

Adam Pozowski, Siemens, Katowice

Henryk Krawiec, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WPLYW FILTRÓW WYJŚCIOWYCH NAPIĘCIOWYCH FALOWNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI NA PRACĘ SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH

INFLUENCE OF DIFFERENT TYPE OF OUTPUT FILTER FOR FREQUENCY CONVERTERS ON OPERATION OF INDUCTION SQUIRREL CAGE MOTORS

Abstract: The article describes matching of frequency converters and fed from it induction squirrel cage motors in scope of different shapes of voltage and current generated for different types of output filter for converters and different motor constructions. The article includes both theoretical aspects of this issue and describes experiences of motors exploitation in different branches of the industry.

Odporność układów izolacyjnych

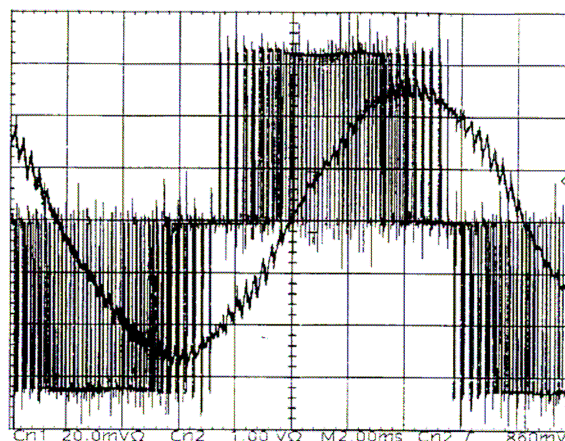
Najpóźniej w latach 90-tych XX w większość europejskich firm produkujących silniki elektryczne o mocy ponad 200 kW, zarówno na napięcia <1 kV jak i >1 kV stosuje układy izolacyjne o klasie odporności termicznej F. Migracja układów izolacyjnych z odporności termicznej B do odporności termicznej F była na ogół związana z poprawą jakości stosowanych rozwiązań układów izolacyjnych, stąd częste przekonanie, że sama klasa termiczna F gwarantuje wysoką odporność na narażenia zarówno ze strony przepięć łączeniowych, jak i ze strony przepięć występujących podczas zasilania silnika napięciem z modulacją PWM. Ze względu na różnorodność stosowanych układów izolacyjnych należy zawsze mieć na uwadze, że sama wyższa odporność termiczna izolacji silnika nie gwarantuje jego wysokiej odporności na przepięcia czy narastanie napięcia w czasie.

Innym zagadnieniem związanym z wytrzymałością układu izolacyjnego jest odporność silnika na składową wspólną napięcia, szczególnie dla silników średniego napięcia pracujących z przebiennikami bez transformatora izolacyjnego.

W naszym artykule zajmiemy się wzajemnym dopasowaniem najszerzej stosowanych przebienników niskiego napięcia oraz silników z nimi aplikowanych.

Olbrzymia większość falowników niskiego napięcia ma, jak już wspominaliśmy topologię falowników z napięciowym obwodem pośredniczącym z napięciem wyjściowym z modulacją

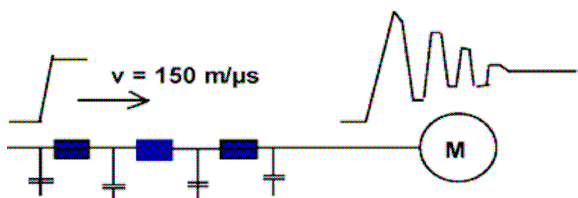
PWM. Stosowane są w nich częstotliwości kłuzowania impulsów w zakresie pomiędzy 0.8-16 kHz. Powoduje to, że w zależności od długości kabli zasilających napięcie na zaciskach silnika ma cechy typowe dla zjawisk falowych, co powoduje, że przy zasilaniu bez wyjściowych filtrów na zaciskach pojawiają się piki napięcia o wartości $\max U_{LLpeak} = 2 \times U_{DC}$ oraz narażenie izolacji w postaci wysokiej stromości narastania napięcia w impulsie.



Rys. 1. Napięcie i prąd wyjściowe przemiennika z napięciowym obwodem pośredniczącym bez zjawisk falowych

Wartość napięcia maksymalnego na zaciskach silnika zależy od napięcia w obwodzie pośredniczącym DC oraz współczynnika odbicia kr definiowanego jako stosunek napięcia maksymalnego

na silniku U_{LL} do napięcia obwodu pośredniczącego UDC.



Rys. 2. Przepięcia refleksyjne na silniku dla dl. kabli $> 15m$

Współczynnik ten w zależności od mocy silnika wynosi od 2 (dla mocy ok. 200 kW) do 1.7 dla mocy > 800 kW. Stąd napięcie maksymalne na zaciskach silnika definiujemy jako:

$$U_{LL} = U_{sieci} * U_{DC}/U_{sieci} * kr$$

Wartość U_{DC}/U_{sieci} wynosi 1.35 dla prostowników dla prostowników pasywnych i 1.5 dla prostowników aktywnych (AFE)

Stąd dla podstawowych napięć występujących w polskich sieciach przemysłowych (z tolerancją $+10\%$) występują następujące wartości przepięć maksymalnych przy zasilaniu z przemienników z prostownikami pasywnymi:

Tabela nr 1

Napięcie sieci [V]	Napięcie U_{DC} [V]	Napięcie U_{LL} dla $kr=1.7$ [V]	Napięcie U_{LL} dla $kr=2$ [V]
400	540	920	1080
500	675	1150	1350
690	930	1580	1860

Oraz zasilanych z prostowników aktywnych

Tabela nr 2

Napięcie sieci [V]	Napięcie U_{DC} [V]	Napięcie U_{LL} dla $kr=1.7$ [V]	Napięcie U_{LL} dla $kr=2$ [V]
400	600	1020	1200
500	750	1270	1500
690	1035	1760	2070

Należy pamiętać, że wartość napięcia dla prostowników pasywnych może jeszcze wzrosnąć przy dodatniej tolerancji napięcia zasilania, lub w

stanie hamowania po rampie w zakresie nastaw regulatora U_{dmax} , i w tym przypadku także dla prostowników pasywnych pojawiać mogą się wartości podane w tabeli nr 2. Prostowniki aktywne mają możliwość elastycznego reagowania na wahania napięcia zasilania oraz poprzez hamowanie ze zwrotem energii do sieci nie dopuszczają do wzrostu napięcia i nie dopuszczają do pojawienia się napięć wyższych niż w tabeli 2.

Innym narażeniem izolacji silnika jest szybkość narastania napięcia w czasie. Dla omawianych przemienników wynosi ona od 3000-6000 V/ μs dla krótkich odcinków kabli silnikowych, do około 100 V/ μs dla kabli o długości $> 100m$.

Większość standardowych układów izolacyjnych silników niskiego napięcia produkowanych w krajach UE – także silników przeznaczonych do pracy z przemiennikami częstotliwości ma odporność układu izolacyjnego $U_{LL} < 1350$ V oraz odporność na stromość narastania napięcia na poziomie $du/dt < 2000$ V/ μs . Wytrzymałość na przepięcia doziemne wynosi $U_{LE} < 1100V$.

Jest to wartość pozwalająca na niezakłóconą pracę z przemiennikami w sieciach 400 i 500 V, bez stosowania dodatkowych filtrów wyjściowych w przemienniku. Inna sytuacja występuje dla sieci zasilających 690V. Większość silników na to napięcie ma uzwojenia wykonane jako 400V D i 690Y, z układem izolacyjnym o wytrzymałości napięciowej 1350 V dla napięcia międzyfazowego U_{LL} i 1100 V dla napięcia fazowego U_{LE} . Dla tego typu silników konieczne jest stosowanie odpowiednich filtrów wyjściowych, których odmiany będą omówione poniżej. Innym sposobem dopasowania układu napędowego jest zastosowanie silników ze wzmocnionym poziomem izolacji, odpornych na podane narażenia napięciowe. Silniki takie powinny mieć następujące parametry układu izolacyjnego:

- $U_{LL} > 2250$ V
- $U_{LE} > 1500V$
- $du/dt > 6000$ V/ μs

Zastosowanie filtrów wyjściowych dla ograniczenia negatywnego wpływu zasilania z przemiennika dla silników ze zbytnim poziomem izolacji

W praktyce codziennej używa się najczęściej określenia dławik (filtr) du/dt lub filtr sinus-

idealny (filtr LC). Dla napięć znamionowych do 500 V standardowe silniki produkowane w ciągu ostatnich 20 lat w UE mają poziom izolacji w pełni odporny na zasilanie z przemiennika – stosowanie filtrów wyjściowych nie jest dla nich niezbędne. Spotyka się jednak w praktyce w tym obszarze napięć znamionowych silniki starsze, z mniej odpornymi układami izolacyjnymi lub silniki specjalne (np. niektórych pomp zasilanych), dla których stosowanie filtrów wyjściowych jest niezbędne.

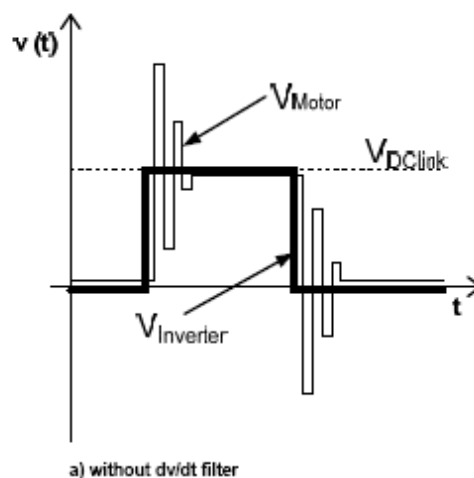
Dla łatwiejszego przekazu zajmiemy się poniżej filtrami wyjściowymi dla napięć silnika 660-690V, lecz pewne zasady ogólne odnoszą się tu także do innych napięć znamionowych.

Dławiki wyjściowe (dławiki du/dt)

Bardzo często dla przemienników stosowane są dławiki wyjściowe, określane czasem także jako dławiki du/dt . Dławiki te spełniają w układzie napędowym podwójną rolę:

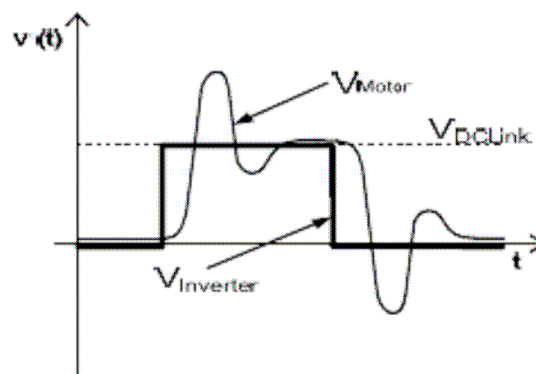
- ograniczenie prądów pojemnościowych powstających na pojemności kabla
- ograniczenie stromości narastania napięcia – du/dt

O ile dławiki dość dobrze spełniają swą rolę ograniczenia prądów pojemnościowych, pozwalając na ogół na stosowanie dłuższych niż standardowo kabli silnikowych, o tyle ich użyteczność jako wyjściowego filtra jest już bardziej dyskusyjna. Dławiki te, w połączeniu z pojemnością kabla, w zależności od jego długości dość dobrze obniżają stromość narastania napięcia (do około $100V/\mu s$ dla bardzo długich kabli) nie ograniczając jednak w znaczącym stopniu refleksyjnych impulsów napięcia ze względu na niską tłumienność (około 1750V). Efektem ich zastosowania dla silników ze standardową izolacją jest ich znacząco większe narażenie na impulsy napięcia, co z reguły prowadzi do szybszej degradacji układu izolacyjnego. Dławiki wyjściowe powodują także na ogół spadek napięcia wyjściowego o około 3%.



a) without dv/dt filter

bez filtra



b) with motor reactor

z dławikiem silnikowym

Rys. 3. Teoretyczne kształty napięcia refleksyjnego bez i z dławikiem wyjściowym

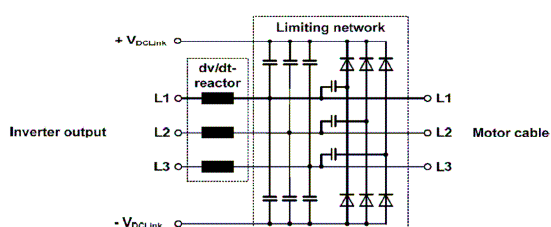
Filtry sinusoidalne (filtry LC)

Filtr sinusoidalny jest pasywnym układem LC dającym bardzo dobre wyniki w ograniczaniu stromości narastania napięcia i ograniczaniu napięć refleksyjnych. Dzieje się to jednak kosztem pogorszenia pewnych parametrów układu. Filtr ten ogranicza stromość narastania napięcia poniżej $50 V/\mu s$, a wartość przepięcia $U_{LL} < 1.1 * \sqrt{2} * U_{sieci}$. Filtry te powodują jednak obniżenie maksymalnego napięcia wyjściowego o około 15-10% w zależności od producenta, przez co napęd dużo wcześniej wchodzi w zakres osłabiania pola i musi mieć odpowiedni przewymiarowany silnik i prąd przemiennika. Filtry z racji konieczności

zastosowania indukcyjności o dużej wartości mają też na ogół znaczny ciężar i gabaryty.

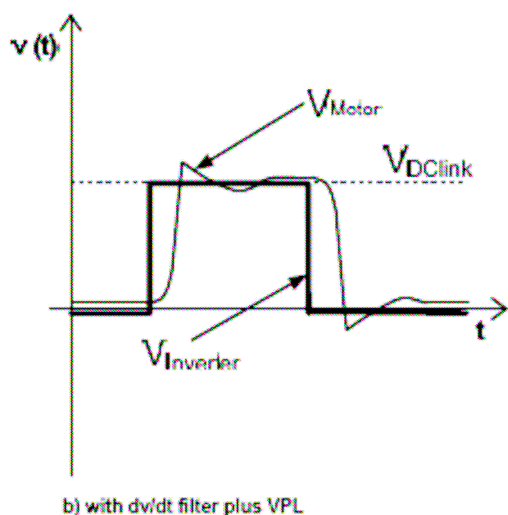
Filtry wyjściowe du/dt z VPL (voltage peak limiter)

Dla pełnej ochrony silników z izolacją standardową przed wpływem zasilania z przemienników z napięciowym obwodem pośredniczącym DC i modulacją PWM na napięciu 690V należy zastosować filtry ograniczające zarówno stromość narastania napięcia jak i wartość przepięć refleksyjnych silnika. Przykładem tego typu filtra jest filtr $du/dt + VPL$ (voltage peak limiter) spełniający z powodzeniem oba zadania.



Rys. 4 Schemat filtra wyjściowego du/dt z VPL pomysłu SIEMENS AG

Filtr ten ogranicza dzięki zastosowaniu dławika wartość stromości napięcia do około $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ natomiast wartość przepięć refleksyjnych do około $1.2 \times \text{UDC}$ (dla sieci 690V jest to 1240 V) co z powodzeniem pozwala na stosowanie silników ze standardowym poziomem izolacji.



Rys. 5. - napięcie na silniku z zastosowaniem filtra $du/dt + VPL$

Dzięki sprzężeniu zwrotnemu do obwodu pośredniczącego filtry te nie powodują obniżenia napięcia wyjściowego.

Wygląd napięcia wyjściowego z zastosowaniem filtra $du/dt + VPL$ pokazany jest na rysunku 5.

Cechy poszczególnych rozwiązań filtrów wyjściowych w aspekcie wpływu na pracę silnika oraz aspekt sprawności

Poza aspektem ochrony układu izolacyjnego, filtry wyjściowe mają wpływ na inne aspekty pracy silnika, takie jak:

- ograniczenie prądów łożyskowych,
- hałas,
- sprawność całego układu,
- nagrzewanie silnika.

Prądy pojemnościowe, powstające w wyniku zasilania silnika napięciem o stromym zboczach i płynące przez wewnętrzne pojemności silnika są groźne ze względu na niszczące działanie względem łożysk. Prądy te mają znaczenie dla silników o większych wzniosach wału (ponad 250-280 – w zależności od konstrukcji). Zastosowanie filtrów wyjściowych ogranicza wielkość tych prądów dzięki zmniejszeniu stromości zbocza, lecz jedynie stosowanie filtra sinusoidalnego lub filtra $du/dt + VPL$ redukuje zupełnie ten problem i pozwala na stosowanie silników bez izolacji łożysk.

Hałas – silniki indukcyjne klatkowe zasilane z przemiennika mają ze względu na wyższe harmoniczne napięcia poziom hałasu podniesiony o około 8-15 dB(A) w stosunku do hałasu dla silnika zasilanego bezpośrednio z sieci sinusoidalnej. Ponieważ hałas ten spowodowany jest głównie hałasem magnetycznym, szczególnie wysoki wzrost hałasu wystąpi dla silników wolnoobrotowych. Stosowanie filtrów wyjściowych du/dt nie ogranicza w znaczący sposób poziomu hałasu – dużo większe znaczenie ma tu podniesienie częstotliwości kluczenia tranzystorów, co jednak niesie za sobą powiększenie strat przemiennika i na ogół ograniczenie jego prądu wyjściowego. Jedynym wyjątkiem jest tu filtr sinusoidalny – zastosowanie tego typu filtra podnosi poziom hałasu silnika o około 2dB(A).

Sprawność całego układu

Poniższa tabela pokazuje straty względne dla systemu silnik-przeźmiennik. Wartości 100% są odniesione do wartości start silnika przy zasilaniu bezpośrednio z sieci, oraz dla wartości start przeźmiennika bez filtrów wyjściowych.

Filtr wyjściowy	Straty przeźmiennika	Straty silnika
Przeźmiennik bez filtra	100%	110%
Dławik silnikowy (dławik du/dt)	110%	110%
Dławik du/dt+VPL	110%	110%
Filtr sinusoidalny	115%	100%

Jak widać w ujęciu sprawnościowym stosowanie wyjściowych filtrów obniża sprawność całego układu – układ silnika z izolacją dostosowaną do narażeń napięciowych systemu i przeźmiennika bez filtrów wyjściowych jest układem o najwyższej sprawności.

Dodatkowe nagrzewanie się silnika

Wyższe harmoniczne prądu zawarte w prądzie będącym efektem modulacji PWM napięcia wyjściowego falownika i indukcyjności zastępczej silnika i linii kablowej nagrzewają dodatkowo silnik. W przypadku bezpośredniego zasilania z falownika, bez stosowania jakichkolwiek filtrów wartość dodatkowego przyrostu temperatury wynosi (w zależności od konstrukcji silnika) +7-10°K. Najczęściej silniki niskiego napięcia stosowane do aplikacji przeźmiennikowych obliczone są do pracy z przyrostami temperatury **B dla zasilania sieciowego**. Dodatkowy przyrost temperatury powoduje wykorzystanie przez nie rezerwy cieplnej wynikającej z wykonania w klasie izolacji F. Jest to z projektowego punktu widzenia stan dopuszczalny dla silników napędzających silniki z obciążeniem $M=f(n^2)$ lub $M=f(n)$ o krótkim okresie rozwijania pełnej mocy (nie więcej niż 30% w skali roku), co w przypadku maszyn tego typu jest dość częste – ostatecznie stosujemy dla nich regulację obrotów właśnie po to, by częściej osiągać prędkości niższe niż znamionowe. W silnikach tego typu

charakterystyce nie musimy także oczywiście stosować wentylatora chłodzącego o obrotach niezależnych od silnika – spadek strat mocy w silniku jest znacznie szybszy niż spadek wydajności przewietrzania związany z obniżeniem obrotów wentylatora chłodzącego.

Inaczej aspekt cieplny wygląda dla obciążeń $M=const$ – wtedy ciągła praca silnika z temperaturami bliskimi granicznej temperaturze układu izolacyjnego (155°C) prowadzi do szybkiej degradacji izolacji (6-10 lat) i skraca znacząco żywotność silnika. Dla tego typu aplikacji zalecane jest takie zaprojektowanie całego układu, by temperatura silnika nie przekraczała 130°C, przez co najmniej 70% czasu jego pracy. Oczywiście dla aplikacji $M=const$ zdecydowanie zalecane jest stosowanie chłodzenia o wydajności niezależnej od obrotów silnika.

Jedynie stosowanie filtrów sinusoidalnych ma pozytywny wpływ na dodatkowe nagrzewanie się silnika i można przyjąć, że dodatkowy przyrost temperatury przy zastosowaniu filtra sinusoidalnego nie przekracza 1-2°K.

Wnioski

Wzajemne dopasowanie silnika i przeźmiennika dla standardowych przeźmienników niskiego napięcia ma spore znaczenie w aspekcie długości bezawaryjnej pracy silnika oraz optymalnego dopasowania systemu. Kluczowe znaczenie ma tu dopasowanie konkretnych parametrów przeźmiennika i silnika związanych z wytrzymałością napięciową (U_{LLpeak} i du/dt), a nie posługiwanie się samymi hasłami (filtr du/dt) nie popartymi konkretnymi wartościami parametrów.