ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: GÓRNICTWO z. 82 Nr kol. 550

Roman PILORZ
Bolesław STOKOWY

NIEKTÓRE PROBLEMY ZABEZPIECZEŃ UPŁYWOWYCH W KOPALNIANYCH SIECIACH NISKIEGO NAPIĘCIA ZASILANYCH Z PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. Przedstawiono rozważania teoretyczne określające wartości prądu zwarcia doziemnego przy zasilaniu z przemienników częstotliwości. Wykazano, że w przypadku takiego zasilania nie spełniają swoich zadań stosowane obecnie zabezpieczenia upływowe.

1. Wstęp

Kompleksowa elektryfikacja i automatyzacja górnictwa jest jednym z podstawowych warunków gwarantujących wykonanie coraz to większych zadań stawianych przed polskim górnictwem. W chwili obecnej około 98% maszyn i urządzeń stosowanych w podziemiach kopalń zasilanych jest energią elektryczną. Wymagany wzrost wydobycia stwarza konieczność poszukiwania i stosowania coraz nowszych, bardziej ekonomicznych rozwiązań napędów i sieci zasilających.

Specyfika warunków eksploatacji w połączeniu z oddziaływaniem środowiska zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń związanych z zastosowaniem energii elektrycznej. Szczególnie niebezpieczne są zagrożenia:

- porażenie prądem elektrycznym;
- zainicjowanie wybuchu gazu kopalnianego;
- niekontrolowane zadziałania zapalników elektrycznych;
- powstanie pożarów.

W warunkach kopalnianych istnieje duże prawdopodobieństwo dotknięcia przez człowieka przewodów, korpusów maszyn i urządzeń będących pod napięciem, co przy dużej wilgotności, zapyleniu i innych niekorzystnych czynnikach jest bardzo niebezpieczne.

2. Ogólna charakterystyka stosowanych rozwiązań zabezpieczeń upływowych

W górnictwie przyjęto system sieciowy z izolowanym punktem zerowym źródła zasilającego sieć. W sieci tej musi być spełniony warunek ograniczenia czasu przepływu przez miejsce uszkodzenia izolacji prądu uszkodzenia.

Realizuje się to przez zastosowanie zabezpieczeń upływowych, które ograniczają czas przepływu prądu uszkodzenia, np. przez wyłączenie napięcia zasilania uszkodzonej sieci.

W polskim górnictwie stosuje się system zabezpieczeń upływowych [2] składający się:

- z centralnego zabezpieczenia upływowego;
- z odcinkowego zabezpieczenia upływowego blokującego.

Centralne zabezpieczenie upływowe swoje zadania spełnia przez:

- samoczynny i ciągły pomiar rezystancji izolacji doziemnej sieci i urządzeń będących pod napięciem;
- wyłączenie napięcia zasilania, jeżeli rezystancja izolacji jest mniejsza od wartości krytycznej;
- ograniczenie wartości prądu ziemnozwarciowego do czasu wyłączenia zasilania przez kompensację składowej pojemnościowej.

Blokujące zabezpieczenia upływowe samoczynnie i ciągle kontrolują oporność rezystancji izolacji doziemnej odcinka sieci po wyłączeniu napięcia roboczego.

Uniemożliwiają włączenie napięcia, jeżeli rezystancja ta jest mniejsza od rezystancji krytycznej.

W zależności od przyjętego sposobu kontroli oporności izolacji wyróżnić można zabezpieczenia upływowe:

- zerowo-prądowe;
- zerowo-napięciowe;
- niedomiarowo-rezystancyjne.

Oprócz tych zabezpieczeń jednoparametrowych stosuje się, szczególnie w Europie Zachodniej [1, 5, 6], zabezpieczenia odcinkowe porównawczo-fazowe, reagujące na wartość składowej zerowej napięcia prądu i kąta przesunięcia między nimi.

Zabezpieczeń zerowo-prądowych i zerowo-napięciowych, jako reagujących wyłącznie na niesymetryczne obniżenia oporności izolacji, nie stosuje się jako zabezpieczenia podstawowe.

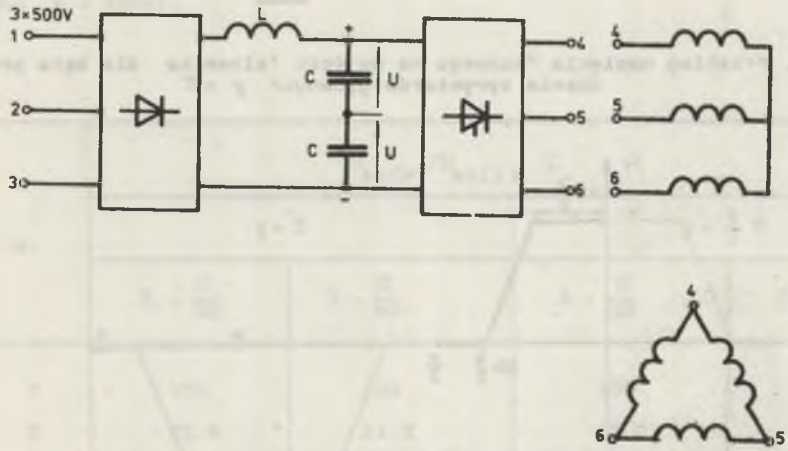
Zabezpieczenia niedomiarowo-rezystancyjne są stosowane powszechnie w dwóch wersjach:

- niezależnego źródła prądu stałego,
- wyprostowanych prądów upływnościowych.

Zabezpieczenia te reagują na symetrycznie i niesymetryczne uszkodzenie izolacji doziemnej niezależnie od miejsca jej uszkodzenia.

3. Określenie wartości prądu doziemienia przy zasilaniu z przemienników częstotliwości

W przemyśle górniczym rozważa się możliwości stosowania stacji falownikowych do zasilania napędów maszyn dołowych. Wiąże się to z możliwością płynnej i ekonomicznej regulacji prędkości obrotowej silników asynchronicznych. Wyrobiska podziemne o zagrożeniu metanowym wymagają stosowania silników w wykonaniu ognioszczelnym, którymi mogą być tylko silniki klatkowe. Jedynym sposobem regulacji ich prędkości obrotowej jest regulacja częstotliwością.

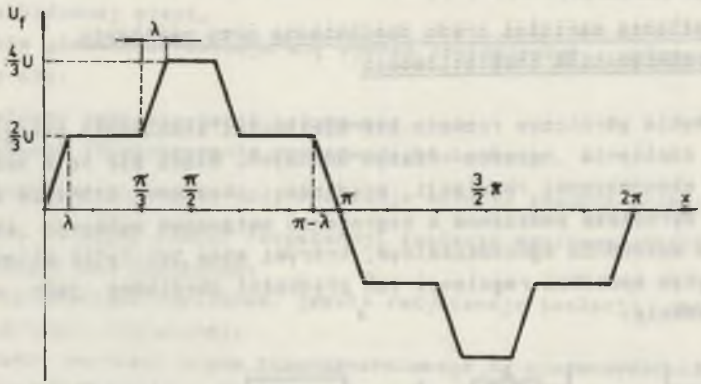


Rys. 1. Schemat ideowy stacji falownikowej

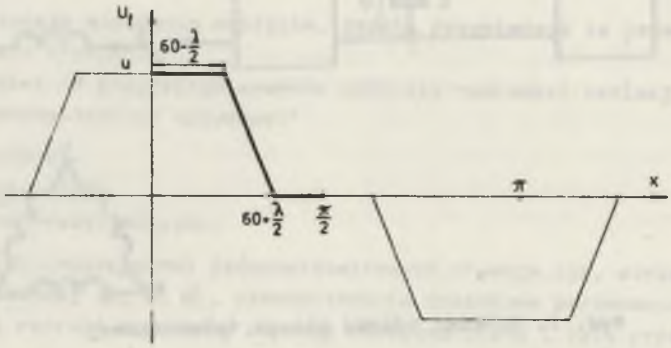
Zastosowanie stacji falownikowej (rys. 1) umożliwia regulację częstotliwości napięcia zasilającego w przedziale od 5-60 Hz. Ten rodzaj zasilania może być stosowany przy spełnieniu istniejących przepisów bezpiecznej eksploatacji elektrycznych urządzeń dołowych. Zastosowanie tego typu zasilania wymaga przeanalizowania jakościowo i ilościowo nowego problemu prądów upływu, wynikającego z niesinusoidalnego kształtu napięcia fazowego przekształtnika. Dla rozważań teoretycznych tego problemu przyjęto uproszczone przebiegi napięć fazowych na wyjściu stacji falownikowej (rys. 2, 3).

W rzeczywistych przebiegach napięcia wyjściowego stacji falownikowej istnieje pewien okres czasu λ związany z narastaniem i zanikiem zboczy krzywej napięcia. Zwłoka ta wynika z niemożliwości skokowego przejścia tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia.

Mimo istnienia tej krótkotrwałej zwłoki czasowej oraz oscylacji wynikających z charakteru linii przesyłowej i odbiornika, do celów obliczeniowych przebieg przejściowy przyjęto za liniowy. Celem wyznaczenia wartości



Rys. 2. Przebieg napięcia fazowego na wyjściu falownika dla kąta przewodzenia tyrystorów głównych $\gamma = \pi$



Rys. 3. Przebieg napięcia fazowego na wyjściu falownika dla kąta przewodzenia tyrystorów głównych $\gamma = \frac{2}{3}\pi$

skutecznych napięć fazowych poszczególnych harmonicznych rozłożono przedstawione przebiegi (rys. 2, 3) w szereg Fouriera. Wartości maksymalne istniejących harmonicznych napięcia fazowego określają zależności [7]:

$$U_{max(n)} = \frac{4A}{\pi n^2 \lambda}\left| \sin n\lambda + \sin n\alpha - \sin n\frac{\pi}{3} \right| \qquad (1)$$

dla $\gamma = \pi$

$$U_{max(n)} = \frac{8U}{\pi n^2 \lambda} \cos n\frac{\pi}{6} \cdot \sin n\frac{\lambda}{2} \qquad (2)$$

dla $\gamma = \frac{2}{3}\pi$

gdzie:

$$A = \frac{2}{3} U$$

$$n = 2k + 1 \qquad k = 0,1,2,...$$

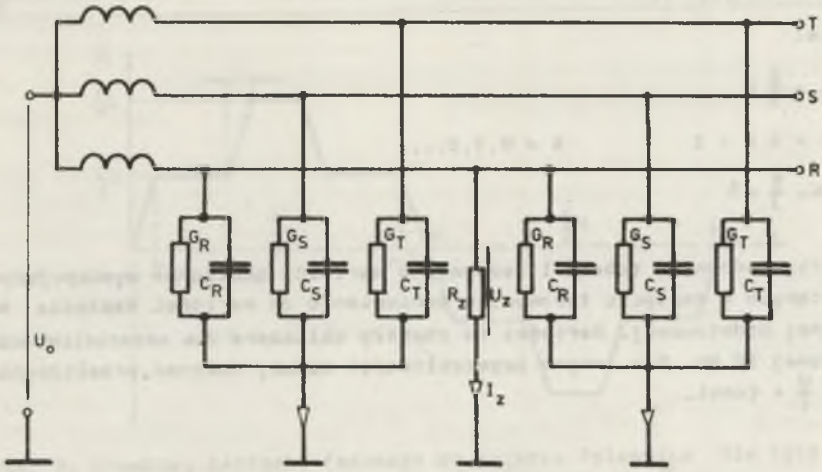
$$\alpha = \frac{\pi}{3} + \lambda$$

Przykładowo, w tabeli 1 zestawiono wartości skuteczne występujących harmonicznych w napięciu fazowym, w odniesieniu do wartości napięcia harmonicznej podstawowej. Wartości te zostały obliczone dla częstotliwości podstawowej 50 Hz. Dla innych częstotliwości należy dokonać przeliczenia, tak aby $\frac{U}{f}$ = const.

Tabela 1

n	$U_{sk(n)}/U_{sk(1)}$ %			
	$\gamma = \pi$		$\gamma = \frac{2}{3}\pi$	
	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$
1	100	100	100	100
5	22,8	21,2	19,0	19,3
7	10,5	13,3	14,0	13,7
11	10,2	10,0	8,5	8,7
13	3,1	6,5	6,9	7,4
17	6,7	5,9	5,2	5,6
19	0,3	3,9	4,4	4,9
23	3,1	4,9	3,3	3,0
25	0,9	2,6	2,9	3,7
29	1,5	3,9	1,8	3,1
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
97	0,2	0,6	0,03	0,03

Dla wyznaczenia wartości prądu zwarcia doziemnego przyjęto schemat zastępczy linii zasilającej (rys. 4) [4].



Rys. 4. Schemat ideowy 1-fazowego zwarcia z ziemią

Prąd zwarcia doziemnego osiąga swoją wartość maksymalną dla $R_z = 0$, które wynosi [7]:

$$I_{z\,max(n)} = 3\,U_{f(n)}\sqrt{\frac{1}{R^2} + (n\omega C)^2} \tag{3}$$

gdzie:

$C = C_R = C_S = C_T$

$R = R_R = R_S = R_T = \frac{1}{G}$

Całkowity prąd zwarcia doziemnego obliczono z zależności:

$$I_z = \sqrt{I^2_{z(1h)} + I^2_{z(5h)} + I^2_{z(7h)} + \dots + I^2_{z(nh)}} \tag{4}$$

Wartości prądu zwarcia doziemnego dla przyjętych parametrów linii zasilającej: $R = 1\ M\Omega$, $C = 0{,}3\ \mu F$ przedstawiono w tabeli 2.

Obliczony prąd zwarcia doziemnego I_z nie jest sumą wszystkich harmonicznych, a mimo to osiąga wartości większe od wartości dopuszczalnych. Prąd ten płynący przez pojemności faz sieci względem ziemi w tradycyjnym zasilaniu napięciem sinusoidalnym o $f = 50$ Hz mógł być kompensowany w układzie statycznym lub układzie automatycznej kompensacji.

Ze względu na odkształcony przebieg i płynną regulację częstotliwości napięcia wyjściowego falownika niemożliwa jest kompensacja składowej pojemnościowej prądu doziemienia. Stąd też nie spełniają stawianych wymagań stosowane dotychczas zabezpieczenia upływnościowe.

W stosowanych w kraju i ZSRR [2, 3] zabezpieczeniach upływowych (CZU, UKSI, UAKI) można tylko wykorzystać człon blokujący mierzący oporność izolacji w stanie beznapięciowym.

Stosowanie więc stacji falownikowych do zasilania napędów dołowych wymaga adaptacji istniejących lub opracowanie nowych rozwiązań zabezpieczeń upływowych.

Tabela 2

n	$I_{z(n)}$ (mA)											
	$\gamma = \pi$						$\gamma = \frac{2}{3}\pi$					
	f = 50 Hz		f = 30 Hz		f = 10 Hz		f = 50 Hz		f = 30 Hz		f = 10 Hz	
	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$	$\lambda = \frac{\pi}{30}$	$\lambda = \frac{\pi}{90}$
1	83,2	85,1	30,0	30,6	3,3	3,4	73,7	76,3	26,5	27,4	2,9	3,0
5	94,9	90,0	34,3	32,4	3,8	3,6	72,9	73,7	26,2	26,4	2,9	3,0
7	61,0	79,3	21,0	28,5	2,5	3,2	72,4	73,3	26,0	26,4	2,9	2,9
11	93,3	93,5	33,6	33,7	3,8	3,7	69,6	73,1	25,0	26,3	2,7	2,9
13	32,7	72,1	11,9	26,0	1,3	2,9	66,8	73,1	24,6	26,3	2,6	2,9
17	94,5	86,5	34,0	31,0	3,8	3,5	65,3	73,0	23,5	25,3	2,6	2,9
19	4,4	64,0	1,5	23,0	0,2	2,6	62,2	71,9	22,3	25,9	2,5	2,9
23	71,4	95,9	25,6	34,5	2,4	3,8	57,1	70,0	20,5	25,2	2,2	2,8
25	19,1	55,1	6,8	19,8	0,8	2,2	53,6	64,9	19,2	23,4	2,1	2,6
29	35,2	95,3	12,4	34,3	1,4	1,8	39,4	62,7	14,1	22,6	1,6	2,5
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
97	9,2	6,6	6,9	3,2	0,8	1,5	2,4	2,4	0,9	0,9	0,1	0,1
I_z mA	215	280	80	100	8,5	11	205	215	70	75	8,0	7,0

4. Wnioski końcowe

1. Zasilanie silników napędowych z przemiennika częstotliwości umożliwia płynną regulację prędkości obrotowej, wprowadza jednak szereg nowych problemów związanych z poprawną pracą zabezpieczeń upływowych. Stosowanie

nowych rozwiązań napędów jest uwarunkowane spełnieniem przepisów bezpiecznej eksploatacji urządzeń elektrycznych.

2. Prądy upływu sieci dołowej zasilanej z tego typu źródła osiągają wartości znacznie większe od dopuszczalnych ze względu na występujące zagrożenia. W sieci tej niemożliwa jest kompensacja składowej pojemnościowej prądu zwarcia doziemnego.

3. Ten system zasilania może być wprowadzony z jednoczesnym opracowaniem nowego systemu zabezpieczeń upływowych.

LITERATURA

[1] Bender W.: Heutiger Stand der Isolationsüberwachung. ETZ-b H22/1973.

[2] Bożek W.: Zabezpieczenia upływowe kopalnianych sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia. Materiały szkoleniowe SIiTG, Katowice 1973.

[3] Gimojan G.G., Lejbow R.M.: Reliejnaja zaszczita podziemnogo elektrooborudowanija i sietiej. Niedra 1970.

[4] Krasucki F.: Praca doktorska. Gliwice 1966.

[5] Winkler A.: Isolationsüberwachungsgeräte. ETZ-b H4/1977.

[6] Zimmerl L.: Das Erdschluss problemen in Mittelspannungsnetzen. ÖZE H5/1969.

[7] Praca Naukowo-Badawcza I.E. i A.G. NB-257/RG-1/76 (niepublikowana).

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ
В ШАХТНЫХ ТРЁХФАЗНЫХ СЕТЯХ ПИТАЕМЫХ ИЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Р е з ю м е

Представлены теоретические рассуждения определяющие величину тока короткого замыкания на земли при питании из преобразователей частоты.

Доказывается, что в случае такого питания не выполняют своих задач применяемые теперь защиты от замыкания на землю.

SOME PROBLEMS CONNECTED WITH EARTH FAULT PROTECTION IN MINE
THREE-PHASE NETWORKS FED FROM FREQUENCY CONVERTERS

S u m m a r y

Some theoretical considerations determining earth fault currents values when using frequency converters have been presented.

It has been shown that with these converters present earth fault protection means are insufficient.