

Andrzej CHOLEWA
Politechnika Śląska, Gliwice

WPLYW ŁUKU ELEKTRYCZNEGO NA PRĄDY ZWARCIOWE W KOPALNIANYCH SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. W artykule krytycznie oceniono dotychczasowy sposób uwzględniania łuku elektrycznego w doborze nastaw zabezpieczeń zwarciovych nadmiarowoprądowych. Przedstawiono cechy łuku, mające wpływ na przebieg i wartości prądu zwarciovego. W sposób przybliżony oceniono ilościowy wpływ łuku na prąd zwarciovyy. Zwrócono uwagę na celowość dalszych badań zwarć łukowych w sieciach kopalnianych z punktu widzenia zabezpieczeń.

INFLUENCE OF THE ELECTRIC ARC ON THE SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN MINING POWER SYSTEMS

Summary. The existing approach to taking into account the electric arc in selection of overcurrent protection devices has been critically evaluated. Characteristic features of the electric arc, that have an effect on course and value of the short-circuit current, have been presented, as well as the quantitative influence of the electric arc on the short-circuit current. The purpose of examination of short-circuits with electric arc in mining power systems has been described.

1. Wprowadzenie

Kryterium nadmiarowoprądowe w przypadku zabezpieczeń zwarciovych polega na rozróżnianiu stanu roboczego i zakłócenia (zwarcia) na podstawie wartości prądu. Warunkiem poprawnego działania zabezpieczenia nadprądowego jest właściwe wyznaczenie jego nastawy. Nastawę zabezpieczenia wyznacza się dla najostrzejszych umownych warunków, w których zabezpieczenie powinno zadziałać.

Przełącznikowe zabezpieczenia zwarciove nadprądowe powszechnie stosowane są w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych. Jedną z wielkości, na podstawie których wyznacza się nastawę takiego zabezpieczenia, jest minimalny prąd zwarciovy. Aby wyznaczyć wartość minimalnego prądu zwarciowego, należy w schemacie zastępczym zwarciowym uwzględnić impedancje wszystkich elementów decydujących o wartości prądu, w tym opór przejścia w miejscu zwarcia, oraz przyjąć odpowiednią wartość napięcia źródłowego, wymuszającego przepływ prądu [15]. W przypadku zwarć międzyfazowych oporem przejścia jest często opór łuku elektrycznego. W praktycznych obliczeniach zwarciowych wpływ łuku elektrycznego na przebieg i wartości prądu uwzględnia się w sposób bardzo uproszczony.

W artykule przedstawiono dotychczasowe zasady uwzględniania łuku w obliczeniach zwarciowych, związanych z doбором zabezpieczeń. Ogólnie scharakteryzowano łuk elektryczny zwarciovy. Przytoczono zależności analityczne między prądem i napięciem łuku, pozwalające uwzględniać łuk w schemacie zastępczym zwarciowym. Na przykładach oceniono w sposób przybliżony wpływ łuku na prąd zwarciovy, głównie w sieciach niskonapięciowych.

2. Zasady obliczania minimalnego prądu zwarciowego i wyznaczania nastaw zabezpieczeń zwarciowych

Prawidłowe działanie zabezpieczenia zwarciowego nadprądowego zależy m.in. od właściwego wyznaczenia jego nastawy I_{nast} . W odniesieniu do prądu pierwotnego powinna być spełniona ogólna zależność:

$$I_{omaks} \leq I_{nast} \leq I_{zmin} \quad (1)$$

w której:

I_{omaks} – maksymalny prąd roboczy, przy którym zabezpieczenie nie powinno zadziałać,

I_{zmin} – minimalna wartość prądu zwarciowego, przy którym powinno wystąpić pewne zadziałanie zabezpieczenia.

Warunek (1) jest uściślany w zależności od zabezpieczanego urządzenia i konkretnego rozwiązania zabezpieczenia nadprądowego (zabezpieczenie pierwotne lub wtórne, bezzwłoczne lub zwłoczne).

Minimalna wartość prądu zwarciowego podczas zwarć rzeczywistych zależy od wielu czynników. Niektóre z tych czynników są trudne do dokładnego ujęcia podczas

obliczeniowego wyznaczania prądu. Dlatego w odniesieniu do wzoru (1) zwykle przyjmuje się:

$$I_{z \min} = \frac{I_{k \min}^*}{k_{cz}} \quad (2)$$

gdzie:

$I_{k \min}^*$ – prąd zwarciovy początkowy wyznaczany przy określonych założeniach [14],

k_{cz} – współczynnik nazywany współczynnikiem czułości, uwzględniający głównie możliwość wystąpienia, podczas zwarcia, prądu mniejszego od $I_{k \min}^*$.

Przyjęcie odpowiednich założeń podczas wyznaczania prądu $I_{k \min}^*$ ma na celu uproszczenie praktycznych obliczeń. Założenia te odnoszą się do charakteru zwarcia (przyjmuje się, że zwarcie jest bezłukowe metaliczne [14]) oraz do tworzenia schematu zastępczego zwarciovego. W schemacie pomija się te urządzenia (elementy) toru prądowego, których wpływ na prąd jest ogólnie niewielki, a których oporność zwarciova lub dane znamionowe niezbędne do jej wyznaczenia nie są zwykle podawane przez producentów [1, 15]. Współczynnik czułości jest miarą zdolności zabezpieczenia do reagowania na objawy zwarcia mimo niekorzystnych okoliczności (prowadzących do zmniejszenia wartości prądu zwarciovego). Wartość minimalna współczynnika czułości $k_{cz \min}$ jest zwykle wymaganiem przepisowym.

Wpływ czynników o wartości prądu prądu zwarciovego uwzględnia się już niekiedy na etapie wyznaczania początkowego prądu zwarciovego $I_{k \min}^*$. Na przykład w normie PN-G 42042:1998 [15], odnośnie do wzoru na minimalny prąd zwarciovy:

$$I_{\min} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot \sqrt{(R_z + R)^2 + (X_z + X)^2}} \quad (3)$$

wyjaśniono, że współczynnik c uwzględnia możliwość zmniejszenia wartości prądu zwarciovego na skutek zmian napięcia zasilania i wpływu impedancji nie uwzględnianych w zwarciowym schemacie zastępczym (np. łączników, przekładników prądowych oraz łuku elektrycznego w miejscu zwarcia). Podobnie w [3] przytoczono wzór, analogiczny do (3), w którym wstępuje współczynnik zwarcia łukowego k_A , uwzględniający zmniejszenie natomiast wartości prądu zwarciovego na skutek łuku w miejscu zwarcia.

W normie PN EN 60909-0:2002 (U) podano, że o wprowadzeniu współczynnika napięciowego c , do zależności na prąd zwarciovy zdecydowały następujące powody: zmienność napięcia w czasie i w różnych punktach sieci, zmiany zaczeów transformatorów,

pominięcie w obliczeniach pojemności elementów sieci oraz pominięcie odbiorników, zjawiska przejściowe w generatorach i silnikach. O innych czynnikach prowadzących do zmniejszenia wartości prądu zwarciovego w normie [14] nie wspomniano, a więc podczas doborze zabezpieczeń powinno się te czynniki uwzględniać, przyjmując odpowiednią wartość współczynnika k_{cz} .

Z powyższego wynika, że zalecane (wymagane) wartości współczynników c i k_{cz} powinny być uzasadnione i skoordynowane z sobą. Brak jest zwykle jednak szczegółowego uzasadnienia przyjmowanych w przepisach wartości współczynników.

Jednym z czynników decydujących o wartości prądu zwarciovego jest impedancja łuku elektrycznego (zwarcia rzeczywiste są najczęściej zwarciami łukowymi). Często uważa się, że wpływ łuku elektrycznego na wartość minimalnego prądu zwarciovego jest niewielki (mała oporność łuku), a jednocześnie trudny do dokładnego ujęcia. Dlatego wpływ ten ujmuje się łącznie z wpływem oporności innych elementów obwodu zwarciovego (zestyki, przekładniki, wyzwalacze), przyjmując do obliczeń odpowiednią wartość współczynnika k_{czmin} lub współczynnika c (w przypadku takiego podejścia, jakie przyjęto w normie PN-G 42042 lub w [3]). Przyjęcie niewłaściwej dla danej sieci (bez wystarczającego poparcia wynikami analiz i badań) wartości wymienionych współczynników w obliczeniach prądu, niezbędnego do wyznaczania nastaw zabezpieczeń zwarciovych, może prowadzić do niezadziałania tych zabezpieczeń (przy zaniżonej wartości k_{cz}) lub niepotrzebnego ograniczenia zakresu stosowania zabezpieczeń nadprądowych (w przypadku zawyżenia współczynnika k_{cz}). Potwierdzają to badania parametrów łuku elektrycznego oraz badania zachowania się zabezpieczeń podczas zwarć łukowych [6, 7, 8].

3. Cechy łuku zwarciovego

Zwarcie łukowe w sieciach kopalnianych może wystąpić w różnym środowisku. Łuk elektryczny może palić się w otwartej przestrzeni, tj. w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym (łuk swobodny). Cechą zwarciovego łuku swobodnego jest zmiana średnicy kolumny łukowej odpowiednio do wartości prądu (stała gęstość prądu). Łuk swobodny może ponadto przemieszczać się w przestrzeni (wydłużać się) na skutek sił termicznych i elektrodynamicznych. Również długość łuku swobodnego w czasie zwarcia może powiększyć się kilkakrotnie [12, 13].

Łuk zwarciovy może palić się także w przestrzeni (kanale) otoczonej materiałami konstrukcyjnymi urządzeń, np. podczas zwarć w kablu lub mufie kablowej. Ograniczone rozmiary kanału nie dopuszczają wtedy do swobodnego powiększania się średnicy kolumny łukowej ze wzrostem natężenia prądu. W tym przypadku warunki środowiskowe palenia się łuku zwarciowego zbliżone są do tych, jakie występują w komorach gaszeniowych łączników, z celowo zastosowanymi w nich różnorodnymi środkami ułatwiającymi gaszenie tegołuku.

Inny charakterystyczny przypadek, to zwarcie wewnątrz komory urządzenia, szczególnie urządzenia ognioszczelnego. Zwarcie takiemu towarzyszy wzrost ciśnienia gazu wypełniającego komorę, narastający w czasie do stosunkowo dużej wartości (ciśnienie może przekraczać 4 MPa [8]).

Środowisko, w jakim pali się łuk elektryczny, wpływa istotnie na jego cechy, m.in. te, które decydują o przebiegu i wartości prądu w obwodzie zwarciowym.

Aby rozwiązać obwód z łukiem elektrycznym, niezbędna jest znajomość modelu matematycznego łuku. Podstawą do formułowania różnych, w zależności od przewidywanego praktycznego wykorzystania, modeli matematycznych łuku jest analiza zjawisk hydrodynamicznych i elektrycznych w przestrzeni łukowej i jej otoczeniu [2, 12].

Ogólnie łuk elektryczny stanowi w obwodzie zwarciowym obciążenie rezystancyjne nieliniowe. Z punktu widzenia praktycznych obliczeń prądów w obwodach z łukiem elektrycznym wystarczająca jest znajomość zależności między parametrami elektrycznymi łuku takimi, jak napięcie na łuku i prąd w nim płynący oraz związaną z tymi parametrami opornością (przewodnością) łuku. Zależności te ujmowane są w postaci statycznych bądź dynamicznych charakterystyk prądowo-napięciowych dla łuków o stałej długości. Charakterystyki prądowo-napięciowe łuku przedstawiane są wykreślnie lub analitycznie. W przypadku łuków długich podaje się często zależność wartości natężenia pola elektrycznego w łuku (gradientu napięcia) od wartości prądu.

Teoretyczna analiza zjawisk fizycznych w łuku prowadzi do ogólnej, możliwej do praktycznego wykorzystania, zależności między napięciem (U), prądem (I) oraz długością łuku (l):

$$U_l = C_1 + C_2 \cdot I^{-\alpha} \cdot l \quad (4)$$

Dla łuków długich ($l > 10$ cm) można pominąć pierwszy składnik wyrażenia (4), natomiast dla łuków krótkich (rzędu kilku milimetrów) można pominąć napięcie na kolumnie łukowej, czyli drugi składnik wyrażenia (4).

Zależność podawana jest niekiedy w innych postaciach:

- w odniesieniu do natężenia pola elektrycznego (gradientu napięcia) na łuku (E)

$$E = C_3 \cdot I^{-\alpha} \quad (5)$$

- w odniesieniu do rezystancji łuku (R_l)

$$R_l = C_4 \cdot I^{-\alpha} \quad (6)$$

w przypadku prądu przemiennego I we wzorach (4 do 6) jest wartością maksymalną lub wartością skuteczną prądu.

Wartości wykładnika α równe 0 i 0,5 w wyrażeniu (6) odpowiadają dwóm charakterystycznym przypadkom:

1. Przekrój kolumny łukowej zmienia się proporcjonalnie do prądu (łuk swobodny). Wtedy koncentracja elektronów w łuku nie zależy od wartości prądu. Natężenie pola również nie zależy od wartości prądu ($E = \text{const}$, $\alpha = 0$).
2. Przekrój kolumny łukowej jest stały. Prąd zmienia się proporcjonalnie do koncentracji elektronów w łuku ($\alpha = 0,5$).

Wartości współczynników C i α w zależnościach (4 do 6) wyznacza się na podstawie badań w sieciach rzeczywistych i na modelach fizycznych sieci w określonych warunkach zwarciovych. W większości są to badania łuku swobodnego. Znajomość warunków, dla których przeprowadzono identyfikację współczynników modelu łuku, jest istotna podczas wykorzystaniu tego modelu.

Można podać przykładowe zależności [11, 12, 13] wyznaczone na podstawie doświadczeń:

$$U_l = 28688 \cdot I^{-0,4} \cdot l_l \quad (7a)$$

$$U_l = 27810 \cdot I^{-0,4} \cdot l_l \quad (7b)$$

$$U_l = 1050 \cdot I^{-1} \cdot l_l \quad (7c)$$

$$U_l = 2500 \cdot l_l \quad (7d)$$

$$U_l = 370 \cdot I^{0,13} \cdot l_l \quad (7e)$$

W zależnościach (7) I jest wartością skuteczną prądu (w amperach), a l_l długością łuku w metrach.

Dla sieci niskonapięciowych w [4, 5] podano wyrażenia wiążące wartości chwilowe napięcia na łuku i prądu:

$$u_l = (20 + 534 \cdot l_l) \cdot i_l^{0,12} \quad (8)$$

$$u_l = (25 \cdot \sqrt{39,37 \cdot l_l}) \cdot i_l^{0,15} \quad (9)$$

gdzie l_l jest długością łuku w metrach.

Cechą charakterystyczną badań łuku są znaczne niekiedy różnice ilościowe wyników, mimo że badania przeprowadzane są w zbliżonych warunkach.

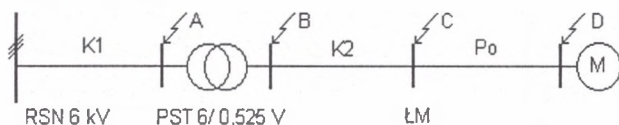
Ogólnie badania doświadczalne potwierdzają [12], że w przypadku łuku swobodnego gradient napięcia na łuku mało zależy od prądu przy większych jego wartościach. Dlatego w rozważaniach praktycznych przyjmuje się stałą jego wartość równą od 1200 do 1500 V/m [9, 13]. Jednak w przypadku występowania intensywnego chłodzenia łuku wartość gradientu napięcia może dochodzić nawet do 20 000 V/m [12]. Natężanie pola elektrycznego wzrasta także znacząco w przypadku wzrostu ciśnienia gazu, w którego otoczeniu łuk się pali [12]. Podczas wzrostu ciśnienia do 1 MPa natężenie pola elektrycznego wzrasta około dwukrotnie, a przy wzroście ciśnienia do 100 MPa – około 10-krotnie (w porównaniu z natężeniem przy ciśnieniu 0,1 MPa).

W przypadku prądu przemiennego o częstotliwości sieciowej zmiany wartości prądu zachodzą na tyle szybko, że uwidocznia się bezwładność cieplnych i jonizacyjnych procesów w kolumnie łukowej (dynamiczna charakterystyka prądowo-napięciowa łuku). Ponieważ dla prądu przemiennego łuk gaśnie w sposób naturalny, przy każdym przejściu przez zero prądu, ważne jest – z punktu widzenia przebiegu prądu zwarciovego – napięcie na przerwie łukowej, przy którym następuje ponowny zapłon łuku (napięcie zapłonu). W przypadku łuku swobodnego bezwładność cieplna powoduje, że wzrost napięcia w otoczeniu przejścia prądu przez zero (napięcie gaśnięcia a następnie przebicia przestrzeni połukowej) jest stosunkowo niewielki w porównaniu z napięciem palenia się łuku. Natomiast w przypadku łuku, w którym otoczenie sprzyja dejonizacji, napięcia zapłonu i gaśnięcia łuku są znacznie większe. Można wtedy obserwować nawet stosunkowo długie przerwy bezprądowe po przejściu prądu przez zero [4]. Wpływ napięcia zapłonu łuku na przebieg prądu zwarciovego ujawnia się szczególnie wyraźnie w sieciach niskonapięciowych, ponieważ w sieciach tych wartość napięcia zapłonu w odniesieniu do napięcia sieci może być stosunkowo duża. W sieciach zaśredniego napięcia przebieg prądu podczas zwarcia łukowego jest praktycznie sinusoidalny, ponieważ napięcie na łuku jest małe w porównaniu z napięciem wymuszającym przepływ prądu zwarciovego.

4. Przybliżone wyznaczenie wpływu łuku na wartość prądów zwarciovech

Ilościowy wpływ łuku na prądy zwarciovey zilustrowano na przykładzie uproszczonego układu zasilania odbiorników z kopalnianej sieci niskonapięciowej.

Schemat i dane znamionowe przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat zasilania odbiorników z sieci kopalnianej
Fig. 1. Simplified diagram of the typical mine power system

W przykładzie obliczeniowym odbiorniki (M) o napięciu znamionowym 500 V zasilane są z rozdzielnic średniego napięcia (RSN 6 kV) linią kablową K1 poprzez przewoźną stację transformatorową (PST) i łącznik manewrowy ŁM. Zaznaczone na rys.1 linie elektroenergetyczne K2 i Po są liniami niskonapięciowymi (odpowiednio kabel i przewód oponowy).

Przyjęto następujące dane:

Rozdzielnic RSN 6 kV (źródło zastępcze):

$$S_k^* = 67 \text{ MVA}, \quad R_Q/X_Q = 0,607$$

Przewoźna stacja transformatorowa PST:

$$IT3Sb \ 315/6, \ S_{nT} = 315 \text{ kVA}, \ U_{nG} = 6000 \text{ V}, \ U_{nD} = 525 \text{ V}, \ e_Z = 3,7 \%, \ \Delta P_R = 2900 \text{ W}.$$

Linia elektroenergetyczne:

$$K1: (6 \text{ kV}) \text{ HKGXSekFpoy}n \ 3 \times 70 \text{ mm}^2, \ l = 1000 \text{ m}.$$

$$K2: \text{YKGYFtlyn} \ 3 \times 120 \text{ mm}^2 + 30 \text{ mm}^2, \ l = 500 \text{ m}.$$

$$Po: \text{OnGekz} \ 3 \times 70 \text{ mm}^2 + 25 \text{ mm}^2, \ l = 300 \text{ m}.$$

Wyliczone na podstawie przyjętych danych wartości prądu zwarcia dwufazowego metalicznego wg wzoru (3) dla $c = 0,95$ w punktach obliczeniowych B, C i D są równe:

$$I_{kB}^* = 6280 \text{ A}, \quad I_{kC}^* = 2010 \text{ A} \quad I_{kD}^* = 1180 \text{ A}$$

Odpowiednie wartości maksymalne prądu zwarciovowego początkowego (również ustalonego, ponieważ $I_k \approx I_k^*$) w poszczególnych punktach są równe:

$$I_{mkB}^* = 8881 \text{ A}, \quad I_{mkC}^* = 2842 \text{ A} \quad I_{mkD}^* = 1669 \text{ A}$$

Aby oszacować wpływ łuku elektrycznego na przebieg i wartości prądu zwarciovowego, należy rozwiązać równanie, które jest uproszczonym modelem zwarcia:

$$L_k \cdot i'(t) + R_k \cdot i(t) + u_l(i) = u(t) \quad (10)$$

W zależności (10):

R_k, L_k – odpowiednio rezystancja zwarciowa i indukcyjność w schemacie zastępczym zwarciowy,

u_l – napięcie na łuku (zależne od wartości prądu, np. jak w zależności 9),

u – napięcie zastępcze wymuszające przepływ prądu w obwodzie zwarciowym.

Dla porównania obliczono wartości prądów w poszczególnych punktach (B, C i D) podczas zwarć łukowych. Przyjęto odpowiadającą zależności (9) charakterystykę prądowo-napięciową łuku o długości 10 cm. Otrzymano następujące wartości maksymalne prądów:

$$I_{mkIB} = 7280 \text{ A}, \quad I_{mkC} = 2157 \text{ A} \quad I_{mkD} = 1260 \text{ A}$$

Zakładając, że prąd łuku jest praktycznie sinusoidalny, można wyznaczyć wartości skuteczne prądów w poszczególnych punktach:

$$I_{kIB} = 5147 \text{ A}, \quad I_{kIC} = 1525 \text{ A} \quad I_{kID} = 890 \text{ A}$$

Stosunek prądu zwarciowego podczas zwarcia metalicznego do prądu podczas zwarcia łukowego w poszczególnych punktach jest równy:

$$k_{IB} = \frac{I_{mkIB}}{I_{kIB}} = \frac{8881}{7280} = 1,23 \quad k_{IC} = 1,31 \quad k_{ID} = 1,32$$

Na rys. 2, jako przykład, przedstawiono obliczone przebiegi wielkości związanych ze zwarcie łukowym w punkcie D. Dla tego przypadku rezystancja łuku wynosi ok. 0,15 Ω . Rezystancję łuku można wyznaczyć z zależności [9]:

$$R_l = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_l}{\pi \cdot I} \quad (11a)$$

$$R_l = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot E_l \cdot l_l}{\pi \cdot I} \quad (11b)$$

w których:

U_l – spadek napięcia na łuku, V,

I_l – prąd łuku (wartość skuteczna), A,

E_l – gradient napięcia na łuku, V/m,

l_l – długość łuku, m.

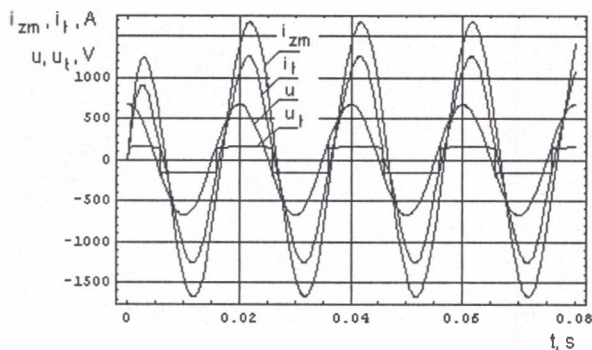
Analogiczne obliczenia wykonano dla sieci 1000 V. W tym przypadku w układzie jak na rys. 1 jest stacja transformatorowa typu IT3Sb 630/6/1 o danych znamionowych:

IT3Sb 630/6/1, $S_{nT} = 630 \text{ kVA}$, $U_{nG} = 6000 \text{ V}$, $U_{nD} = 1050 \text{ V}$, $e_z = 4,3 \%$, $\Delta P_R = 5200 \text{ W}$.

Inne urządzenia w układzie mają takie same parametry, jak w przypadku sieci 500 V.

Wpływ łuku na wartość prądu zwarciowego jest w tym przypadku mniejszy. Wartości współczynników, będących stosunkiem prądu maksymalnego przy zwarcie metalicznym do prądu maksymalnego, przy zwarcie łukowym mają odpowiednio wartości:

$$k_{IB} = \frac{I_{mkB}^n}{I_{mkIB}} = 1,08 \quad k_{IC} = 1,11 \quad k_{ID} = 1,13$$



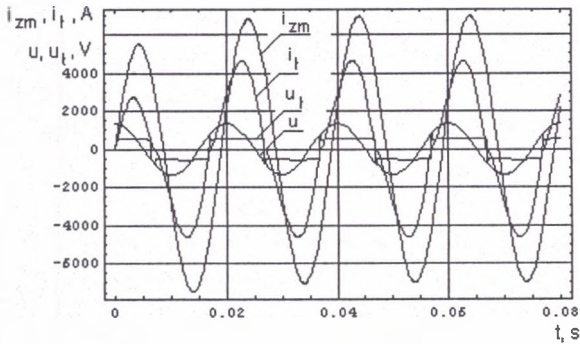
Rys. 2. Obliczone przebiegi wielkości związanych ze zwarcim dwufazowym łukowym w punkcie D (sieć 500 V): i_t – prąd zwarciovowy podczas zwarcia łukowego, u_t – napięcie na łuku, u – napięcie wymuszające przebieg prądu zwarciovowego, i_{zm} – prąd podczas zwarcia metalicznego w punkcie D.

Fig. 2. Characteristical quantities of two-phase fault with electric arc in the point „D” (system voltage 500 V): i_t – arc current, u_t – arc voltage, u – supply voltage, i_{zm} – fault current during metallic fault in the point „D”

Jeszcze mniejsza różnica występuje między prądem zwarciovowym podczas zwarcia metalicznego i zwarcia łukowego w sieci 6 kV (np. w punkcie A na rys. 1; $I_{mkA}^n \approx I_{klA}$).

Przyjęte do obliczeń warunki palenia się łuku są łagodne z punktu widzenia niezawodności pracy zabezpieczenia (łuk o długości 10 cm palący się w powietrzu). Podczas zwarc rzeczywistych w kablach lub w komorach urządzeń spadek napięcia na łuku może znacznie przekraczać wartość wynikającą z przyjętej do obliczeń charakterystyki prądowo-napięciowej łuku (zależność 9). Jednoznacznie wskazują na to wyniki badań [7, 8] i przypadki nieprawidłowego działania zabezpieczeń podczas zwarc łukowych [6, 7, 8]. Podczas zwarc łukowych zarejestrowano 1,5- [7], a nawet dwukrotnie [8] mniejsze wartości prądu niż podczas zwarc metalicznych w tym samym miejscu układu.

Aby w omawianym przykładzie dotyczącym sieci 1000 V prąd zwarciovowy podczas zwarcia łukowego był 1,5-krotnie mniejszy niż podczas zwarcia metalicznego, spadek napięcia na łuku musi wynosić ok. 500 V (rezystancja łuku $R_l \approx 0,14 \Omega$). Przebiegi dla takiego przypadku pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi wielkości związanych ze zwarcie dwufazowym łukowym w punkcie B (sieć 1000 V, $I_{mzm}/I_m = 1,5$): i_t – prąd zwarciovy podczas zwarcia łukowego, u_t – napięcie na łuku, u – napięcie wymuszające przebieg prądu zwarciovego, i_{zm} – prąd podczas zwarcia metalicznego w punkcie B.

Fig. 3. Characteristical quantities of two-phase fault with electric arc in the point "B" (system voltage 1000 V, $I_{mzm}/I_m = 1,5$): i_t – arc current, u_t – arc voltage, u – supply voltage, i_{zm} – fault current during metallic fault in the point „B”

5. Uwagi końcowe

W procedurze wyznaczania nastaw zabezpieczeń celowym jest obliczanie prądu zwarciovego przy założeniu, że zwarcie jest zwarcie bezłukowym, bezoporowym (jak przewiduje to norma PN EN 60909:2002). Wpływ łuku elektrycznego na zmniejszenie się wartości prądu zwarciovego należy uwzględnić, przyjmując odpowiednią wartość współczynnika czułości k_{cz} .

Elektryczny łuk zwarciovy w niektórych, szczególnie niekorzystnych przypadkach, takich, jak np. zwarcie w kablu lub komorze urządzenia, może powodować zmniejszenie wartości prądu zwarciovego w większym stopniu niż wynikałoby to z przyjmowanych obecnie [15] wartości współczynników napięciowego c i współczynnika czułości k_{czmin} (należy przy tym pamiętać, że rolą tych współczynników jest uwzględnienie jeszcze innych niekorzystnych okoliczności, prowadzących do zmniejszenia wartości prądu zwarciovego). Wartość współczynnika k_{czmin} odpowiadająca niekorzystnym przypadkom zwarć łukowych powinna być większa od wartości dotychczas wymaganych [15].

Przyjęcie większej od dotychczasowych wartości współczynnika czułości (np. $k_{czmin} = 2$), aby mogły być wyłączone zwarcia łukowe, ograniczy zakres stosowania zabezpieczeń nadprądowych w sieciach kopalnianych. Dlatego istnieje potrzeba opracowania zabezpieczeń

zwarciovych sieci kopalnianych potrafiących wykryć zwarcie łukowe na podstawie innego kryterium niż tylko wartość prądu. Do tego z kolei potrzebne są dalsze badania w warunkach rzeczywistych zwarć łukowych, w tym rejestracja zwarć, w sieciach kopalnianych.

LITERATURA

1. Bartodziej G., Polaczek A.: Niektóre problemy obliczeń zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia. Biuletyn Elektroprojektu 1973, nr 4.
2. Ciok Z.: Modele matematyczne łuku łączeniowego. Warszawa, PWN, 1987.
3. Fasek G., Helfrich W., Vilcheck W., Deutsch D.: Instantaneous Circuit Breaker Settings for Short Circuit Protection of Three Phase 480, 600 and 1040 V Trailing Cables. Conf. Rec. 1997 12th Annu. Mtg. IEEE Ind. Appl. Soc.
4. Gammon T., Matthews J.: Instantaneous Arcing-Fault Models Developed for Building Systems Analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.37, no.1, 2001.
5. Gammon T., Matthews J.: Conventional and Recommended Arc Power and Energy Calculation and Arc Damage Assessment. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.39, no.3, 2003.
6. Praca zbiorowa: Ekspertyza przyczyn i analiza awarii stacji transformatorowej typu IT3Sc 400/6/1. Praca naukowo-badawcza wykonana w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej. Gliwice 2003, (niepublikowana).
7. Praca zbiorowa: Badania parametrów i skuteczności działania ochrony nadmiarowoprądowej dla sieci kopalnianej oraz określenie zasad doboru, nastawień i instalowania. Etap II. Praca naukowo-badawcza wykonana w Instytucie Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1988, (niepublikowana).
8. Tabaczyński Z.: Wpływ obciążenia zwarciovego na zjawiska ciśnieniowe w komorach osłon ognioszczelnych. Materiały sympozjum nt. „Kierunki zwiększania bezpieczeństwa elektrycznego urządzeń przeciwwybuchowych”. Gliwice, 1976.
9. Terzija V.V., Koglin H.-J.: A new approach to arc resistance calculation. Electrical Engineering 83, 2001.
10. Wysocki Z., Mrozek T.: Cyfrowe zabezpieczenie dla zwarć międzyfazowych wysokomowych. Materiały IX Krajowej Konferencji Elektryki Górniczej nt. „Projektowanie i eksploatacji sieci i urządzeń elektrycznych w zakładach górniczych”. Szczyrk 2002.
11. Żydanowicz J.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa. Tom 1: Podstawy zabezpieczeń elektroenergetycznych. Warszawa, WNT, 1979.
12. Буткевич Г. В.: Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. Москва, Издат. Энергия, 1973.
13. Жуков В. В., Дала А.: Расчет сопротивления открытой электрической дуги. Электричество 1990, no. 1.
14. PN-EN 60909-0:2002 (U) Prądy zwarciovie w sieciach trójfazowych prądu przemiennego-Część 0: Obliczanie prądów.
15. PN-G 42042:1998 Środki zabezpieczające i ochronne w elektroenergetyce kopalnianej. Zabezpieczenia zwarciovie i przeciążeniowe. Wymagania i zasady doboru.