

*Dwupoziomowy przemiennik częstotliwości,  
napięcie zaburzeń wspólnych,  
prądy doziemne, bierny filtr silnikowy*

SZYMAŃSKI Jerzy<sup>1</sup>  
SZYMAŃSKI Bernard<sup>2</sup>  
JANKOWSKI Krzysztof<sup>3</sup>

### **FILTRY PRĄDÓW DOZIEMNYCH W NAPĘDACH Z FALOWNIKAMI NAPIĘCIOWYMI ZASILANYMI Z SIECI NIEUZIEMIANYCH**

*W artykule zawarto porównanie wybranych właściwości silnikowych filtrów pasywnych LC, ograniczających wysokoczęstotliwościowe prądy doziemne płynące przez pojemności pasozytnicze kabli silnikowych i silników. W badaniach oceniających efektywność filtracji prądów doziemnych uwzględniono takie kryteria jak: napięcie względem ziemi punktu neutralnego uzwojeń stojana silnika, oraz napięcie fazowe zasilania przemiennika częstotliwości.*

### **HIGH FREQUENCY GROUND CURRENT FILTERS OF FREQUENCY CONVERTER DRIVES SYSTEMS SUPPLIED FROM UNGROUNDED POWER NETWORKS**

*In the article basic features' comparison of different kinds of passive LC motor filters, utilized in order to reduce inverter's the differential and common voltage in the frequency converters drives, is presented. Filters' examinations were prepared for non-grounded power supply of electrical drives (IT mains) where parasitic ground capacitances of a screened motor cable have significant value. Filters were compared under following criteria: voltage of stator windings neutral point to grounded motors cover, high frequency parasitic current in PE conductor, value of frequency converter phase-ground and value of motor phase-phase voltage. Examinations were made for unscreened and screened motor cables.*

---

<sup>1</sup> Adiunkt, Politechnika Radomska - Wydział Transportu i Elektrotechniki, j.szymanski@pr.radom.pl

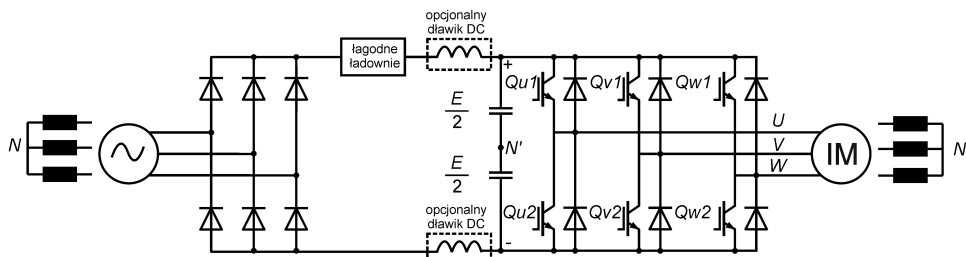
<sup>2</sup> Dział Badań i Rozwoju, ELPOL Centrum Elektroniki i Automatyki Sp. z o.o., bs@elpol.biz

<sup>3</sup> Adiunkt, politechnik Radomska, Wydział Mechaniczny, k.jankowski@pr.radom.pl .

## 1. WSTĘP

Stosowanie dwupoziomowych trójfazowych falowników napięciowych z modulacją MSI niesie ze sobą wiele negatywnych konsekwencji, rys1 [19].

Falowniki napięciowe są generatorami trójfazowych napięć odkształconych i w konsekwencji napięcie punktu neutralnego (N'') uzwojeń stojana zasilanego silnika indukcyjnego nie jest równe zero, gdyż suma napięć fazowych falownika jest różna od zera rys. 2. Napięcia fazowe falownika mogą być tutaj definiowane jako:  $u_{UN''}$ ,  $u_{VN''}$ ,  $u_{WN''}$  lub  $u_{UN'}$ ,  $u_{VN'}$ ,  $u_{WN'}$  lub  $u_{UN}$ ,  $u_{VN}$ ,  $u_{WN}$ .



Rys. 1. Obwód mocy komercyjnego przemysłowego trójfazowego przemiennika częstotliwości z dwupoziomowym falownikiem napięciowym MSI i silnikiem indukcyjnym.

Impulsowe przebiegi napięć fazowych powodują, że ich suma ma wartość chwilową różną od zera, i przebieg napięcia, tzw. zaburzeń wspólnych CM można opisać można zapisać w postaci nieskończonych szeregów harmonicznych zależnością (1):

$$u_{CMfal} = \frac{u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}}{3} = \frac{4V_{DC}}{3\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \frac{1}{m} J_n \left( m \frac{\pi}{2} M \right) \sin \left( (m+n) \frac{\pi}{2} \right) \times \\ \times \left( 1 + 2 \cos \left( n \frac{2\pi}{3} \right) \right) \cos(m\omega_c t + m\omega_0 t). \quad (1)$$

gdzie:

$J_n$  – funkcja Bessela  $n$ -tego rzędu,

$M$  – głębokość modulacji,

$V_{DC}$  – połowa napięcia obwodu DC ( $V_{DC}=0,5E$ ),

$m$  – rząd harmonicznej częstotliwości wyjściowej falownika,

$n$  – rząd harmonicznej częstotliwości nośnej.

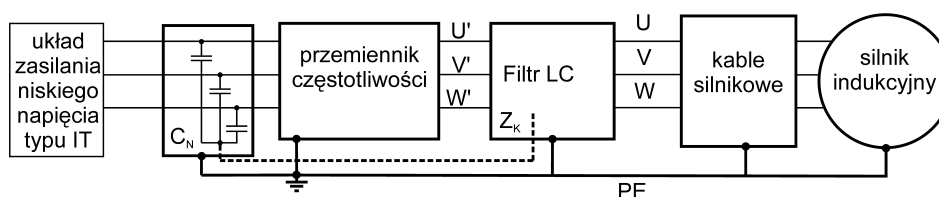
Napięcie zaburzeń wspólnych CM może mieć wiele negatywnych konsekwencji dla układu napędowego. Napięcie CM pomiędzy wałem silnika i łożyskami, powoduje przepływ wysokoczęstotliwościowego prądu, który może zniszczyć łożyska [6], [16]. Jeśli silnik jest uziemiony wspólnie z innymi wrażliwymi odbiornikami to wskutek zaburzenia potencjału uziemienia, może prowadzić to do zakłóceń w pracy tych odbiorników [7].

Ponadto przepływ wysokoczęstotliwościowego prądu zaburzeń CM od instalacji ochronnej, przez doziemne pojemności pasozytne układu zasilania do obwodu DC zasilania falownika zakłóca pracę czujników prądów zwarć doziemnych.

Prowadzone są badania efektywności różnych konfiguracji silnikowych filtrów pasywnych i aktywnych eliminujących nadmierny poziom zaburzeń doziemnych powodowanych falownikami w napędach zasilanych z sieci uziemionych [17], [18], [19]. Autorzy zaproponowali zastosowanie wybranych rodzajów filtrów LC i przeprowadzili weryfikację ich skuteczności w napędach z falownikami napięciowymi zasilanych sieciami nieziemionymi, typu IT [20].

## 2. BADANIA PORÓWNAWCZE FILTRÓW SILNIKOWYCH LC

W nieziemionych układach zasilania, o układzie sieciowym IT, przepływ wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych z filtra LC typu DM-CM do wejść zasilania przemiennika częstotliwości, uniemożliwia pracę napędu przy wystąpieniu pojedynczego zwarcia doziemnego tak po stronie zasilania przemiennika częstotliwości jak i silnika. Metody wykrywania zwarć doziemnych w napędach przekształtnikowych zasilanych z sieci IT nie są przedmiotem tego artykułu [26].



Rys.5. Układ napędowy z filtrem LC do ograniczania zaburzeń DM i CM z obwodem zamykania prądów doziemnych przez wejścia zasilania przemiennika częstotliwości [25].

W sieciach izolowanych układ napędowy z rys.5 może być powszechnie wykorzystywany gdyż umożliwia zamknięcie prądów zaburzających CM bez ingerowania w strukturę wewnętrzną przemiennika częstotliwości. Zaburzenia wysokoczęstotliwościowe tak wg, rys.5 zostają zamknięte w układzie przemiennik częstotliwości – filtr LC i nie przepływają przez pozostałe elementy systemu zasilania napędu.

Celem badań jest określenie skuteczności filtracji zaburzeń CM zastosowanych filtrów LC. Należy zwrócić uwagę, że przy nieobciążonym przemienniku częstotliwości może nastąpić niepożądany wzrost napięcia w jego obwodzie DC, dlatego przy stosowaniu filtracji napięcia zaburzeń wspólnych przemiennik częstotliwości powinien być obciążony lub bateria kondensatorów obwodu DC musi być rozładowywana przy przekroczeniu dopuszczalnej wartości napięcia, np. przerywaczem prądu odciążonym rezystorem mocy.

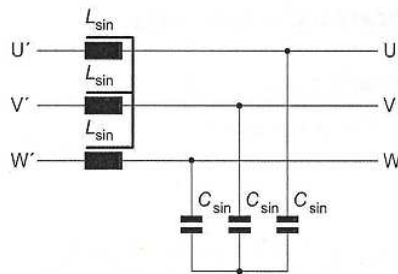
### 2.1 Dolnoprzepustowy filtr LC dla napięcia zaburzeń typu DM

Standardowy filtr zaburzeń typu DM zawiera 3-fazowy dławik  $3xL_{sin}$  oraz kondensatory  $3xC_{sin}$  włączone pomiędzy fazy. Ten typ filtra ma mały wpływ na zakłócenia typu CM, rys.6.

Dla filtra trójfazowego o parametrach  $I_n = 16A/400V$  o dławiku powodującym 5% spadek napięcia harmonicznej podstawowej (50Hz) zasilania silnika oraz częstotliwości nośnej modulacji MSI falownika  $f_n = 4kHz$ , należy dobrać  $L_{sin}$  i  $C_{sin}$  o wartościach według zależności (2).

$$L_{sin} = \frac{\Delta U}{\omega_{h1} \cdot I_n} = \frac{20V}{2\pi \cdot 50Hz \cdot 16A} = 4mH$$

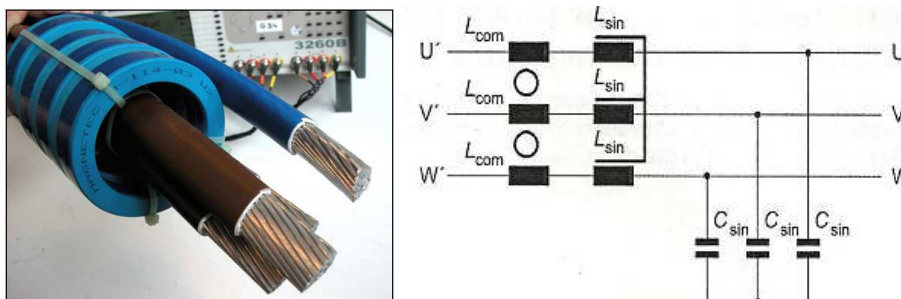
$$C_{sin} = k \cdot \frac{1}{\omega_n^2 L_{sin}} = 10 \cdot \frac{1}{(2\pi \cdot 4kHz)^2 \cdot 4mH} = 4,0\mu F$$
(2)



Rys.6. Standardowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika.

## 2.2 Dolnoprzepustowy filtr LC dla napięcia zaburzeń typu DM-CM z pierścieniami ferrytowymi

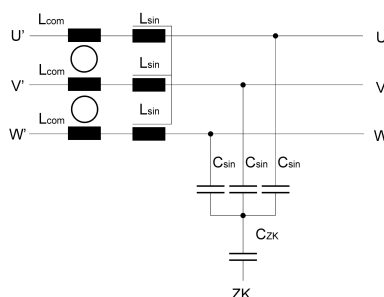
W filtrze zastosowano dodatkowe trzy indukcyjności  $3xL_{com}$ , które są nawinięte na jeden rdzeń magnetyczny, rys.7. Pozwalają one na indukcyjne tłumienie prądu zaburzeń CM, głównie w paśmie częstotliwości radiowych ok. 150kHz–30MHz, gdzie impedancja dławika  $L_{com}$  jest większa od  $1k\Omega$  [9], [21], [22], [23]. W rozwiązaniach przemysłowych stosuje się kilka pierścieni ferromagnetycznych (np. 4 pierścieniowe rdzenie magnesu neodymowego) przez które są przewleczone żyły fazowe kabla silnikowego. Filtr LC z indukcyjnościami do tłumienia zaburzeń wspólnych przedstawiono na rys. 7. Działanie dławików  $L_{com}$  polega na zmniejszeniu stromości narastania impulsów prądowych i zmniejszeniu ich wartości maksymalnej. Wartości indukcyjności dławików  $L_{com}$  w postaci pierścieni z magnesów stałych (np. magnesy neodymowe) zwykle wynoszą kilka  $\mu F$  i znajdują zastosowanie głównie jako komponenty filtrów radioelektrycznych.



Rys.7. Standardowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika z dodatkowymi indukcyjnościami  $3xL_{com}$  do tłumienia zaburzeń CM w paśmie radiowym.

### 2.3 Dolnoprzepustowy filtr LC dla zaburzeń typu DM-CM z kondensatorem sprzęgającym

Filtr dolnoprzepustowy dla zaburzeń typu DM-CM przedstawiony na rys.8, posiada dodatkowy kondensator włączony pomiędzy kondensatory tłumienia zaburzeń DM oraz wejściowy filtr pojemnościowy (np.  $3x2\mu F$ ) (rys. 5). Filtr ten ogranicza zakłócenia typu DM i CM. Filtr uniemożliwia przepływ doziemnych prądów zaburzających przez pojemności pasożytnicze kabla zasilania silnika i samego silnika [8], [10], [11]. Ponadto prądy zaburzeń wspólnych CM nie przepływają też przez doziemne pojemności pasożytnicze transformatora zasilającego przemiennik częstotliwości. Nie występują wtedy zaburzenia fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości. Taki filtr cechuje się dużą skutecznością ograniczania zaburzeń wspólnych CM w sieciach IT. W przemysłowych rozwiązaniach można spotkać bezpośrednie połączenie pojemności sprzęgającej  $C_{ZK}$  bezpośrednio do przewodu ochronnego PE i nie ma wówczas wydzielonego przewodu dla prądów zaburzeń wspólnych CM.



Rys.8. Standardowy filtr LC typ DM stosowany do uzyskiwania sinusoidalnego napięcia międzyfazowego zasilania silnika z dodatkowymi indukcyjnościami  $3xL_{com}$  do tłumienia zaburzeń CM i pojemnością sprzęgającą  $C_{ZK}$

### 3. REZULTATY BADAŃ

W badaniach używano przemiennikowy układ napędowy przedstawiony na rys.5 stosując omówione wcześniej filtry pasywne LC. Użyty był przemiennik częstotliwości o mocy 2,2kW bez filtrów wewnętrznych. Częstotliwość przełączania wynosiła  $f_n = 4,5\text{kHz}$  przy harmonicznej podstawowej międzyfazowego napięcia wyjściowego falownika 400V/50Hz (współczynnik głębokości modulacji  $M=1$ ). Użyty silnik o mocy 2,2kW bez izolowanych łożysk na wale. Użyty w badaniach filtr LC typ DM jest filtrem standardowym o  $I_N = 16\text{A}$  dla częstotliwości  $f_n = 4\text{kHz}-6\text{kHz}$ . Zmierzone pasożytnicze pojemności doziemne na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości wynosiły 4-6nF. Sieć zasilająca typu IT zbudowana z zastosowaniem transformatora separującego 10kVA.

Wejściowy filtr pojemnościowy jak na rys.5 został wykonany poprzez włączenie kondensatorów  $3 \times 1\mu\text{F}$  między napięcia fazowe transformatora separującego a punkt gwiazdowy filtra był dołączany do przewodu  $C_N-Z_K$ .

Kabel silnikowy nieekranowany  $4 \times 4\text{mm}^2$ , długość 10mb. Pojemności międzyprzewodowe i doziemne na zaciskach silnika wynoszą 4-6nF.

Dla określenia wpływu ekranowanego kabla silnikowego o dużym przekroju użyto dodatkowych kondensatorów dołączonych do zacisków silnika o wartościach:  $3 \times 19\text{nF}$  – pojemności międzyprzewodowe,  $3 \times 32\text{nF}$  – pojemności doziemne. Odpowiadają one parametrom ekranowanego kabla silnikowego  $4 \times 50\text{mm}^2/100\text{mb}$  [24].

Badania dla układów z silnikowymi filtrami LC przeprowadzono dla kabla silnikowego nieekranowanego (N) i ekranowanego kabla silnikowego (E) w konfiguracji:

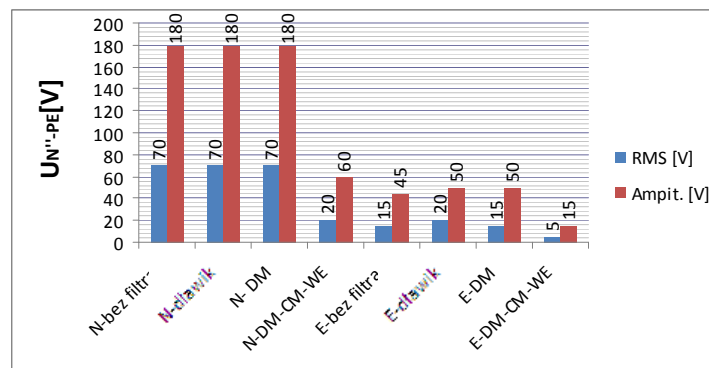
1-bez filtra,

2-dławik silnikowy (rys.6 – filtr LC typ DM bez kondensatorów),

3-filtr LC typ DM (rys.6),

4-filtr LC DM-CM-WE (rys.5 i rys.8,  $C_{ZK}=10\mu\text{F}$ ).

#### 3.1 Napięcie względem ziemi punktu neutralnego uzwojeń stojana silnika

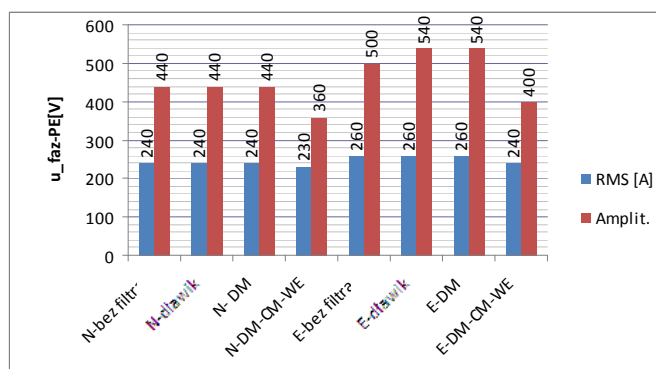


Rys.10. Wykres zależności napięcia między punktem neutralnym uzwojeń stojana silnika i uziemioną obudową silnika  $U_{N''-PE}$  dla nieekraowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego.

Pomiar napięcia zaburzeń wspólnych między punktem neutralnym uzwojeń stojana połączonych w gwiazdę i uziemionym korpusem silnika wskazuje, że filtry pasywne LC, z połączonym kondensatorem sprzęgającym  $C_{ZK}$  do wejściowego przez filtr pojemnościowy, pozwalają na największe zmniejszenie napięcia zaburzeń CM w silniku, rys.10. Same dławiki silnikowe nie wpływają na zmniejszenie napięcia między uziemionym korpusem silnika i punktem neutralnym uzwojeń stojana, co wpływa negatywnie na prace łożysk wału silnika, gdyż nie występuje tu zmniejszenie wartości prądu łożyskowego.

Filtry ograniczające napięcie zaburzeń CM silnika ograniczają jednocześnie prąd doziemny przepływający przez doziemne pojemności pasozytnicze kabla silnikowego. Najkorzystniejsze właściwości ma filtr LC typ DM-CM wg konfiguracji z rys.5, gdyż zapewnia drogę przepływu prądów pasozytniczych poza przewodem ochronnym PE, a tym samym napęd może pracować przy wystąpieniu pojedynczego zwarcia doziemnego.

### 3.2 Fazowe napięcia zasilania przemiennika częstotliwości



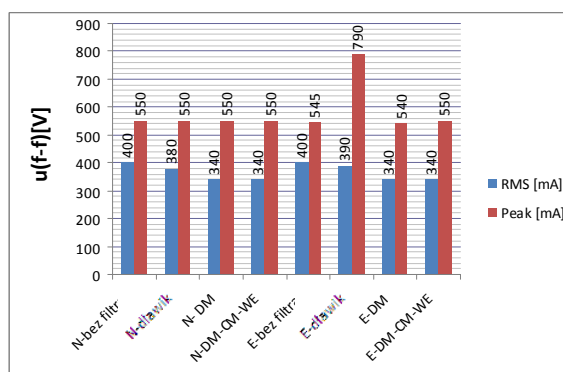
Rys.12. Wykres zależności fazowego napięcia zasilania przemiennika częstotliwości przy dla nieekranowanym (N) i ekranowanym (E) kablu silnikowym (sieć IT - 3x400V/50Hz)

Doziemne pojemności pasozytnicze powodują powstawanie wysokoczęstotliwościowych prądów w instancji ochronnej napędu z przemiennikiem częstotliwości. Duże pojemności doziemne silnikowych kabli ekranowanych powodują, że duża część napięcia zaburzeń wspólnych odkłada się na relatywnie mniejszych pojemnościach doziemnych po stronie zasilania przemiennika częstotliwości. Powoduje to przesuwanie się względem ziemi nieuziemionego punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora. Do napięcia fazowego transformatora dodaje się odwrócone napięcie zaburzeń wspólnych, co zwiększa wartość skuteczną fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości.

Badane pasywne filtry LC typu DM-CM skutecznie ograniczają wartości maksymalne fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości przybliżając ich kształt do przebiegu sinusoidalnego (230V/50Hz), rys.12. Ich stosowanie wydaje się być szczególnie uzasadnione w napędach większych mocy z ekranowanymi kablami silnikowymi.

### 3.3 Napięcie międzyfazowe silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości

Stwierdzono, że istotnym mankamentem stosowania filtrów pasywnych napięcia zaburzeń wspólnych DM i CM jest obniżenie międzyfazowego napięcia zasilania silnika, rys.13. Przy nominalnym obciążeniu silnika następuje obniżenie jego napięcia zasilania o ok. 15%, zarówno przy stosowaniu kabli silnikowych nieekranowanych jak i ekranowanych (rys.13). Aby zminimalizować skutki pracy filtra LC należy dokonać powiększenia tego napięcia poprzez zastosowanie przemodelowania w algorytmie modulacji falownika MSI.



Rys.13. Wykres zależności napięcia międzyfazowego silnika od rodzaju filtra LC dla nieekranowanego (N) i ekranowanego (E) kabla silnikowego.

## 4. WNIOSKI

W artykule porównano wybrane właściwości pasywnych filtrów silnikowych LC stosowanych w napędach z napięciowymi przemiennikami częstotliwości. W szczególności badano skuteczność filtrów LC w górniczych układach zasilania, o układzie sieciowym typu IT. Badano filtr LC do redukcji napięcia zaburzeń różnicowych DM i filtr LC do redukcji napięcia zaburzeń wspólnych CM, które są instalowane między falownikiem napięciowym i silnikiem.

Filtr pasywny LC typ DM-CM włączony w układzie z rys.4 okazał się najkorzystniejszym rozwiązaniem. Stosowanie takiej konfiguracji umożliwi pracę napędu przy pojedynczym zwarciu doziemnym, tak po stronie zasilania jak i silnika.

Badane filtry pasywne LC typu DM-CM skutecznie ograniczają, napięcie zaburzeń wspólnych silnika, prądy pasożytnicze w przewodzie ochronnym PE i odkształcenia fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości.

Istotną cechą niekorzystną filtrów pasywnych LC typ DM-CM jest 15% zmniejszenie międzyfazowego napięcia zasilania silnika niezależnie od jego obciążenia, co w warunkach przemysłowych należy kompensować nadmodulacją falownika MSI.

Autorzy wykorzystali omówione w referacie metody ograniczania wpływu napięcia zaburzeń wspólnych na wartości maksymalne napięć zasilania przemienników częstotliwości dużej mocy (450kW/500V) w stacjach zasilania silników głównych



przenośników taśmowych o regulowanej prędkości taśmy [25]. Zastosowane rozwiązanie wpłynęło na zmniejszenie awaryjności przemienników częstotliwości. Ponadto zwiększyła się niezawodność urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej zainstalowanej w kontenerowej stacji napędowej, w której całkowita moc napędów przekształtnikowych wynosiła blisko 2MVA.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] VON JOUANNE, A. and ENJETI, P. Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual, 1996.
- [2] HUPPUNEN, J. Sine wave filter for PWM inverter driven medium speed solid-rotor induction motors. 1999.
- [3] MACDONALD, D. and GRAY, W. A practical guide to understanding bearing damage related to PWM drives. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1998. Conference Record of 1998 Annual, 1998.
- [4] KEMPSKI, A.; SMOLENSKI, R.; and STRZELECKI, R. Common mode current paths and their modeling in PWM inverter-fed drives. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002.
- [5] CHEN, S.; LIPO, T.; and FITZGERALD, D. Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1996.
- [6] BUSSE, D.; ERDMAN, J.; KERKMAN, R.; SCHLEGEL, D.; and SKIBINSKI, G. The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings 1996., Eleventh Annual, 1996.
- [7] SKIBINSKI, G.; KERKMAN, R.; and SCHLEGEL, D. EMI emissions of modern PWM AC drives. Industry Applications Magazine, IEEE, 1999.
- [8] CHEN, S.; LIPO, T.; and FITZGERALD, D. Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters. Energy Conversion, IEEE Transaction on, 1996.
- [9] AG, S. DE 295 06 951 U, 1995. Deutsches Gebrauchsmuster.
- [10] ZHONG, E. and LIPO, T. Improvements in EMC performance of inverter-fed motor drives. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1995.
- [11] HUPPUNEN, J. and PYRHONEN, J. Filtered PWM-inverter drive for high-speed solid-rotor induction motors. Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, 2000.
- [12] CHEN, X.; XU, D.; LIU, F.; and ZHANG, J. A Novel Inverter-Output Passive Filter for Reducing Both Differential- and Common-Mode  $dv/dt$  at the Motor Terminals in PWM Drive Systems. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2007.
- [13] AKAGI, H. and TAMURA, S. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2006.
- [14] RENDUSARA, D. and ENJETI, P. An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes  $dv/dt$  at the motor terminals in PWM drive systems. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1998.

- [15] SWAMY, M. and KUME, T. Common-mode current attenuation techniques for use with PWM drives. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual, 1999.
- [16] BINDER, A. Abschlussbericht: Elektrische Lagerbeanspruchung bei umrichter gespeisten Maschinen. Tech. rep., TU Darmstadt, 2003.
- [17] KAMPEN, D. and PARSPOUR, N. and BEYER, S. and LAUDAHN, S. Efficiency of Motor Side Common Mode (CM) Filtering Techniques for PWM Inverters. PCIM - Nuremberg, Germany, 2009
- [18] HONGFEI, M. and DIANGUO, X. LIJIE, M. Suppression Techniques of Common-Mode Voltage Generated by Voltage Source PWM Inverter. Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC, IEEE Transactions on, 2004.
- [19] SWAMY, M. and KUME, T. Present state and futuristic vision of motor drive technology. Optimization of Electrical and Electronic Equipment, IEEE Transactions on, 2008. OPTIM 2008.
- [20] SZYMANSKI, J. Stosowanie filtrów EMC w sieciach IT zasilających napędy z napięciowymi przemiennikami częstotliwości (eng. EMC filters usage in IT mines with voltage frequency converters). elektro.info, Nr 12, 2008, www.elektro.info.pl
- [21] Muetze, A. Scaling Issues for Common Mode Chokes to Mitigate Ground Currents in Inverter- Based Drive Systems. IEEE Industrial Applications Society 40th Annual Meeting, Hong Kong, October 2-6, 2005
- [22] MAGNETIC Magnet-Technologie, COOL BLUE, PB-CB, Magnetic GmbH, 2009
- [23] VAC Vacuumschmelze – specification – Item Nr T60405-S6123-X163, 2011
- [24] HELUKABEL, katalog „Kable i przewody 2009/2010”, www.helukabel.pl – 2011
- [25] SZYMANSKI, J. Zgłoszenie patentowe nr P.394803 - Filtr napięcia zaburzeń wspólnych napięciowych elektronicznych przetwornic częstotliwości zasilanych z trójfazowej sieci nieziemionej typu IT, 2011
- [26] RODRIGUEZ-Valdez C.D., Kerkman R.J. Method to detect line-to-ground faults in high-resistance-ground networks. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , Atlanta, GA-USA, 12-16 Sept. 2010