

Ograniczanie odkształceń napięcia sieci górniczych wytwarzanych przez napięcie zaburzeń wspólnych falowników

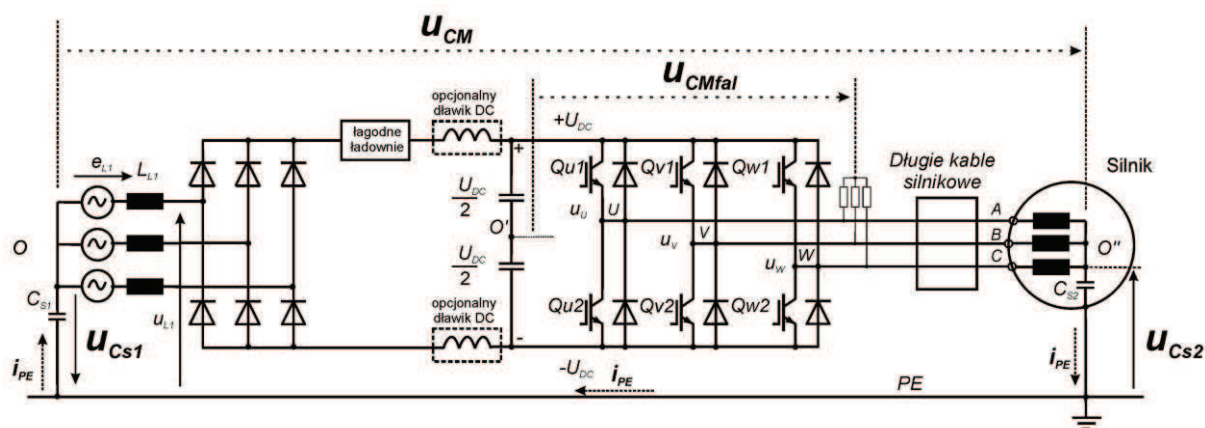
Do zasilania napędów elektrycznych w górnictwie odkrywkowym stosuje się nieuziemione układy sieciowe typu IT. Wytwarzane w falowniku napięcie zaburzeń doziemnych jest przyczyną odkształceń napięcia zasilania. Odkształcone fazowe napięcie zasilania przemiennika częstotliwości może spowodować jego uszkodzenie. Badania przeprowadzone przez autora wykazały, że zastosowanie dodatkowej sztucznej pojemności na zasilaniu przemiennika częstotliwości mocno ogranicza odkształcenia fazy napięcia zasilania.

1. WPROWADZENIE

Z publikacji [1, 2] wiadomo, że falownik napięciowy jest generatorem napięcia zaburzeń doziemnych, znanych w literaturze także jako zaburzenia wspólne u_{CMfal} (rys. 1).

W powszechnie stosowanych sieciach zasilania o układzie sieciowym TN punkt neutralny trójfazowego uzwojenia wtórnego transformatora zasilania przemiennika częstotliwości jest galwanicznie połączony z ziemią i napięcie zaburzące falownika, znane jako

napięcie zaburzeń wspólnych (ang. *common mode voltage*), nie powoduje przesuwania potencjału punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zasilania (punkt O , rys. 1). W układach zasilania typu TN prądy doziemne wymuszone napięciem zaburzeń wspólnych u_{CM} przepływają przez przewód ochronny PE i przewodami zasilającymi przemiennika częstotliwości wpływają do falownika, zamykając obwód elektryczny. Im mniejsza impedancja zwarciowa transformatora zasilającego przemiennika częstotliwości, tym większa część tych prądów może przepływać przez inne obwody elektryczne dołączone do tego transformatora, powodując zakłócenia. W sieciach o izolo-



Rys. 1. Falownik jako generator napięcia zaburzeń wspólnych napięciowego przemiennika częstotliwości zasilanego z sieci nieuziemionej o układzie typu IT

wanym punkcie neutralnym (typu *IT*) nie ma połączenia galwanicznego punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora, dlatego zachodzi zjawisko modulowania potencjału punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora napięciem zaburzeń wspólnych u_{CM} przemiennika częstotliwości.

W artykule przedstawiono analizę matematyczną napięcia zaburzeń, badania symulacyjne oddziaływania tego napięcia na odkształcenia fazowych napięć zasilania oraz przedstawiono metodę ograniczania modulowania potencjału punktu 0 transformatora i utrzymywania go w pobliżu potencjału uziomu. Otrzymane wyniki badawcze zweryfikowano na przykładzie napędu z przemiennikami częstotliwości dużej mocy zasilanymi z sieci górniczej w stacji napędowej przenośników taśmowych o regulowanej prędkości taśmy.

2. SZKODLIWE ODDZIAŁYWANIE NAPIĘCIA ZABURZEŃ WSPÓLNYCH NA FAZOWE NAPIĘCIA ZASILANIA

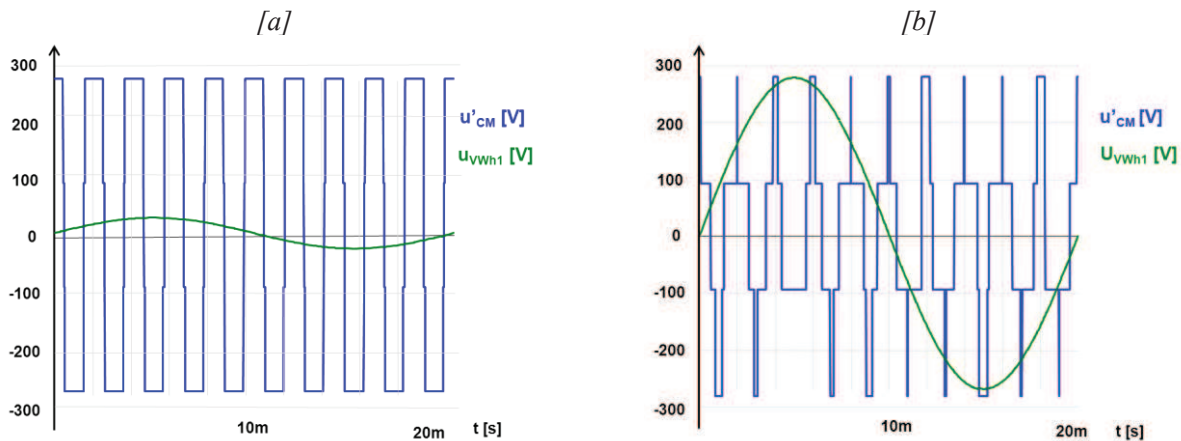
Opis matematyczny oddziaływania napięcia zaburzeń wspólnych u_{CM} przemiennika częstotliwości na napięcia zasilania można rozważać dla krótkich i długich kabli silnikowych. Wyprowadzone zależności matematyczne uwzględniają oznaczenia przedstawione na rysunku 1.

Napięcie zaburzeń wspólnych przy krótkich kablach silnikowych, do 10 metrów [3], można opisać wyrażeniem 1(4-8) [2], a dla długich kabli silnikowych – wyrażeniem 2(11-12):

<p>(1) $u_U = u_{U'0'} + u_{0'0}$ (I') $u_V = u_{V'0'} + u_{0'0}$ (I'') $u_W = u_{W'0'} + u_{0'0}$</p> <p>(2) $u_{CMfal} = \frac{u_{U'0'} + u_{V'0'} + u_{W'0'}}{3}$ (3) $u_{CM} = \frac{u_{A0} + u_{B0} + u_{C0}}{3}$</p> <p>dla kabli silnika $l \leq 10m$ $u_{CM} = u'_{CM} = u_{CMfal} + u_{0'0}$</p> <p>wtedy</p> <p>(4) $u'_{CM} = u_{CMfal} + u_{0'0} = \left\{ \pm \frac{U_{DC}}{2} + u_{0'0} \text{ lub } \pm \frac{U_{DC}}{6} + u_{0'0} \right\}$</p> <p>(5) $u_{CM} = u_{Cs1} + u_{Cs2}$</p> <p>(6) $u_{L1} = -u_{Cs1} + e_{L1} - L \frac{di_{PE}}{dt}$ dla $L \frac{di_{PE}}{dt} \approx 0$</p> <p>(7) $u_{L1} = e_{L1} - u_{Cs1}$</p> <p>(8) dla $u_{Cs2} \approx 0$ $u_{L1} = e_{L1} - u'_{CM}$ sieć typu <i>IT</i></p> <p>(9) dla $u_{Cs1} \approx 0$ $u_{L1} = e_{L1}$ sieć typu <i>TN</i></p>	1
<p>(10) dla kabli $sil. \geq 10m$ $u_{CM} = u''_{CM} = 2u_{CMfal} + u_{0'0}$</p> <p>wtedy</p> <p>(11) $u''_{CM} = \left\{ \pm U_{DC} + u_{0'0} \text{ lub } \pm \frac{U_{DC}}{3} + u_{0'0} \right\}$</p> <p>(12) dla $u_{Cs2} \approx 0$ $u_{L1} = e_{L1} - u''_{CM}$ sieć typu <i>IT</i></p> <p>(13) dla $u_{Cs1} \approx 0$ $u_{L1} = e_{L1}$ sieć typu <i>TN</i></p>	2

Doziemne napięcie zaburzające $u_{0'0}$ wytwarzane przez prostownik jest zwykle pomijane przy analizie napięcia zaburzeń wspólnych napięciowego przemiennika częstotliwości u_{CM} , gdyż jego amplituda i częstotliwość są znacznie mniejsze od amplitudy i częstotliwości napięcia u_{CMfal} wytwarzanego przez falownik napięciowy [1]. Napięcie u_{CMfal} przyjmuje wartości $\{ + \frac{1}{2}U_{DC}$ lub $- \frac{1}{2}U_{DC}$ oraz $+ \frac{1}{6}U_{DC}$ lub $- \frac{1}{6}U_{DC} \}$. Przebiegi tego napięcia dla małej i dużej wartości harmonicznej podstawowej napięcia międzyfazowego wytworzonego przez falownik przedstawiono na rysunku 2.

Napięcie zaburzeń doziemnych u_{CMfal} generowane przez falownik napięciowy zbudowane jest ze składowych zerowych zawartych w widmach napięć fazowych falownika. Wybrane harmoniczne z widm napięć fazowych falownika, zawierające składowe zerowe i harmoniczne doziemnego napięcia zaburzającego generowanego przez falownik napięciowy uzyskane w badaniach symulacyjnych, przedstawiono na rysunku 3. Na podstawie rysunku 3d można stwierdzić, że główną część energii doziemnego prądu zaburzającego przenosi harmoniczna o częstotliwości nośnej modulacji MSI falownika.



Rys. 2. Napięcie zaburzeń wspólnych u_{CMfal} wytwarzane w falowniku napięciowym przemiennika częstotliwości dla małej ($M=0,1$) [a] i dużej ($M=0,9$) [b] wartości harmonicznej podstawowej napięcia międzyfazowego u_{VW}

	f [Hz]	VM8.V [V]	Phi [deg]	% (Max)
Minimum	2k	20.325	52.89	7.3081
Maximum	10.3k	0.1687k	0.34613k	60.658
0	2k	0.1687k	82.8	60.658
1	3.85k	55.694	0.34613k	20.026
2	4.15k	58.745	0.16506k	21.123
3	6k	31.303	68.398	11.255
4	9.7k	22.233	55.093	7.9942
5	10.3k	20.325	52.89	7.3081

a) napięcie u_U (VM8)

	f [Hz]	VM9.V [V]	Phi [deg]	% (Max)
Minimum	2k	22.077	53.682	8.004
Maximum	10.3k	0.17122k	0.34843k	52.075
0	2k	0.17122k	83.128	52.075
1	3.85k	57.423	0.34843k	20.819
2	4.15k	57.035	0.1646k	20.678
3	6k	34.216	69.604	12.405
4	9.7k	22.479	60.48	8.1498
5	10.3k	22.077	53.682	8.004

b) napięcie u_V (VM9)

	f [Hz]	VM10.V [V]	Phi [deg]	% (Max)
Minimum	2k	22.081	49.653	8.0052
Maximum	10.3k	0.17121k	0.34385k	62.07
0	2k	0.17121k	82.459	62.07
1	3.85k	57.446	0.34385k	20.826
2	4.15k	57.049	0.16553k	20.682
3	6k	34.225	67.141	12.408
4	9.7k	22.489	49.653	8.1532
5	10.3k	22.081	52.166	8.0052

c) napięcie u_W (VM10)

	f [Hz]	MUL1.VAL	Phi [deg]	% (Max)
Minimum	2k	21.493	52.913	12.615
Maximum	10.3k	0.17037k	0.34614k	100
0	2k	0.17037k	82.799	100
1	3.85k	56.824	0.34614k	33.352
2	4.15k	57.608	0.16506k	33.813
3	6k	33.242	68.381	19.511
4	9.7k	22.334	55.074	13.109
5	10.3k	21.493	52.913	12.615

d) napięcie u_{CMfal} (MUL1)

Rys. 3. Składowe zerowe widma napięć fazowych falownika i widmo doziemnego napięcia zaburzającego falownika napięciowego u_{CMfal} ($M=1/50$ Hz/2 kHz)

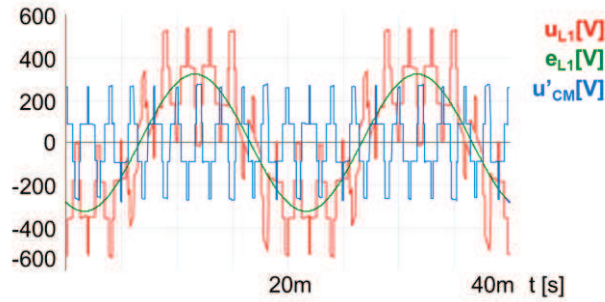
W układach zasilania o nieuziemiającym punkcie neutralnym, typu IT, wysokoczęstotliwościowe napięcie zaburzeń doziemnych generowane przez falownik napięciowy u_{CMfal} wpływa na potencjał punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zasilającego θ . Jako skutek wysokoczęstotliwościowych zmian potencjału punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zachodzi zjawisko modulowania napięć fazowych transformatora. Przez to powstaje niebezpieczne dla zasilanego falownika odkształcenie napięcia fazowego od przebiegu sinusoidalnego oraz powiększenie jego wartości maksymalnej i skutecznej, co opisuje równanie 1(7).

Ponieważ radiator falownika jest bezpośrednio uziemiony, to w efekcie następuje niebezpieczne zwiększenie się wartości napięcia pomiędzy radiato-

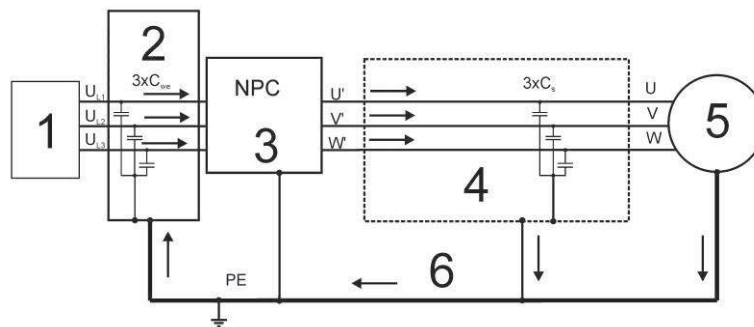
rem falownika oraz aktywnymi wejściami i wyjściami mocy falownika (wejścia +/- U_{DC} i wyjścia napięć fazowych: U, V, W). Taki stan może spowodować uszkodzenie falownika na skutek nadmiernego udaru napięciowego.

Na rysunku 4. przedstawiono przebieg zmodulowanego fazowego napięcia zasilania przemiennika częstotliwości u_{L1} napięciem zaburzeń wspólnych falownika u_{CMfal} i napięciem zaburzeń wytwarzanym przez prostownik 3f6d (150 Hz) – $u_{\theta'0}$, co opisuje równanie 1(4).

Napięcie zaburzeń pochodzące od prostownika uwidacznia się trapezowym odkształceniem sinusoidalnego napięcia fazowego [2]. Amplituda fazowego napięcia zasilania powiększyła się o blisko połowę wartości napięcia obwodu DC przemiennika częstotliwości.



Rys. 4. Napięcie fazowe u_{L1} zasilania przemiennika częstotliwości zmodulowane napięciem zaburzeń wspólnych u_{CMfal} wytwarzanym w module falownika



Rys. 5. Zmodyfikowana instalacja napędowa z przemiennikiem częstotliwości NPC (3) zasilana z sieci górniczej (1)

Napięcie zaburzeń wspólnych u_{CMfal} wytwarzane przez falownik napięciowy jest podstawową przyczyną wymuszania przepływu doziemnych prądów wysokoczęstotliwościowych przez pojemności pasozytne kabla silnikowego i silnika.

Ograniczenie doziemnych pojemności pasozytnych jest skutecznym sposobem ograniczania wartości prądów doziemnych w przewodzie ochronnym PE przemiennika częstotliwości. Niemniej brak odpowiednio dużych pojemności doziemnych na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości skutkuje opisanym wyżej niekorzystnym odkształceniem fazowych napięć zasilania – wniosek ten wynika z porównania równań 1(7-9).

Dla kabli silnikowych o długości powyżej 10 metrów przyjmuje się, że **amplituda impulsów napięcia zaburzeń wspólnych (doziemnych) u_{CM} , jak i amplituda impulsów napięcia międzyfazowego na silniku zwiększa się blisko dwukrotnie** wskutek efektu falowego w związku z niedopasowaniem impedancji falowej kabla silnikowego i uzwojeń fazowych silnika [3]. Analiza matematyczna oddziaływania napięcia zaburzeń wspólnych na fazowe napięcia zasilania pokazuje, że długie kable silnikowe będą dwukrotnie bardziej odkształcać przebiegi fazowych napięć zasilania układów nieuziemionych [2] – równania 2(12-13).

3. METODA OGRANICZANIA ODDZIAŁYWANIA NAPIĘCIA ZABURZEŃ WSPÓLNYCH U_{CM} NA FAZOWE NAPIĘCIA ZASILANIA

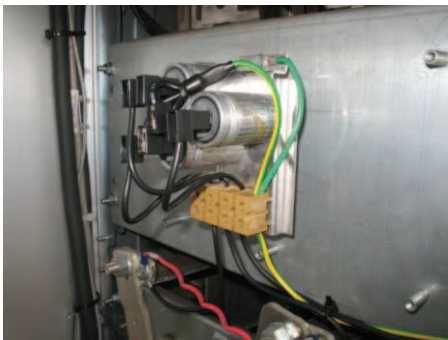
Dla ograniczenia oddziaływania napięcia zaburzeń wspólnych u_{CM} napięciowego przemiennika częstotliwości (3) na fazowe napięcia zasilania transformatora zbudowano układ dodatkowego filtra pojemnościowego ($3 \times 1 \mu\text{F}$) dołączonego do wejść zasilających przemiennika częstotliwości (2) – rysunek 5. Układ zasilania jest o konfiguracji sieciowej typu IT (1). Zadaniem filtra wejściowego jest zmniejszenie impedancji wejściowej dla prądów wysokoczęstotliwościowych wypływających przez doziemne pojemności pasozytne kabla silnikowego (4) i silnika (5) oraz płynących przewodem ochronnym (6).

Filtr wejściowy (2) jest techniczną realizacją zależności 1(10) dla krótkich kabli silnikowych lub 2(13) dla długich kabli silnikowych. Zastosowanie filtra wejściowego (2) spowodowało osadzenie punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zasilającego w pobliżu potencjału ziemi dla dużo mniejszych wartości pasozytnych pojemności doziemnych na wyjściach mocy falownika, a więc – w praktyce inżynierskiej – niezależnie od długości i przekroju kabla silnikowego oraz mocy nominalnej silnika.

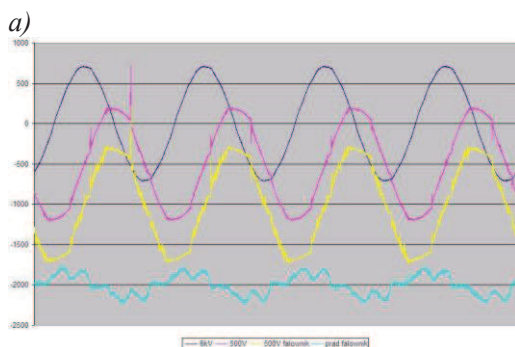
4. BADANIA SKUTECZNOŚCI POJEMNOŚCIOWEGO FILTRA WEJŚCIOWEGO OGRANICZAJĄCEGO ODKSZTAŁCENIA NAPIĘCIA ZASILANIA

Badania skuteczności filtra ograniczającego wpływ napięcia zaburzeń doziemnych generowanego przez falownik napięciowy u_{CMfal} na odkształcania fazowych napięć transformatora przeprowadzono w mobilnej stacji napędowej przonośnika powierzchniowego. Na stacji były zainstalowane przemienniki częstotliwości o mocy 4×450 kW/500 V, które zasilają silniki klatkowe 4×355 kW/500 V. Długość kabla silnikowego ($4 \times 2 \times 120$ mm kw.) z pojedynczym uziemionym ekranowaniem w poszczególnych napędach wynosiła ok. 50 m. Przemienniki częstotliwości były zasilane z sieci o układzie typu IT – 3×500 V/50 Hz.

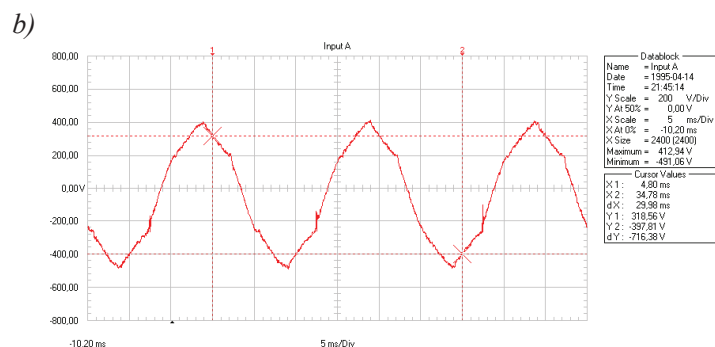
Na fotografii 1. przedstawiono realizację techniczną filtra pojemnościowego (2) – rysunek 5.



Fot. 1. Filtr pojemnościowy do ograniczania odkształceń fazowych napięć zasilania, powodowanych napięciem zaburzeń doziemnych przemiennika częstotliwości



a) odkształcone napięcie międzyfazowe po stronie niskonapięciowej transformatora 6 kV/500 V i napięcie zasilania (żółty) oraz prąd fazowy (niebieski) przemiennika częstotliwości, spowodowane wysokoczęstotliwymi prądami doziemnymi



b) przebieg napięcia fazowego zasilania przemiennika częstotliwości po odfiltrowaniu wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych

Rys. 6. Przebiegi napięć zasilania przemiennika częstotliwości w układzie zasilania o nieziemionym punkcie neutralnym, z wyłączonym (a) i włączonym (b) pojemnościowym filtrem wejściowym, wg rysunku 5.

Przed zastosowaniem pojemnościowego filtra wejściowego przemiennik częstotliwości miał włączony fabryczny filtr pojemnościowy obwodu pośredniego DC z pojemnościami ($2 \times 0,35$ μ F) [3], stosowany powszechnie w sieciach o układzie sieciowym TN. Filtr ten wykazywał się dużą skutecznością tłumienia odkształceń powodowanych napięciem zaburzającym przemiennika częstotliwości.

Stosowanie tego filtra w sieciach o nieziemionym punkcie neutralnym powoduje trapezowe odkształcenie przebiegu napięcia fazowego transformatora zasilającego przemiennik częstotliwości. Na zmodulowane napięciem u_{CMfal} fazowe napięcia transformatora nakłada się dodatkowo napięcie zaburzające od prostownika wejściowego 3f6d przemiennika częstotliwości. Doziemne napięcie zaburzające obciążonego prostownika 3f6d jest przebiegiem trójkątnym o częstotliwości 150 Hz. Stosowanie filtra w obwodzie pośrednim przemiennika częstotliwości jest niebezpieczne w sieciach o nieziemionym punkcie neutralnym, gdyż przemiennik jest wtedy podatny na uszkodzenia przy wystąpieniu zwarcia doziemnego po stronie zasilania lub silnika [4, 5]. Prądy zwarcia doziemnego lub prądy doziemnych wpływów pojemnościowych kabla silnikowego lub silnika mogą spowodować pojawienie się nadmiernej wartości napięcia na zaciskach baterii kondensatorów przemiennika częstotliwości o małym obciążeniu i doprowadzić do uszkodzenia falownika.

Na rysunku 6b przedstawiono przebieg fazowego napięcia zasilania przemiennika częstotliwości z odfiltrowanymi zaburzeniami wysokoczęstotliwościowymi. Wskutek względnie małej mocy zwarciowej transformatora zasilającego przebieg fazowego napięcia zasilania obciążonego transformatora jest przebiegiem zbliżonym do trójkątnego.

Z rysunku 6b wynika, że stosując pojemnościowy filtr wejściowy, można skutecznie ograniczyć odkształcenia napięć fazowych, a tym samym i międzyfazowych transformatora zasilającego przemiennik napięciowy dużej mocy [6].

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie zewnętrznego pojemnościowego filtra dla zmniejszenia impedancji między wejściami zasilania przemiennika częstotliwości a przewodem ochronnym zdecydowanie ograniczyło odkształcenia fazowych napięć transformatora zasilającego. Trzeba zauważyć, że poziom odkształceń napięć zasilania transformatora napięciem zaburzeń wspólnych nie jest zależny od jego mocy zwarciowej.

Eliminacja odkształceń fazowych napięć zasilania transformatora eliminuje stres napięciowy między uziemionym radiatorem falownika a jego wejściami i wyjściami mocy. W skutek stresu napięciowego może dochodzić do uszkodzeń falownika i jego wybuchu, który zwykle powoduje dodatkowe zniszczenie w torze mocy przemiennika częstotliwości.

Wadą stosowania uziemienia fabrycznego filtra pojemnościowego w obwodzie pośrednim przemiennika częstotliwości jest niekontrolowane narastanie napięcia na zaciskach baterii kondensatorów przy wystąpieniu zwarcia doziemnego w transformatorze zasilającym [4], gdy przemiennik częstotliwości jest nieobciążony. Cecha ta eliminuje możliwość utrzymywania zasilania obwodu mocy przemiennika w warunkach pracy postojowej [7]. Zagrożenia uszkodzenia przemiennika częstotliwości przy wystąpieniu zwarcia doziemnego po stronie silnikowej występują podczas zasilania kilku przemienników częstotliwości z jednego transformatora – zagadnienia te są szerzej opisane w literaturze światowej [2].

Oprócz przedstawionych korzyści, jakie uzyskujemy ze stosowania dodatkowego wejściowego filtra pojemnościowego (filtr obwodu pośredniego jest wówczas odłączony), ma on wadę polegającą na niekontrolowanym wzroście napięcia na baterii kondensatorów przy wystąpieniu zwarcia doziemnego po stronie silnikowej. Niemniej wada ta nie uniemożliwia pracy przemiennika częstotliwości przy zwarcu doziemnym po stronie silnikowej. Narastanie napięcia na zaciskach baterii kondensatorów występuje w czasie procesu modulacji bez dołączonego silnika, a taki stan pracy przemiennika nie występuje w normalnych warunkach eksploatacji napędu.

Wydaje się celowe poszukiwanie rozwiązania technicznego, które zapewni brak przepływu prądów

wysokoczęstotliwościowych przez przewód ochronny PE i umożliwi pełną odporność przemiennika częstotliwości przy wystąpieniu zwarcia doziemnego zarówno po stronie zasilania, jak i silnika. Przykładem badań prowadzonych w tym celu jest rozwiązanie zaproponowane przez autora w zgłoszeniu patentowym [8]. Cechą znamioną tego rozwiązania jest zastosowanie dodatkowego obwodu dla wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych. Zastosowanie zaproponowanego rozwiązania umożliwi znaczące zredukowanie wartości skutecznej wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych w przewodzie ochronnym PE [9].

Literatura

1. Szymański J.: *Odształcenia napięć w nieziemionych układach zasilania typu IT wytwarzane przez przemienniki częstotliwości*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2012 nr 1b.
2. Ma Hongfei, Xu Dianguo and Miao Lijie, Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Suppression Techniques of Common-Mode Voltage Generated by Voltage Source PWM Inverter, IEEE – 2004.
3. Szymański J.: *Efektywność tłumienia prądów doziemnych silnika filtrami LC w napędach z falownikami napięciowymi zasilanymi z sieci TN*. Elektro Info, 2011 nr 7-8.
4. Szymański J.: *Praca napięciowych przemienników częstotliwości dużych mocy sieciowych zasilania typu IT przy doziemieniu napięcia zasilania*. XI International Conference TransComp, grudzień 2007.
5. Tallam R. M., Schlegel D. W. and Hoedley F. L.: *Failure Mode for AC Drives on High Resistance Grounded Systems*, 2006.
6. Szymański J.: *Zaburzenia powodowane prądami doziemnymi w sieciach IT z przemiennikami częstotliwości dużych mocy*. Pomiar, Automatyka, Komputery w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2009 nr 2.
7. Danfoss – VLT® on IT mains, MN.90.C4.02, 2010.
8. Szymański J.: *Filtr napięcia zaburzeń wspólnych napięciowych elektronicznych przetwornic częstotliwości zasilanych z trójfazowej sieci nieziemionej IT*. Zgłoszenie patentowe nr P.394803, 2011.
9. Szymański J.: *Prądy doziemne w napędach z przemiennikami częstotliwości zasilanymi z sieci górniczych*. Elektro Info, 2012 nr 5.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów