

dr inż. Mariusz Hetmańczyk

EMT-Systems Sp. z o.o.

PRZEWODY SILNIKOWE

– przegląd oraz praktyczne aspekty wykonania instalacji

Doprowadzenie zasilania oraz sygnałów sterujących (w tym sprzężenia zwrotnego) do silnika elektrycznego stanowi elementarne zagadnienie prawidłowości wykonania aplikacji napędowej. Zgodnie z nomenklaturą wprowadzono podział, który obejmuje definicje [6, 9]:

- kabla – zespół składający się z jednej żyły lub kilku żył mających (lub nie) indywidualne pokrycie (izolacje, ekrany), z warstwy ochronnej (lub nie) na skręconych żyłach (izolacja rdzeniowa) oraz (lub nie) z osłon ochronnych;
- przewodu – wyrób przemysłowy składający się z jednego lub kilku skręconych drutów albo jednej lub większej liczby żył izolowanych bez powłoki lub zaopatrzonej w powłokę niemetalową.

Ogólnie kable zasilające zbudowane są z żył wielodrutowych (nie ekranowanych lub ekranowanych opłotem) z drutów miedzianych, skręcone z pojedynczych żył lub wieloparowe. Mogą występować również w odmianach związanych ze specjalnym wykonaniem

(bezhalogenowe, z materiałów niepalnych i o zmniejszonej emisji dymów, olejoodporne, do układania w kanałach kablowych, do dźwigów, kaset sterujących, silników i instalacji iskrobezpiecznych) [5-9].

Właściwy dobór przewodu elektrycznego uwarunkowany jest czynnikami z następujących grup [6, 7, 9]:

- parametrów eksploatacyjnych, m.in.:
 - wartością napięcia znamionowego,
 - częstotliwością napięcia,
 - warunkami środowiskowymi oraz przeznaczeniem,
 - obciążalnością prądową długotrwałą,
 - przeciążalnością,
 - parametrami zwarciovymi,
 - określoną wartością spadku napięcia;

- wytycznych instalacyjnych, a w tym:
 - długości i profilu trasy,
 - sposobu instalowania,
 - szczególnych warunków ułożenia.

Podstawowe cechy eksploatacyjne żył przewodów elektrycznych zestawiono w tab. 1.

Dobór przewodów pod względem spełnienia parametrów eksploatacyjnych

Podstawowym czynnikiem wpływającym na degradację przewodów elektrycznych jest ciepło wydzielane w wyniku przepływu natężenia prądu o wysokich wartościach. Wartość natężenia prądu obciążającego, określająca długotrwałą obciążalność i przeciążalność prądową przewodu, można obliczyć wg wzorów podanych w tab. 2. Obciążalność prądowa długotrwała może zostać określona według normy PN-IEC 60364-5-523, która dodatkowo zawiera:

- dopuszczalne temperatury żył w izolacjach wykonanych z różnych materiałów,
- sposoby ułożenia przewodów w obiektach technicznych oraz zależności do obliczeń długotrwałej obciążalności prądowej.

Kolejnym istotnym aspektem jest odporność przewodu na przeciążenie, zgodnie z normą PN-IEC 60364-4-43 (tab. 3). Przekrój przewodu S ze względu na obciążalność zwarciovą (PN-IEC 60364-4-43) można obliczyć ze wzoru przedstawionego w tab. 4.

Spadek napięcia na dowolnym odcinku toru jest określony zależnościami przedstawionymi w tab. 5.

Obciążalność zwarciovą kabli zależy od kilku czynników, wśród których znajdują się [1-3]:

- materiał żyły – obciążalność cieplna rośnie wraz ze wzrostem parametru pojemności cieplnej,
- pole przekroju poprzecznego żyły przewodu – zwiększanie przekroju powoduje wzrost pojemności cieplnej i obciążalności,
- typ materiału izolacji – wyższa obciążalność żył związana jest z odpornością na mięknięcie, deformację i degradację termiczną,
- dopuszczalna długotrwała temperatura żyły.

Przewody silnikowe powinny być zabezpieczone za pomocą urządzeń powodujących samoczynne wyłączenie w razie przeciążenia lub zwarcia. W układach napędowych wymagane jest zastosowanie koordynacji zgodnej z normą IEC 60947-4-2:

- typu 1 – wymaga, aby w stanie zwarcia aparat nie stwarzał zagrożenia dla osób ani instalacji, a jego dalsze działanie może jednak wymagać naprawy i wymiany części;

W artykule przedstawiono charakterystykę oraz cechy eksploatacyjne przewodów zasilających silniki elektryczne. Szczególną uwagę zwrócono na dobór przekroju przewodu pod względem obciążalności prądowej (krótkotrwałej, długotrwałej), zwarciovowej, spadków napięć oraz wpływ zakłóceń pochodzących od przetwornic częstotliwości. Podano także podstawowe czynniki wpływające na spełnienie wytycznych instalacyjnych.

Cecha żyły przewodu	Odmiana lub wartość parametru
kształt	okrągłe (przekrój kołowy), sektorowe (przekrój w kształcie wycinka koła)
budowa	jednodrutowe, wielodrutowe, wielodrutowe giętkie
przekrój	0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500 [mm ²]
klasa giętkości (wg PN-EN 60228)	klasa 1 (wykonane jako pojedynczy drut w kablach przeznaczonych do ułożenia na stałe), klasa 2 (żyły wielodrutowe przeznaczone do układania na stałe), klasa 5 (żyły wielodrutowe giętkie), klasa 6 (bardzo giętkie żyły wielodrutowe)
materiał izolacji	poliwinyl (PVC, PCW), polietylen (PE), polietylen spieniony, polietylen usieciowany (XLPE), elastomery termoplastyczne (TPE), tworzywa bezhalogenowe (HFFR), guma

Tab. 1. Zestawienie cech eksploatacyjnych żył przewodów

- typu 2 – wymaga, aby w stanie zwarcia aparat nie stwarzał zagrożenia dla osób ani instalacji oraz był zdolny do dalszego działania, a w przypadku hybrydowych sterowników i rozruszników uwzględnione jest ryzyko zgrzewania stykowego i producent powinien wskazać środki, jakie należy podjąć podczas serwisowania aparatury.

W związku z tym stosuje się różne konfiguracje urządzeń zabezpieczających [6-9]:

- wyłącznie przed natężeniem prądu przeciążeniowego – urządzenia o odwrotnie proporcjonalnej charakterystyce czasowo-prądowej (większe natężenie prądu, mniejsza zwłoka czasowa) i zdolności przerywania prądów tylko mniejszych od przewidywanych zwarciovych;
- wyłącznie przed natężeniem prądu zwarciovego (w przypadku gdy zabezpieczenie przed prądem przeciążeniowym nie jest wymagane) – wyłączniki z wyzwalaczami zwarciovymi lub bezpieczniki topikowe;
- przed prądem przeciążeniowym i prądem zwarciovym – wyłączniki z wyzwalaczami przeciążeniowymi, wyłączniki z bezpiecznikami topikowymi lub bezpieczniki topikowe.

Zalecenia montażowe przewodów zasilających silników z przetwornicami częstotliwości

Przy doborze przewodów łączących przetwornice częstotliwości z silnikiem należy mieć na uwadze [4, 5, 8]:

- wpływ rodzaju przewodu na wypadkowe obciążenie falownika,
- kompatybilność elektromagnetyczną zastosowanego przewodu,
- odporność izolacji kabla na oddziaływanie impulsów napięcia,
- jakość i budowę żył przewodzących przewodu.

Sterowanie silników metodą modulacji szerokości impulsu – PWM (ang. *Pulse-Width Modulation*) – powoduje konieczność rozważenia dodatkowych parametrów eksploatacyjnych przewodu. Ten stan wynika z pojawienia się harmonicznych częstotliwości (stanowiących wielokrotność podstawowej częstotliwości zasilania silnika). Wyższa częstotliwość modulacji PWM obniża wartość na-

Przypadek weryfikacji	Wzór obliczeniowy
obwody jednofazowe	$I_{OB} = \frac{S_{zn}}{U_{znf}} = \frac{P_{zn}}{\cos\varphi \cdot U_{znf}}$
obwody trójfazowe	$I_{OB} = \frac{S_{zn}}{\sqrt{3} \cdot U_{zm}} = \frac{P_{zn}}{\sqrt{3} \cdot \cos\varphi \cdot U_{zm}}$

gdzie: S_{zn} – wartość mocy pozornej obciążenia [VA], U_{znf} , U_{zm} – znamionowa napięcia fazowego oraz międzyfazowego [V], P_{zn} – wartość mocy czynnej obciążenia [W], $\cos\varphi$ – współczynnik mocy

Tab. 2. Wzory obliczeniowe prądu obciążającego I_{ob} określające długotrwałą obciążalność i przeciążalność prądową przewodu [6, 9]

teżnienia prądu, którym może zostać obciążony przewód silnikowy. Prawdopodobnie uwzględnione warunki doboru oraz zabudowy przewodu powinny obejmować [1, 3-5]:

- prawidłowo dobrane oraz podłączone uziemienie – utworzenie niskiej impedancji ścieżki uziemienia pomiędzy silnikiem a napędem ma kluczowe znaczenie w przypadku zmniejszenia różnic potencjałów, a tym samym szkodliwego oddziaływania wysokich natężeń prądu;
- odporność na zakłócenia – zakłócenia emitowane przez przewód są proporcjonalne do ilości zmiennego prądu elektrycznego, jak również długości kabla (wyższa wartość natężenia prądu i/lub większa długość powodują wyższy poziom emitowanych zakłóceń); problem można wyeliminować za pomocą ekranowania przewodu;
- niska wartość stałej dielektrycznej – istotną właściwością izolacji przewodu jest stała dielektryczna lub względna przenikalność; w kablu stała dielektryczna powinna mieć niską wartość; izo-

reklama



Innowacyjne narzędzia tnące dla przemysłu



slice™

noże ceramiczne



Zarządzanie Jakością
ISO 9001:2008
Systematycznie monitorowany

tel. 71 793 40 70
e-mail: info@jusky.pl
www.jusky.pl

Typ konfiguracji sieci zasilającej	Wzór obliczeniowy
Przewody z obciążeniem o stałej wartości (tj. praca ciągła) – obciążalność długotrwała I_z jest większa od obliczeniowego prądu obciążenia I_{OB} wyznaczonego z wartości wymaganej mocy lub obliczeniowej mocy szczytowej	$I_z \geq I_{OB}$
Obciążenie dorywcze	$I_z = K_{zD} \cdot I_{OB}$
Obwody z zabezpieczeniami przeciążeniowymi (przy uwzględnieniu warunku selektywności działania): • obciążalność długotrwała przewodu I_z powinna być większa od znamionowego natężenia prądu nastawczego I_n zabezpieczenia przeciążeniowego obwodu, które powinno być większe od obliczeniowego natężenia prądu obciążenia I_{OB} • natężenie prądu przeciążeniowego o wartości $1,45 \cdot I_z$ przy której przyrost temperatury ustala się na poziomie dwukrotnie większym niż dopuszczalny długotrwałe, powinien wywołać zadziałanie członu przeciążeniowego zabezpieczenia nadprądowego obwodu	$I_z \geq I_n \geq I_{OB}$
	$I_z \geq \frac{k_t \cdot I_n}{1,45}$

gdzie: $K_{zD} = x \cdot e^{-t_D/T}$ – współczynnik przeciążenia, t_D – czas obciążenia dorywczego, T – cieplna stała czasowa przewodu, k_t – współczynnik zależny od typu zabezpieczenia (1,9 – wkładki topikowe o pełnozakresowej zdolności wyłączania i natężeniu prądu znamionowego 6-13 A, 1,6 – wkładki topikowe o natężeniu prądu znamionowego ≥ 13 A, 1,45 – wyłączniki nadprądowe instalacyjne (o charakterystyce B, C, D), 1,2 – wyzwalacze termobimetalowe i elektroniczne przy stycznikach i wyłącznikach oraz wyzwalacze nadprądowe o charakterystyce E

Tab. 3. Wzory obliczeniowe odporności przewodu na przeciążenie [6, 9]

- ▶ lacja z niską stałą dielektryczną skutecznie redukuje energię akumulowaną w przewodzie, a tym samym pozwala na zastosowanie dłuższych przewodów;
 - tłumienie fali odbitej – bez właściwego projektu kabla fale wywołane niedopasowaniem impedancji kabla do silnika mogą być problematyczne w aplikacji z przetwornicami częstotliwości; skala tego problemu zależy od długości kabla, czasu narastania fali nośnej modulowanej szerokością impulsu pochodzącego z napędu, napięcia przetwornicy oraz stopnia niedopasowania impedancji pomiędzy silnikiem a linią (izolacja wykonana z materiałów o wysokim współczynniku załamania napięcia znacząco zmniejsza ryzyko niepowodzeń fal odbitych i skoków napięcia);
 - niskie ryzyko wyładowania koronowego – zastosowanie odpowiedniej izolacji zmniejsza prawdopodobieństwo, że napięcie kabla lub napędu silnika osiągnie swoje napięcie koronowe (CIV); CIV jest punktem, w którym szczelina powietrzna pomiędzy dwoma przewodami w kablu lub między dwoma uzwojeniami silnika rozbija się za pomocą łuku elektrycznego; wyładowaniu koronowemu towarzyszy bardzo wysoka temperatura; jeżeli izolacja kabla jest wykonana z materiału termoplastycznego, efekt może powodować przedwczesne wypalenie kabla lub zwarcie ze względu na lokalne stopienie izolacji;
 - właściwe podłączenie końców przewodu – odnosi się do sposobu podłączenia elementów systemu uziemienia lub żył przewodzących; w kablu przetwornicy częstotliwości szczególne znaczenie ma podłączenie ekranu oraz uziemienia.
- W zastosowaniu silników z przetwornicami częstotliwości można

Przypadek weryfikacji	Wzór obliczeniowy
dobór przewodów i kabli pod względem obciążalności zwarcia 1-sekundowej	$S \geq \frac{I_{th}}{k} \cdot \sqrt{T_k}$

gdzie: k – dopuszczalna gęstość prądu [A/mm²], I_{th} – zastępcze natężenie prądu cieplnego [A], T_k – czas zadziałania zabezpieczenia [s]

Tab. 4. Wzór obliczeniowy przekroju przewodu S ze względu na obciążalność zwarcia [6, 9]

Przypadek weryfikacji	Wzór obliczeniowy
obwody jednofazowe	$\Delta U = \frac{200}{U_{zmf}} \cdot I_{OB} \cdot \left(\frac{l}{\gamma \cdot S} \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi \right)$
obwody trójfazowe	$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_{zm}} \cdot I_{OB} \cdot \left(\frac{l}{\gamma \cdot S} \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi \right)$

gdzie: l – długość linii [m], γ – przewodność materiału żył [m/Ω·mm²], X_L – reakcja przewodu [Ω]

Tab. 5. Wzory obliczeniowe spadku napięcia na dowolnym odcinku toru [6, 9]

spotkać przewody hybrydowe, które zawierają w sobie przewody serwo- oraz resolverowo- enkoderowe. Do zalet opisanych komponentów należą [7, 8]:

- jedno połączenie pomiędzy silnikiem oraz układem sprzężenia zwrotnego silników;
- redukcja liczby przewodów oraz kosztów,
- niska wartość pojemności,
- odporność na czynniki atmosferyczne oraz środowiskowe (promieniowanie UV, rozprzestrzenianie ognia, oleje itp.),
- zgodność z normami oraz szeroki zakres dopuszczeń,
- możliwość zastosowania w instalacjach stałych oraz ruchomych.

Podsumowanie

Wielu dystrybutorów elementów wchodzących w skład technik napędowych oferuje kalkulatory lub katalogi doboru przewodów silnikowych. W przewodach silników sterowanych przetwornicami częstotliwości warto zwrócić uwagę na zastosowane klucze falownika (bramki IGBT, tranzystory MOSFET, tyrystory itp.). Wysokie częstotliwości przełączeń dużych wartości mocy powodują powstawanie zaburzeń pracy oraz uszkodzenia samych przewodów. □

Piśmiennictwo

1. Nasar S.A.: *Theory and Problems of Electric Machines and Electromechanics*. McGraw-Hill, USA 1998.
2. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical Insulation for Rotating Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. IEEE Press, USA 2004.
3. Toliyat H.A., Kliman G.B.: *Handbook of electric motors*. CRC Press, New York 2004.
4. Trigeassou J.C.: *Electrical Machines Diagnosis*. Wiley-ISTE, London 2011.
5. <https://www.belden.com/> [dostęp: 30.10.2017 r].
6. <http://elpar.pl/> [dostęp: 30.10.2017 r].
7. <https://lappoland.lappgroup.com/> [dostęp: 30.10.2017 r].
8. https://www.sew-eurodrive.pl/strona_glowna.html [dostęp: 30.10.2017 r].
9. <http://www.technokabel.com.pl/pl/> [dostęp: 30.10.2017 r].