

Zaburzenia napięcia w górniczych systemach zasilania powodowane prądami doziemnymi dużych częstotliwości

W artykule przeanalizowano wpływ napędów z niskonapięciowymi przemiennikami częstotliwości dużej mocy, zasilanymi sieciami nieuziemiającymi, na napięcie zasilania. Prądy bowiem upływu, które płyną poprzez doziemne pojemności pasożytnicze powodują zaburzenia fazowych napięć zasilania. Negatywne skutki prądów upływu wzrastają w przemiennikach dużej mocy z długimi kablami silnikowymi. Wykazano, że stosując pojemnościowy filtr EMC (ang. ElectroMagnetic Capability) na zasilaniu przemiennika częstotliwości można radykalnie zmniejszyć zaburzenia napięć w sieci zasilania.

1. WPROWADZENIE

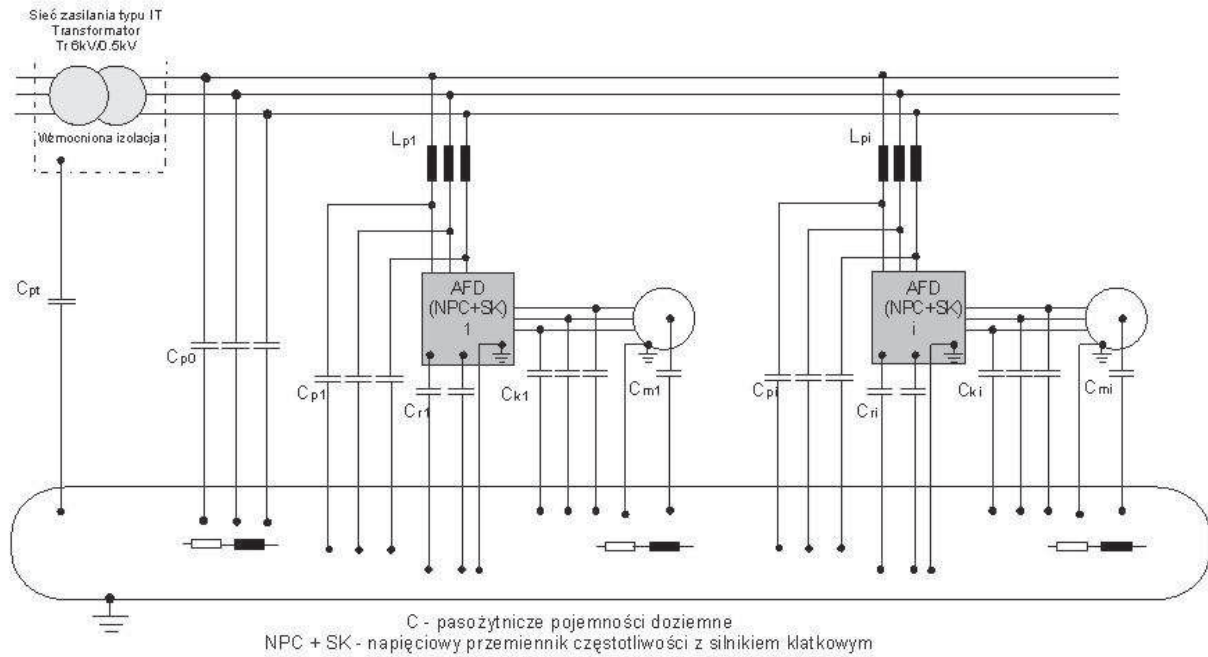
Przedmiotem analizy są zaburzenia doziemne wywołane tzw. napięciem zaburzeń wspólnych. Napięcie to jest skutkiem skokowych zmian impulsów fazowych napięć wyjściowych napięciowych przemienników częstotliwości, gdzie suma napięć fazowych jest różna od zera.

Stosując analizę rozkładu napięcia trójfazowego falownika na składowe symetryczne otrzymuje się składową zerową napięcia różną od zera. Dlatego wysokoczęstotliwościowe prądy doziemne, wywoływane przez napięcia poszczególnych faz oraz napięcie składowej zerowej, znane też w literaturze jako napięcie zaburzeń wspólnych – u_{MC} .

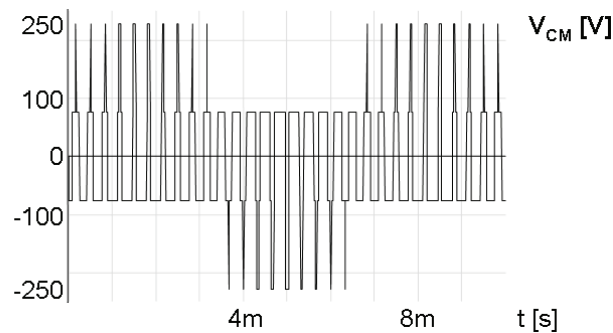
Wielu producentów przemienników częstotliwości nie podaje zaleceń oraz wytycznych odnośnie do sposobu instalowania przemienników częstotliwości w sieciach nieuziemiających lub uziemiających przez podłużną rezystancję (sieci IT). Typowa instalacja z dwoma przemiennikami częstotliwości zasilanymi z jednego transformato-

ra i zaznaczonymi doziemnymi pojemnościami pasożytniczymi jest przedstawiona na rys. 1. W sieciach IT występuje efekt "pływania" punktu neutralnego uzwojenia wtórnego transformatora zasilania, co skutkuje zwiększeniem wartości skutecznych napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości.

W artykule wyjaśniono podstawowe zjawiska związane z występowaniem doziemnych prądów pasożytniczych, które decydują o niezawodności i bezpieczeństwie instalacji z napięciowymi przemiennikami częstotliwości zasilanymi sieciami izolowanymi od ziemi. Dokonano analizy skuteczności zastosowania wejściowego filtra EMC w celu zmniejszania odkształcenia napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości. Zaburzenia w otoczeniu trójfazowego napędu, powodowane szybkimi zmianami napięcia na wyjściach układu falownikowego przemiennika częstotliwości dzielimy na dwa podstawowe rodzaje (wymagające odrębnego wyjaśnienia i innych środków technicznych ich tłumienia): zaburzenia międzyfazowe – różnicowe *DM* (ang. *Differential Mode*) i zaburzenia doziemne – wspólne *CM* (ang. *Common Mode*) [1].



Rys. 1. Napięciowe przemienniki częstotliwości zasilane z sieci IT i główne pojemności pasytywne



Rys. 2. Przebieg wyjściowego napięcia zaburzeń wspólnych V_{CM} przemiennika częstotliwości o harmonicznej podstawowej 50 Hz (modulacja synchroniczna - 60° PWM, $f_p = 3$ kHz)

2. ZABURZENIA RÓŻNICOWE I WSPÓLNE JAKO SKUTEK PRACY NAPIĘCIOWEGO PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

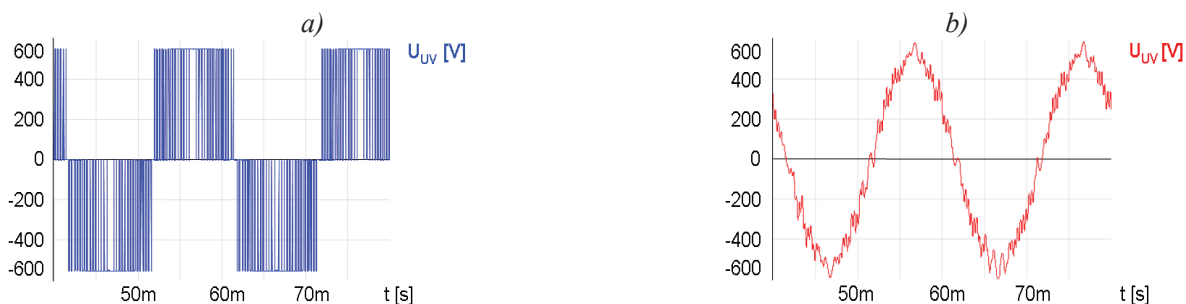
Impulsowe przebiegi napięć fazowych powodują, że ich suma ma wartość chwilową różną od zera i jest to tzw. napięcie zaburzeń wspólnych V_{CM} , które można opisać zależnością (1), (rys. 2). Napięcia: u_u , u_v , u_w , to chwilowe nastawy wyjściowych napięć fazowych przemiennika częstotliwości, stąd:

$$V_{CM} = \frac{u_u + u_v + u_w}{3} \quad (1)$$

Zaburzenia różnicowe, to zaburzenia powodujące odkształcenia napięć międzyfazowych. Prądy po-

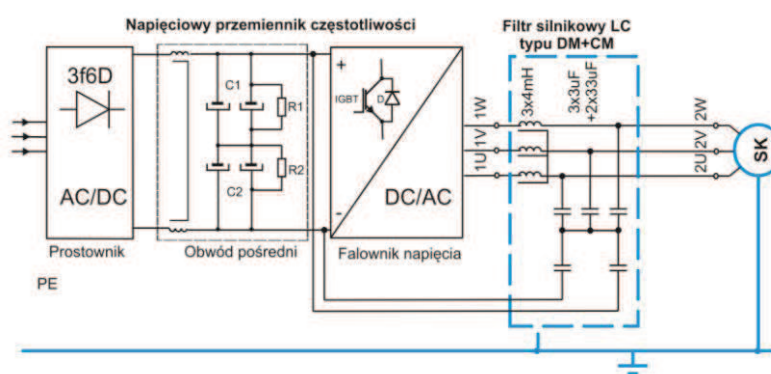
wodowane przez nie przepływają pomiędzy przewodami fazowymi kabla silnikowego napędu a napięciowym przemiennikiem częstotliwości. Odfiltrowanie tego typu zaburzeń powoduje, że wyjściowe impulsowe napięcie międzyfazowe zasilania silnika dołączonego do napięciowego przemiennika częstotliwości będzie miało kształt sinusoidy, jak pokazano to na (rys. 3).

Niezależnie od rodzaju zastosowanej sieci zasilania należy dążyć do uzyskania sinusoidalnego kształtu fazowych napięć zasilających. Wówczas napięcie zaburzeń wspólnych V_{CM} jest równe zero. Szczególnie podczas stosowania sieci zasilania typu IT (dla przemiennikowych napędów dużych mocy) redukcja zaburzeń wspólnych V_{CM} ma podstawowe znaczenie dla bezpiecznej i niezawodnej instalacji napędowej.

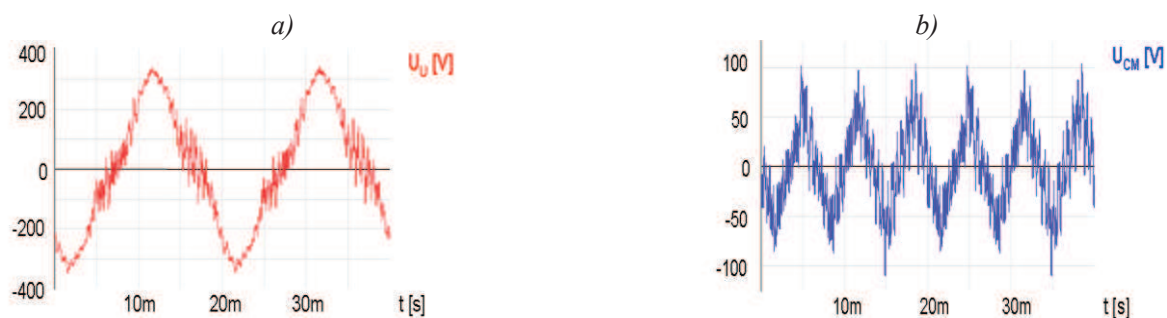


Rys. 3. Przebieg napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości o harmonicznej podstawowej 50 Hz (modulacja synchroniczna - 60° PWM):

a - U_{UV} - impulsy wyjściowego napięcia międzyfazowego przemiennika częstotliwości,
 b - U_{UV} - wyjściowe napięcie międzyfazowe przemiennika częstotliwości po odfiltrowaniu napięcia zaburzeń różnicowych silnikowym filtrem EMC



Rys. 4. Napięciowy przemiennik częstotliwości z dołączonym silnikowym filtrem EMC do filtracji zaburzeń różnicowych i wspólnych



Rys. 5. Napięcia zasilania silnika z przemiennika częstotliwości zasilanego z sieci IT z silnikowym filtrem EMC wg rys. 4:

a - napięcie fazowe U_U ma kształt zbliżony do sinusoidy,
 b - napięcie zaburzeń wspólnych V_{CM} ma chwilowe przyrosty napięcia do ok. 50 V, a amplituda napięcia V_{CM} jest ograniczona do 100 V

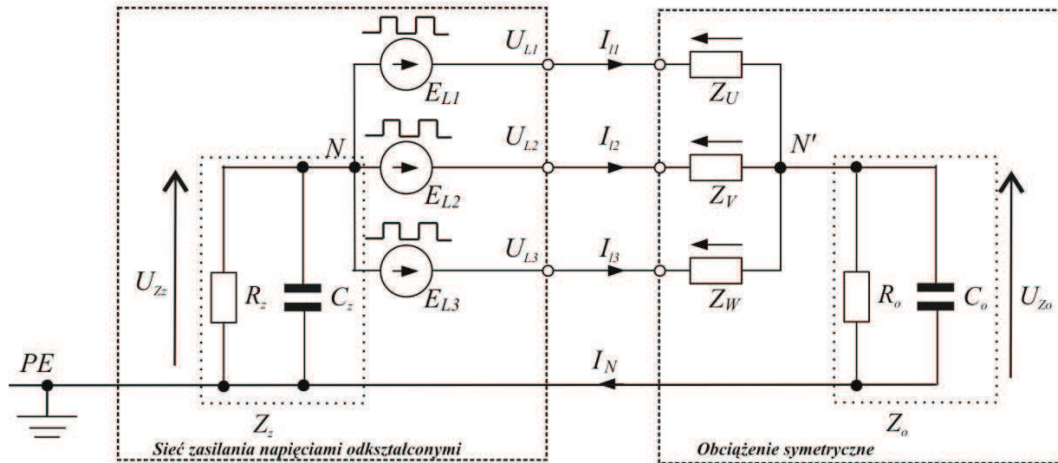
W wielu zastosowaniach z napędami małych mocy należy poważnie rozważyć możliwość zastosowania silnikowego filtra EMC do filtracji zarówno zaburzeń różnicowych, jak i wspólnych, rys. 4. W napędach jednak dużych mocy silnikowe filtry EMC są sporadycznie stosowane, ze względu na duże koszty i rozmiary [4].

Przebieg napięcia fazowego zasilania silnika i napięcia zaburzeń wspólnych po zastosowaniu sil-

nikowego filtra EMC (rys. 3), przedstawiono na rys. 5.

Zastosowanie silnikowego filtra EMC napięcia zaburzeń różnicowych i wspólnych spowodowało jak widać przybliżenie kształtu napięcia fazowego zasilania silnika do sinusoidy.

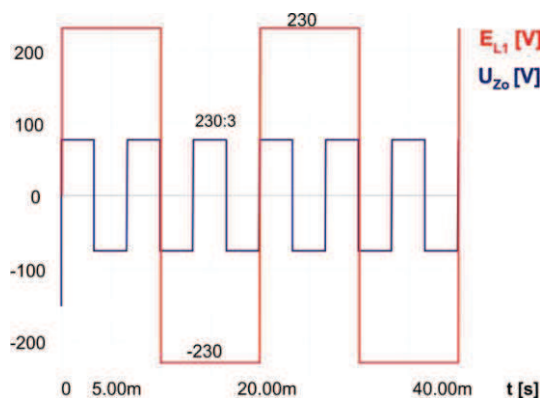
Napięcie zaburzeń wspólnych V_{CM} ma tutaj zmniejszoną amplitudę do wartości ok. 100 V.



Rys. 6. Trójfazowy symetryczny układ zasilania z napięciami odkształconymi

3. SYMETRYCZNE TRÓJFAZOWE NAPIĘCIA ODKSZTAŁCONE W NIEUZIEMIONYM SYSTEMIE ZASILANIA

Układ symetrycznej sieci zasilającej z prostokątnymi napięciami fazowymi przedstawiono na rys. 6. W badaniach symulacyjnych założono, że napięcia fazowe są przebiegami prostokątnymi o współczynniku wypełnienia $\alpha=0,5$, amplitudzie 230 V, częstotliwości $f=3$ kHz i są przesunięte w fazie względem siebie $2/3\pi$. Suma napięć fazowych w takim układzie jest różna od zera i wywołuje przepływ wysokoczęstotliwościowych prądów doziemnych. Przebieg napięcia zaburzeń wspólnych przedstawiono dla przykładu na rys. 7.



Rys. 7. Napięcie zaburzeń wspólnych U_{Z0} trójfazowego symetrycznego układu zasilania z napięciami prostokątnymi

Składowa czynna (R_z) impedancji Z_z (rys. 6) reprezentuje rezystancję izolacji między punktem neutralnym układu zasilania a uziemem, składowa natomiast bierna (pojemnościowa C_z) – całkowitą doziemną

pojemność pasożytniczą pomiędzy punktem neutralnym układu zasilania a uziemem.

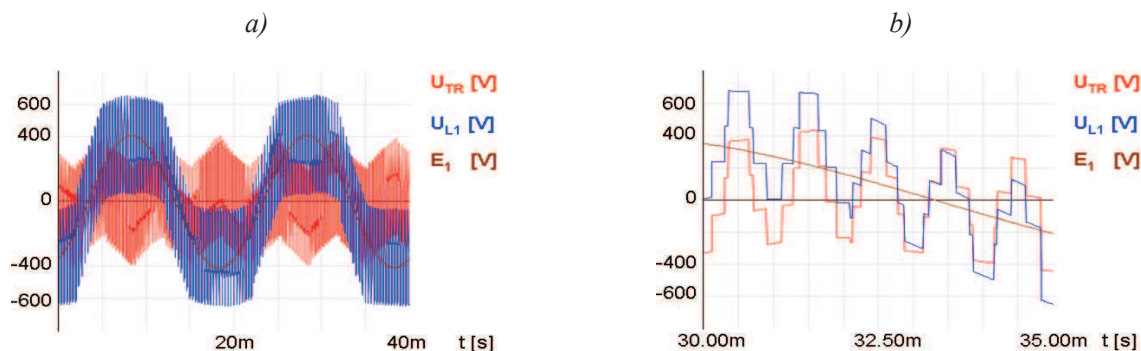
Podobnie impedancja Z_o poprzez swoje składowe reprezentuje odpowiednio rezystancję izolacji i wypadkową doziemną pojemność pasożytniczą odbiornika trójfazowego.

Zakładając zatem dostatecznie duże wartości rezystancji izolacji układu zasilania R_z i obciążenia R_o można ich udział pominąć w dalszych rozważaniach. Napięcie zaburzeń wspólnych U_{Z0} odkłada się wtedy na pojemnościach C_o i C_z . Wzajemna relacja wartości tych pojemności decyduje zatem o możliwości odkształcenia fazowych napięć zasilania. (Dla $C_z \ll C_o$ dochodzą odkształcenia napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości.) Ponieważ punkt neutralny transformatora zasilania jest zmodulowany napięciem zaburzeń wspólnych równym U_{Cz} , stąd napięcia U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} zasilania przemiennika są powiększone o napięcie U_{Cz} .

4. OGRANICZANIE ZABURZEŃ DOZIEMNYCH WEJŚCIOWYM FILTREM EMC PRZEPRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

Zaburzenia doziemne (wspólne) powodują odkształcenie fazowych napięć przemiennika częstotliwości zasilanego z sieci separowanej od ziemi (IT), rys. 8.

Prądy zaburzeń wspólnych mają zamkniętą drogę przepływu dzięki fazowym doziemnym pojemnościom pasożytniczym i płyną w przewodzie ochronnym PE przemiennika częstotliwości. Prądy zaś doziemne wywołane tymi zaburzeniami dążą do zamknięcia obwodu ze stałonapięciowymi szynami zasilania układu falownikowego przemiennika częstotliwości.



Rys. 8. Napięcia przemiennika częstotliwości zasilanego z sieci IT:
 a – napięcie fazowe U_{L1} – ma kształt trapezu i jego amplituda zależy od impulsów napięcia zaburzeń wspólnych
 b – przebiegi z rys. 2a w krótkim przedziale czasu – 5 ms
 (widoczne jest napięcie zaburzeń wspólnych sumujące się z napięciem transformatora zasilającego przemiennik częstotliwości)

U_{TR} – napięcie punktu neutralnego transformatora przesunięte względem ziemi o napięcie zaburzeń wspólnych V_{CM}

U_{L1} – napięcie fazowe zasilania przemiennika częstotliwości przy uwzględnieniu pojemności doziemnych kabla silnikowego i silnika powodujących przepływ prądów o dużych częstotliwościach w otoczeniu napędu,

E_1 – znamionowa wartość napięcia fazowego zasilania napięciowego przemiennika częstotliwości

Droga przepływu tych zaburzeń prowadzi poprzez doziemne pojemności pasozytnicze, na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości z sieci IT. Stosowanie zatem filtrów EMC, dostosowanych do tłumienia wpływu napięcia zaburzeń wspólnych V_{CM} , może mocno zminimalizować wpływ tego napięcia na odkształcenia napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości w sieci IT.

Odkształcenia napięć fazowych zwiększają się wraz ze wzrostem doziemnych pojemności pasozytniczych kabla silnikowego i silnika. Minimalizowanie oddziaływania napięcia zaburzeń wspólnych ma podstawowy wpływ na zapewnienie sinusoidalnego kształtu napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości. Zastosowanie zatem odpowiedniego wejściowego filtra EMC spowoduje, że nie nastąpi zwiększenie wartości skutecznej napięć fazowych w stosunku do wartości nominalnej i ich kształt będzie sinusoidalny.

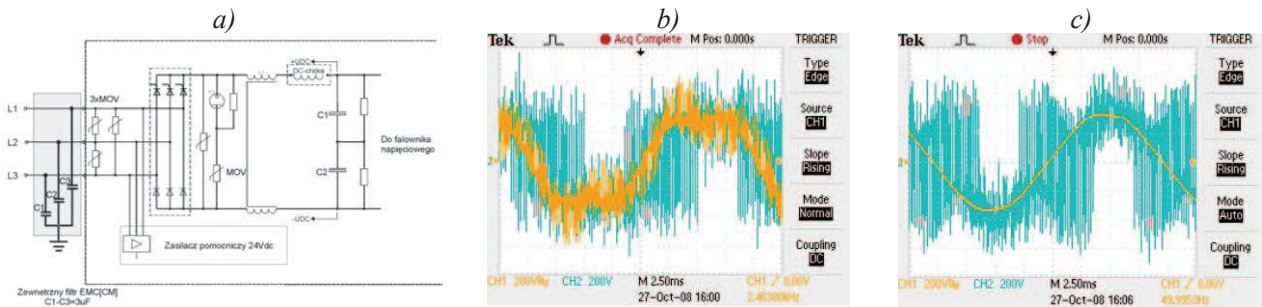
Eliminowanie zaburzeń wywoływanych napięciami różnicowymi (DM) i napięciami zaburzeń wspólnych (CM) ma decydujący wpływ na zwiększenie niezawodności pracy napędu.

Jeśli bowiem nie jest stosowany silnikowy filtr EMC napięcia zaburzeń wspólnych i różnicowych (rys. 4), a przemiennik częstotliwości jest zasilany z sieci nieuziemionej IT, to należy zastosować wejściowy pojemnościowy filtr EMC, tak aby nie zwiększać wartości skutecznej napięć fazowych zasilania przemiennika częstotliwości.

W warunkach zastosowania filtra wejściowego EMC należy zabezpieczyć przemiennik częstotliwości przed uszkodzeniem przy pracy awaryjnej, podczas zwarcia doziemnego, w silniku. Przy wystąpieniu bowiem zwarcia doziemnego na jednej z faz uzwojenia wirnika w silniku, może dojść do niekontrolowanego wzrostu napięcia w obwodzie DC przemiennika częstotliwości. Odpowiednie zabezpieczenie można zrealizować poprzez zastosowanie dodatkowego układu rozładowania obwodu DC przemiennika stosując przerywacz prądu z rezystorem rozładowczym.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie wejściowego filtra EMC (rys. 9a) nie jest działaniem kosztownym i jest szczególnie istotne w napędach większych mocy o długich ekranowanych kablach silnikowych. Duże pojemności upływu doziemnego między żyłami kabla i uzziemionego/zbrojonego ekranu oraz prądy doziemne silnika powodują bowiem znaczny wzrost wartości fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości, co skutkuje zwiększoną awaryjnością przemiennika częstotliwości [2,3,5]. W sieciach zasilania IT pomiar fazowych napięć zasilania przemiennika częstotliwości ma więc podstawowe znaczenie diagnostyczne.



Rys. 9. Obwód wejściowy napięciowego przemiennika częstotliwości z wejściowym filtrem EMC do filtracji zaburzeń doziemnych:

- a – obwód wejściowy przemiennika częstotliwości z zewnętrznym pojemnościowym filtrem EMC napięcia składowej wspólnej zaburzeń VCM,
 b – zniekształcone napięcie fazowe zasilania przemiennika częstotliwości UL1 (żółty kolor) przy wyłączonym filtrze EMC (kształt trapezu). Wyjściowe napięcie fazowe przemiennika częstotliwości (kolor niebieski) z dużymi przepięciami jest źródłem napięcia zaburzeń wspólnych,
 c – odfiltrowane przepięcia z napięcia fazowego zasilania przemiennika częstotliwości UL1 (żółty kolor), przez filtr wejściowy EMC. Fazowe napięcie zasilania przemiennika ma kształt sinusoidy

Stosowanie pojemnościowych, uziemionych, filtrów EMC pociąga za sobą konieczność stosowania izometru monitorującego stan izolacji zasilania z uwzględnieniem pojemności pomiędzy kablami sieciowymi i uziomem. Obecnie są już produkowane tego typu izometry współpracujące z siecią zasilania IT o pojemności doziemnej do 500 μF [6].

Literatura

1. J. Adabi, F. Zare, G. Ledwich, A. Ghosh: Leakage Current and Common Mode Voltage Issues in Modern AC Drive Systems, Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2007. Australasian, 2007.
2. S., S.; Pairodamonchai, P.; Sangwongwanich, S.; Sukhapap, C.; Tearwattanaratikal, W.: Destruction by Charge Current and Its Solution for PWM Inverter Feeding Multiple Motors Through Long Cables. Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record, 2005.
3. Szymański J.: High-Frequency Leakage Currents in Medium Power Adjustable Speed Drives supplied from IT Mains. Elektrotechnical Review Nr 10, 2007.
4. Szymański 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
5. R., M. Tallam, D., W. Schlegel, F., L. Hoadley: Failure Mode for AC Drives on High Resistance Grounded Systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition, Twenty-First Annual IEEE, Dallas, TX. 19-23 March 2006.
6. Technical documentation of IRDH375 firm BENDER, 2008.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński

VOLTAGE DISTURBANCES IN MINING POWER SUPPLY SYSTEMS CAUSED BY HIGH-FREQUENCY EARTH CURRENTS

The article features an analysis of the impact of drives with low-voltage high-power frequency converters, powered by non-grounded networks, on voltage supply. The leakage currents which flow through earth parasitic capacities cause disturbances of phase voltage supply. Negative impact of leakage currents increases in high-power converters with long engine cables. It was demonstrated that using an EMC capacity filter on the frequency converter supply it is possible to significantly diminish voltage disturbances in a power supply network.

НАРУШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ГОРНЫХ СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ ВЫЗВАНЫ ТОКАМИ НА ЗЕМЛЮ БОЛЬШИХ ЧАСТОТ

В статье проанализировано влияние приводов с преобразователями частоты низкого напряжения большой мощности, питаемыми сетями без заземления, на напряжение питания. Токи утечки, проходящие через паразитические объемы на землю вызывают нарушения фазовых напряжений питания. Негативные результаты токов утечки увеличиваются в преобразователях больших мощностей с длинными двигательными кабелями. Доказано, что применяя объемный фильтр EMC (анг. ElectroMagnetic Capability) на блоке питания преобразователя частоты можно радикально сократить нарушения напряжений в сети питания.