

ANALIZA POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ OD SKUTKÓW ZWARĆ WIELKOPRĄDOWYCH W WARUNKACH PRACY WYSPOWEJ FRAGMENTU SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ ZAKŁADU GÓRNICZEGO

Piotr RZEPKA¹, Mateusz SZABLICKI², Dawid JURCZYK³, Adrian HALINKA⁴

1. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów; PSE Innowacje sp. z o.o. tel.: 32 237 1481, e-mail: piotr.rzepka@polsl.pl; piotr.rzepka@pse.pl
2. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów; PSE Innowacje sp. z o.o. tel.: 32 237 1481, e-mail: mateusz.szablicki@polsl.pl; mateusz.szablicki@pse.pl
3. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów tel.: 32 237 1481, e-mail: dawid.jurczyk@polsl.pl
4. Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów tel.: 32 237 1481, e-mail: adrian.halinka@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań analitycznych weryfikujących poprawność działania zabezpieczeń od skutków zwarć wielkoprądowych we fragmencie sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego pracującym jako wyspa sieciowa. Warunki prądowe towarzyszące zwarciom wielkoprądowym w układach pracy wyspowej silnie zależą od zdolności lokalnej jednostki wytwórczej energii elektrycznej do generacji prądu zwarciovego. Zwykle w przypadku przejścia fragmentu sieci do pracy wyspowej występuje znaczne zmniejszenie poziomu mocy zwarciovowej, co w efekcie doprowadzi do ograniczenia poziomu prądów zwarć wielkoprądowych.

Słowa kluczowe: praca wyspowa, elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa, poziom prądu zwarciovego, zakład górniczy.

1. WSTĘP

Bezpieczne funkcjonowanie zakładu górniczego wymaga zapewnienia ciągłego zasilania najważniejszych odbiorów. W stanach katastrofalnych zasilanie od strony systemu elektroenergetycznego (SEE) może ulec przerwaniu, np. wskutek zerwania przewodów linii napowietrznych zasilających zakład. Zatem zasilanie wybranych, krytycznych odbiorów zakładu górniczego z lokalnej jednostki wytwórczej (funkcjonującej w ramach tego zakładu) może znacząco poprawić bezpieczeństwo funkcjonowania zakładu górniczego. Jednak realizacja tego zadania wymaga wydzielenia fragmentu sieci zakładu górniczego i jego przejścia do pracy wyspowej. Dopuszczenie do takiego stanu pracy wymaga m.in. przeprowadzenia weryfikacji poprawności działania układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

Warunki zwarciovowe występujące w układzie pracy wyspowej zmieniają się diametralnie względem przypadku, gdy wewnętrzna sieć zakładu górniczego zasilania jest z SEE. Zmianie ulega zarówno poziom prądu zwarciovego, jak i cechy w dziedzinie czasu (przebieg czasowy). Obniżenie wartości prądu zwarciovego wynika ze stosunkowo niewielkiej mocy lokalnej jednostki

wytwórczej (zakres mocy lokalnej jednostki wytwórczej wynosi 1-5 MW [1]) pracującej w układzie pracy wyspowej – względem mocy zwarciovowej występującej w układzie w sytuacji zasilania go z SEE. Zmiana kształtu obwiedni przebiegu czasowego składowej okresowej prądu zwarciovego w układzie pracy wyspowej wynika ze zmiany charakteru zwarcia – zwarcie występujące w sieci pracującej wyspowo należy traktować jako zwarcie bliskie generatora [2]. W takim przypadku wartość prądu zwarciovego będzie się zmniejszać w czasie trwania zwarcia, przy czym skala i dynamika tego zmniejszania się bardzo silnie zależą od parametrów technicznych lokalnej jednostki wytwórczej i jej zdolności do generacji prądu zwarciovego.

Przedstawiona problematyka zmiany warunków zwarciovych po przejściu układu sieciowego do pracy wyspowej skłoniła do podjęcia analiz mających na celu określenie czy nowe warunki występujące w układzie pracy wyspowej wydzielonego fragmentu sieci zakładu górniczego będą umożliwiały poprawną identyfikację oraz eliminację zwarć wielkoprądowych przez automatykę zabezpieczeniową funkcjonującą w tego typu strukturach sieciowych [3]. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w niniejszym artykule. Jako studium przypadku przyjęto fragment sieci istniejącego zakładu górniczego wyposażonego w lokalną jednostkę wytwórczą.

2. ZWARCIA WIELKOPRĄDOWE W UKŁADZIE PRACY WYSPOWEJ

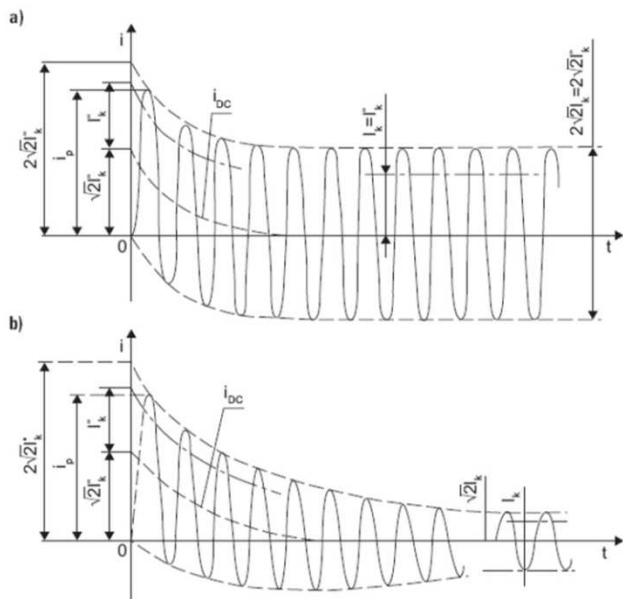
Lokalna jednostka wytwórcza pracująca na wydzieloną sieć nie zapewnia poziomu parametrów prądu zwarciovego, jakie występują w przypadku zasilania tej sieci z SEE. W układach pracy wyspowej występuje najczęściej:

- zmniejszenie poziomu prądu zwarcia wielkoprądowego (mocy zwarciovowej);
- zmiana parametrów prądu zwarciovego w czasie.

Poziom i zakres mocy lokalnej jednostki wytwórczej (1-5 MW) jest relatywnie mały względem mocy zwarciovowej występującej w sytuacji zasilania z SEE (kształtującej się na

poziomie kilkuset MW). Zatem poziom prądu zwarciego w przypadku przejścia sieci do pracy wyspowej będzie ulegać znaczącemu zmniejszeniu. Podkreśla się, że w niektórych przypadkach wartość prądu zwarciego może nie przekraczać wartości obciążenia znamionowego chronionych obiektów (np. odpyłów liniowych).

Z kolei z punktu widzenia zmiany parametrów prądu zwarcia w czasie, zwarcia wielkopądowe w sieci pracującej wyspowo należy traktować jako tzw. zwarcie bliskie. Z tego powodu w przebiegu prądu zwarciego (rys. 1) należy spodziewać się skutków przechodzenia generatora synchronicznego ze stanu podprzejściowego do stanu przejściowego oraz ostatecznie do stanu ustalonego. W efekcie ustalona wartość skuteczna prądu zwarciego może być o wiele niższa niż jego początkowa wartość prądu zwarciego. Zgodnie z normą [4] należy zakładać, że w niektórych przypadkach wartość ta może być niższa od wartości prądu znamionowego generatora.



Rys. 1. Przebieg prądu zwarciego: a) zwarcie odległe od generatora, b) zwarcie pobliskie generatora; gdzie: I_k - prąd zwarciego początkowy, i_p - prąd udarowy, I_k - ustalony prąd zwarciego, i_{bc} - składowa nieokresowa prądu zwarciego [4]

3. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU SIECIOWEGO I PRZYJĘTA METODYKA BADAWCZA

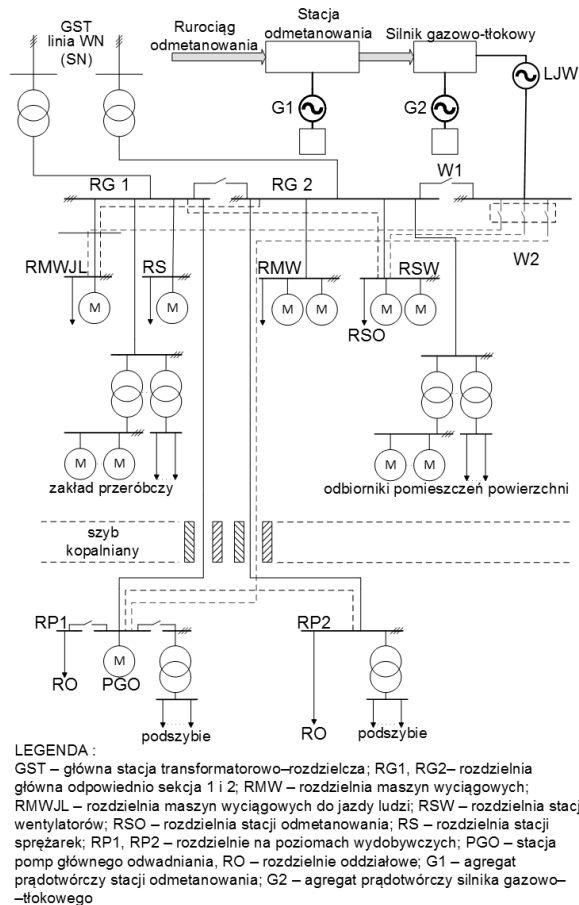
Przejście do pracy wyspowej wydzielonego fragmentu sieci elektroenergetycznej zakładu górniczego w stanach katastrofalnych pracy sieci elektroenergetycznej lub blackout'u powinno zapewnić ciągłość zasilania najistotniejszych obiektów podstawowych.

Zgodnie z §29 rozporządzenia [5] do podstawowych obiektów zakładu górniczego, dla których powinna być realizowana podwyższona ciągłość zasilania zalicza się:

- górnicze wyciągi szybowe w szybach i szybikach;
- stacje wentylatorów głównych;
- stacje odmetanowania;
- urządzenia i układy głównego odwadniania wraz z rozdzielniami zasilającymi;
- główne stacje sprężarek;
- wewnętrzne instalacje i sieci elektroenergetyczne wysokiego i średniego napięcia, zasilające podstawowe obiekty i urządzenia na powierzchni.

Ideę przejścia wewnętrznej sieci zakładu górniczego do pracy wyspowej przedstawiono na rysunku 2. Na rysunku tym zaznaczono fragment sieci wewnętrznej zakładu górniczego przeznaczony do pracy wyspowej z wyeksponowanymi obiektami podstawowymi. Należy podkreślić, że z uwagi na występujące ograniczenia mocowe w analizowanym przypadku nie zakłada się zasilania górniczych wyciągów osobowych/materiałowych.

W analizowanym przypadku jako źródło zasilania układu pracy wyspowej zostanie wykorzystana lokalna jednostka wytwórcza (LJW) składają się z silnika spalinowego gazowego napędzającego czterobiegunowy generator synchroniczny. Paliwem silnika spalinowego gazowego jest metan wydobyty z pokładów węgla za pomocą odpowiedniej instalacji i stacji odmetanowania.



LEGENDA:
 GST – główna stacja transformatorowo-rozdzielcza; RG1, RG2 – rozdzielnia główna odpowiednio sekcja 1 i 2; RMW – rozdzielnia maszyn wyciągowych; RMWJL – rozdzielnia maszyn wyciągowych do jazdy ludzi; RSW – rozdzielnia stacji wentylatorów; RSO – rozdzielnia stacji odmetanowania; RS – rozdzielnia stacji sprężarek; RP1, RP2 – rozdzielnie na poziomach wydobywczych; PGO – stacja pomp głównego odwadniania, RO – rozdzielnie oddziałowe; G1 – agregat prądowców stacji odmetanowania; G2 – agregat prądowców silnika gazowo-tłokowego

Rys. 2. Fragment wewnętrznej sieci zakładu górniczego z zaznaczonymi obiektami podstawowymi [6]

Badania weryfikujące poprawność działania zabezpieczeń od skutków zwarców wielkopądowych przeprowadzono z uwzględnieniem dwóch wariantów zasilania: *wariant 1* - zasilanie analizowanego fragmentu sieci z SEE (rys. 3); *wariant 2* - zasilanie analizowanego fragmentu sieci z LJW – praca wyspowa (rys. 4).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń prądów zwarciego dla symulowanego zwarcia w punkcie F zlokalizowanym w kablu K4 (rys. 3 i rys. 4). Podstawowe parametry obiektów przyjęte do obliczeń przedstawiono w tablicy 1 i tablicy 2.

W celu wyznaczenia wartości prądów zwarciego w analizowanym fragmencie sieci skorzystano z wzorów i tabel zawartych w normie [4], w tym z zależności:

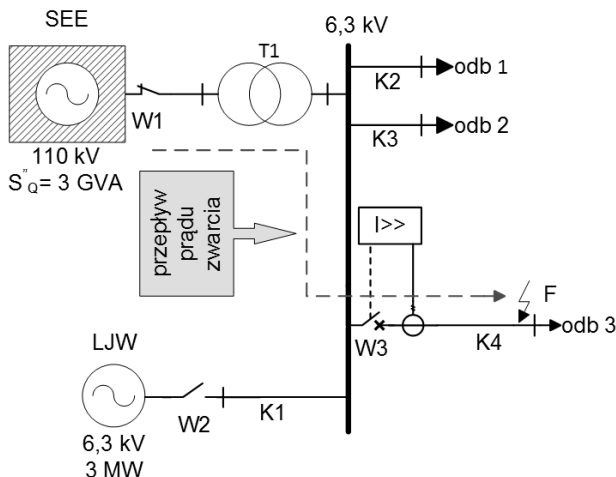
- prąd zwarciego początkowy trójfazowy:

$$I''_{K3f} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}|Z_Z|}, \quad (1)$$

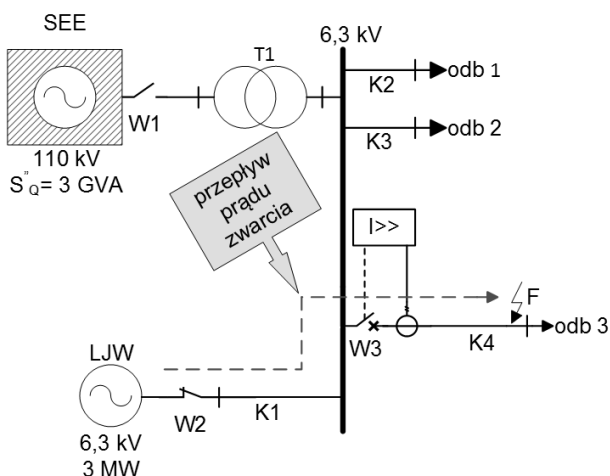
- prąd zwarciaowy początkowy dwufazowy:

$$I''_{K2f} = \frac{cU_N}{2|Z_Z|}, \quad (2)$$

gdzie: c – współczynnik napięciowy, U_N – napięcie znamionowe w miejscu zwarcia, Z_Z – impedancja zwarcia.



Rys. 3. Przepływy prądu zwarcia w przypadku zasilania zakładu górniczego od strony SEE – wariant 1



Rys. 4. Przepływ prądu zwarcia w sytuacji zasilania zakładu górniczego przez lokalną jednostkę wytwórczą – wariant 2

Tablica 1. Podstawowe parametry elementów układu sieciowego, w przypadku zasilania fragmentu sieci od strony SEE – wariant 1

System elektroenergetyczny		
1	Moc zwarciaowa, $S_{O''}$	3 GVA
2	Napięcie znamionowe, U_N	110 kV
Transformator T1		
1	Moc znamionowa, S_{rT}	25 MVA
2	Przekładnia napięciowa, t_r	110/6,3 kV
3	Napięcie zwarcia procentowe, $u_{z\%}$	12
4	Starty w miedzi, ΔP_{CU}	133 kW
5	Straty w żelazie, ΔP_{FE}	22 kW
6	Prąd jałowy procentowy, $i_{0\%}$	0,5
7	Przekładnia napięciowa, t_r	110/6,3 kV
Linia kablowa K4 (wiązka 3 kabli)		
1	Rezystancja jednostkowa, R	0,133 Ω /km
2	Indukcyjność jednostkowa, L	0,5 mH/km
3	Długość linii, l	2 km

Tablica 2. Podstawowe parametry elementów układu sieciowego, w przypadku zasilania fragmentu sieci przez lokalną jednostkę wytwórczą – wariant 2

Lokalna jednostka wytwórcza		
1	Moc pozorna, S_N	3,34 MVA
2	Napięcie znamionowe, U_N	6,3 kV
3	Reaktancja podprzejsiowa, $X_{d''}$	1,915 Ω
4	Reaktancja przejsiowa, $X_{d'}$	2,450 Ω
5	Reaktancja synchroniczna, X_d	28,66 Ω
Linia kablowa K4 (wiązka 3 kabli)		
1	Rezystancja jednostkowa, R	0,133 Ω /km
2	Indukcyjność jednostkowa, L	0,5 mH/km
3	Długość linii, l	2 km

4. WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ NADPRĄDOWYCH

Wybrane rezultaty przeprowadzonych badań analitycznych dotyczących wartości skutecznych ustalonego prądu zwarciaowego i weryfikacji działania zabezpieczeń przedstawiono w tablicach 3 i 4 oraz na rysunku 5. Weryfikację działania zabezpieczeń przeprowadzono z uwzględnieniem metodyki doboru nastaw tych zabezpieczeń zawartych w [7], [8]. Dla linii kablowych (górnicych) zlokalizowanych w pomieszczeniach niebezpiecznych pod względem wybuchowym zabezpieczenie od skutków zwarć wieloprądowych wykonuje się jako zabezpieczenie bezzwłoczne, a prąd nastawy wyznacza się zgodnie z zależnością [7]:

$$\frac{k_s k_{nz} I_{om}}{n_i} \leq I_{nz} \leq \frac{k_s I''_{k2min}}{n_i k_{cz}}, \quad (3)$$

gdzie: k_s - współczynnik schematowy układu połączeń przekładników prądowych (przyjęto 1 - na podstawie [7]), k_{nz} - współczynnik pewności niewystąpienia zbędnego zadziałania (przyjęto 2,5 - na podstawie [7]), I_{om} - prąd maksymalnego obciążenia obiektu zabezpieczanego (dla linii kablowej K4 przyjęto 840 A), I''_{k2min} - najmniejsza obliczeniowa wartość początkowego prądu zwarciaowego, na końcu zabezpieczanej strefy, n_i - przekładnia przekładnika prądowego, k_{cz} - współczynnik czułości ustalony w normie (przyjęto 2 - na podstawie [7]).

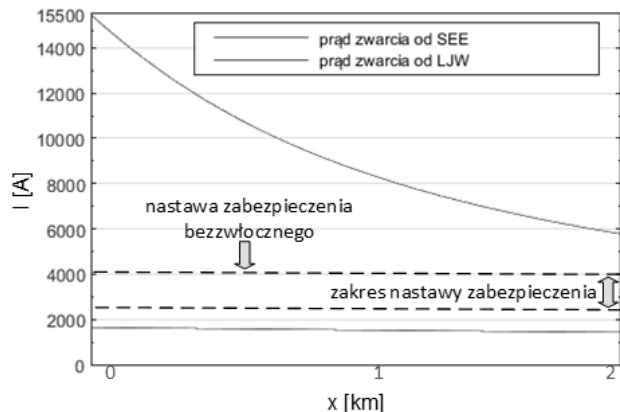
Korzystając z zależności (3), dla rozpatrywanej kablowej linii szybowej K4 dokonano oszacowania nastawy zabezpieczenia bezzwłoczego. Wartość tej nastawy może zawierać się w przedziale 2,1 ÷ 3,8 kA. Należy podkreślić, że w praktyce górniczej jako nastawę często przyjmuje się wartości bliższe wynikowi prawej strony równania (3) - zapobiega to zbędnym włączeniom podczas zwarć wieloprądowych występujących w głębi sieci kopalnianej. Zestawiając wyznaczone wartości z uzyskanymi wynikami obliczeń prądów zwarcia spodziewanych w linii K4 (patrz tablica 4), można jednoznacznie stwierdzić, że w przypadku pracy wyspowej analizowanego fragmentu sieci wymagane bezzwłoczne zadziałanie tego zabezpieczenia nie nastąpi.

Tablica 3. Wartości prądu zwarcia w punkcie F analizowanego fragmentu sieci zasilanego z SEE – wariant 1

Rodzaj zwarcia	Prąd zwarcia, kA	Spodziewane działanie EAZ
Zwarcie 3f metaliczne	6,7	poprawne
Zwarcie 2f metaliczne	5,8	poprawne

Tablica 4. Wartości prądu zwarcia w punkcie F analizowanego fragmentu sieci pracującego wyspowo – wariant 2

Rodzaj zwarcia	Reaktancja generatora	Prąd zwarcia, kA	Spodziewane działanie EAZ
Zwarcie trójfazowe metaliczne	X_d''	1,66	niepoprawne
	X_d'	1,36	niepoprawne
	X_d	0,14	niepoprawne
Zwarcie dwufazowe metaliczne	X_d''	1,44	niepoprawne
	X_d'	1,18	niepoprawne
	X_d	0,12	niepoprawne



Rys. 5. Przebieg wartości skutecznej ustalonego prądu zwarcia dwufazowego w funkcji odległości miejsca zwarcia dla linii kablowej K4

5. WNIOSKI

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań jednoznacznie wskazują, że klasycznie sparametryzowane zabezpieczenia nadprądowe (wg dotychczasowej praktyki służb zabezpieczeniowych i wytycznych zawartych w [7] i [8]), realizują poprawnie swoje zadania tylko w sytuacji, gdy wewnętrzna sieć zakładu górniczego jest zasilana z SEE. W przypadku przejścia wydzielonego fragmentu sieci zakładu górniczego do pracy wyspowej (np. na skutek awarii w SEE) poziom wartości skutecznej prądu zwarciego towarzyszącego zwarciom wieloprądowym może okazać się niewystarczający do zapewnienia poprawnej identyfikacji i lokalizacji zwarć przez zabezpieczenia nadprądowe. Zatem przejściu do pracy wyspowej powinna towarzyszyć samoczynna adaptacja „nastawień” zabezpieczeń nadprądowych, przy czym „nastawy” te powinny uwzględniać nowe warunki zwarcie występujące w sieci.

ANALYSIS OF POWER SYSTEM PROTECTION AGAINST HIGHT-CURRENT FAULT OPERATION IN WORKING ISLAND OF THE POWER GRID MINING PLANT

The safe operation of a mining plant requires continuous supply of the most important loads. In catastrophic situations, power supply from the power system side may be interrupted, eg. due to break of overhead power lines supplying the plant. Therefore, the supply of selected critical devices of a mining plant from a local generating unit (operating within this plant) can significantly improve the safety of the mining plant operations. However, the implementation of this task requires separating a fragment of the mining plant network and its transition to island operation. The implementation of such a state requires, among others, carrying out verification of the correct operation of electrical power protection systems. The paper presents analysis of power system protection against high-current fault operation of the power grid mine working island. Current conditions accompanying high-currents faults in island systems are strongly dependent on the ability of the local electricity generation unit to generate short-circuit current. Usually in case of electricity power network transition to island operation, there is a significant reduction in the level of high-current fault, what may cause a bad operation of power system protection.

Keywords: island operation, electric power system, power system protection, mining plant.

W przypadku wystąpienia dużych problemów z doborem nastawień zabezpieczeń (z uwagi na mały poziom mocy zwarcieowej), alternatywą może być stosowanie nieklasycznych systemów automatyki zabezpieczeniowej, przykładowo systemów wieloagentowych [9].

W rzeczywistym układzie sieciowym, w przypadku braku zmiany nastaw zabezpieczeń nadprądowych przy przejściu układu do pracy wyspowej, przerwanie przepływu prądu zwarcia będzie wymuszane przez zabezpieczenia lokalnej jednostki wytwórczej, które doprowadzą do jej wyłączenia. Skutkuje to jednak tym, że układ sieciowy zakładu górniczego zostanie pozbawiony rezerwowego źródła zasilania.

6. BIBLIOGRAFIA

- Kacejko P.: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwo uczelniane 2004.
- Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, Wydawnictwo WNT Warszawa 2009.
- Halinka A., Rzepka P.: Koncepcja obszarowego systemu automatyki elektroenergetycznej do nadzoru autonomicznych struktur sieci SN z lokalnymi źródłami w postaci źródeł biogazowych. Przegląd Elektrotechniczny, R. 90 NR 8/2014, ISSN 0033-2097, 101-104.
- PN-EN 60909-0:2002 (U) Prądy zwarcieowe w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Część 0: Obliczanie prądów.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych.
- Halinka A., Jurczyk D., Rzepka P., Szablicki M.: Zwiększenie pewności zasilania obiektów podstawowych zakładu górniczego. Autom. Elektr. Zakłóc. 2018 nr 4, s. 16-24.
- Gawor P.: Urządzenia elektroenergetyczne w górnictwie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- PN - G - 42042: 1998 Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej – Zabezpieczenia zwarcieowe i przeciążeniowe – Wymagania i zasady doboru.
- Halinka A., Rzepka P., Szablicki M., Agent model of multi-agent system for area power system protection, Conference MEPS, Wrocław 2015, s. 191-194.