

ADAM MAREK

Wpływ pośrednich przemienników częstotliwości na pracę zabezpieczeń upływowych w dołowych sieciach kopalnianych

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące pracy zabezpieczeń upływowych w dołowych sieciach kopalnianych zawierających obciążenia, w których skład wchodzi przemienniki częstotliwości. Wykazano możliwość nieprawidłowego działania zabezpieczeń upływowych w przypadku wystąpienia obniżenia rezystancji doziemnej w obwodzie prądu stałego.

Słowa kluczowe: centralne zabezpieczenie upływowo (CZU), rezystancja doziemna, pojemność doziemna, pośredni przemiennik częstotliwości

1. TYPOWE ROZWIĄZANIA ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH

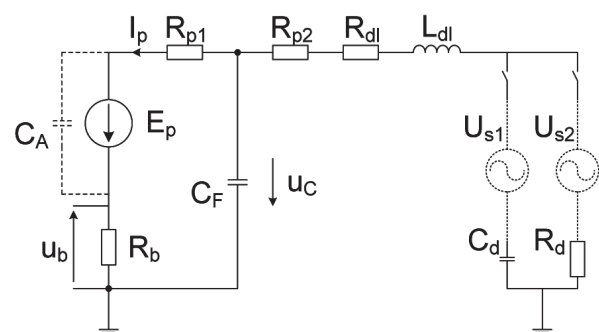
Używane powszechnie w polskim górnictwie zabezpieczenia upływowe przeznaczone do stosowania w sieci dołowej ($f_n = 50$ Hz) możemy podzielić na zabezpieczenia oparte na stałym oraz zmiennym źródle pomocniczym. Zadaniem tych urządzeń jest wyłączenie spod napięcia pracujących fragmentów sieci oraz odbiorników (lub sygnalizacja wspomnianej sytuacji), w których doszło do obniżenia się rezystancji odziemnej poniżej wartości progowej, określonej przez właściwe normy. Dostępne na rynku zabezpieczenia upływowe najczęściej oparte są na stałym źródle pomocniczym. Stosowane są zarówno zabezpieczenia wykorzystujące stałe napięcie pomocnicze, jak i stały prąd pomocniczy.

Niezależnie od tego, czy wielkością mierzoną jest prąd, czy napięcie, to informację o stanie izolacji uzyskuje się na podstawie napięcia pomiarowego porównywanego z wartością odniesienia (odpowiadającą progowej rezystancji zadziałania zabezpieczenia upływowego). W zabezpieczeniach opartych na stałym napięciu pomocniczym (rys. 1) jest to napięcie u_b mierzone na boczniku R_b , a wartość rezystancji doziemnej R_d określa zależność:

$$R_d = \frac{E_p}{U_b} R_b - (R_{p1} + R_{p2} + R_b + R_{dl}) \quad (1)$$

gdzie:

- R_d – wartość zastępczej rezystancji doziemnej [Ω],
- E_p – wartość napięcia źródła pomocniczego zabezpieczenia upływowego [V],
- U_b – wartość średnia napięcia pomiarowego mierzonego na boczniku R_b [V],
- R_b – wartość rezystancji bocznika pomiarowego [Ω],
- R_{p1}, R_{p2} – wartości rezystancji szeregowych zabezpieczenia upływowego [Ω],
- R_{dl} – wartość zastępczej rezystancji szeregowej dławika [Ω].



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy zabezpieczenia upływowego opartego na stałym napięciu pomocniczym

Uproszczony schemat zastępczy zabezpieczenia upływowego opartego na stałym napięciu pomocniczym

zawiera również elementy służące do filtrowania przebiegu napięcia pomiarowego (pojemności kondensatorów filtrujących C_F , C_A oraz indukcyjność dławika szeregowego L_{dl}) oraz pozostałe zastępcze parametry kontrolowanej sieci: zastępczą pojemność doziemną sieci C_d i zastępcze napięcia zakłócające (związane z asymetrią: pojemności doziemnych sieci U_{s1} i rezystancji doziemnych U_{s2}).

W przypadku zabezpieczeń opartych na stałym prądzie pomocniczym najczęściej spotyka się dwa rozwiązania: zabezpieczenia pracujące w układzie omomierza szeregowego (rys. 2) oraz w układzie omomierza równoległego (rys. 3). W pierwszym ze wspomnianych rozwiązań wielkością mierzoną jest napięcie pomiarowe u_p występujące na zaciskach źródła zastępczego prądu pomocniczego. Stan izolacji sieci opisuje zależność [1]:

$$R_d = \frac{U_p}{I_p} - (R_{b1} + R_{b2} + R_{dl}) \quad (2)$$

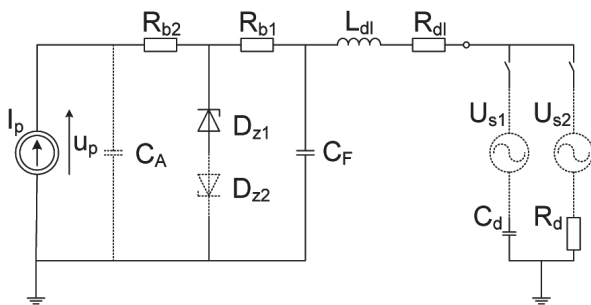
gdzie dodatkowo w porównaniu z przednim schematem pojawiły się wielkości:

R_{b1}, R_{b2} – wartości rezystancji diodowej bariery ochronnej [Ω],

U_p – wartość średnia napięcia pomiarowego zabezpieczenia upływowego [V],

I_p – wartość prądu pomocniczego zabezpieczenia upływowego [A],

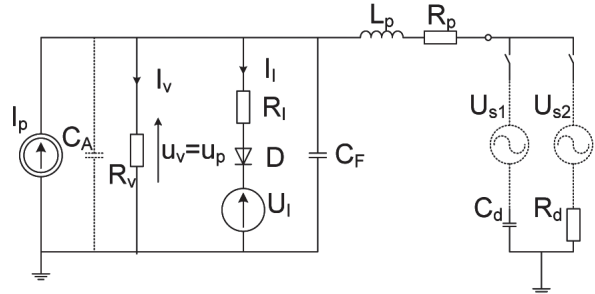
C_A, C_F – wartości pojemności filtrujących zabezpieczenia upływowego [F].



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy zabezpieczenia upływowego opartego na stałym prądzie pomocniczym pracującego w układzie omomierza szeregowego

Drugi wariant zabezpieczeń upływowych opartych na stałym prądzie pomocniczym (w układzie omomierza równoległego) zakłada pomiar napięcia na podstawie przepływu prądu pomiarowego przez rezystor pomiarowy R_V , który jest włączony równoległe do źródła prądu pomocniczego (rys. 3). Przedstawione rozwiązanie pozwala zachować większą czułość w zakresie

rezystancji istotnych z punktu widzenia poprawności zadziałania zabezpieczenia (mniejszych od około dwu- do trzykrotnej wartości rezystancji nastawczej zabezpieczenia) oraz mniejszą czułość w zakresie dużych rezystancji (ograniczenie maksymalnej wartości napięcia pomiarowego).



Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy zabezpieczenia upływowego opartego na stałym prądzie pomocniczym pracującego w układzie omomierza równoległego

Wartość mierzonej rezystancji doziemnej kontrolowanej sieci dla zabezpieczeń upływowych z pomocniczym źródłem prądowym pracujących w układzie omomierza równoległego, wyznaczanej z większą czułością (bez uwzględnienia rezystancji R_I), opisany jest zależnością [2]:

$$R_d = \frac{R_V}{\frac{I_p}{U_p} R_V - 1} - R_p \quad (3)$$

gdzie (w porównaniu z przednimi schematami):

U_p – wartość średnia napięcia pomiarowego zabezpieczenia upływowego [V],

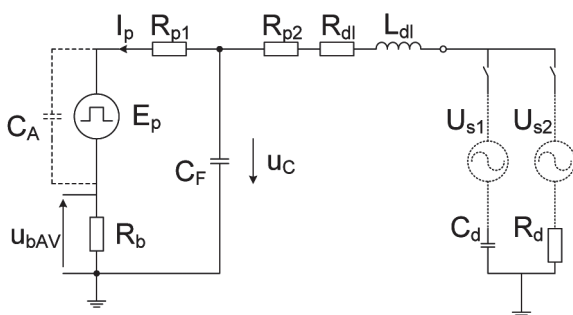
R_V – wartość rezystancji równoległej zabezpieczenia upływowego [Ω].

Zabezpieczenia upływe oparte na stałym prądzie pomocniczym (niezależnie czy pracują w układzie omomierza szeregowego, czy równoległego) nie nadają się do wykrywania stanów awaryjnych pojawiających się w obwodach stałoprądowych. Przyczyną tego jest brak możliwości prowadzenia prawidłowych pomiarów rezystancji doziemnej przy obu kierunkach prądu zakłóceniewego.

Poza zabezpieczeniami wykorzystującymi stałe źródło pomocnicze spotyka się również urządzenia oparte na zmiennym napięciu pomocniczym. Dostępne na rynku są (lub były) rozwiązania oparte na zmiennym napięciu pomocniczym o kształcie prostokątnym (rys. 4) lub trójkątnym. Zmieniając okresowo biegunowość napięcia E_p , uzyskuje się dwie wartości napięcia średniego U_b na rezystorze pomiarowym R_b . Średnia war-

tość różnicy tych napięć U_{bAV} pozbawiona jest wpływu napięcia zakłócającego obwodu stałoprądowego U_o . W tych warunkach wartość mierzonej rezystancji doziemnej opisana jest taką samą zależnością jak w przypadku zabezpieczeń upływowych ze stałym napięciem pomocniczym:

$$R_d = \frac{E_p}{U_{bAV}} R_b - (R_{p1} + R_{p2} + R_b + R_{dl}) \quad (4)$$



Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy zabezpieczenia upływowego opartego na przemiennym, prostokątnym napięciu pomocniczym

Częstotliwość takiego zmiennego źródła pomocniczego nie może być zbyt duża ze względu na stany przejściowe pojawiające się podczas zmiany biegunowości napięcia. Stała czasowa obwodu komutacyjnego zależy od zastępczej pojemności, rezystancji i indukcyjności układu (mogą się również pojawić obwody rezonansowe). W obwodach RC stan ustalony uzyskuje się po czasie dłuższym od czterech stałych czasowych. W typowych warunkach kopalnianych okres źródła pomocniczego nie powinien być krótszy od około 3 s. Biorąc pod uwagę obowiązującą normę, należy stwierdzić, że jest to istotna wada tego typu rozwiązań. Pomijając ten fakt, zabezpieczenia upływowe oparte na przemiennym napięciu pomocniczym mogą prawidłowo wykrywać przypadki obniżenia rezystancji doziemnej w sieciach z pośrednimi przemiennikami częstotliwości.

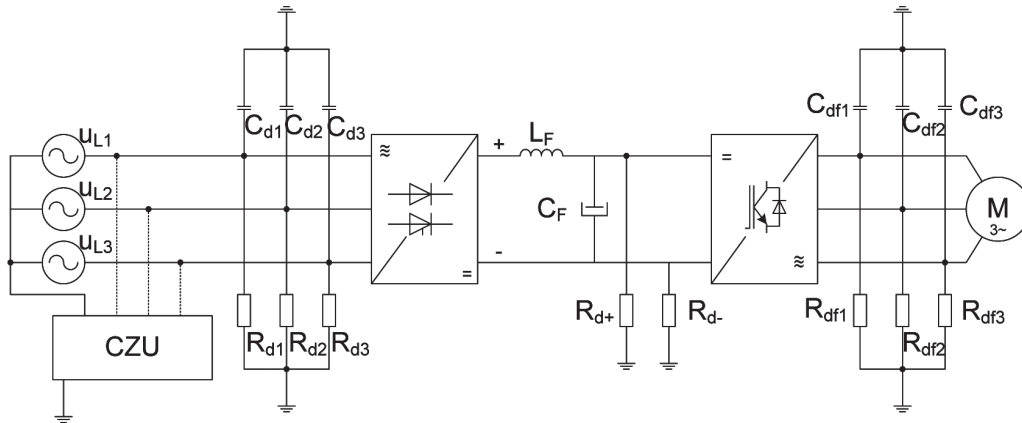
Dalsza analiza współpracy zabezpieczeń upływowych z sieciami obciążonymi pośrednimi przemiennikami częstotliwości będzie dotyczyć zabezpieczeń upływowych opartych na stałym napięciu pomocniczym. Zabezpieczenia tego typu mogą pracować przy obu kierunkach prądu pomiarowego (zmiana kierunku przepływającego prądu pomiarowego może być wywołana obniżeniem rezystancji doziemnej w obwodzie stałoprądowym). Pojawienie się w obwodzie pomiarowym dodatkowego napięcia stałego prawdopodobnie spowoduje, że błędnie zostanie wyznaczona (pomiarowo) wartość wypadkowej rezystancji do-

ziemnej. Należy więc określić to, jakie skutki wywoła pojawienie się dodatkowego stałego napięcia zakłócającego na poprawną pracę zabezpieczenia. Problem ten rozwiązuje zastosowanie zabezpieczenia upływowego z prostokątnym kształtem napięcia pomocniczego o częstotliwości mniejszej od minimalnej częstotliwości wyjściowej przemiennika, w którym pomiar byłby prowadzony w przypadku obu kierunków napięcia pomocniczego.

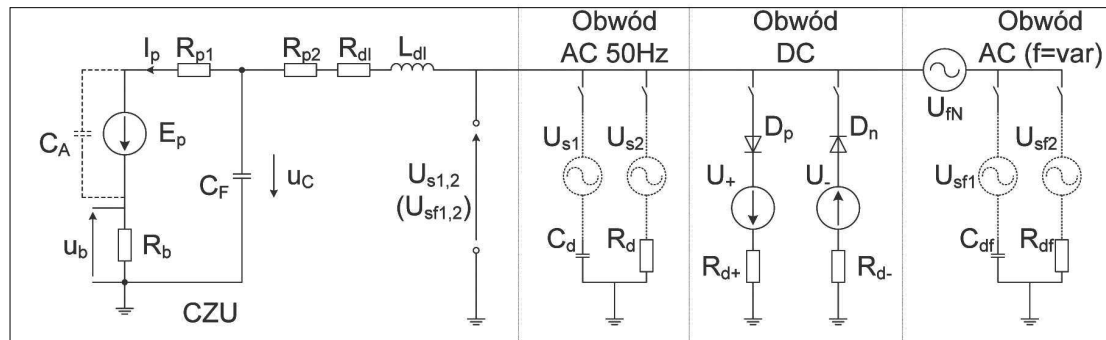
2. ODDZIAŁYWANIE POŚREDNICH PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI NA PRACĘ ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH

Postęp technologiczny w dziedzinie produkcji zaworów energoelektronicznych, rozwój energoelektroniki oraz metod sterowania zaworami energoelektronicznymi wpływa na coraz częstsze stosowanie przekształtników energoelektronicznych (głównie prostowników i przemienników) do zasilania różnych odbiorników, również w dołowej sieci kopalnianej. W tej sytuacji zabezpieczenia upływowe powinny wykazywać skuteczność działania nie tylko w samej sieci kopalnianej prądu przemiennego (na wejściu przemienników częstotliwości), ale również powinny wykrywać obniżenie rezystancji doziemnej w obwodach pośredniczących przemienników częstotliwości (obwody stałoprądowe) oraz na wyjściu przemienników częstotliwości (na wyjściu falowników). Biorąc pod uwagę fakt, że zabezpieczenia upływowe są najczęściej instalowane w stacjach transformatorowych, urządzenia te powinny wykrywać obniżenie rezystancji doziemnej kolejno: w dołowej sieci kopalnianej, w obwodzie pośredniczącym przemiennika częstotliwości oraz na wyjściu falownika (rys. 5).

Na rysunku 6 pokazano schemat zastępczy uwzględniający sieć zasilającą wraz z podłączonym do niej pośrednim przemiennikiem częstotliwości oraz zabezpieczenie upływowe mające kontrolować stan izolacji całej sieci (wraz z przemiennikiem częstotliwości). Schemat ten uwzględnia najważniejsze parametry kontrolowanych fragmentów sieci (przed przemiennikiem częstotliwości, w obwodzie pośredniczącym prądu stałego i na wyjściu przemiennika częstotliwości) oraz parametry samego zabezpieczenia upływowego opartego na stałym napięciu pomocniczym. Założono, że analiza zdolności wykrywania (przez zabezpieczenie upływowe) obniżenia rezystancji doziemnej w poszczególnych fragmentach sieci z przemiennikami częstotliwości będzie przeprowadzona oddzielnie.



Rys. 5. Uproszczony schemat zastępczy fragmentu sieci z zabezpieczeniem upływowym i z przemiennikiem częstotliwości zasilającym silnik indukcyjny [4]



Rys. 6. Uproszczony schemat zastępczy zabezpieczenia upływowego oraz sieci zasilającej wraz z przemiennikiem częstotliwości, uwzględniający niezależne, potencjalne miejsca stanów awaryjnych lub zakłóceńowych

Przemiennik częstotliwości nie ma wpływu na wykrycie stanu obniżenia rezystancji doziemnej w kontrolowanym fragmencie kopalnianej sieci prądu przemiennego (przy zachowaniu idealnego stanu izolacji w obwodzie pośredniczącym i na wyjściu przemiennika). Stan izolacji sieci jest wówczas określany zależnością (1). Na określenie rzeczywistej wartości rezystancji doziemnej (przez człon pomiarowy zabezpieczenia upływowego) mają wpływ: stan symetrii parametrów doziemnych sieci oraz wartości pojemności i rezystancji doziemnej. Zależnie od tego, czy badamy wpływ rezystancji, czy też pojemności doziemnej na poprawność działania zabezpieczenia upływowego, zakłada się stałość pojemności lub rezystancji doziemnej. Wówczas wartość skuteczną napięcia zakłócającego (w przypadku jednofazowego obniżenia rezystancji doziemnej) można określić na podstawie zależności [3]:

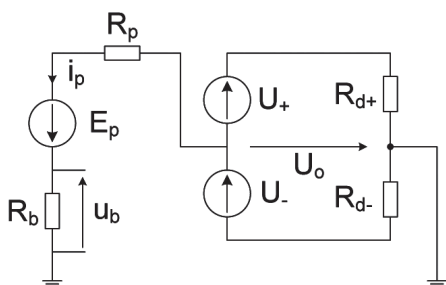
$$U_{s1,2} \approx \frac{U_f}{\sqrt{1 + \frac{R_d^2}{X_{dz}^2}}} \quad (5)$$

Nie powinno być również większego problemu z poprawnym wykryciem przez zabezpieczenie upływowo na wyjściu falownika rezystancji doziemnej mniejszej od wartości progowej zadziałania zabezpieczenia upływowego. W zależności do aktualnej częstotliwości wyjściowej falownika może pojawić się opóźnienie w wykryciu takiego stanu (wynoszące nawet kilka sekund) w porównaniu z wystąpieniem obniżenia rezystancji doziemnej w kopalnianej sieci napięcia przemiennego. Przy pominięciu dodatkowych rezystancji pomiędzy wejściem przemiennika a odbiornikiem (są one niewielkie w porównaniu z pozostałymi rezystancjami z rys. 1) stan izolacji sieci na wyjściu falownika można również opisać zależnością (1). Analogicznie można również określić wartość skuteczną napięcia zakłócającego na wyjściu falownika (dla jednofazowego obniżenia rezystancji doziemnej) [3]:

$$U_{sf1,2} \approx \frac{U_{ffal}}{\sqrt{1 + \frac{R_{df}^2}{X_{dzf}^2}}} \quad (6)$$

gdzie U_{ffal} – wartość skuteczną wyjściowego napięcia fazowego falownika [V].

Poważny wpływ na poprawność pracy zabezpieczenia upływowego może mieć obniżenie rezystancji doziemnej w obwodzie stałoprądowym przemiennika częstotliwości (rys. 7).



Rys. 7. Uproszczony schemat zastępczy służący do analizy wpływu obwodu stałoprądowego przemiennika częstotliwości na pracę zabezpieczenia upływowego

Szczególnie niekorzystna sytuacja zachodzi, gdy $E_p = U_o$. Może ona uniemożliwić wykrycie doziemienia: w obwodzie stałoprądowym czy też na wyjściu falownika. Wielkością pomiarową zabezpieczeń upływowych opartych na stałym napięciu pomocniczym jest wartość średnia prądu pomiarowego I_p . Informację na jej temat uzyskujemy na podstawie średniej wartości spadku napięcia U_b na boczniku pomiarowym R_b [4]:

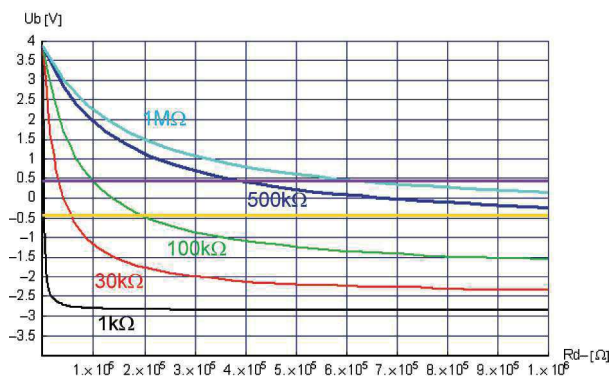
(7)

Dla sieci 1000 V wartość rezystancji progowej zadziałania zabezpieczenia upływowego wynosi 30 k Ω . Wartość napięcia pomiarowego U_b na boczniku R_b (przy którym zabezpieczenie oparte na stałym napięciu pomocniczym powinno zadziałać w sieci 1000 V) opisane jest więc zależnością [1]:

$$U_{b30k} = \frac{R_b}{R_b + R_p + R_{d30k}} E_p \quad (8)$$

Na podstawie zależności (7) i (8) otrzymano charakterystyki zależności napięcia U_b na boczniku pomiarowym R_b (pośrednio również wartość średnią prądu pomiarowego I_p) od zmian rezystancji doziemnych szyn w obwodzie prądu stałego. Do obliczeń przyjęto: $E_p = 100$ V, $R_p = 199$ k Ω , $R_b = 1$ k Ω , $U_d = 1350$ V. Jako pierwszą pokazano zależność napięcia pomiarowego U_b w funkcji zmian wartości rezystancji doziemnej szyny ujemnej R_{d-} przy parametrycznych

zmianach ($R_{d+} = 1, 30, 100, 500, 1000$ k Ω) wartości rezystancji doziemnej szyny dodatniej R_{d+} (rys. 8).

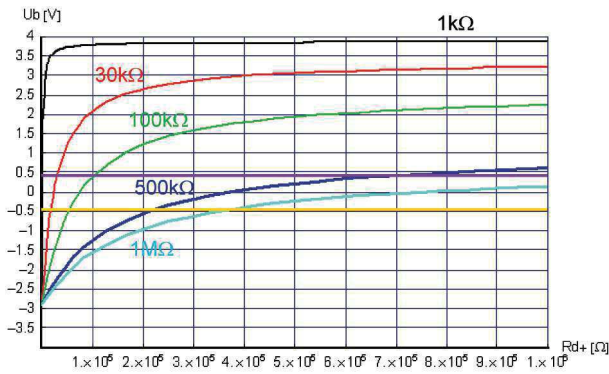


Rys. 8. Zależności wartości średniej napięcia pomiarowego na boczniku U_b w funkcji zmian rezystancji doziemnej szyny ujemnej R_{d-} przy parametrycznych zmianach rezystancji szyny dodatniej R_{d+}

Otrzymane wyniki wskazują, że mogą pojawić się nieprawidłowości w działaniu zabezpieczenia upływowego: zabezpieczenie upływowe nie zadziała, pomimo że zostały spełnione warunki jego działania ($-0,435$ V $< U_b < 0,435$ V), oraz mogą się pojawiać przypadki błędnego zadziałania ($U_b < -0,435$ V oraz $U_b > 0,435$ V). Obszar wartości rezystancji doziemnej obu szyn obwodu prądu stałego, przy których nie dojdzie do prawidłowego zadziałania zabezpieczenia upływowego, jest niewielki i dotyczy podobnych wartości rezystancji obu szyn obwodu prądu stałego.

Gorzej sytuacja wygląda pod kątem możliwości pojawiania się przypadków zbędnego zadziałania zabezpieczenia upływowego. Sytuacja jest szczególnie niekorzystna w przypadku rezystancji doziemnych szyny dodatniej R_{d+} zawierającej się pomiędzy 30 k Ω a około 200 k Ω (przykładowo dla rezystancji doziemnej szyny dodatniej $R_{d+} = 100$ k Ω , wartości rezystancji doziemnej szyny ujemnej R_{d-} zawierające się pomiędzy 30 k Ω a 90 k Ω oraz powyżej 200 k Ω będą prowadzić do zbędnego zadziałania zabezpieczenia upływowego).

Kolejne wykresy (rys. 9) wskazują, że parametryczne obniżenie rezystancji doziemnej w szynie ujemnej R_{d-} przyczynia się do tych samych negatywnych zjawisk, ale w jeszcze szerszym zakresie rezystancji doziemnych, niż to miało miejsce dla poprzednio analizowanej sytuacji (przykładowo dla rezystancji doziemnej szyny ujemnej $R_{d-} = 100$ k Ω wartości rezystancji doziemnej szyny dodatniej R_{d+} powyżej 100 k Ω będą prowadzić do zbędnego zadziałania zabezpieczenia upływowego).



Rys. 9. Zależności wartości średniej napięcia pomiarowego na boczniku U_b w funkcji zmian rezystancji doziemnej szyny dodatniej R_{d+} przy parametrycznych zmianach rezystancji szyny ujemnej R_{d-}

3. PODSUMOWANIE

Zastosowanie przemienników częstotliwości do zasilania odbiorników przyczynia się do zmian warunków pracy zabezpieczeń upływowych. Na poprawność działania zabezpieczeń upływowych opartych na stałym źródle pomocniczym szczególnie niekorzystnie wpływają zmiany rezystancji doziemnej w stałoprądowych obwodach pośredniczących przemienników częstotliwości. Mogą one prowadzić do braku zadziałania zabezpieczenia upływowego (mimo że zachodzą warunki do jego zadziałania), jak i zadziałania zabezpieczenia w sytuacji, gdy warunki ku temu nie są spełnione. Przeprowadzona analiza wskazuje na to, że zabezpieczenia oparte na stałym źródle pomocniczym w określonych sytuacjach będą działać nieprawidłowo (rys. 8 i 9). W celu ograniczenia nieprawidłowego działania zabezpieczeń upływowych należy sprawdzić ich odporność na obniżenie rezystancji doziemnej R_d w obwodach stałoprądowych (producenti mogą zastosować dodatkowe rozwiązania ograniczające tego typu nieprawidłowe działania). Podobne problemy nie powinny się pojawiać w sytuacji, gdy przemienniki częstotliwości stosowane są w wersji standardowej (cały przemiennik znajduje się w jednej obudowie), w której dostępne są jedynie zaciski wejściowe z dołowej sieci kopalnianej (wejście prostownika) i zaciski wyjściowe do podłączenia z odbiornikiem (wyjście falownika). Coraz częściej dochodzi jednak do sytuacji, w której prostownik przemiennika

częstotliwości znajduje się w innym miejscu niż jego falownik, a w związku z tym wyjście prostownika jest łączone za pomocą kabli (lub przewodów oponowych) z wejściem falownika [5]. W przypadku zaistnienia powyższej sytuacji konieczne staje się zastosowanie zabezpieczenia upływowego prawidłowo wykrywającego obniżenie rezystancji doziemnej R_d w obwodzie stałoprądowym.

Kiedy nie występuje negatywne oddziaływanie obwodów stałoprądowych, pomiar rezystancji doziemnej w dołowej sieci kopalnianej napięcia przemiennej nie różni się zasadniczo od sytuacji, gdy nie ma przemienników częstotliwości. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że częstotliwość napięcia wyjściowego falownika jest zmienna, zależna od wymaganego stanu pracy odbiornika (wpływa na czas zadziałania zabezpieczenia upływowego i na zastępczą reaktancję pojemnościową sieci w tych warunkach).

Zabezpieczenia upływowe oparte na zmiennym napięciu pomocniczym pozwalają uniknąć negatywnych skutków związanych z obniżeniem rezystancji doziemnej w obwodach stałoprądowych. Rozwiązania takie charakteryzują się jednak dłuższym czasem reakcji na zaistniałe obniżenie rezystancji doziemnej poniżej wartości progowej zadziałania zabezpieczenia upływowego.

Literatura

- [1] Marek A.: *Wybrane zagadnienia centralnych zabezpieczeń upływowych z pomocniczym źródłem prądowym*, Konferencja EMTECH 2014: 82–91.
- [2] Marek A.: *Właściwości centralnych zabezpieczeń upływowych w układzie omomierza równoległego z pomocniczym źródłem prądowym*, XV Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej 2014: 161–171.
- [3] Marek A.: *Zabezpieczenia upływowe w sieciach z przemiennikami częstotliwości w podziemiach kopalń*, „Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering” 2010, 2: 30–35.
- [4] Marek A.: *Analiza przydatności wybranych zabezpieczeń upływowych w dołowych sieciach z przemiennikami*, Konferencja EMTECH 2016: 64–72.
- [5] Elgór + Hansen: *Układ zasilania z wykorzystaniem przesyłu energii prądem stałym* [karta produktu].

dr inż. ADAM MAREK
Katedra Elektrotechniki
i Automatyki Przemysłowej
Wydział Górnictwa i Geologii
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice
Adam.Marek@polsl.pl