

Andrzej Morawski
BIAP, Wrocław

UWAGI DO PROJEKTOWANIA NAPĘDÓW ŚREDNIEGO NAPIĘCIA Z PRZEMIENNIKAMI PRĄDOWYMI

REMARKS CONCERNING DESIGNING OF MEDIUM VOLTAGE DRIVES WITH CURRENT SOURCE FREQUENCY CONVERTERS

Abstract: The paper presents some remarks concerning medium voltage drive design method. New types of medium voltage frequency converters (MVFC) demands change in electric calculation and equipment selection methods. The side effects of MVFC applications are much different using current source inverters than other FC constructions. Presented subjects, observations and conclusions are result of experience in design and start-up of MVFC in many different industrial applications.

1. Wstęp

Komputerowe wspomaganie projektowania ułatwia dobór urządzeń. Poprzez standardowe, przyjęte w projektowaniu reguły i procedury, ogranicza ryzyko popełnienia błędów niewłaściwego zastosowania i wyposażenia urządzeń technologicznych. Zdarza się jednak, że proponowane przez program komputerowy rozwiązania nie uwzględniają w wystarczającym stopniu postępu technicznego i zmian właściwości projektowanych urządzeń. Wówczas proponowane rozwiązania mogą odbiegać od optymalnych i narażać użytkownika na nadmierne koszty inwestycyjne lub eksploatacyjne.

Wymienione uwagi można zastosować do doboru układów napędowych pomp i wentylatorów dużej mocy. Stosowane zasady projektowe mogą nie nadążać za postępem techniki napędowej lub szczególnymi wymaganiami stawianymi przez określone rozwiązania. Podobnie metody projektowania i rozwiązywania problemów efektów ubocznych zastosowania przemienników dotyczą projektantów branży elektrycznej.

Celem zawartych niżej uwag jest wskazanie głównych różnic pomiędzy stosowanymi dotychczas, a obecnie wdrażanymi technikami napędowymi średniej i dużej mocy z przemiennikami prądowymi (PP).

2. Dobór mocy napędu

Typowe, najczęściej dotychczas stosowane napięciowe przemienniki częstotliwości powodują dodatkowe straty mocy w silniku i torze zasilania.

Stąd przyjmuje się, że do napędu przemiennikowego należy zastosować silnik o większej mocy niż do napędu zasilanego z sieci. Proponowane podwyższenie mocy silnika waha się od kilku do kilkunastu procent i zależy od zakresu regulacji i typu chłodzenia. Typowy program projektowania układów pompowych o regulowanej prędkości dobierze silnik o mocy około 10% wyższej od wynikającej z obliczeń zapotrzebowania mocy pompy. Jeżeli przyjmie się chłodzenie własne silnika i regulację przez obniżenie prędkości przekraczające 30-40%, proponowana moc silnika może wzrosnąć nawet o 30% lub więcej!

Skutki takiego doboru są dwójakiego rodzaju. Po pierwsze, silnik o większej mocy jest droższy, zwłaszcza jeżeli zmienia się wielkość mechaniczna silnika, jest cięższy, wymaga odpowiedniej konstrukcji nośnej. Po drugie, silnik o większej mocy będzie pracował niedociążony, co typowo obniża jego sprawność. Ponadto, przyjęta podwyższona moc znamionowa silnika (prąd znamionowy) jest podstawą doboru większej wielkości przemiennika, a tu zmiany ceny wraz z mocą mogą być znacznie większe. Kable, aparaturę elektryczną i źródło zasilania projektuje się także na zawyżoną moc. Ogólnie całość układu napędowego staje się większa, cięższa i bardziej kosztowna niż wymagają tego potrzeby technologiczne.

Zasada pracy przemienników ze źródłem prądowym – dławikiem w obwodzie pośredniczącym prądu stałego, polega na bezpośredniej regulacji

prądu zasilania silnika. Zawartość składowych harmonicznych w prądzie silnika jest znacznie mniejsza niż powodowana przez przemienniki napięciowe. Efekt dodatkowych strat w silniku i wzrostu temperatury silnika z tego powodu jest pomijalnie mały. Dodatkowo, silnik nie jest poddawany szybkim naprzemiennym zmianom napięcia zasilania, co znacznie ogranicza straty w żelazie silnika oraz prądy pojemnościowe.

Praca silnika zasilanego przez prądowy przemiennik częstotliwości tylko nieznacznie różni się od warunków zasilania napięciem sinusoidalnym.

W rzeczywistości, jak wynika z pomiarów przeprowadzonych przy okazji uruchamiania układów napędowych z przemiennikami średniego napięcia, przebiegi napięcia w sieci przemysłowej odbiegają od sinusoidalnych. Może zatem dojść do sytuacji korzystniejszych przebiegów elektrycznych zasilania silnika dużej mocy przez prądowy przemiennik częstotliwości niż z sieci. Zjawisko takie stwierdzono np. w sieci kopalnianej zasilającej maszyny wyciągowe prądu stałego z przekształtnikami tyrystorowymi.

W typowych warunkach, zasilanie napędu pompy lub wentylatora z użyciem przemiennika prądowego nie wymaga zwiększenia mocy napędu ze względu na dodatkowe straty w silniku.

3. Obecność harmonicznych

Układu napędowe z przemiennikami częstotliwości są źródłem harmonicznych w sieci zasilającej. Problemy związane z wymienionymi efektami ubocznymi szybko rosną wraz z mocą projektowanego napędu oraz sumaryczną mocą zainstalowanych przemienników.

Typowy układ zasilania przemiennikowego układu napędowego projektuje się uwzględniając obecność składowych harmonicznych prądu i napięcia. Przekroje kabli, szyn i cały tor zasilania ulegają powiększeniu.

Oddziaływanie przemienników na wspólną sieć nie może wpłynąć na przekroczenia dopuszczalnych zawartości harmonicznych w napięciu, określonych normami. Według prostej reguły inżynierskiej, oddziaływanie przemiennika na przebieg napięcia w sieci określa się według stosunku mocy przemiennika do mocy zwarciowej sieci zasilającej: wartość powyżej 1000 uważa się za granicę, powyżej której oddziaływanie na sieć można całkowicie pominąć. W napędach dużej

mocy taka sytuacja przeważnie nie ma miejsca. Stąd niezbędna jest indywidualna (každorazowa) analiza widma harmonicznych i wpływu na sieć zasilającą oraz zastosowanie odpowiednich technik filtracji. Problem staje się poważny, gdy przemienniki stanowią główny odbiornik mocy. Ograniczenie zawartości harmonicznych jest jednym z głównych problemów konstruowania przemienników dużej mocy i projektowania układów zasilania. Stąd wynika rozwój konstrukcji przemienników z transformatorami wielouzwojennymi i prostownikami wielopulsowymi lub konstrukcji przemienników napięciowych o kilku poziomach modulowanego napięcia i wielu transformatorach zasilających. Są to konstrukcje złożone, zawierające wiele elementów i połączeń, statystycznie bardziej zawodne.

Jednym z rozwiązań jest zastosowanie prostownika sterowanego z modulacją szerokości impulsów PWM (Pulse-Width Modulation). Rozwiązanie takie jest stosowane typowo w przemiennikach prądowych. Przebieg napięcia i prądu zasilania przemiennika praktycznie nie zawiera składowych piątej i siódmej, składowe jedenasta u trzynasta są bardzo ograniczone, wyższe składowe można praktycznie pominąć. Jest to proste i skuteczne rozwiązanie jednego z podstawowych problemów projektowania zasilania układów napędowych dużej mocy.

4. Hamowanie

W układach napędowych dużej mocy wysoka energia mas wirujących podnosi na wyższy poziom problem rezonansu mechanicznego. Szybkie ominięcie szybkości rezonansowych w fazie hamowania wymaga efektywnego odbierania energii przez układ przemiennikowy. Hamowanie odzyskowe rezystorowe może być technicznie trudne, ale w niektórych z wymienionych wcześniej konstrukcji przemienników średniego napięcia nie jest możliwe.

Przemienniki prądowe w typowym wykonaniu z prostownikiem z modulacją szerokości impulsów PWM cechuje praca czterokwadrantowa, co rozwiązuje problem hamowania. Hamowanie odzyskowe wymaga, aby sieć zasilająca umożliwiła zwrot energii. Zazwyczaj energia zwracana jest do pobliskich innych odbiorników. Hamowanie odzyskowe możliwe jest z pełną mocą napędu i w długim czasie, stąd wszelkie wymagania techno-

logiczne hamowania napędu, niezależnie od rezonansu mechanicznego, mogą być rozwiązane w ten sam sposób.

5. Przelączanie silnika na sieć

Układy z przemiennikiem krocącym tzn. wyposażonym w możliwość dokonania synchronizacji z siecią i przelączania zasilanego silnika do zasilania z sieci nie należą do częstych rozwiązań w układach średniego napięcia, ale też są szczególnie trudne w tradycyjnych konstrukcjach przemienników. Rozwiązanie takie dotychczas wymagało zastosowania precyzyjnych układów synchronizacji i specjalnych szybkich łączników. W praktyce, uderzenia prądu i momentu, nawet ograniczone, były trudne do uniknięcia.

W układzie z przemiennikiem prądowym przelączania silnika z pracy przemiennikowej do zasilania z sieci - i odwrotnie - jest łatwe i nie grozi skokowymi zmianami prądu zasilania silnika z powodu obecności w przemienniku źródła prądowego. Producenci przemienników prądowych proponują gotowe rozwiązania prostych układów przelączających. Tak wykonany krocący przemiennik prądowy jest bezpieczny dla instalacji i nie wymaga specjalistycznego wyposażenia i zabezpieczeń.

6. Zakłócenia elektromagnetyczne

Zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez przemienniki średniego napięcia mogą mieć duże wartości, a ich ograniczenie jest trudne. Tranzystorowe przemienniki napięciowe, także wielopoziomowe, cechuje duża stromość zmian napięcia, do ok. 1600V/us, co wobec wyższych poziomów napięć jest źródłem silnych zakłóceń w szerokim zakresie częstotliwości, znacznie powyżej 100kHz. Zakłócenia pochodzące od przemienników częstotliwości wpływają szkodliwie na urządzenia automatyki, systemy łączności, odbiór radiowy itp.

Techniki stosowania ekranów, filtrów i separacji stanowią oddzielny obszar inżynierii elektrycznej, rozwiniętej w powiązaniu z energoelektroniką, trudnej w projektowaniu i kosztownej w zastosowaniach. Problemy te można ominąć stosując przemienniki, w których nie występują duże stromości zmian napięcia (du/dt). W typowym przemienniku prądowym z kluczami SGCT szybkość zmian napięcia nie przekracza 10V/ μ s.

Przemiennik prądowy nie generuje przebiegów o szerokim widmie częstotliwości, a zakłócenia elektromagnetyczne są pomijalnie małe. Z tego powodu nie wymaga się stosowania specjalnych kabli ekranowanych, separacji elektrycznej układów mechanicznych i innych środków zapobiegawczych. W wykonanych i uruchomionych z udziałem autorów układach napędowych z przemiennikami prądowymi średniego napięcia, w tym wiele pracujących we wspólnej sieci, o mocach jednostkowych od 400kW do 1MW, nie stwierdzono wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na jakiegokolwiek urządzenia. Znane są natomiast przypadki długotrwałego i żmudnego eliminowania szkodliwego wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na łączność radiową i układy sterowania, pochodzących od przemienników napięciowych podobnej mocy.

7. Sprawność energetyczna

Znaczącym powodem wzrostu liczby zastosowań przemienników częstotliwości SN jest wysoka sprawność przemiennikowych układów napędowych pomp i wentylatorów o zmiennym wydatku w stosunku do innych technik regulacji. Niezależnie od oszczędności energetycznych wynikających z braku dławienia, sprawność układu przemiennik-silnik jest również uwzględniana w bilansie zużycia energii.

Do wymienionych wcześniej właściwości energetycznych przemienników prądowych (niski poziom harmonicznych, małe straty mocy w silniku i kablach) należy dodać możliwość pracy przemiennika bez transformatora, co podnosi jego sprawność. Jest to jedyne rozwiązanie przemiennika średniego napięcia nie wymagające zastosowania transformatora (transformator może być stosowany z innych powodów, nie związanych bezpośrednio z zasadą pracy przemiennika).

Przemienniki prądowe średniego napięcia bez transformatora są obecnie najczęściej stosowaną i zalecaną przez producentów wersją wykonania tego typu przemiennika.

Wyższa sprawność oznacza mniejszą moc chłodzenia i wentylacji, co jest szczególnie istotne w przypadku silnie zanieczyszczonego środowiska pracy przemiennika. Powszechnie obecnie stosuje się ograniczenie wymiany zewnętrznego powietrza przez zastosowanie klimatyzacji pomieszczenia przemiennika.

Ponadto przemienniki w tym wykonaniu są lżejsze i wymagają mniej miejsca do zabudowy.

Niska częstotliwość komutacji przemiennika prądowego z kluczami SGCT powoduje obniżenie łącznych strat komutacji w porównaniu z wykonaniem tranzystorowym. Informacje o sprawności przemiennika dotyczą różnych stanów pracy i zależą od wersji wykonania przemiennika. Należy korzystać ze szczegółowych obliczeń strat mocy dla wybranej wersji wykonania i wyposażenia przemiennika prądowego.

8. Modernizacje starych napędów

Przemienniki prądowe z powodu wyżej wymienionych właściwości można stosować do istniejących silników na napięcia do 6,6kV stosując istniejące kable i źródło zasilania. Silnik i tor zasilania nie wymagają zmian.

Przemiennik prądowy, z zasady pracy nie dopuszcza przerwania prądu zasilania przemiennika bez wcześniejszego zamknięcia kluczy przemiennika. Wyłączenie przemiennika prądowego niezbędnie wymaga wyposażenia pola średniego napięcia zasilającego przemiennik w wyłącznik, sterowany za pośrednictwem przemiennika. Obecnie większość pól zasilających przemienniki posiada wystarczające wyposażenie. W przeciwnym razie należy przewidzieć zainstalowanie wyłącznika w polu zasilającym. Jest to jedyna, ewentualnie wymagana, zmiana w torze zasilania.

9. Rozmieszczenie

Przemiennik dużej mocy wymaga chłodzenia z zachowaniem ochrony przed zanieczyszczeniami stałymi oraz gazami i parami agresywnymi. Zapewnienie odpowiedniego pomieszczenia w pobliżu silnika bywa trudne, a oddalenie przemiennika jest ograniczone dopuszczalną długością kabli między przemiennikiem, a silnikiem (długość kabli równoległych jest sumowana). Jest to poważny problem projektowy. Wydłużenie kabli dla przemienników napięciowych jest możliwe po zastosowaniu odpowiednich filtrów, jednak nie jest nieograniczone i jest okupione utratą możliwości sterowania wektorowego w silniku.

Przemienniki prądowe nie ograniczają długości kabli przemiennik - silnik, które mogą wynosić nawet wiele kilometrów, bez utraty możliwości sterowania wektorowego. Lokalizacja przemiennika nie jest ograniczona długością kabli i może

być wybierana dowolnie. Typowo, zarówno przy modernizacji jak i projektowaniu nowych instalacji, przemiennik umieszcza się w rozdzielni SN, nawet jeżeli jest ona oddalona od napędu.

10. Podsumowanie

Wymienione uwagi projektowe są wynikiem doświadczeń w projektowaniu i uruchamianiu układów napędowych z przemiennikami częstotliwości różnego typu, w szczególności przemienników częstotliwości średniego napięcia wykonanych w technice przemiennika prądowego. Uruchomione układy napędowe, w tym pracujące od lat w pompowniach w KGHM, projektowane i wyposażane z uwzględnieniem podanych właściwości i zasad, mogą świadczyć o ich słuszności i przydatności w innych zastosowaniach.

Autorzy

dr inż. Andrzej Morawski,
Dział Centrum Napędowe,
BIAP Sp. z o.o.

54-424 Wrocław, ul. Muchoborska 16
andrzej.morawski@biap.com.pl