

Marek Trajdos, T-System Projekt Sp. z o.o., Łódź
Robert Pastuszka, HELUKABEL Polska Sp. z o.o., Poznań

JAKIE KABLE LUBIĄ FALOWNIKI

WHAT KIND OF CABLES ARE INVERTERS FAVORITS

Abstract: In system included frequency converter motor cables, are main source of electromagnetic interference for whole automatic system. Secure of proper operation of the automatic system is conditional on use suitable motor cable. Used cable has to be characterised by electromagnetic compatibility and noise immunity, specified in catalogue. The cable construction is not enough to receive satisfactory level of electromagnetic interference emission. A lot important is proper method of fitting the cable, especially the cable screen to the ground connection. Except the electromagnetic interference we can find other disadvantageous effects during power supply of motors using electric power converters.

1. Wstęp

Wszystkie współczesne przekształtniki prądu przemiennego pracują w oparciu o zasadę modulacji szerokości impulsu (PWM). Powyższe warunkuje występowanie w widmie harmonicznych napięcia zasilającego silnik poza pierwszą harmoniczną o regulowanej częstotliwości (zwykle w zakresie 0-60 Hz) pasm wyższych harmonicznych będących wielokrotnością podstawowej częstotliwości modulacji, która jest z reguły jednym z nastawianych parametrów konfiguracyjnych falownika.

Przykładowo dla przekształtników z rodziny Master Drives VC nastawa fabryczna wynosi 2,5 kHz, choć użytkownik może ją zmienić pozostając w zakresie od 1,5 do 16,0 kHz.



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka przedstawiająca przykładowe możliwości modulatora PWM.

W zależności od wielkości urządzenia dany przedział dopuszczalnej zmienności częstotliwości impulsowania zmienia się w sposób uwidoczniony na rys.1.

2. Konstrukcja kabli do falowników, pojemności pasozytnicze

Każdy kabel będący układem jednej lub wielu żył przewodzących w ewentualnym ekranie (również przewodzącym) charakteryzuje własna indukcyjność oraz pojemność pasozytnicza. Pojemność wynika z istnienia elementów przewodzących oddzielonych izolatorem, pomiędzy którymi występuje różnica potencjałów. Impedancja w przypadku pojemności jest określona następującym wzorem:

$$Z_c = 1/2\pi f_i C_\delta L \quad (1)$$

Gdzie: f_i - częstotliwość impulsowania

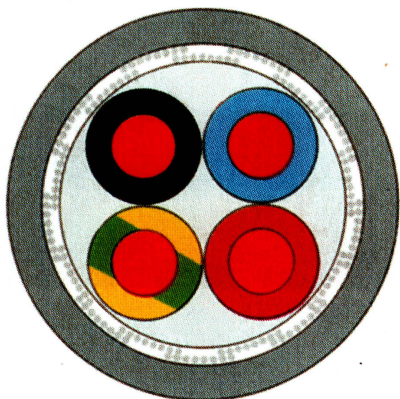
C_δ - całkowita (wypadkowa) pasozytnicza pojemność jednostki długości kabla

L - długość kabla łączącego wyjście falownika z silnikiem

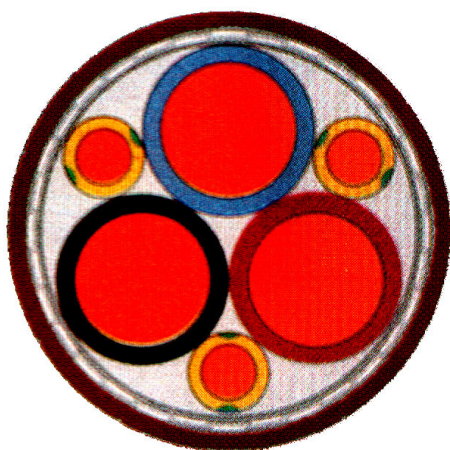
Widać zatem, że impedancja maleje wraz ze wzrostem zaprogramowanej częstotliwości impulsów, pojemności właściwej kabla (będącej jego parametrem konstrukcyjnym) oraz długości przewodów zasilających silnik.

Im mniejsza jest wartość wypadkowej impedancji pojemnościowej układu przewodów zasilających silnik, tym większy jest prąd płynący przez pojemności pasozytnicze. Wartość tego prądu sumuje się z właściwym obciążeniem przekształtnika, co w krytycznym przypadku prowadzi do konieczności przewymiarowania falownika w aplikacjach z bardzo długimi kablami.

a)



b)



Rys. 2. Widok kabli trzy-(a) i czterżyłowych (b)

Producenci przekształtników niekiedy podają proponowane dopuszczalne długości kabli ekranowanych oraz nie ekranowanych, lecz z natury rzeczy są to dane bardzo szacunkowe, ponieważ w zasadzie nie wiadomo o jakiego producenta kabla chodzi. Przy czym większość producentów nie prowadzi nawet badań takich parametrów jak pojemność własna kabli dla swoich wyrobów.

Na uwagę zasługuje tu „jawność” wartości pojemności właściwej kabla zdefiniowana w [nF/km], której wartość zmienia się oczywiście w zależności od przekroju żyły w granicach:

- od 70 (4x1,5 mm²) do 250 (4x95 mm²) nF/km – wartość między żyłami
- od 110 (4x1,5 mm²) do 410 (4x95 mm²) nF/km – wartość między żyłą a ekranem.

Dla wyższych przekrojów wartość pojemności już znacząco nie wzrasta.

Biorąc pod uwagę, że powyższe kable są wykonywane jako czterożyłowe (rys.2.a) należy przy obliczaniu pojemności wypadkowej uwzględnić, że na jednostkę długości kabla składa się sześć połączonych równolegle kondensatorów międzyżyłowych oraz cztery zastępcze kondensatory typu żyła/ekran. Pamiętając, że dla połączenia równoległego kondensatorów ich pojemność sumuje się, należy całkowitą pojemność zastępczą obliczać ze wzoru:

$$C_{\delta} = 6C_z + 4C_e \quad (2)$$

gdzie: C_z – pojemność między żyłami

C_e – pojemność między żyłą a ekranem

Tak więc przykładowo wypadkowa właściwa pojemność pasożytnicza dla kabla 4x16 mm² wyniesie 1760 nF/km.

Dla kabla ekranowanego nowej generacji (rys.2.b) o przekroju żyły czynnej 16 mm² pełna zastępcza pojemność pasożytnicza wynosi (według danych producenta) 210 nF/km!

Natomiast obliczenie wartości prądu płynącego w wyniku występowania zjawiska upływu przez pojemności pasożytnicze można wykonać w oparciu o następujące przykładowe założenia:

- wartość skuteczna harmonicznej zgodnej z częstotliwością modulacji 2,5 kHz wynosi 15% wartości pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego 400V, czyli 0,15x400=60V,
- napięcie skuteczne powyższej harmonicznej pomiędzy żyłami wynosi zatem 60V, natomiast dla układów sieci z uziemionym punktem zerowym transformatora (nie IT) 0,5x60V=30V,
- sumaryczny upływ prądu między żyłami wynosi dla kabla 4x16 mm² o długości 100 m:

$$I = U / Z_z + U / 2 Z_e \quad (3)$$

$$I = 60V / 758,27\Omega + 30V / 692,33\Omega = 0,12A \quad (4)$$

$$Z_z = 1 / 2\pi f_i 6C_z L = 758,27 \Omega \quad (5)$$

$$Z_e = 1 / 2\pi f_i 4C_e L = 692,33 \Omega \quad (6)$$

Jak widać powyżej już sama część upływu do ekranu (0,04A) będzie powodować błędne działania wyłącznika różnicowo-prądowego o znamionowym prądzie wyzwolenia $\Delta I_n=30$ mA. Oczywiście w celu wykonania pełnych obliczeń należy wziąć pod uwagę również dalsze harmoniczne częstotliwości impulsowania.

3. Kompatybilność elektromagnetyczna

Drugim istotnym aspektem zastosowania właściwych kabli jest potrzeba spełnienia wymogów kompatybilności elektromagnetycznej. Produkuje się obecnie kable wyposażone w podwójny (złożony) ekran, składający się z wewnętrznej warstwy foliowej oraz zewnętrznego opłotu elastycznego zapewniających „szczelność elektromagnetyczną” porównywalną z kablami sygnałowymi. Należy w tym miejscu podkreślić, że kable z pojedynczym ekranem oraz tzw. kable opancerzone nie spełniają w pełni wymogów kompatybilności elektromagnetycznej.



Rys. 3. Dławiki do kabli ekranowanych

Nie spełniają jej również nawet najdoskonalsze kable, których ekran nie został obustronnie (na obu końcach) uziemiony, najlepiej na całym obwodzie opłotu. W praktyce osiąga się to np. specjalnymi dławikami z kontaktem dla ekranu (rys.3).

4. Izolacja kabli do zasilania przekształtnikowego

Rozpatrując parametry izolacji kabla do zasilania przekształtnikowego należy rozpatrzeć dwa aspekty: odporności napięciowej na przebicie oraz odporności na stromość narastania napięcia (du/dt). Warunki napięciowe, którym jest poddawana izolacja kabla znacznie różnią się od typowych warunków obwodów sinusoidal-

nych. Wynika to z faktu zasilania silnika napięciowym przebiegiem prostokątnym o amplitudzie impulsów wynikającej z wartości napięcia w obwodzie pośrednim przekształtnika oraz stromości zboczy wynikającej z czasu przełączania kluczy tranzystorowych falownika. Wobec powyższego wytrzymałość izolacji kabla przy zasilaniu przekształtnika napięciem np. 3x400V AC powinien być stosowany kabel o podwyższonych parametrach odporności napięciowej 600 V (a nie 400 V jak zwykle) oraz o zwiększonej do ok. 10.000 V/ μ s wytrzymałości stromościowej. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt iż, jak wcześniej wspomniano częstotliwość impulsowania typowo wynosi 2,5 kHz, czyli w ciągu sekundy 2,5 tysiąca razy izolacja jest poddawana stresowi stromościowemu.

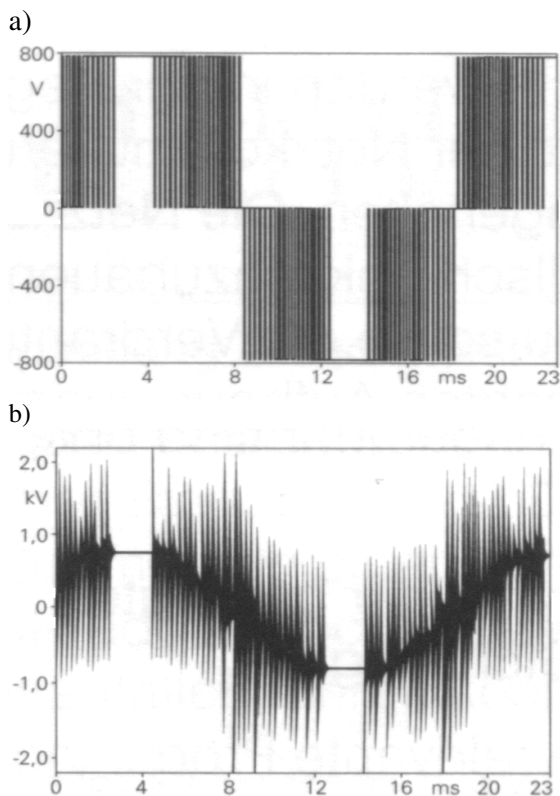
Ponadto na długości kabla zasilającego silnik, ze względu na podwyższoną częstotliwość impulsów PWM oraz ich prostokątny kształt (który stanowi swoisty generator wyższych harmonicznych, liczonych względem nośnej, czyli 2,5 kHz) w obecności pasożytniczych indukcyjności i pojemności ujawniają się zjawiska falowe. Owocuje to jak widać na rysunku nr 4, stopniowym wzrostem amplitudy impulsów PWM wzdłuż kabla licząc od przekształtnika.

W przebiegu widocznym na oscylogramie (rys.4.b) można zaobserwować zwiększoną amplitudę napięcia, co jest wynikiem nałożenia się na przebieg a) napięciowych drgań gasnących będących wynikiem występowania zjawisk falowych.

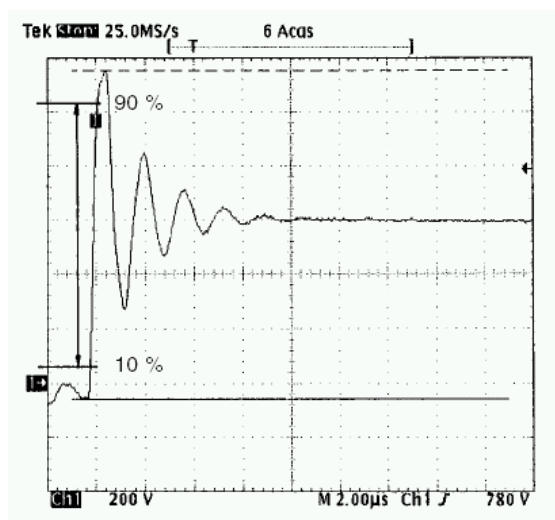
Maksymalnie chwilowe wartości napięć mogą osiągać wartości do:

$$U_{mx\ chwil} = 1,9 U_{DC} = 2,6 U_{sk\ zas} \quad (7)$$

Co dla przykładu zilustrowanego na rys. 4. dla napięcia zasilania $U_{sk\ zas}=575$ V AC daje wartość $U_{DC} = 800$ V DC, a w konsekwencji maksymalne chwilowe napięcie $U_{mx\ chwil} = 1520$ V. Jak wykazuje praktyka sporadyczne wartości mogą w tym przypadku sięgać nawet 1840 V.



Rys. 4. Oscylogramy napięcia wyjściowego falownika PWM: a) na zaciskach wyjściowych falownika, b) na zaciskach silnika.



Rys.5. Przykładowy oscylogram czoła impulsu PWM na zaciskach silnika (stromość napięcia $dU/dt=1/0,136 [kV/s]=7,35 [kV/s]$)

Chcąc dogłębnie przeanalizować zagadnienie należy zdać sobie dodatkowo sprawę z faktu, że:

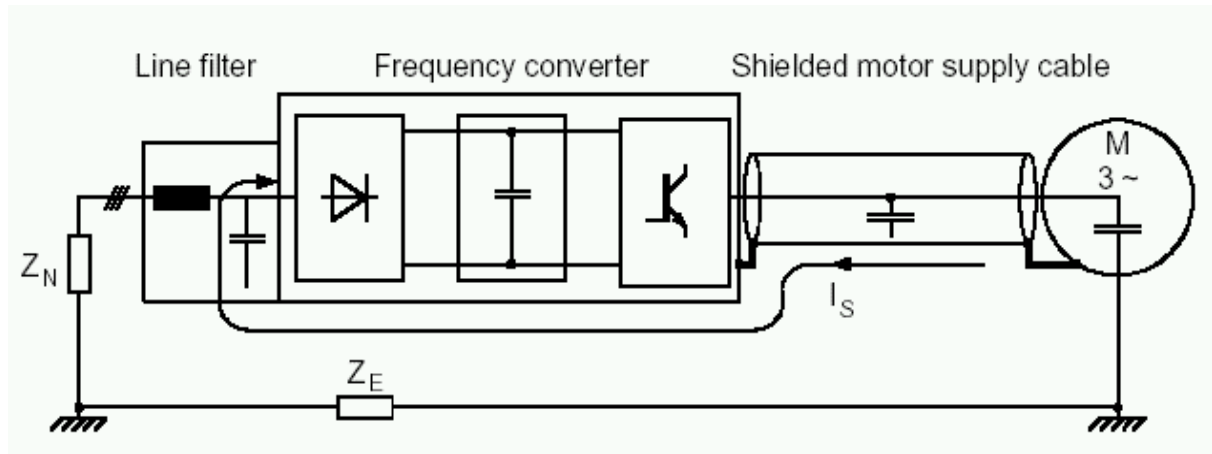
- jak wyżej wspomniano w wyniku oddziaływań falowych kabla pojawiają się drgania gasnące napięcia o częstotliwości wyższej od nośnej przebiegu PWM (rys.5), czyli faktycznie liczba zboczy napięciowych następujących po każdym narastającym zboczu impulsu wynikającym z modulacji wzrośnie wielokrotnie,
- będą wzrastać skoki napięcia przy niezmiennym stromości, co również pogorszy warunki pracy izolacji, ponieważ należy się spodziewać dla przykładu z rysunku 4. stromości nawet do $1840 V / 0,1 \mu s = 18.400 V/\mu s$,
- biorąc pod uwagę prędkość rozchodzenia się sygnału w kablu należy oczekiwać iż **opisane wyżej zjawiska falowe powinny zacząć występować już przy długości połączenia na poziomie 15 m!**

Z powyższymi problemami można i należy walczyć nie tylko za pomocą właściwego doboru kabli oraz izolacji silnika, lecz również za pomocą filtrów wyjściowych. Zasada działania filtra wyjściowego jest analogiczna do filtra RFI i wprowadza do układu napędowego ograniczenie przepływu pasożytniczego przez kabel i silnik.

Warto również podać przy okazji informację, że izolacja silnika (który przecież też jest narażony na skutek opisanych zjawisk) powinna być specjalna. Powinno się tutaj stosować izolację klasy F. Przy czym niektórzy producenci maszyn opracowali już systemy izolacyjne o wyższych parametrach.

5. Żyły robocze

Ostatnim aspektem do analizy jest zalecana budowa samych żył przewodzących kabla. Powinny być one wykonane z wysokogatunkowej (czystej) miedzi oraz należy używać linki, a nie drutu. Użycie linki jest przy tym uzasadnione głównie względami mechanicznymi i przeciwdziała przenoszeniu się drgań z silnika na szafę sterującą. Typową konstrukcją kabla jest układ czterech żył (3 fazy+PE) w ekranie lub dla najnowszej generacji sześciu żył (3 fazy + 3xPE) o różniących się przekrojach (Rys.2.b). Stosowane są przekroje z szeregu typowego dla innych kabli siłowych.



Rys.6. Zasada współpracy kabla ekranowanego i filtra sieciowego RFI w układzie sieci TN. Na rysunku pokazano drogę przepływu pasożytniczego

Autorzy

Marek Trajdos
 T-System Projekt Sp.zo.o.
 Ul. Narutowicza 120/1
 90-145 Łódź
 tel 042 /6780263
 tel 042 /6780266
 fax 042/ 6785111
<http://www.t-system.com.pl/projekt>
 e-mail:projekt@t-system.com.pl

Robert Pastuszka
 Helukabel Polska Sp. z o.o.
 tel 046 8580100
 tel 046 8580111
 fax 046/858 0117
www.helukabel.pl
 e-mail: biuro@helukabel.pl