

Zabezpieczenia upływowe w sieciach z przemiennikami częstotliwości w podziemiach kopalń

W artykule przedstawiono wpływ przemiennika (załączonego bezpośrednio do sieci kopalnianej niskiego napięcia) na pracę centralnych zabezpieczeń upływowych. Wykazano konieczność stosowania dwubiegunowego członu pomiaru prądu. Wykazano zmniejszoną przydatność stosowania źródła stałonapięciowego w przypadku podwójnego doziemienia. Przedstawiono możliwość usunięcia tej niedogodności poprzez zastosowanie przemiennych napięć pomiarowych o kształcie trójkątnym lub prostokątnym.

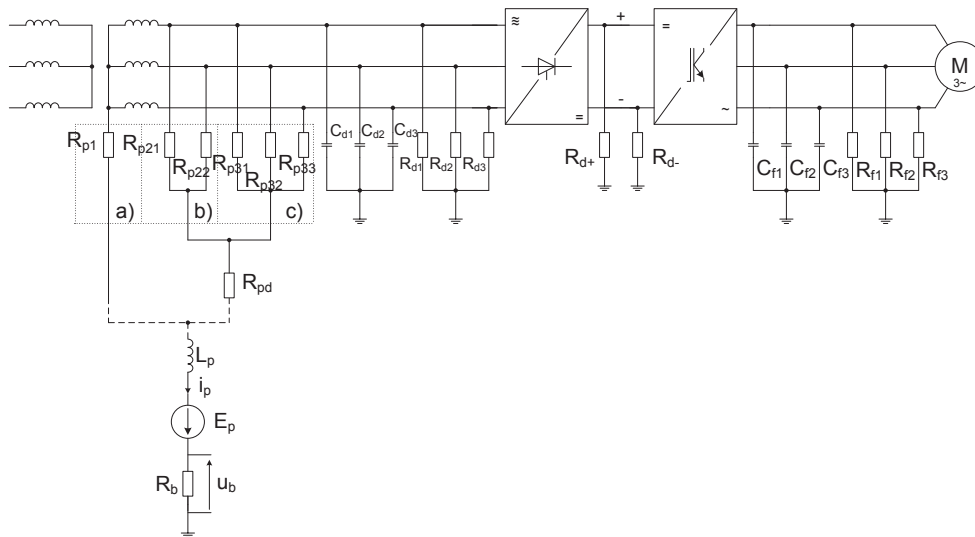
1. WSTĘP

Przepisy wymagają monitorowania stanu izolacji w sieciach IT niskiego napięcia. Wymagania dotyczące stanu izolacji w sieciach niskiego napięcia określają dwie normy: PN-EN 61557-8:2004 (Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemianych do 1 kV i stałych do 1,5 kV Urządzenia przeznaczone do sprawdzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych Część 8: Urządzenia do monitorowania stanu izolacji w sieciach IT) oraz w dołowych sieciach kopalnianych PN-G-42040:1996 (Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej Zabezpieczenia upływowe Wymagania i badania). Na podstawie przepisów dotyczących bezpieczeństwa w dołowych sieciach niskiego napięcia wymagane jest stosowanie centralnych zabezpieczeń upływowych (w skrócie CZU). Centralne zabezpieczenia upływowe winny działać zarówno w przypadku niesymetrycznego jak i symetrycznego obniżenia się rezystancji doziemnej. Zabezpieczenia te budowane są jako jednoparametrowe (rezystancja izolacji doziemnej) lub wieloparametrowe (mierzone są dodatkowo np. pojemność doziemna oraz napięcie zerowe). Zabezpieczenia te zasadniczo przeznaczone są do kontroli sieci, do których nie są załączone przemienniki lub przekształtniki.

Zastosowanie przemienników wpływa na pracę klasycznych zabezpieczeń upływowych niskiego napięcia. Przykładowy (uproszczony) schemat ideowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego w sieci niskiego napięcia, do której podłączono układ przemiennikowy wraz z obciążeniem w postaci silnika indukcyjnego przedstawia rysunek 1. Na schemacie przedstawiono trzy sposoby sprzęgania układu pomiarowego z siecią:

- poprzez rezystor dołączony do punktu zerowego transformatora (rezystor R_{p1}),
- międzyfazowe (rezystory R_{p21} , R_{p22} , R_{pd}),
- trójfazowe (rezystory R_{p31} – R_{p33} , R_{pd}).

Rozwiązanie pierwsze jest najkorzystniejsze w przypadku kiedy dostępny jest punkt zerowy transformatora oraz kiedy mierzony jest jeden parametr – rezystancja doziemna. W przypadku symetrii sieci zasilającej, moc wydzielana na rezystorze jest niewielka. Rozwiązanie drugie może być stosowane w przypadku zabezpieczeń kilkuparametrowych (wtedy zamiast rezystorów stosowane są impedancje). Układ ten charakteryzuje się tym, że na jego wyjściu pojawia się duża składowa przemienna (połowa napięcia fazowego). Układ ten może być stosowany w układach jednofazowych i prądu stałego. Rozwiązanie trzecie charakteryzuje się tym, że dla symetrycznych obciążeń doziemnych, składowa przemienna w punkcie neutralnym jest równa zero. Niestety układ ten pobiera o 1/3 większą moc niż układ drugi.



Rys. 1. Schemat ideowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego w sieci z przemiennikiem

Napięcie pomocnicze E_p poprzez filtr dolnoprzepustowy, oparty na dławiku L_p , dołączone jest do jednego ze wspomnianych układów sprzęgających. Sygnałem wyjściowym układu jest prąd obwodu pomiarowego i_p , mierzony pośrednio poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze R_b . Zastępczą rezystancję doziemną wyznacza się metodą techniczną, bądź w układzie omomierza szeregowego. Korzystniejsza i dokładniejsza jest metoda techniczna pomiaru rezystancji doziemnej (wykorzystuje się metodę poprawnie mierzonego prądu).

Wartość rezystancji doziemnej w takim układzie wyznacza się na podstawie zależności:

$$R_d = \frac{E_p}{I_p} - (R_p + R_b) \quad (1)$$

gdzie:

R_d – rezystancja doziemna,

R_p – rezystancja szeregową.

Projektanci tego typu urządzeń zasadniczo uwzględniają jedynie pojemności doziemne ($C_{d1} - C_{d3}$) oraz rezystancje doziemne ($R_{d1} - R_{d3}$) w sieci prądu przemiennego, natomiast nie biorą pod uwagę problemów jakie mogą wynikać w czasie pracy dołowej sieci niskiego napięcia, do której podłączono układ przemiennikowy wraz z obciążeniem w postaci silnika indukcyjnego. W artykule zostanie wykazane, że tego typu układy mogą prowadzić do pojawienia się niekorzystnych sytuacji skutkujących powstaniem zagrożeń, które „zwykle” CZU nie wykrywają lub wystąpieniem zbędnych wyłączeń (pomimo, że rezystancja doziemna jest znacznie większa od rezystancji granicznej wynikającej z normy PN-G 42040).

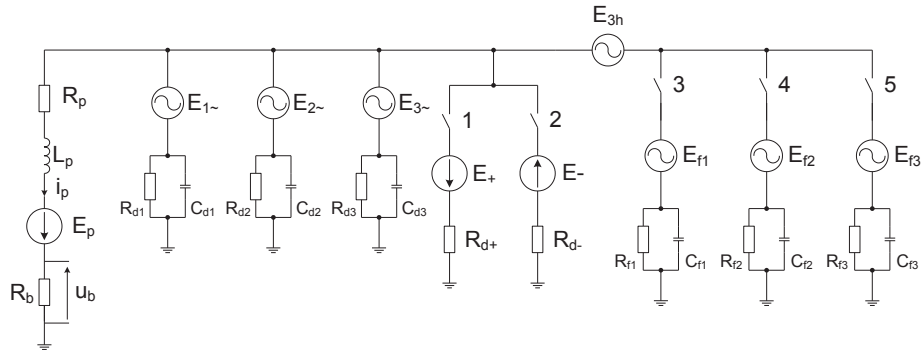
Wspomniane problemy mogą się pojawić ze względu na występowanie rezystancji doziemnych w sieci prądu stałego R_{d+} , R_{d-} (za prostownikiem, a przed falownikiem) oraz rezystancji i pojemności doziemnych na wyjściu falownika (R_f , C_f).

2. ANALIZA PRACY ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH W DOŁOWEJ SIECI NISKIEGO NAPIĘCIA OBCIĄŻONEJ PRZEMIENNIKAMI

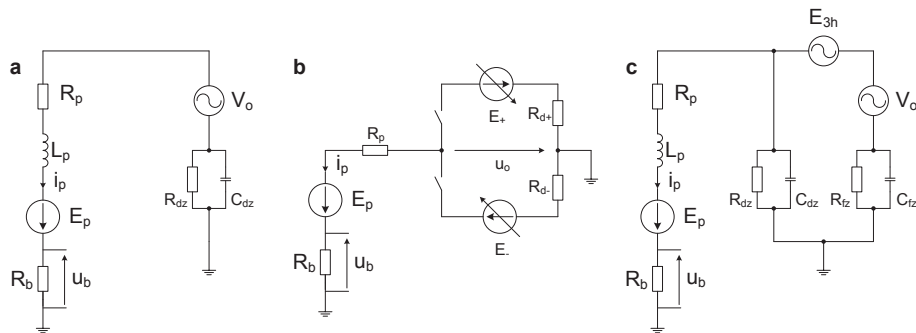
Najważniejszym zadaniem centralnego zabezpieczenia upływowego (CZU) jest jak najszybsze wykrycie pojawiającej się awarii i następnie wyłączenie zasilania. Tego typu zabezpieczenia są bowiem stosowane nie tylko ze względu na konieczność zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej, ale również z konieczności przeciwdziałania zagrożeniom pożarowym i wybuchowym. W czasie normalnej pracy zabezpieczenia upływowego poprawność jego funkcjonowania mogą zakłócać następujące czynniki:

- a) stan nieustalony w sieci podczas załączania zasilania oraz obciążenia,
- b) doziemienie niesymetryczne w sieci prądu zmiennego,
- c) doziemienie w obwodzie prądu stałego,
- d) doziemienie symetryczne na wyjściu falownika,
- e) doziemienie niesymetryczne na wyjściu falownika.

W celu przeprowadzenia analizy przytoczonych sytuacji, przyjęto (na bazie schematu z rysunku 1) uproszczony schemat zastępczy (rys. 2). Centralne zabezpieczenie upływowo jest na nim reprezentowane przez gałąź, w skład której wchodzi rezystancja: szeregową R_p i pomiarową R_b , dławik wygładzający L_p oraz napięcie pomocnicze E_p . Stan izolacji po



Rys. 2. Uproszczony, zastępczy schemat ideowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego uwzględniającego różne źródła stanów awaryjnych



Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy: a) dla niesymetrycznego doziemienia pojawiającego się w sieci napięcia przemiennego, b) dla doziemienia w obwodzie stałoprądowym, c) dla doziemienia pojawiającego się na wyjściu falownika

szczególnych faz po stronie sieci napięcia przemiennego reprezentują rezystancje doziemne R_d i pojemności doziemne C_d . Klucze 1 oraz 2 opisują stany załączenia (wyłączenia) grup zaworów prostownika, zaś klucze 3, 4, 5 opisują fazy, w których wyzwalane są zawory falownika. Stan izolacji w obwodzie stałoprądowym (szyn napięcia stałego „+” i „-”) opisują rezystancje doziemne R_{d+} , zaś stan izolacji na wyjściu falownika – rezystancje doziemne R_f oraz pojemności doziemne C_f . Na schemacie tym ponadto uwzględniono pojawienie się trzeciej harmonicznej w napięciu wyjściowym prostownika.

Każde z możliwych miejsc pojawienia się doziemienia zostanie rozpatrzone osobno, bez uwzględniania stanu izolacji w pozostałych miejscach. Pozwoli to określić zależności jakie występują pomiędzy pogorszeniem się stanu izolacji w poszczególnych miejscach rozpatrywanego układu, a wynikającą z takiego stanu, zmianą poziomu bezpieczeństwa. Pozostaje też do rozstrzygnięcia, jaki wpływ ma miejsce pojawienia się doziemienia na poprawność działania centralnego zabezpieczenia upływowego. Jak podano we wstępie, działanie centralnego zabezpieczenia upływowego, w uproszczeniu, opiera się na kontroli napięcia występującego na boczniku pomiarowym (pośrednio prądu). Wobec tego,

pojawienie się dodatkowych doziemień w obwodzie prądu stałego oraz na wyjściu falownika może prowadzić do sytuacji, w której zabezpieczenie nie zadziała (pomimo, że rezystancja izolacji jest mniejsza od zakładanego normami poziomu) bądź też może prowadzić do zbędnych wyłączeń (w sytuacji gdy rezystancja izolacji nie przekroczyła zakładanego progu zadziałania zabezpieczenia). W pierwszym przypadku zabezpieczenie nie spełniałoby swojego zadania (brak zadziałania), zaś w drugim przypadku, zbędne wyłączenia prowadziłyby do pojawienia się zbędnych przerw w pracy (wymierne straty ekonomiczne).

Rozpatrując problematykę pojawiających się doziemień w dołowych sieciach niskiego napięcia bierze się pod uwagę przede wszystkim doziemienia w sieci napięcia przemiennego. Takie podejście do problemu doziemień wynika z założenia, że w takiej sieci jest największe prawdopodobieństwo pojawienia się doziemienia (długość kabli w takiej sieci jest znacznie większa, w porównaniu do pozostałych miejsc, w których mogą pojawić się doziemienia). Jeśli założymy, że doszło do niesymetrycznego doziemienia w sieci napięcia przemiennego (w układzie z rysunku 1) to schemat zastępczy z rysunku 2 można uprościć do postaci pokazanej na rysunku 3a:

Na podstawie schematu z rysunku 3a można założyć, że napięcie V_o (przy założeniu symetrii pojemności doziemnej) opisane jest zależnością:

$$V_o \approx \frac{E_f}{\sqrt{1 + \frac{R_{dz}^2}{X_{dz}^2}}} \quad (2)$$

gdzie:

- V_o – napięcie zastępcze,
- E_f – wartość skuteczna napięcia fazowego,
- R_{dz} – zastępcza rezystancja doziemna,
- X_{dz} – zastępcza reaktancja doziemna.

Zgodnie z zależnością (2) zastępcze napięcie V_o maleje wraz ze wzrostem zastępczej rezystancji doziemnej. Norma PN-G-42040 przewiduje różne wartości rezystancji nastawczej zabezpieczenia dla różnych napięć zasilania. Dla sieci 1 kV wartość rezystancji nastawczej wynosi 30 k Ω . Przy tej rezystancji oraz symetrycznych pojemnościach doziemnych ($C_d = 1 \mu\text{F}$ na fazę), napięcie to jest około 30 razy mniejsze od wartości skutecznej napięcia fazowego sieci bądź jedynie około $\sqrt{2}$ razy mniejsze od wartości skutecznej napięcia fazowego sieci (dla $R_{dz} = 1 \text{ k}\Omega$). Na tej podstawie można określić wartość prądu (pochodzącą od tej składowej napięcia) i jej udział w prądzie pomiarowym i_p . Wartość składowej przemiennej w prądzie pomiarowym może być wielokrotnie większa od składowej stałoprądowej (w przypadku małych rezystancji doziemnych).

Poważniejsze konsekwencje może mieć pojawienie się doziemienia w obwodzie prądu stałego (rys. 3b). Doziemienie takie może prowadzić do powstania dwóch niekorzystnych sytuacji: powstałe doziemienie może nie zostać wykryte przez CZU albo powstałe doziemienie może prowadzić do zbędnych wyłączeń CZU [1, 2]. Na podstawie schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 3b, wartość prądu pomiarowego płynącego w obwodzie pomiarowym wynosi:

$$I_p = \frac{E_p \pm E_{(+/-)}}{R_p + R_b + R_{d(+/-)}} \quad (3)$$

gdzie:

E_+ lub E_- – napięcie na wyjściu grupy katodowej lub anodowej prostownika.

Z zależności tej wynika, że pojawienie się doziemienia w jednej z szyn prowadzić będzie do wielokrotnego wzrostu prądu pomiarowego i_p , a tym samym CZU zadziała przy znacznie większej wartości rezystancji doziemnej (zbędne wyłączenia). Doziemienie szyny dodatniej (rys. 3b) spowoduje zmianę

kierunku przepływu prądu pomiarowego i_p i jeśli producent CZU nie przewidział takiej sytuacji to zabezpieczenie nie zadziała. Jeżeli dodatkowo dojdzie do doziemienia w obwodzie prądu przemiennego (prąd i_p mniejszy od progu zadziałania CZU) to zadziałanie zabezpieczenia nastąpi przy mniejszej wypadkowej rezystancji doziemnej [1, 2].

Groźniejsze w skutkach może być pojawienie się podwójnego doziemienia w obwodzie stałoprądowym. W sytuacji, w której prąd pomiarowy obniży się do wartości bliskich zero (dla U_o bliskiego E_p), zabezpieczenie nie zadziała, pomimo obniżenia się rezystancji doziemnej poniżej rezystancji nastawczej [1, 2].

W celu rozwiązania problemów, związanych z wielokrotnym doziemieniem, należy zastosować w obwodzie pomiarowym przemienną napięcia pomocnicze E_p . Jako napięcia pomocnicze mogą być wykorzystane napięcia o kształtach: trójkątnym i prostokątnym [1, 2]. Użycie przemiennych napięć pomocniczych wymusza powstanie cyklicznych stanów przejściowych. W związku z tym wymagane jest zastosowanie małej częstotliwości źródła. Częstotliwość napięcia pomocniczego powinna być na tyle mała, aby zaniknął stan przejściowy (związany ze stałą czasową obwodu $R_p \parallel R_d, C_f$) w czasie połowy okresu tego napięcia. Należy przyjąć, że stan przejściowy zanika po 5 do 6 stałych czasowych obwodu. Z powyższego wynika, że okres napięcia pomiarowego powinien wynosić 10 do 12 stałych czasowych obwodu. Pojemności doziemne sieci mogą być różne, w związku z tym zachodzi potrzeba adaptacji okresu napięcia pomiarowego (w celu uzyskania minimalizacji czasu zadziałania). Zabezpieczenie, wykorzystujące przemienną napięcie pomiarowe, powinno więc być zabezpieczeniem wieloparametrowym. Dodatkowo częstotliwość sygnału pomiarowego powinna być dwa razy mniejsza od minimalnej częstotliwości wyjściowej falownika. Dla przebiegu o kształcie prostokątnym obowiązuje:

$$R_d = \frac{E_{p+} - E_{p-}}{I_{p+} - I_{p-}} - (R_p + R_b) \quad (4)$$

gdzie:

E_{p+} , E_{p-} – dodatnia, ujemna wartość napięcia pomiarowego,

I_{p+} , I_{p-} – wartość prądu pomiarowego na końcu dodatniej, ujemnej wartości napięcia pomiarowego.

Częstotliwość źródła napięcia pomocniczego E_p z reguły nie przekracza 0,5 Hz. Charakterystyczną cechą (wadą) takiego rozwiązania staje się więc

względnie duże opóźnienie zadziałania zabezpieczenia, wynoszące nawet kilka sekund.

Doziemienie może również pojawić się na wyjściu falownika. Podobnie, jak to miało miejsce w przypadku doziemienia w obwodzie sieci prądu przemiennego, przy analizie skutków pojawienia się takiego doziemienia uwzględnia się zastępczą rezystancję doziemną na wyjściu falownika R_{fz} oraz zastępczą pojemność doziemną na wyjściu falownika C_{fz} . Schemat z rysunku 2, po uwzględnieniu pojawienia się składowej trzeciej harmonicznej w prądzie pomiarowym i_p oraz zastępczego napięcia na wyjściu falownika uproszczono do postaci schematu z rysunku 3c.

Objawy wystąpienia doziemienia na wyjściu falownika są różne i zasadniczo zależą od rodzaju doziemienia (symetryczne lub niesymetryczne) oraz relacji zachodzącej pomiędzy zastępczą pojemnością doziemną na wyjściu falownika a zastępczą pojemnością doziemną w sieci napięcia przemiennego. Zależność na napięcie V_o ma analogiczną postać jak w przypadku wystąpienia doziemienia w sieci napięcia przemiennego:

$$V_o \approx \frac{E_{fal}}{\sqrt{1 + \frac{R_{fz}^2}{X_{fz}^2}}} \quad (5)$$

gdzie:

E_{fal} – wartość skuteczna napięcia fazowego na wyjściu falownika.

Należy jednak zauważyć, że napięcie V_o jest w tym przypadku zależne nie tylko od zastępczej rezystancji doziemnej R_{fz} oraz pojemności doziemnej C_{fz} , ale również od amplitudy i częstotliwości napięcia wyjściowego falownika E_{fal} (w przypadku doziemienia w sieci prądu przemiennego $f = 50$ Hz, a $E_f = U_n$).

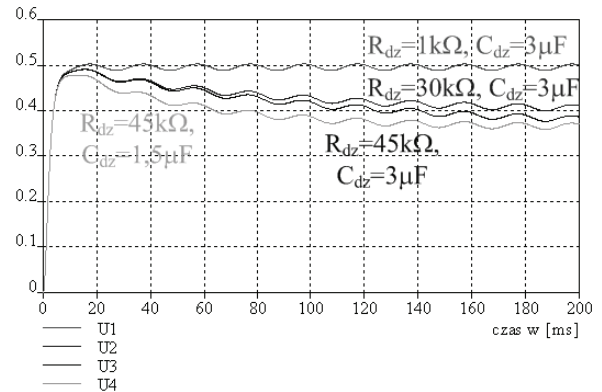
3. BADANIA SYMULACYJNE

Analizę zagrożeń, powstałych w wyniku możliwości pojawienia się doziemień w różnych miejscach elementów zasilania odbiorników w podziemiach kopalń, przeprowadzono w oparciu o model układu przedstawionego na rysunku 1.

W pierwszej kolejności wykonano symulację podania napięcia do sieci o dużej pojemności doziemnej wraz z CZU (rys. 4).

Zgodnie z normą, dla sieci 1 kV, przy rezystancji doziemnej $R_{dz} = 1$ k Ω oraz pojemności doziemnej $C_{dz} = 3$ μ F czas zadziałania centralnego zabezpieczenia upływowego (CZU) powinien być krótszy od 70 ms.

Z załączonych badań symulacyjnych obrazujących stan załączenia zabezpieczenia do sieci o parametrach zastępczych R_{dz} i C_{dz} (rys. 4) wynika, że po 70 ms doszłoby do zadziałania CZU (wyłączenia), nawet gdyby rezystancja doziemna wynosiła $R_{dz} = 45$ k Ω .

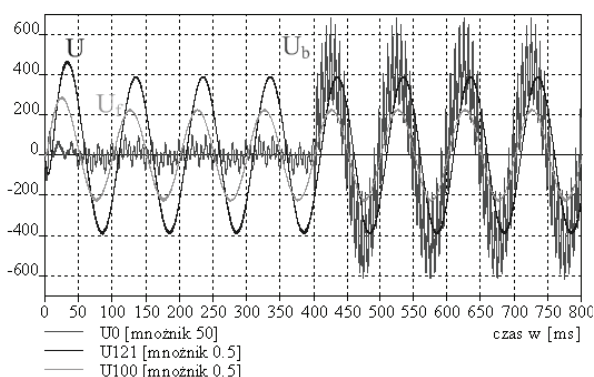


Rys. 4. Przebiegi napięć czujnika prądu u_b dla: $R_{dz}=1$ k Ω i $C_{dz}=3$ μ F, $R_{dz}=30$ k Ω i $C_{dz}=3$ μ F, $R_{dz}=45$ k Ω i $C_{dz}=3$ μ F, $R_{dz}=45$ k Ω i $C_{dz}=1,5$ μ F

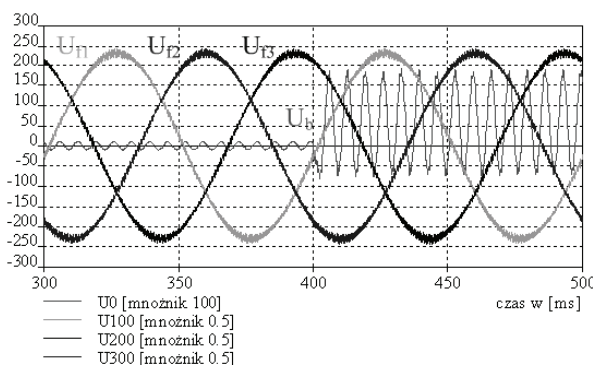
W kolejnym etapie przeprowadzono badania związane z możliwością pojawienia się podwójnych doziemień. Pojawienie się nawet dużej rezystancji doziemnej (znacznie większej od rezystancji nastawczej) po stronie napięcia stałego powoduje niepotrzebne zadziałanie CZU (w przypadku, gdy układ reaguje na oba kierunki przepływu prądu pomiarowego). Podwyższenie napięcia pomocniczego zwiększa wartość prądu pomiarowego dla doziemienia w sieci napięcia przemiennego, ale jednocześnie, w przypadku zmienności napięcia stałego (charakterystycznej dla sterowanych układów przekształtnikowych), poszerza się strefa, w której zabezpieczenie nie zadziała. Wystąpienie podwójnego doziemienia po stronie napięcia stałego może skutkować brakiem zadziałania zabezpieczenia CZU nawet, gdyby układ reagował na oba kierunki przepływu prądu pomiarowego i_p .

Na funkcjonowanie zabezpieczenia CZU mają także wpływ doziemienia pojawiające się na wyjściu falownika. Objawy wystąpienia takich doziemień uzależnione są od charakteru doziemienia (doziemienie symetryczne lub niesymetryczne) oraz relacji występującej pomiędzy zastępczą pojemnością doziemną w obwodzie prądu przemiennego C_{dz} a zastępczą pojemnością doziemną na wyjściu falownika C_{fz} . Przypadek doziemienia jednej z faz na wyjściu falownika (doziemienie niesymetryczne) oraz dla $C_{dz} > C_{fz}$ (czyli tak jak to ma zazwyczaj miejsce) obrazuje rysunek 5. Konsekwencją zaistnienia takiego doziemienia jest wzrost udziału trzeciej harmonicznej

(150 Hz) oraz pojawienie się składowej o częstotliwości wyjściowej falownika (10 Hz) w przebiegu napięcia na boczniku pomiarowym. W przypadku odwrócenia relacji pomiędzy C_{dz} i C_{fz} , tzn. $C_{dz} < C_{fz}$ w przebiegu napięcia na boczniku pomiarowym, a tym samym prądzie pomiarowym i_p , uwidacznia się wzrost udziału trzeciej harmonicznej w stanie normalnej pracy zabezpieczenia CZU.



Rys. 5. Przebiegi napięć: międzyprzewodowego u , fazowego u_f oraz czujnika prądu u_b przy pojawieniu się niesymetrycznego doziemienia na wyjściu falownika dla $R_{f1}=1 \text{ k}\Omega$ i $C_{dz1} > C_{fz1}$



Rys. 6. Przebiegi napięć: fazowych u_{f1} , u_{f2} , u_{f3} oraz czujnika prądu u_b przy pojawieniu się symetrycznego doziemienia na wyjściu falownika dla $R_{f1}=3 \text{ k}\Omega$, $C_{dz1} > C_{fz1}$

Zwiększenie pojemności doziemnej C_{dz} w obwodzie napięcia przemiennego (w porównaniu do przypadku z rysunku 5) przyczynia się do ograniczenia udziału trzeciej harmonicznej w prądzie pomiarowym i_p (w stanie normalnej pracy zabezpieczenia CZU). Jednakże w sytuacji pojawienia się doziemienia w jednej z faz falownika wzrost pojemności C_{dz} nie ma większego wpływu na amplitudę prądu pomiarowego i_p o częstotliwości wyjściowej falownika (10 Hz). Wystąpienie symetrycznego doziemienia na wyjściu falownika (rys. 6) objawia się jedynie wzrostem trzeciej harmonicznej w prądzie pomiarowym i_p . W prądzie wyjściowym nie

zaobserwowano pojawienia się składowej związanej z częstotliwością wyjściową falownika.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W górnictwie powszechnie stosowane są centralne zabezpieczenia upływowe (CZU) w oparciu o stałe napięcie pomocnicze. Takie rozwiązania charakteryzują się nadmierną czułością przy pojedynczym doziemieniu w obwodzie prądu stałego oraz możliwością wystąpienia braku reakcji zabezpieczenia w przypadku zaistnienia podwójnych doziemień w obwodach stałoprądowych. Ponadto człon pomiarowy CZU powinien reagować na przepływ prądu w obu kierunkach. Najważniejszą zaletą takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania krótkiego czasu zadziałania zabezpieczenia. Jeżeli jednak wymaga się by układ poprawnie działał oraz wykrywał stany doziemień w obwodach stałoprądowych, to należy zastosować CZU oparte na prostokątnym przemiennym napięciu pomocniczym (CZU oparte na napięciu pomocniczym o kształcie trójkątnym ma gorsze właściwości dynamiczne – dłuższy czas zadziałania). Niezależnie od kształtu przemiennego napięcia pomocniczego, zabezpieczenia takie charakteryzują się znacznie dłuższym opóźnieniem zadziałania (kilka sekund). Jest to czas wielokrotnie dłuższy, w porównaniu do zabezpieczeń opartych na stałym napięciu pomiarowym. W przypadku użycia przemienników częstotliwości, dodatkowo pojawia się problem tłumienia zakłóceń (w sygnale pomiarowym) o częstotliwości wyjściowej falownika (1 do 60 Hz), co wymaga zastosowania filtrów cyfrowych.

Literatura

1. Marek A.: Wpływ przekształtnika na pracę centralnych zabezpieczeń upływowych w dołowych sieciach niskiego napięcia, ZN Górnictwo nr 286, str. 303 – 311, Gliwice 2008.
2. Marek A., Marek B.: Wpływ przekształtników na pracę centralnych zabezpieczeń upływowych w dołowych sieciach niskiego napięcia, XII KKEG, str. 49 – 56, Szczyrk 2008.
3. Murray J.: Application and Operation of Insulation Monitors in Unearthed (floating-IT) Rail Signal Power Systems. Power Distribution for Signalling Systems, 2007. The IET Seminar on Page(s):167 – 184, 2007.
4. Sznura R.: Ochrona ziemnozwarciowa w górniczych sieciach niskiego napięcia – zabezpieczenia upływowe typu RRgFx/M. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa nr 8, str. 8 -12 Katowice, 2003.
5. Praca naukowo-badawcza NB-257/RG1/76.: Badanie struktury i charakteru zakłóceń oraz optymalizacja systemów zabezpieczeń ziemnozwarciowych, Gliwice 1979. (niepublikowana).
6. Method and apparatus for insulation monitoring in unearthed DC and AC networks.: Opis patentowy EP 0 654 673 B1.