEGO

Awarię wyłącznika 420 kV z sześćfluorkiem siarki spowodował – jak wykazali autorzy w orzeczeniu poawaryjnym – zapłon łuku elektrycznego w przerwach międzystykowych obydwu komór gaszeniowych bieguna fazy L2, który nastąpił w stanie otwartym wyłącznika, co uniemożliwiło dokończenie procesu synchronizacji bloku. Zapłon łuku w przerwach międzystykowych wyłącznika wystąpił w chwili, gdy kąt przesunięcia fazowego między

napięciami generatora i systemu elektroenergetycznego (po stronie 400 kV transformatora blokowego) wynosił w przybliżeniu  $180^\circ$ , czyli w stanie tzw. opozycji fazowej tych napięć. Generator bloku był bowiem w chwili poprzedzającej wyładowanie łukowe w przerwach międzystrykowych bieguna wyłącznika bloku przygotowany do automatycznej synchronizacji, będąc wzbudzonym do napięcia znamionowego na biegu jałowym. Skuteczna wartość napięcia między zaciskami otwartego bieguna wyłącznika osiąga w tych warunkach poziom 485 kV, natomiast wartości chwilowe omawianego napięcia, utrzymujące się w dłuższych okresach (nawet rzędu sekund), mogą wynosić do 686 kV, co stwarza trudne warunki pracy dla tego rodzaju wyłączników.

Pojawienie się łuku elektrycznego w komorach gaszeniowych bieguna fazy L2 wyłącznika bloku doprowadziło do jednofazowego zasilania transformatora blokowego od strony systemu elektroenergetycznego o napięciu 400 kV i mocy zwarciowej 15 GV·A poprzez krótką linię 400 kV. Pobudzenie się w tych warunkach zabezpieczenia zerowoprądowego od zwarcí doziemnych po stronie górnego napięcia transformatora blokowego, zasilanego z przekładnika prądowego umieszczonego w przewodzie uziemiającym punkt neutralny transformatora blokowego, świadczyło o przepływie w przewodach fazy L2 linii 400 kV i odpowiadającym jej biegunie wyłącznika bloku prądu o wartości większej od 1 kA. Prąd ten po transformacji przez transformator blokowy o grupie połączeń Yd11 miał w uzwojeniach faz L1 i L2 generatora wartość, którą określić można jako większą od 15,4 kA. Wyniki rejestracji wielkości elektrycznych podczas zakłócenia potwierdzają przepływ w uzwojeniach faz L1 i L2 generatora prądów o wartościach po 11,25 kA, stanowiących maksimum zakresu pomiarowego przetworników rejestratora.

Rozpływ prądów w transformatorze blokowym i generatorze podczas wyładowania łukowego w komorach gaszeniowych fazy L2 wyłącznika 420 kV w czasie przeprowadzania synchronizacji bloku z systemem elektroenergetycznym przedstawiono na rys. 2.

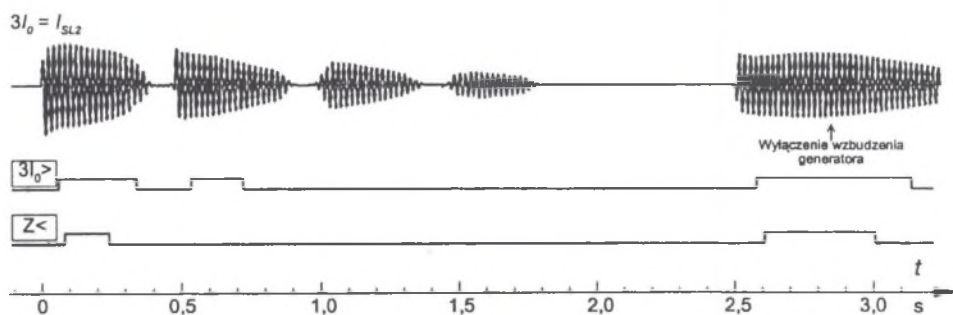


Rys. 2. Schemat ideowy rozplywu prądów w transformatorze blokowym TB oraz generatorze G podczas wyładowania łukowego w komorach gaszeniowych fazy L2 wyłącznika 420 kV, podczas przeprowadzania automatycznej synchronizacji bloku

Fig. 2. Equivalent scheme of a current flow in the unit transformer TB and generator G during the arc discharge in quenching chambers of phase L2 of the 420 kV circuit breaker during power unit automatic synchronization

Wskutek zjawisk występujących w generatorze prąd wyładowania łukowego w biegunie fazy L2 wyłącznika zmniejszył swoją wartość i po upływie 0,3 s obniżył się do poziomu poniżej 1 kA (zabezpieczenie zerowoprądowe transformatora blokowego odzwbudziło się), nastąpiło krótkotrwałe (trwające ok. 0,1 s) zgaszenie łuku, po czym nastąpił ponowny zapłon łuku w komorach gaszeniowych fazy L2 wyłącznika oraz dalszy przepływ prądu, trwający podobnie jak poprzedni ok. 0,4 s.

Przedstawiony cykliczny charakter zmian wartości prądu wyładowania łukowego w biegunie fazy L2 wyłącznika bloku, jak wynika to z zarejestrowanego przebiegu prądu płynącego w przewodzie uziemiającym punkt neutralny transformatora blokowego (rys. 3), wystąpił czterokrotnie w okresie 1,8 s, tj. czterokrotnie następowało kolejno wyładowanie łukowe, a następnie odbudowa wytrzymałości elektrycznej przerw międzystykowych w rozpatrywanym biegunie wyłącznika.



Rys. 3. Przebieg prądu w przewodzie uziemiającym punkt neutralny transformatora blokowego ( $3I_0 = I_{SL2}$ ) oraz wykresy stanu pracy zabezpieczenia zerowoprądowego transformatora ( $3I_0 >$ ) i zabezpieczenia podimpedancyjnego ( $Z <$ )

Fig. 3. Current waveforms in earth conductor of the unit transformer neutral ( $3I_0 = I_{SL2}$ ) and diagrams of operation of the transformer zero-sequence current protection ( $3I_0 >$ ) and the underimpedance protection ( $Z <$ )

Zjawisko kolejno występujących wyładowań łukowych i krótkotrwałej odbudowy wytrzymałości elektrycznej przerw międzystykowych należy wiązać z mechanizmem palenia się łuku elektrycznego w zamkniętej przestrzeni komór gaszeniowych wypełnionych sześciofluorkiem siarki, a także stosunkowo niewielką wartością prądu wyładowania w chwilach jego gaszenia (mniejszą od  $0,2I_{nW}$ ). Przyczyn zmniejszania się amplitudy prądu wyładowania łukowego w kolejnych cyklach jego przepływu (zabezpieczenie zerowoprądowe transformatora blokowego pobudziło się tylko w dwóch pierwszych cyklach), a także ostatniego dłuższego (trwającego ok. 0,7 s) zaniku prądu należy natomiast upatrywać przede wszystkim w zmniejszaniu się wartości napięcia między zaciskami otwartego wyłącznika, wynikającej głównie z różnicy częstotliwości napięć generatora i sieci. W czasie występowania omawianych zjawisk częstotliwość napięcia generatora nieznacznie się zmniejszała (maleła), przy czym różnica częstotliwości napięć generatora i sieci nie przekraczała  $\pm 1\%$ .

Po upływie 2,5 s (licząc od chwili wystąpienia zakłócenia) nastąpiło kolejne, piąte wyładowanie łukowe w przerwach międzystykowych omawianego bieguna wyłącznika, a pobudzenie się zabezpieczenia zerowoprądowego transformatora świadczyło o przepływie w rozpatrywanym biegunie wyłącznika prądu większego od 1 kA. Prawie równocześnie z zabezpieczeniem zerowoprądowym transformatora pobudziło się między innymi zabezpieczenie generatora od zwarć zewnętrznych (podimpedancyjne), które po upływie 0,25 s zadziało, powodując samoczynne odwzbudzenie generatora oraz odcięcie dopływu pary do turbiny.

Łuk elektryczny palący się w komorach gaszeniowych bieguna fazy L2 wyłącznika bloku, pozostającego przez cały czas zakłócenia w stanie otwartym, doprowadził do znacznego wzrostu ciśnienia sześćofluorku siarki oraz naprężeń termicznych w ceramicznych osłonach izolacyjnych komór gaszeniowych i w konsekwencji do ich rozerwania. Rozhermetyzowanie tego bieguna wyłącznika, sygnalizowane niskim stanem ciśnienia SF<sub>6</sub> po upływie ok. 3 s od chwili powstania zakłócenia, spowodowało wydostanie się łuku elektrycznego poza zamkniętą przestrzeń komór gaszeniowych i jego dalsze palenie się w powietrzu, pomiędzy przewodzącymi elementami komór. Proces palenia się łuku miał charakter stabilny, co wynika z zarejestrowanego przebiegu prądu, z uwagi na znaczną indukcyjność obwodu, w którym łuk występował.

Generator synchroniczny bloku po wyłączeniu wzbudzenia zwiększył swoją impedancję, co wpłynęło na ograniczenie wartości prądu płynącego w biegunie fazy L2 wyłącznika blokowego (pobudzone zabezpieczenie zerowoprądowe transformatora blokowego zostało odwzbudzone). Z zapisu rejestracji wielkości elektrycznych podczas zakłócenia wynika, że w tych warunkach w uzwojeniach faz L1 i L2 generatora płynęły prądy o wartościach po 8,62 kA, a zatem prąd w przewodzie fazy L2 linii 400 kV łączącej system z transformatorem blokowym miał wartość 0,56 kA.

Po upływie ok. 11 s od chwili rozerwania się komór gaszeniowych bieguna fazy L2 wyłącznika bloku zakłócenie przerodziło się w jednofazowe zwarcie z ziemią na izolacji doziemnej tego bieguna. Doprowadziło to do pobudzenia się i zadziałania zabezpieczenia linii 400 kV w stacji sieciowej, powodując otwarcie wyłącznika linii w tej stacji oraz w konsekwencji likwidację zakłócenia.

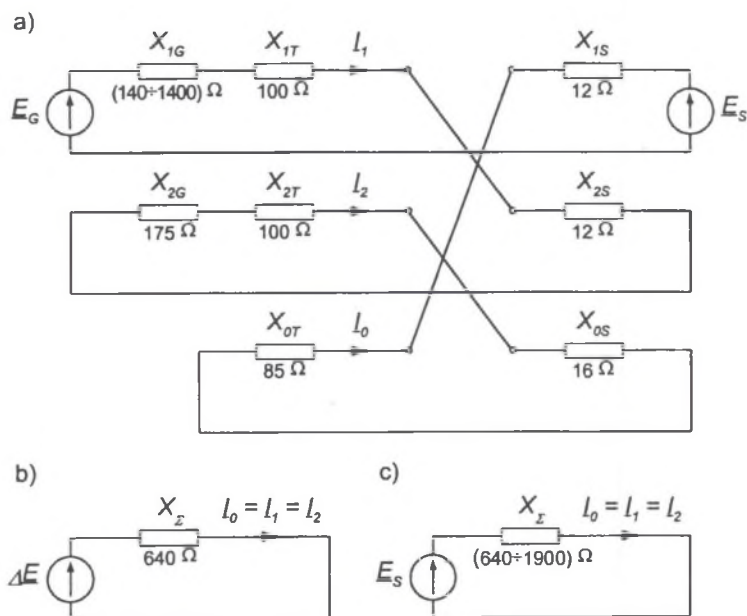
#### 4. ZACHOWANIE SIĘ ZABEZPIECZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

Aby przeprowadzić ocenę zachowania się zabezpieczeń rozpatrywanego bloku podczas przedstawionego zakłócenia, wykonano odpowiednie obliczenia, których celem było określenie wartości wielkości pobudzających poszczególne rodzaje zabezpieczeń i porównanie warunków działania tych zabezpieczeń z zapisem rejestratora zakłóceń i zdarzeń.

Wystąpienie wyładowania łukowego w przerwach międzystykowych komór gaszeniowych bieguna fazy L2 wyłącznika bloku doprowadziło do jednofazowego zasilania transformatora blokowego od strony stacji sieciowej 400 kV. Zapłon łuku, jak to już stwier-



dzono, nastąpił w czasie opozycji fazowej napięcie sieci zasilającej oraz wzbudzonego i przygotowanego do synchronizacji generatora. Powstała w ten sposób silna asymetria rozpatrywanego obwodu, która doprowadziła do pojawienia się składowych symetrycznych prądów. Wartości tych prądów można wyznaczyć na podstawie schematu zastępczego przedstawionego na rys. 4. Jest oczywiste, że w miarę upływu czasu od chwili powstania zakłócenia zmieniały się warunki zasilania obwodu, z uwagi na zmianę napięcia wypadkowego  $\Delta E$  wskutek zmieniającej się prędkości obrotowej synchronizowanego generatora. Zmieniały się w czasie również parametry samego generatora.



Rys. 4. Schemat obwodu dla określenia rozplywu prądów składowych symetrycznych po wystąpieniu wyladowania łukowego w fazie L2 bieguna wyłącznika 420 kV: a) pełny, b) zredukowany z generatorem w stanie wzbudzenia, c) zredukowany z generatorem odwzbudzonym

Fig. 4. Scheme of a circuit for current symmetrical components' flow after arc discharge appearance in phase L2 of the 420 kV circuit breaker pole: a) a full scheme, b) the reduced one with generator in state of excitation, c) the reduced one, when the generator exciter is de-energized

Po wystąpieniu wyladowania łukowego w biegunie wyłącznika 420 kV, gdy generator pozostawał wzbudzony, wartość prądu płynącego w przewodzie fazy L2 linii 400 kV można określić korzystając z zależności

$$I_{SL2} = 3I_0 = \frac{3\Delta E}{X_z} = (0 \div 2,3) \text{ kA} .$$

W przypadku maksymalnej wartości napięcia wypadkowego  $\Delta E$ , równej podwójnej wartości napięcia fazowego sieci, prąd płynący w przewodzie fazy L2 linii 400 kV mógł osiągnąć (przy pominięciu rezystancji łuku występującego w przerwie międzystykowej wyłącznika bloku) wartość 2,3 kA, czyli przekraczającą wartość prądu rozruchowego zabezpieczenia zerowoprądowego transformatora, przeliczonego na stronę pierwotną przekładnika prądowego. Oznacza to, że wartości prądów w uzwojeniach faz L1 i L2 generatora mogły dochodzić do 35 kA, co stanowi czterokrotną wartość prądu znamionowego generatora.

Po wyłączeniu wzbudzenia generatora, które nastąpiło po 2,8 s od chwili wystąpienia zakłócenia, jego napięcie znacznie się obniżyło. Napięciem wymuszającym przepływy prądów było praktycznie napięcie od strony systemu 400 kV. Jednocześnie reaktancja niewzbudzonego generatora wzrosła. W tych warunkach prąd płynący w fazie L2 linii 400 kV oszacować można ze związku

$$I_{SL2} = 3I_0 = \frac{3E_s}{X_T} = (0,4 \div 1,15) \text{ kA}.$$

Obliczenia te znajdują potwierdzenie w rezultatach rejestracji wielkości elektrycznych podczas zakłócenia (por. p. 3).

Wyniki przedstawionych wyżej rozważań uzasadniają następującą interpretację i ocenę zachowania się automatyki zabezpieczeniowej:

- W pierwszej chwili po powstaniu zakłócenia i pojawieniu się prądu w fazie L2 po stronie 400 kV o wartości większej od 1 kA (prąd rozruchowy zabezpieczenia zerowoprądowego odniesiony do strony pierwotnej przekładnika) oraz w fazach L1 i L2 generatora po stronie 15 kV o wartościach przekraczających 15,4 kA nastąpiło prawidłowe pobudzenie się zabezpieczeń:

- zerowoprądowego transformatora blokowego,
- od przeciążenia uzwojenia stojana generatora,
- podimpedancyjnego od zwarć zewnętrznych generatora,
- od asymetrii obciążenia generatora,
- od mocy zwrotnej generatora.

Ze względu na wartości rozruchowe zabezpieczeń oraz czas występowania i wartości prądów zabezpieczenia te odzwbudziły się. Poprawnie zachowało się również zabezpieczenie od zwarć wewnętrznych bloku, czyli nie pobudziło się, ponieważ zakłócenie miało charakter zewnętrzny. Pobudzenie się zabezpieczenia od mocy zwrotnej generatora można — w tym etapie awarii — wyjaśnić stanem przejściowym pracy układu „generator — system”, w którym generator chwilowo pobierał moc czynną z systemu dla podtrzymania swoich obrotów.

- Po czasie wynoszącym ok. 0,6 s wystąpił ponowny wzrost prądu  $3I_0$  powyżej 1 kA, który doprowadził do kolejnego, krótkotrwałego (trwającego ok. 0,2 s) pobudzenia zabezpieczenia zerowoprądowego transformatora blokowego. Następnie w czasie prawie 2 s prąd ten posiadał wartość mniejszą od 1 kA lub nawet zanikał wskutek zjawisk opisanych w p. 4.

- Ponowny wzrost prądu w fazie L2 linii 400 kV powyżej 1 kA wystąpił po czasie 2,5 s (licząc od chwili powstania zakłócenia) i ponownie zostały pobudzone wszystkie wymienione

zabezpieczenia, z wyjątkiem zabezpieczenia od mocy zwrotnej generatora. Obniżenie impedancji obwodu poniżej wartości rozruchowej zabezpieczenia podimpedancyjnego doprowadziło do zadziałania tego zabezpieczenia, pobudzenia przekaźnika wyjściowego zabezpieczeń elektrycznych bloku i w efekcie do odstawienia bloku (odwzbudzenie generatora, zamknięcie zaworów pary). Wyłącznik bloku po stronie 400 kV był w tym czasie otwarty, a więc impuls wyłączający od tego zabezpieczenia nie mógł, oczywiście, spowodować otwarcia nawet sprawnego wyłącznika.

- Nadal więc trwało jednofazowe zasilanie bloku poprzez łuk elektryczny występujący w przerwie międzystykowej bieguna fazy L2 wyłącznika bloku. Generator utrzymywał się w pracy jako silnik asynchroniczny, pobierając z systemu moc czynną, wskutek czego zadziałało prawidłowo zabezpieczenie od mocy zwrotnej, doprowadzając do ponownego pobudzenia przekaźnika wyjściowego zabezpieczeń elektrycznych bloku.

- Stan pracy asynchronicznej generatora utrzymywał się przez czas ok. 11 s. W tym czasie prąd w fazie L2 linii 400 kV był niewielki (mniejszy od 1 kA) i był niewystarczający do zadziałania zabezpieczeń sieciowych linii 400 kV od strony systemu elektroenergetycznego.

- Po czasie ok. 14 s od chwili powstania zakłócenia wystąpiło jednofazowe zwarcie z ziemią na izolacji doziemnej bieguna fazy L2 wyłącznika bloku, co doprowadziło do pobudzenia się i zadziałania zabezpieczeń sieciowych linii 400 kV, powodując otwarcie wyłącznika tej linii w stacji sieciowej, a tym samym do likwidacji zakłócenia.

Reasumując powyższe rozważania, można stwierdzić, że zachowanie się automatyki zabezpieczeniowej rozpatrywanego bloku podczas zakłócenia było prawidłowe, a w zaistniałej sytuacji jedynie zabezpieczenia linii 400 kV w stacji sieciowej, stanowiące rezerwę zdalną zabezpieczeń bloku, mogły i spowodowały definitywną likwidację zakłócenia.

## 5. WNIOSKI I UWAGI

1. Przyczyną uszkodzenia wyłącznika zainstalowanego po stronie 400 kV bloku energetycznego podczas przygotowania tego bloku do synchronizacji był zapłon łuku elektrycznego w przerwach międzystykowych obydwu komór gaszeniowych jednego z biegunów tego wyłącznika. Zapłon łuku wystąpił w stanie tzw. opozycji fazowej napięć generatora i systemu elektroenergetycznego. Łuk elektryczny palący się w komorach gaszeniowych bieguna wyłącznika bloku, pozostającego przez cały czas awarii w stanie otwartym, doprowadził do znacznego wzrostu ciśnienia sześćsiofluorku siarki oraz naprężeń termicznych w osłonach izolacyjnych (izolatorach) komór gaszeniowych i w konsekwencji do ich rozerwania.

2. Warunki pracy rozpatrywanego wyłącznika podczas synchronizacji generatora z systemem elektroenergetycznym są szczególnie trudne z uwagi na możliwość relatywnie długotrwałego utrzymywania się na jego przerwach międzyczaciskowych napięcia o podwójnej



wartości napięcia fazowego sieci. Dlatego też wyłączniki tego rodzaju powinny być dobierane i poddawane badaniom diagnostycznym w sposób szczególnie staranny.

3. Zachowanie się automatyki zabezpieczeniowej bloku podczas analizowanego zakłócenia oceniono jako prawidłowe. Ostateczna likwidacja zakłócenia mogła być dokonana tylko przez zabezpieczenia i wyłącznik linii 400 kV w stacji sieciowej.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Gerhard Bartodziej

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 maja 2000 r.

### Abstract

The paper is aimed at analysis of fault which led to damage of the 400 kV SF<sub>6</sub>-insulated unit circuit breaker during preparatory operations in order to pull the power unit into step. The paper includes:

- a short characteristic of arrangement of the power unit circuit where the fault occurred and technical data of the unit (Fig. 1)
- a description of the fault and its symptoms
- an analysis of the fault state
- an analysis of power protection behaviour during the fault.

As it was proved by authors, the fault was brought about by an electric arc ignition in contact gaps of both quenching chambers of the pole of phase L2. The ignition happened when the circuit breaker was in state of opening. The fault made ending the unit synchronization process not possible. The arc ignition in contact gaps occurred when a phase displacement angle between voltage vectors of generator and system was approximately 180°, i.e. an opposition of the mentioned vectors happened. An rms value of voltage between contacts of the opened circuit breaker reaches in such conditions 485 kV but instantaneous values can amount up to 686 kV<sub>m</sub>. An appearance of the electric arc in quenching chambers of the pole of phase L2 of the unit circuit breaker brought to a single-phase supply of the unit transformer from side of the power system. It caused an activation of zero-sequence current earth-fault protection. Current flow during this event has been shown in Fig. 2; current waveforms in earth conductor of the unit transformer neutral, as well as diagrams of operation of the transformer zero-sequence current protection have been shown in Fig. 3.

About 3 s after beginning of fault quenching chambers of the pole of phase L2 exploded and after 11 s the fault became a single phase earth fault. It brought about activation and operation of protection of the 400 kV line in network substation.

Calculations carried out for the analysed circuit equivalent scheme (Fig. 4) confirmed results of registration of electric quantities' values during all the process and explained as well a reason of the circuit breaker damage as process of the accident which lasted totally about 14 s. Moreover, it was shown that power unit protection during fault operated correctly.