

Marek Trajdos, T-System Projekt Sp. z o.o., Łódź

Robert Pastuszka, Ireneusz Sosnowski, Helukabel Polska Sp. z o.o., Poznań

ZNACZENIE POJEMNOŚCI KABLA W UKŁADACH ZASILAJĄCYCH SILNIKI INDUKCYJNE ZA POŚREDNICTWEM PRZEKSZTAŁTNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

IMPORTANCE OF CABLE'S CAPACITY IN MOTOR - FREQUENCY CONVERTER CONFIGURATION

Abstract: The paper shows the influence of capacity of motor cables on proper functioning of system included frequency converter. It shows the methods of reduction of cables capacity and results of using a cables about incorrect parameters. It shows also all the conditions which has to be comply by the cables functioning of system included frequency converter.

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 nastawiana jednym z parametrów konfiguracyjnych falownika. Z reguły nastawa fabryczna wynosi od 2,5 do 4,5 kHz, ale użytkownik może zmieniać tę częstotliwość w zakresie nawet do 16 kHz.



Rys.1. Przykładowa charakterystyka przedstawiająca możliwości modulatora PWM. [1]

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

2. Pojemność jako wartość wynikająca z geometrii i zastosowanych materiałów

Każdy kabel będący układem jednej lub wielu żył przewodzących, ewentualnie umieszczonych w przewodzącym ekranie, charakteryzuje własna indukcyjność oraz pojemność. Pojemność wynika z istnienia elementów przewodzących, na których można zgromadzić ładunek, oddzielonych izolatorem, pomiędzy którymi występuje różnica potencjałów, czyli napięcie. Na wielkość pojemności wpływa zarówno rodzaj wprowadzonego pomiędzy elementy przewodzące izolatora, jak i geometria całego układu.

W przypadku kondensatora płaskiego, czyli najprostszego do analizy układu, pojemność jest określona wzorem [2]:

$$C_p = \frac{\epsilon_w \epsilon_0 S}{d} \quad (1)$$

gdzie:

C_p – pojemność kondensatora płaskiego

ϵ_w – przenikalność dielektryczna względna

ϵ_0 – przenikalność dielektryczna próżni
($8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m.)

S – pole powierzchni elektrod

d – odległość pomiędzy elektrodami

Przy układzie walcowym, który bardziej trafnie odzwierciedla budowę kabla, sposób obliczania pojemności jest podobny i wyraża się wzorem:

$$C_w = \frac{2\pi\epsilon_w\epsilon_0 L}{\ln \frac{R}{r}} \quad (2)$$

gdzie:

C_w - pojemność w układzie walców współosiowych

ϵ_w - przenikalność dielektryczna względna

ϵ_0 - przenikalność dielektryczna bezwzględna ($8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m.)

L - długość układu [m]

r - promień walca wewnętrznego (żyły)

R - promień walca zewnętrznego (ekranu)

W przypadku układu płaskiego oraz układu walcowego widać, że pojemność zależy jedynie od geometrii układu i własności dielektrycznych materiału izolacyjnego. Jedynie zmiana tych dwóch parametrów wpływa na zmianę pojemności kabla i daje możliwość jej obniżenia. Własnością materiału izolacyjnego która wpływa na pojemność układu jest przenikalność dielektryczna względna ϵ_w . Wielkość ta wskazuje ile razy wzrasta pojemność kondensatora po wstawieniu między okładki dielektryku w stosunku do kondensatora próżniowego o takiej samej geometrii. Wartość ϵ_w zmienia się dla różnych materiałów w dość szerokich granicach w zależności od natury dielektryka, ale zawsze $\epsilon_w > 1$ [2]. Dla materiału najczęściej stosowanego na izolację kabli, czyli polichlorku winylu (PVC) ma ona wartość z zakresu od 4 do 8. Przy produkcji kabli o obniżonej pojemności do zastosowań specjalnych stosuje się jako materiał izolacyjny polietylen (PE). Większość własności pozaelektrycznych (np. temperatury pracy kabla) nie ulega zmianie w stosunku do kabli izolowanych PVC, natomiast zaletą PE jest jego niska w stosunku do PVC przenikalność dielektryczna, która wynosi 2,3 i pozostaje taka sama bez względu na to czy jest to polietylen otrzymywany metodą wysokociśnieniową, czy niskociśnieniową [3,4]. Oznacza to, że pojemność kabla izolowanego polietylenem jest co najmniej 1,74 razy niższa od kabla izolowanego PVC o takiej samej geometrii. Kolejną zaletą stosowania PE jako izolacji kabla jest niższy współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ [3]. Nie ma to zbyt dużego znaczenia przy kablach o napięciu pracy do 1kV, jednak może być zauważalne w przypadku kabli średniego napięcia (np. przeznaczonych do zasilania silników o napięciu pracy powyżej 1kV)

Ponieważ kable do przekształtników są kablami ekranowanymi w kablu takim zawsze wystąpią

dwa rodzaje pojemności: pomiędzy żyłami roboczymi i pomiędzy żyłami a ekranem.

Producenci kabli specjalistycznych przeznaczonych do współpracy z silnikiem indukcyjnym i przekształtnikiem podają wśród parametrów wartości pojemności właściwej zdefiniowanej np. w [nF/km]. Wartość tej pojemności zmienia się oczywiście w zależności od przekroju żyły i zawiera się w granicach:

- od 70 ($4 \times 1,5 \text{ mm}^2$) do 250 ($4 \times 95 \text{ mm}^2$) nF/km – wartość między żyłami
- od 110 ($4 \times 1,5 \text{ mm}^2$) do 410 ($4 \times 95 \text{ mm}^2$) nF/km – wartość między żyłą a ekranem.

Dla wyższych przekrojów wartość już znacząco nie wzrasta [5,6].

3. Zjawiska związane z pojemnością kabla

W przypadku występowania pojemności można wyznaczyć wartość impedancji pojemnościowej, która jest zależna od pojemności oraz częstotliwości impulsowania, jest ona określona następującym wzorem:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f_i C_\delta L} \quad (3)$$

gdzie:

f_i - częstotliwość impulsowania

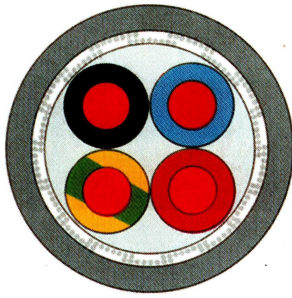
C_δ - całkowita (wypadkowa) pasożytnicza pojemność jednostki długości kabla

L - długość kabla łączącego falownik z silnikiem

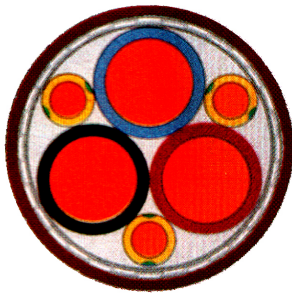
Widać zatem, że impedancja maleje wraz ze wzrostem zaprogramowanej częstotliwości impulsów, pojemności właściwej kabla (będącej jego parametrem konstrukcyjnym) oraz długości przewodów zasilających silnik.

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

a)



b)



Rys.2. Przekroje kabli przeznaczonych do połączenia silnika z przekształtnikiem: TOPFLEX-EMV (a) i TOPFLEX-EMV-3PLUS (b) [5,6]

Producenci przekształtników niekiedy podają proponowane dopuszczalne długości kabli, lecz z natury rzeczy są to dane bardzo szacunkowe, ponieważ nie jest określony konkretny producent kabli. Jednocześnie większość producentów nie prowadzi nawet badań takich parametrów jak pojemność właściwa dla swoich wyrobów. W wypadku przekształtników rodziny Master Drives VC podaje się, że możliwe jest zwiększenie do 150% dopuszczalnej długości kabli zasilających silnika przy zastosowaniu przewodów specjalnych. Biorąc pod uwagę, że kable są zazwyczaj 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 sumujemy, możemy obliczyć wypadkową pojemność kabla uwzględniającą wszystkie pojemności pasożytnicze

$$C\delta = 6C_z + 4C_e \quad (4)$$

gdzie: C_z – pojemność między żyłami

C_e – pojemność między żyłą a ekranem

Tak więc przykładowo wypadkowa właściwa pojemność pasożytnicza dla kabla $4 \times 16 \text{ mm}^2$, którego pojemność pomiędzy żyłami wynosi 140 nF/km a pojemność żyła ekran wynosi 230 nF/km [6], pojemność wypadkowa wyniesie 1760 nF/km .

Pojemności te mają jeszcze mniejsze wartości dla kabli ekranowanych o konstrukcji symetrycznej 3 plus (rys. 2b)

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 impulsowania $2,5 \text{ kHz}$ wynosi 15% wartości pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego 400 V , czyli $0,15 \times 400 = 60 \text{ V}$.
- napięcie skuteczne powyższej harmonicznej pomiędzy żyłami wynosi zatem 60 V , natomiast dla układów sieci z uziemionym punktem zerowym transformatora (nie IT) $0,5 \times 60 \text{ V} = 30 \text{ V}$.
- zatem sumaryczny upływ prądu między żyłami wynosi dla kabla $4 \times 16 \text{ mm}^2$ o długości 100 m :

$$I = U / Z_z + U / 2 Z_e \quad (5)$$

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

$$Z_z = 1 / 2\pi f_i 6 C_z L = 758,27 \Omega \quad (7)$$

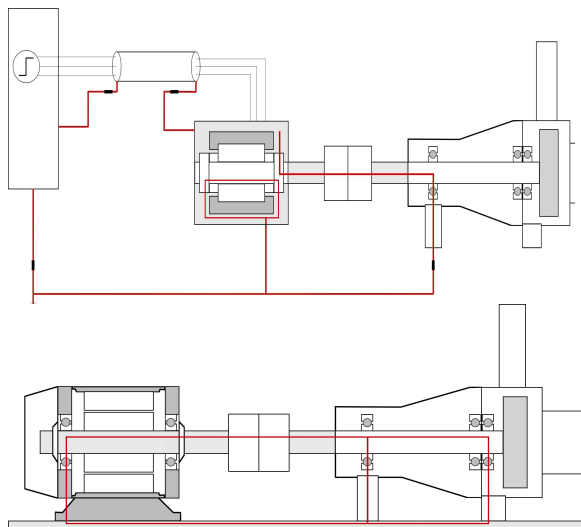
$$I = 60 \text{ V} / 758,27 \Omega + 30 \text{ V} / 692,33 \Omega = 0,12 \text{ A} \quad (8)$$

Jak widać powyżej, już sam prąd upływu do ekranu wynosi 40 mA , wystarcza więc do zadziałania wyłącznika różnicowo-prądowego o znamionowym prądzie wyzwolenia $\Delta I_n = 30 \text{ mA}$. Oczywiście w celu wykonania pełnych obliczeń należy wziąć pod uwagę również dalsze harmoniczne częstotliwości impulsowania, jednak uwzględnienie ich wpłynie jedynie na podwyższenie wyników obliczeń prądu upływu.

W przypadku zastosowania kabla w izolacji PVC wartości pojemności pasożytniczych kabla (przy zachowaniu jego geometrii) wzrosły by o co najmniej 1,74 raza i ich suma wyniosłaby w najlepszym przypadku $C\delta = 3062 \text{ nF/km}$. W tej sytuacji wartość całkowita prądu płynącego przez pojemności pasożytnicze wyniesie ok. 210 mA , a sama wartość prądu ekranowego wyniesie ok. 75 mA . Podobnie wzrost innych parametrów, takich jak długość kabla zasilającego silnik, czy częstotliwość f_i , spowoduje dalszy

wzrost prądów pasożytniczych, które wpływają na obciążenie falownika.

Należy w tym miejscu zwrócić szczególną uwagę na szkodliwość prądu ekranowego, którego wzrost powoduje również wzrost prądu płynącego przez łożyska silnika (oraz maszyny napędzanej, jeśli nie jest ona połączona z silnikiem za pomocą izolowanego sprzęgła).



Rys.3. a) Droga prądu ekranowego, b) droga prądu łożyskowego, przy izolowanym jednym łożysku silnika i nie izolowanym sprzęgle.

Przykładowy przebieg prądu ekranowego pokazano na rysunku. Prąd łożyskowy, szczególnie w przypadku maszyn większych mocy, może doprowadzić do zniszczenia łożysk, co pociąga za sobą przestój maszyny.



Rys.4. Uszkodzenie bieżni łożyska wywołane przepływem prądu łożyskowego

W konstrukcji kabla specjalnego w celu obniżenia pojemności stosuje się następujące zabiegi:

- zastosowanie specjalnej konstrukcji kabla w szczególności zmiana geometrii w stosunku do kabla tradycyjnego, polegającej na zwiększeniu odstępów izolacyjnych.
- zastosowanie innego materiału izolacyjnego niż w konstrukcjach tradycyjnych, dzięki czemu obniżana jest pojemność całego układu nawet przy takich samych wymiarach geometrycznych.
- zastosowanie w konstrukcji kabla izolacyjnej warstwy dystansowej pomiędzy żyłami, a ekranem, która oddalając ekran od żył obniża pojemność C_e .

4. Inne wymagania stawiane kablom EMC w połączeniach silnik - przekształtnik

Drugim istotnym aspektem zastosowania właściwych kabli jest potrzeba spełnienia wymagań kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). Specjalne kable są wyposażone w podwójny ekran, składający się z wewnętrznej warstwy foliowej oraz zewnętrznego opłotu elastycznego zapewniających „szczelność elektromagnetyczną” porównywalną z kablami sygnałowymi. Należy podkreślić, że kable z pojedynczym ekranem oraz tzw. kable opancerzone nie spełniają w pełni wymagań kompatybilności elektromagnetycznej. Nie spełniają jej również kable, których ekran nie został obustronnie uziemiony, najlepiej na całym obwodzie opłotu. W praktyce stosuje się specjalne dławiki z kontaktem dla ekranu.

Rozpatrując parametry izolacji kabla do zasilania przekształtnikowego należy rozpatrzyć odporność napięciową na przebicie oraz odporność na stromość narastania napięcia (du/dt). Warunki napięciowe, którym jest poddawana izolacja kabla znacznie różnią się od typowych warunków obwodów sinusoidalnych. Wynika to z zasilania silnika przebiegiem prostokątnym o amplitudzie impulsów wynikającej z wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym przekształtnika oraz stromości zboczy wynikającej z czasu przełączania kluczy tranzystorowych falownika. Wobec powyższego przy zasilaniu przekształtnika napięciem np. $3 \times 400V$ AC powinien być stosowany kabel o podwyższonej parametrach odporności napięciowej $600V$ (a nie $400V$ jak zwykle) oraz o zwiększonej do ok. $10\ 000V/\mu s$ wytrzymałości stromościowej [5]. Wytrzymałość stromościowa izolacji nie jest z reguły podawana przez producentów kabli, dlatego kierujemy się zasadą, że napięcie pracy kabla powinno wynosić $U_p/U=0,6/1$ kV. Na

długości kabla zasilającego silnik, ze względu na podwyższoną częstotliwość impulsów PWM oraz ich prostokątny kształt w obecności pasywnych indukcyjności i pojemności ujawniają się zjawiska falowe. Owocuje to wzrostem amplitudy impulsów PWM wraz ze wzrostem długości kabla przy czym największe odkształcenia napięcia zasilającego występują na zaciskach silnika. Amplituda napięcia może osiągać wartości chwilowe nawet do $1,8 kV$ [5].

Dodatkowym wymogiem jest zalecana budowa żył przewodzących kabla. Powinny być one wykonane z wysokogatunkowej (czystej) miedzi oraz mieć konstrukcję wielodrutową. Użycie linki jest przy tym uzasadnione głównie względami mechanicznymi i przeciwdziałania 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.

5. Wnioski

Zasilanie silników indukcyjnych za pomocą nowoczesnych układów przekształtnikowych jest związane z występowaniem szeregu zjawisk, mogących mieć niekorzystny wpływ na pracę całego układu. Zjawiska te są wywołane przez specyficzny kształt napięcia zasilającego (PWM), oraz jego wysoką częstotliwość. Elementem o największych wymiarach, a co za tym idzie o największej pojemności, w układzie przekształtnik – kabel – silnik, jest kabel zasilający. Mamy tu do czynienia z następującymi niekorzystnymi zjawiskami:

- występowanie prądu upływu pomiędzy żyłami (fazami),
- występowanie prądu upływu pomiędzy żyłami a ekranem, przepływ prądu ekranowego,
- występowanie prądu łożyskowego,
- występowanie oscylacyjnych, gasnących drgań napięcia w przebiegu napięcia zasilającego – przepięcia.

Wpływ tych zjawisk na pracę całego układu można ograniczyć stosując odpowiedni kabel łączący silnik z przekształtnikiem. Podstawową cechą takiego kabla jest obniżona pojemność. W przypadku kabli specjalistycznych pojemność jednostkowa jest podawana jako jeden z parametrów.

Redukcja pojemności odbywa się na etapie projektowania i produkcji kabla. Osiąga się ją przez :

- zwiększenie odległości pomiędzy elementami przewodzącymi,
- zastosowanie odpowiedniego materiału izolacyjnego (o niskiej przenikalności dielektrycznej i odpowiedniej wytrzymałości napięciowej i stromościowej),
- zastosowanie dodatkowych warstw „oddalających” ekran od żył (redukcja prądu ekranowego).

Stosowanie odpowiedniego kabla jest jednym z warunków poprawnej pracy układu przekształtnik-kabel zasilający-silnik.

Literatura

- [1]. Marek Trajdos, Robert Pastuszka *Jakie kable lubią falowniki* Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005, Katowice 2005
- [2]. Andrzej S. Gajewski – *Elektryczność Statyczna – poznanie, pomiar, zapobieganie, eliminowanie*, Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, Warszawa 1987
- [3]. Praca zbiorowa pod redakcją Hanny Mościckiej-Grzesiak, *Inżynieria Wysokich Napięć w Elektroenergetyce*, Tom 1, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1996
- [4]. Aleksandra Rakowska, *Właściwości eksploatacyjne usieciowanego polietylenu izolacyjnego stosowanego w wysokonapięciowych kablach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1998, seria rozprawy, nr 341
- [5]. Robert Pastuszka, Marek Trajdos, Antoni Żuk *Kable do zasilania silników w napędach z przekształtnikami częstotliwości*, Helukabel 2005
- [6]. *Kable i przewody 2005/2006*, Helukabel 2005

Autorzy

Marek Trajdos
T-System Projekt Sp. z o.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 , Ireneusz Sosnowski
Helukabel Polska Sp. z o.o.
tel. 046 8580100
tel. 046 8580111
fax 046/858 0117
www.helukabel.pl
e-mail: biuro@helukabel.pl