

ADAM MAREK

Influence of indirect frequency converters on operation of central leakage protection in underground coalmine networks

This paper presents considerations for leakage protections operating in underground coalmine networks containing loads that include frequency converters. The possibility of malfunctions in leakage protections has been proven in the case of a reduction of leakage resistance in a DC circuit.

Key words: central leakage protection (CZU), leakage resistance, capacitance to earth, indirect frequency converter

1. TYPICAL SOLUTIONS OF LEAKAGE PROTECTIONS

The leakage protections commonly used in Polish underground coal mines ($f_n = 50$ Hz) can be divided into protections based on constant and alternative auxiliary sources. The task of these leakage protections is to switch off the damaged fragments of a network and loads (or to signal such situations) in the case of a decrease the leakage resistance below the threshold value, which are specified by the relevant standards. The leakage protections available on the market are based on a constant auxiliary source. Protections based on direct auxiliary voltage as well as protections based on a direct auxiliary current are used.

Regardless of whether the measured magnitude is the current or the voltage, information about the condition of isolation is obtained through a comparison of the measured voltage to the reference value of the voltage (corresponding to the actuation of the threshold resistance of the leakage protection). In leakage protections based on direct auxiliary voltage (Fig. 1), it is voltage drop u_b along shunt R_b , and the value of leakage resistance R_d is described by the following dependence:

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

where:

- R_d – value of equivalent leakage resistance [W],
- E_p – value of auxiliary source voltage of leakage protection [V],
- U_b – average value of measured voltage along shunt R_b [V],
- R_b – value of measured shunt resistance [W],
- R_{p1}, R_{p2} – value of series resistances of leakage protection [W],
- R_{dl} – value of equivalent resistance of series reactor [W].

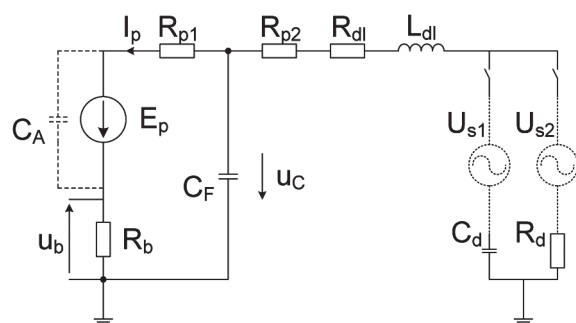


Fig. 1. Simplified equivalent circuit diagram of leakage protection based on direct auxiliary voltage

A simplified equivalent circuit diagram of the leakage protection based on direct auxiliary voltage also includes elements filtering the measuring voltage

waveform (filter capacitance C_F , C_A , and series reactor inductance L_{dl}) and other equivalent parameters of the controlled network: equivalent capacitance to earth C_d and equivalent interference voltage (associated with the asymmetry: network capacitance to earth U_{s1} and network leakage resistance U_{s2}).

In the case of leakage protections based on direct auxiliary current, two solutions are mainly used: leakage protections operating in an arrangement of a series-connected ohmmeter (Fig. 2) and leakage protections operating in an arrangement of a parallel-connected ohmmeter (Fig. 3). In the first solution, measurement magnitude is voltage u_p , which is measured across terminals of an equivalent auxiliary current supply. The network insulation condition is described by the following dependence [1]:

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

where, in comparison to the previous circuit, the following magnitudes have appeared:

- R_{b1}, R_{b2} – resistance values of diode protective barrier [Ω],
- U_p – average value of measuring voltage of leakage protection [V],
- I_p – value of auxiliary current of leakage protection [A],
- C_A, C_F – values of filtering capacitors of leakage protection [F].

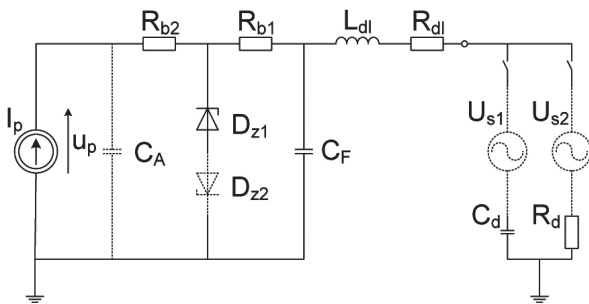


Fig. 2. Simplified equivalent circuit diagram of leakage protection operating in arrangement of series-connected ohmmeter based on direct auxiliary current

The second variant of the leakage protection based on a direct auxiliary current (in an arrangement of a parallel-connected ohmmeter) assumes that the voltage measurement is obtained by the passage of a current through measuring resistor R_V , which is connected in parallel to the auxiliary current supply

(Fig. 3). The presented solution allows us to preserve greater sensitivity in a range of resistances that are significant in the case of the correctness actuations of the leakage protection (about 2 to 3 times less than the adjusted resistance values of the leakage protection) and less sensitivity in a range of larger resistance values (a limitation of the maximum measuring voltage value).

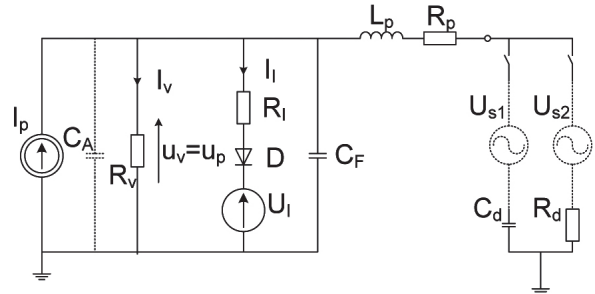


Fig. 3. Simplified equivalent circuit diagram of leakage protection operating in arrangement of parallel-connected ohmmeter based on direct auxiliary current

The value of the measured leakage resistance of the controlled network for leakage protection operating in an arrangement of a parallel-connected ohmmeter based on direct auxiliary current evaluated with greater sensitivity (without taking into account resistance R_V) is described by the following dependence [2]:

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

where, compared to the previous circuits:

- U_p – average value of measured voltage of leakage protection [V],
- R_V – value of parallel resistance of leakage protection [Ω].

The leakage protection based on the direct auxiliary current (regardless of whether they operating in an arrangement of a series-connected or parallel-connected ohmmeter) is not suitable for the detection of emergency conditions appearing in the DC current circuits. The cause of this state of affairs is a lack of opportunities for the correct measurement of the leakage resistance in both directions of the fault current.

Apart from the leakage protections based on direct auxiliary sources, there are also devices based on alternating auxiliary voltages. Available on the market are (or were) solutions based on a rectangular

(Fig. 4) or triangular alternating auxiliary voltage. By changing voltage polarity E_p periodically, two values of voltage U_b on measuring resistor R_b are obtained. The average value of the difference between these voltages U_{bAV} is lacking influences of the interfere voltage of DC circuit U_o . Under these conditions, the value of the measured leakage resistance described is the same relationship as in the case of leakage protections based on direct auxiliary voltage:

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

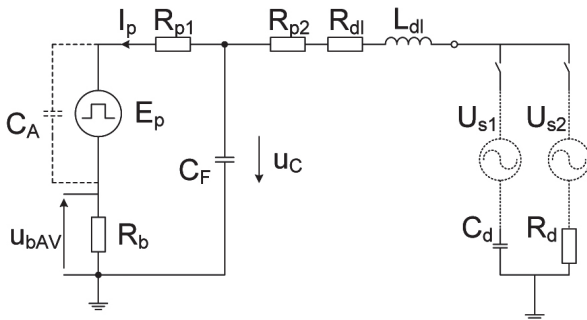


Fig. 4. Simplified equivalent circuit diagram of leakage protection based on alternating rectangular auxiliary voltage

The frequency of such an alternating auxiliary voltage cannot be too big due to the appearing transient states during changes in the polarity of the voltage. The time constant of the commutation circuit depends on the equivalent capacity, resistance, and inductance of the system (the resonant circuits can also appear). RC circuits in a steady state are achieved after a period of more than four times constants. In a typical coal mine environment, the period of auxiliary sources should not be less than about 3s. Taking into account the applicable standard, this is an important defect in this type of leakage protection solution. Apart from this fact, leakage protection based on alternating auxiliary voltage can correctly detect cases of a decrease in the leakage resistance in networks with indirect frequency converters.

A further analysis of the leakage protection cooperation with networks loaded by indirect frequency converters will focus on leakage protection based on direct auxiliary voltage. This type of leakage protection can work in both directions of current (changing the direction of the flowing current measurement can be caused by decreased value of leakage resistance in the DC circuit). The appearance of the additional direct voltage in the measuring circuit will probably

cause an erroneous result (measuring) in the value of the resultant leakage resistance. So, it is necessary to specify which effects will cause the emergence of an additional constant parasitic voltage on the operation of the leakage protection. This problem can be solved by the application of leakage protection with a rectangular shape of the auxiliary voltage with a lesser frequency than the minimum output frequency inverter in the case when the measurement would be operating in both directions of the auxiliary voltage.

2. INFLUENCE OF INDIRECT FREQUENCY CONVERTER ON OPERATING LEAKAGE PROTECTION

The technological progress in the field of power electronic valve production, power electronic development, and methods of controlling power electronic valves has influenced the more and more frequent application of power electronic converters (mainly rectifiers and frequency converters) to feed various loads; this is also true in underworld coal mine networks. In such a situation, the leakage protections should prove the effectiveness of the actuations not only in an alternating coal mine voltage network (input of the indirect frequency converters), but it should also detect decreasing leakage resistance in the indirect circuits of frequency converters (DC circuits) as well as at the outputs of indirect frequency converters (output of the inverters). Taking into account the fact that the leakage protections are most-commonly installed in transformer stations, these devices should detect decreasing leakage resistance: in a coal mine network, in an indirect circuit of a frequency converter, and at the output of the inverter (Fig. 5).

Figure 6 shows the equivalent scheme that includes the indirect frequency converter connected to the power coal mine network and leakage protection that should be controlling the state of isolation of the whole network (also with a frequency converter). This scheme takes into consideration the most-important parameters of the controlled parts of the network (before the frequency converter, in the indirect DC circuit, and at output of the frequency converter), as well as the parameters of the same leakage protection based on direct auxiliary voltage. The assumption was made that an analysis of the detection capability (by leakage protection) of leakage resistance decreases in different parts of the network with frequency inverters that will be carried out separately.

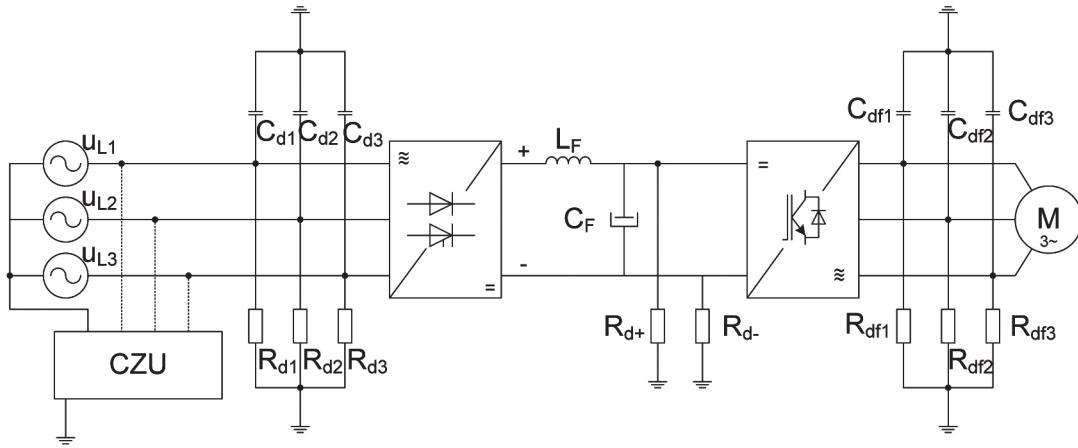


Fig. 5. Simplified diagram of equivalent part of network with leakage protection and with frequency converter supplying induction motor [4]

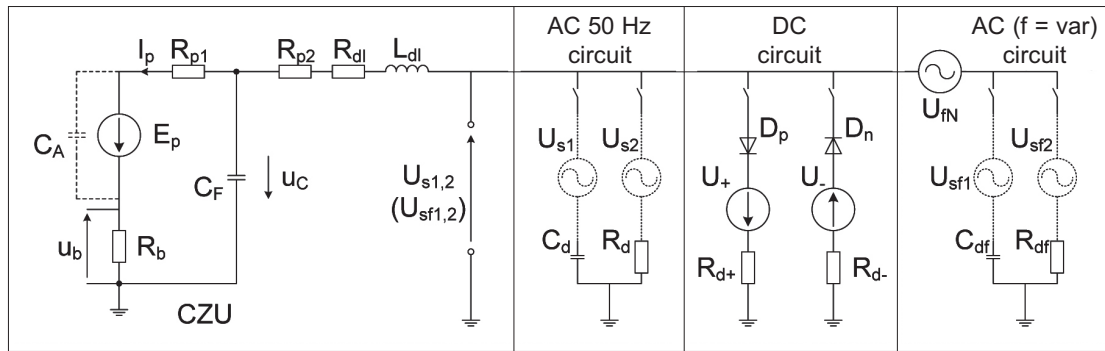


Fig. 6. Simplified diagram of equivalent leakage protection and power supply network with frequency converter, with taking into account independent, potential places of emergency or interference states

The frequency converter has no effect on the detection of the state of the decreased leakage resistance in a controlled part of an alternative coal mine network (while maintaining perfect insulation in the indirect circuit and at the output of the converter). The network isolation status is then described using dependence (1). The following impact the determination of the actual value of the leakage resistance (by measuring the unit of the leakage protection): the state of the symmetry of the network parameters to earth and the values of the capacity to earth and leakage resistance. Depending on whether we examine the influence on leakage resistance or capacity to earth for the correct actuation of the leakage protection, the consistency of the capacity to earth or leakage resistance is assumed. The RMS value of the interference voltage (for single phase decreasing of the leakage resistance) can be specified using dependence [3]:

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

The leakage protection shouldn't have any problems with the correct detection and actuation in the case when the leakage resistance is less than the threshold resistance at the output of the inverter. Depending on the actual output frequency of the inverter, a delay could appear in detecting such a situation (a lag of even several seconds) compared to an instance of decreasing leakage resistance in an underworld coal mine network. Ignoring the additional resistance between the input of the frequency inverter and load (they are small compared to the rest of the resistance of Fig. 1), relationship (1) can also be used to describe the network insulation status at the output of the inverter. Analogously, the value of the RMS interference voltage at the output of the inverter can be determined (for the single-phase reduction of the leakage resistance) [3]:

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

where U_{ffal} – RMS value of output phase voltage of inverter [V].

A serious influence on the proper function of the leakage protection may have a reduction of the leakage resistance in the DC circuit of the frequency converter (Fig. 7).

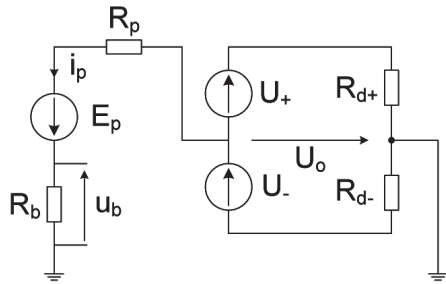


Fig. 7. Simplified, equivalent diagram used to define influence DC circuit of frequency converter on operating leakage protection

A particularly unfavorable situation occurs when $E_p = U_o$. It may prevent the detection of an earth fault: in the DC circuit or at the output of the inverter. The measured quantity of the leakage protection based on direct auxiliary voltage is the average value of measuring current I_p . Information about this current is achieved on the basis of the average value of voltage drop u_b along shunt R_b [4]:

$$U_b = \frac{R_b}{R_b + R_p + \frac{R_{d-} \cdot R_{d+}}{R_{d-} + R_{d+}}} \left(E_p - \frac{U_d}{2} + \frac{U_d}{1 + \frac{R_{d-}}{R_{d+}}} \right) \quad (7)$$

For a 1000 V alternative underworld coal mine network, the value of the response threshold resistance of the leakage protection is 30 k Ω . Measured voltage U_b along shunt R_b (with which the leakage protection based on direct auxiliary voltage should actuate at the 1000 V network) is described by relation [1]:

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

Characteristics of voltage U_b along shunt R_b (indirectly, also the average value of measuring current I_p) depending on the changes in the leakage resistance of the rods in the DC circuit were obtained based on relationships (7) and (8). The following were presupposed in the calculations: $E_p = 100$ V, $R_p = 199$ k Ω , $R_b = 1$ k Ω , $U_d = 1350$ V. First was shown the dependency of measuring voltage U_b as a function of chang-

es in the leakage resistance value of negative rod R_{d-} and parametric ($R_{d+} = 1, 30, 100, 500, 1000$ k Ω) changes in the leakage resistance values of positive rod R_{d+} (Fig. 8).

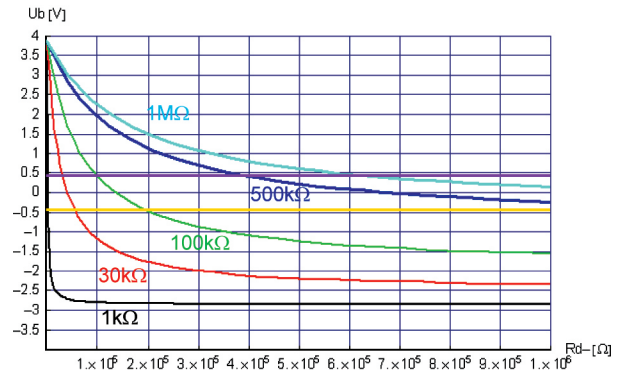


Fig. 8. Dependencies of average value of measuring voltage U_b along shunt R_b in function of changes in leakage resistance of negative rod R_{d-} and parametric changes in resistances of positive rod R_{d+}

The obtained results indicate that malfunctions can appear during operation of the leakage protection: the leakage protection doesn't actuate, despite the fact that the conditions for its actuation were fulfilled (-0.435 V $< U_b < 0.435$ V), and instances of unnecessary actuations of the leakage protection may also arise ($U_b < -0.435$ V and $U_b > 0.435$ V). The area of leakage resistance values of both rods in a DC circuit where the appearance of an incorrect actuation of the leakage protection may emerge is small, and it is related to similar leakage resistance values of both rails in a DC circuit.

The possibilities of the emergence of cases of unnecessary actuation of the leakage protection can appear more often. The situation is particularly bad for the leakage resistance of positive rod R_{d+} , which contain between 30 k Ω and about 200 k Ω (for example, for leakage resistance of positive rod $R_{d+} = 100$ k Ω , the leakage resistances of negative rail R_{d-} containing between 30 k Ω and 90 k Ω and above 200 k Ω will lead to unnecessary actuations of the leakage protection).

The following charts (Fig. 9) indicate that parametric leakage resistance reduction in negative rail R_{d-} contributes to the same negative phenomena, but in an even wider range of the leakage resistances than was the case for the previously analyzed situation (for example, for the leakage resistance of negative rail $R_{d-} = 100$ k Ω , the leakage resistance values of positive rail R_{d+} above 100 k Ω will lead to the unnecessary actuation of the leakage protection).

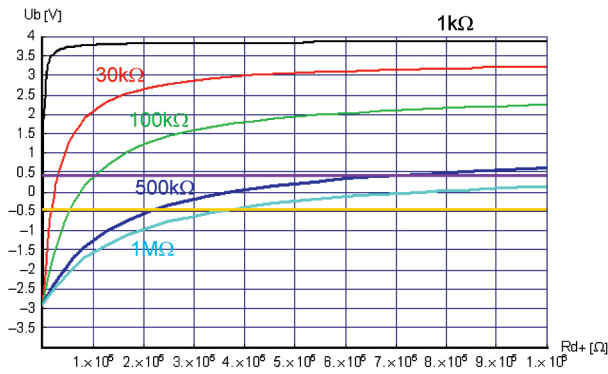


Fig. 9. Dependencies of average value of measuring voltage U_b along shunt R_b in function of changes in the leakage resistance of negative rod R_{d+} and parametric changes in resistances of positive rod R_{d-}

3. SUMMARY

Using frequency converters to supply the receivers contributes to changes in the operating conditions of leakage protection. Changes in the leakage resistance in DC circuits of indirect frequency converters have especially adversely affected the correct operation of the leakage protection based on the direct auxiliary source affected. These can lead to a lack of leakage protection actuation (despite the fact that there are conditions for its operation) and its actuation, in the case when the fulfillment conditions are not met for doing so. The carried-out analysis indicates that the leakage protection based on a direct auxiliary source in specific situations will not work properly (Fig. 8 and 9). Resistance to a decrease in leakage resistance R_d in the DC circuits should be checked in order to limit the cases of leakage protection malfunction (manufacturers may apply additional solutions that reduce this type of incorrect actuation).

These sorts of issues should not arise when frequency converters are used in the standard version (the whole converter is located in a single case), in which only the input terminals for the connection to an underworld coal mine network (input rectifier) and output terminals for connecting to the receiver (output of the inverter) are available. However, the situation where the rectifier of the frequency converter

is located in a place other than its inverter is becoming more and more frequent; therefore, the output of the rectifier is connected by using cables with input terminals of the inverter [5]. In the case of such an occurrence, application of the leakage protection is necessary in order to correctly detect the decrease of leakage resistance R_d in the DC circuits.

When there are no adverse effects of the DC circuits, the leakage resistance measurement in an underworld alternating coal mine voltage network does not differ substantially from the situation when there are no frequency converters. However, it should be noted that the frequency of the output voltage of the inverter is variable, depending on the required operating state of your receiver (under these conditions, it influences the response time of the leakage protection and substitute capacitance of the network).

Leakage protections based on alternating auxiliary voltages allow for avoiding the negative effects associated with a reduction of leakage resistance in the DC circuits. However, such arrangements need longer response times to actuate in the case of a reduction in the leakage resistance below the threshold resistance of the leakage protection.

References

- [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 omierza 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*, product's card.

ADAM MAREK, Ph.D., Eng.
 Department of Electrical Engineering
 and Industrial Automation
 Faculty of Mining and Geology
 Silesian University of Technology
 ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Poland
 Adam.Marek@polsl.pl

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 upływowe (CZU), rezystancja doziemna, pojemność doziemna, pośredni przemiennik częstotliwości

1. TYPOWE ROZWIĄZANIA ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH

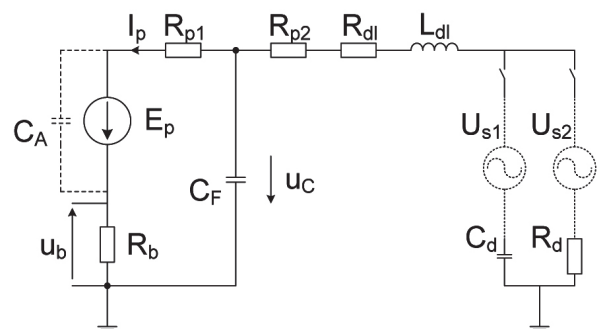
Używane powszechnie w polskim górnictwie zabezpieczenia upływowe przeznaczone do stosowania w sieci dołowej ($f_n = 50$ Hz) możemy podzielić na zabezpieczenia oparte na stałym oraz zmiennym źródle pomocniczym. Zadaniem tych urządzeń jest wyłącznie spod napięcia pracujących fragmentów sieci oraz odbiorników (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]:

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

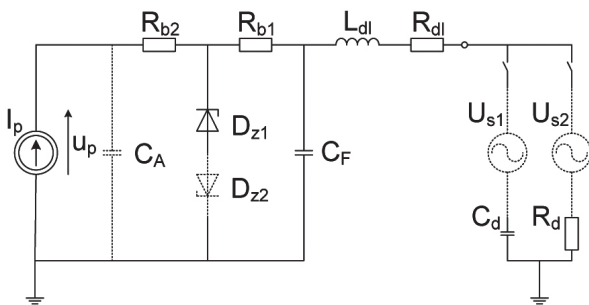
gdzie dodatkowo w porównaniu z przednim schematem pojawiły się wielkości:

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],

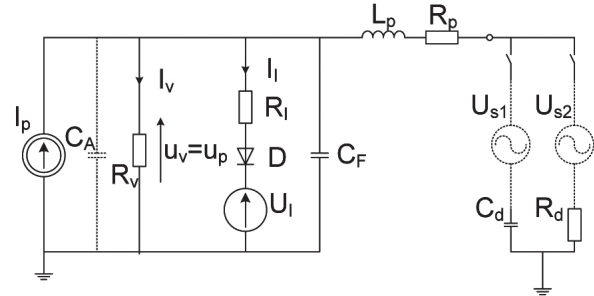
C_A, C_F – wartości pojemności filtrujących zabezpieczenia upływowego [F].



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 równolegle 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],

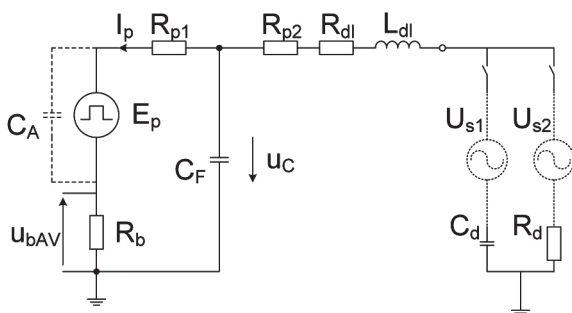
R_V – wartość rezystancji równoległej zabezpieczenia upływowego [Ω].

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.

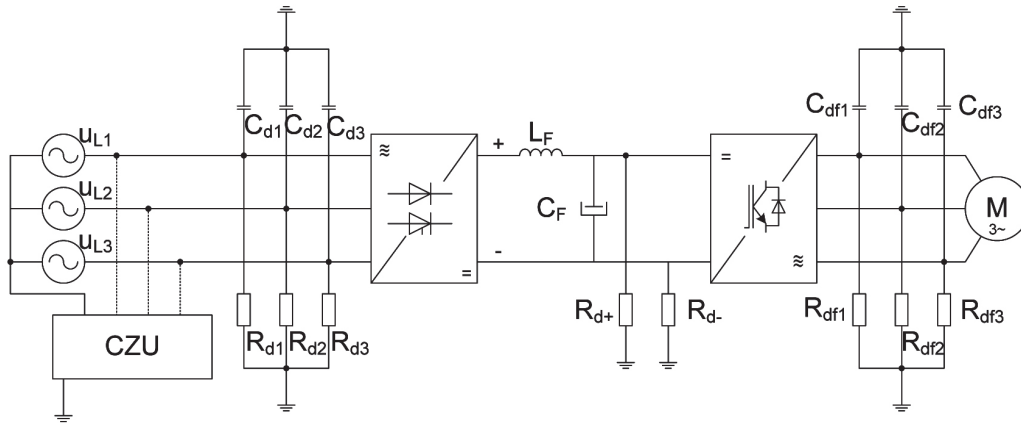
Dalsza analiza współpracy zabezpieczeń upływowych z sieciami obciążonymi pośrednimi przemiennikami częstotliwości będzie dotyczyć zabezpieczeń upływowych opartych na stałym napięciu pomocniczym. Zabezpieczenia tego typu mogą pracować przy obu kierunkach prądu pomiarowego (zmiana kierunku przepływającego 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.

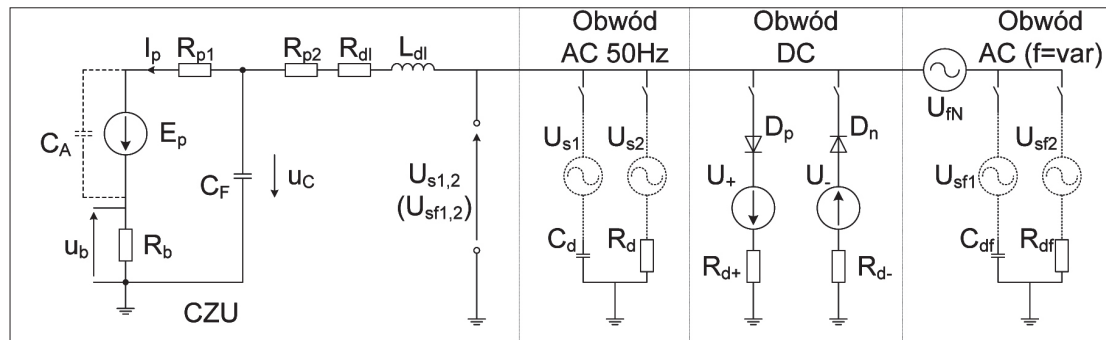
2. ODDZIAŁYWANIE POŚREDNICH PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI NA PRACĘ ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH

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]:

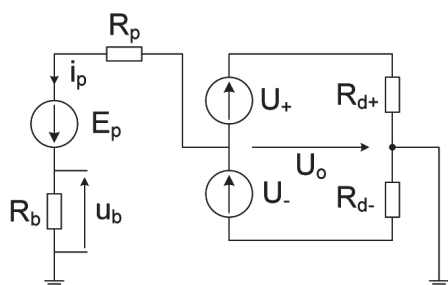
$$U_{s1,2} \approx \frac{U_f}{\sqrt{1 + \frac{R_d^2}{X_{dz}^2}}} \quad (5)$$

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]:

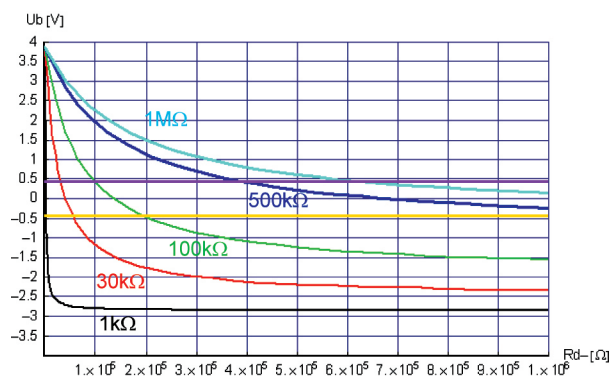
(7)

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).

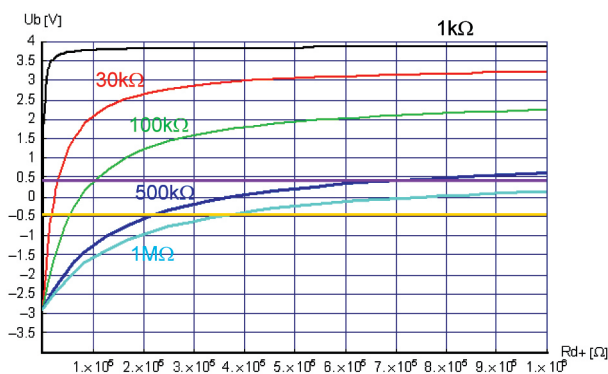


Rys. 8. Zależności wartości średniej napięcia pomiarowego na boczniku U_b w funkcji zmian rezystancji doziemnej szyny ujemnej R_{d-} przy parametrycznych zmianach rezystancji szyny dodatniej R_{d+}

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 (producenci 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