

Zastosowanie układów regulacji prędkości obrotowej pomp wodociągowych z silnikiem i przemiennikiem częstotliwości średniego lub niskiego napięcia

Zbigniew Szulc

1. Wstęp


Układy regulacji prędkości obrotowej pomp wodociągowych są coraz częściej stosowane w pompowniach, gdzie wymagane są zmiany ciśnienia lub wydajności wyjściowych. Problemem, który pojawia się przy projektowaniu nowej pompowni lub przy modernizacji już eksploatowanej, jest właściwy dobór regulowanych układów napędowych. Wśród najważniejszych parametrów tych układów jest wartość napięcia znamionowego elektrycznych silników napędowych pomp. Dobór niskiego napięcia znamionowego silników pociąga za sobą zastosowanie przemienników częstotliwości niskiego napięcia (np. 400 V, 690 V). Podobnie zastosowanie silników o napięciu znamionowym średnim (najczęściej 6 kV, rzadziej 3,3 kV) wymaga eksploatacji przemienników częstotliwości o znamionowym napięciu średnim. Oczywiście powyższe rozważania dotyczą najczęściej silników indukcyjnych klatkowych, trójfazowych.

Dotychczasowa eksploatacja tych układów napędowych sugerowała, że stosowanie napięcia średniego jest uzasadnione dla dużych mocy znamionowych silników. Przyjmowano najczęściej, że graniczną mocą znamionową jest wartość 1000 kW. Obecnie coraz częściej wartość tej mocy jest przyjmowana na poziomie 500 kW. Głównym czynnikiem, który ustalał te wartości graniczne, była i jest cena przemiennika częstotliwości zasilającego silnik. W zakresie mocy znamionowych do 1000 kW cena przemiennika częstotliwości średniego napięcia jest dwa lub więcej razy większa niż napięcia niskiego. Oczywiście można dla napięć średnich stosować przemiennik częstotliwości niskiego napięcia z sinusoidalnym filtrem wyjściowym i transformatorem podwyższającym. Jednak takie instalacje wymagają dodatkowych powierzchni, połączeń, aparatury łącznikowej i kontrolno-pomiarowej oraz zabezpieczeń. Wówczas sprawność takiej instalacji obniża się, a koszt znacznie rośnie. Współczesna technika energoelektroniczna pozwala budować i stosować przemienniki częstotliwości na napięcia znamionowe nawet 13,6 kV. Jednak ceny tych urządzeń są wysokie i ich zastosowanie musi być poprzedzone obliczaniem wskaźników ekonomicznych. Czasem warto dokładnie rozważyć efekty wymierne i trudno wymierne oraz takie, które trudno opisać przy pomocy wskaźników ekonomicznych.

W artykule został przedstawiony przykład, w którym rzeczywisty obiekt pompowni wodociągu przemysłowego ma być zmodernizowany, gdyż będzie zasilany technologią wymagającą dużych zmian dostarczanej wody.

2. Wymagania obiektu zasilanego z pompowni

Poniżej zostanie przedstawiony obiekt pompowni, która ma zostać zmodernizowana. Według [1] pompownia ta, za-

 **Abstract:** Integrated speed control of water supply pumps are increasingly being used in pumping stations where changes are required pressure output or productivity. The problem that arises in the design of a new pumping station and the upgrade already in service is the right choice of regulated power system. Among the most important parameters of these systems is the nominal voltage electric motors pumps. Selection of low voltage motors rated entails the use of low-voltage frequency converters (for example, 400 V, 690 V). Similarly, the use of motors with a rated voltage of the medium (usually 6 kV, 3,3 kV less) requires the operation of frequency converters with a rated voltage of the medium. Of course, these considerations apply to the most common squirrel cage induction motors, three-phase.

silająca zakład przemysłowy, jest pompownią II stopnia. Przepompowuje ona wodę ze zbiornika przy ujęciu rzeczonym do obiektów technologicznych w dużym zakładzie chemicznym w kraju. Pompownia I stopnia pobiera wodę z ujęcia rzeczynego i po wstępnym uzdatnieniu pompuje do zbiornika, z którego zasilana jest pompownia II stopnia. Pompownia ta poprzez rurociąg dostarcza wodę do procesu technologicznego. Przez ostatnich kilka lat pompownia II stopnia pompowała wodę bez regulacji natężenia przepływu i ciśnienia. Proces technologiczny wymagał równomiernego dopływu wody przez określoną liczbę godzin na dobę. Pracowały dwa zespoły nieregulowane pompa – silnik napędowy, obciążone mocą ok. 90% mocy znamionowej. System pracy pompowni był dwustanowy. Włączone były do pracy dwa zespoły lub dwa były wyłączone co zupełnie wystarczało dla prowadzonego procesu technologicznego. Trzeci zespół pompa – silnik napędowy był zespołem rezerwowym. Wszystkie trzy zespoły posiadały takie same parametry znamionowe. Podczas pracy starano się utrzymać jednakowe przepływy pomp, gdyż obie pracowały równolegle. Jediną możliwością regulacji było dławienie na króćcach tłocznych pomp.

Obecnie pompownia ta ma zasilac proces technologiczny zupełnie innego charakteru niż dotychczasowy. Wymagana będzie zmiana natężenia przepływu w granicach, 55% do 100% znamionowego przepływu pompowni. Ponieważ proces technologiczny ma mieć charakter ciągły, pompownia ma pracować w ciągu roku ok. 8500 h. Szybkość zmian natężenia przepływu ma być duża. W skrajnym przypadku zmiana natężenia przepływu od 55% do 100% i odwrotnie powinna zadziać w ciągu kilkunastu sekund.

Tabela 1. Proponowane przemienniki częstotliwości

Typ	Przebiegnik częstotliwości niskiego napięcia 400 V ze źródłem napięcia w obwodzie DC	Przebiegnik częstotliwości średniego napięcia 6000 V ze źródłem prądu w obwodzie DC
Cena [zł]	56200	690000

Regulacja natężenia przepływu przez dławienie może temu wymaganiu nie sprostać, nawet pomijając względy energetyczne. Zmiana struktury zasilania procesu technologicznego wodą jest trudna do realizacji. Najlepszym rozwiązaniem mogło być wybudowanie zbiornika z wodą uzdatnioną w pobliżu procesu technologicznego. Ponieważ nowy proces technologiczny jest częścią już istniejącego skomplikowanego procesu, nie jest możliwa budowa nowych rozwiązań. Obecnie rurociąg pomiędzy obiektem z procesem technologicznym a pompownią II stopnia ma długość 8 km.

Postanowiono wstępnie rozpatrzyć możliwość zastosowania do obecnych pomp regulacji prędkości obrotowej.

3. Wstępna analiza zastosowania regulacji prędkości obrotowej pomp

W chwili obecnej silniki napędowe pomp posiadają moc znamionową po 250 kW i są zasilane napięciem 6 kV. Są to silniki indukcyjne klatkowe trójfazowe, które można zasilac regulowa-

Tabela 2. Zakres działań przy modernizacji układu napędowego

Rodzaj działania	Układ NN	Układ SN
Wymiana silnika	Tak	Nie
Zastosowanie p.cz.	Tak	Tak
Wymiana kabli pomiędzy p.cz. a silnikiem na ekranowane	Tak	Nie
Dodatkowy transformator obniżający napięcie średnie na niskie	Tak	Nie
Wymiana kondensatorów obwodu napięcia DC co 7-8 lat	Tak	Nie
Montaż i uruchomienie w czasie poniżej 5 dni	Nie	Tak

nym napięciem (amplitudą i częstotliwością) zbliżonym do sinusoidalnego (pod względem kształtu). Taka sytuacja sugeruje wykorzystanie istniejących silników średniego napięcia. Jednak porównanie cen przemienników częstotliwości (p.cz.) średniego (SN) i niskiego (NN) napięcia zmusza do wnikliwej analizy tego problemu. Wzięto pod rozwagę dwa typy p.cz., których liczba aplikacji w Polsce należy do największych.

Tak duża różnica cenowa najczęściej powoduje odrzucenie wariantu z p.cz. SN. Należy jednak rozpatrzyć nakłady na wszystkie działania związane z aplikacją regulowanego układu napędowego NN i SN. Tabela 2 podaje, jakich działań wymagają te aplikacje.

Jeśli według aktualnych cen zsumujemy nakłady na zakup elementów, demontaż, montaż, prace budowlane, uruchomieniowe oraz uwzględniając 10% niepewność modernizacja układów napędowych będzie kosztowała:

1. Układ regulowany napędowy niskiego napięcia – 318 900 zł;
 2. Układ regulowany napędowy średniego napięcia – 793 500 zł.
- Czas realizacji aplikacji 1. wyniesie 25 dni.
 - Czas realizacji aplikacji 2. wyniesie 4 dni.

Na podstawie przewidywanych punktów pracy pompowni przy założeniu pracy dwóch zespołów pompa – silnik i przy określonym czasie pracy dla każdego punktu pracy zużycie energii elektrycznej wyniesie:

$$E_D = 1530 \text{ MWh} \quad (1)$$

$$E_R = 740 \text{ MWh} \quad (2)$$

przy czym:

E_D – zużycie energii elektrycznej podczas dławienia dla jednego zespołu;

E_R – zużycie energii elektrycznej podczas regulacji prędkości obrotowej dla jednego zespołu.

Zaoszczędzona wartość energii (ΔE) dla jednego zespołu wynosi:

$$\Delta E = E_D - E_R = 1530 - 740 = 790 \text{ MWh} \quad (3)$$

Do obliczeń przyjęto cenę 1 MWh równą (k_E – zł/MWh)

$$k_E = 265 \frac{\text{zł}}{\text{MWh}} \quad (4)$$

Wówczas cena zaoszczędzonej energii dla jednego zespołu wyniesie (C_E):

$$C_E = k_E \cdot \Delta E = 265 \cdot 790 = 20350 \text{ zł} \quad (5)$$

4. Efekty zastosowanej modernizacji

Wszystkie efekty zastosowanej modernizacji można przedstawić w postaci wielkości wymiernih (np. wartość zaoszczędzonej energii) lub trudno wymiernih (np. brak prądów rozruchowych silników, stabilne przepływy wody w rurociągu). Ogólnie można je także podzielić na rodzaje efektów, które przewidywaliśmy, że zaistnieją. Rodzaje tych efektów to:

- efekty technologiczne;
- efekty energetyczne;
- efekty ekologiczne;
- efekty ekonomiczne.

We wszystkich tych efektach pojawia się problem. Zastosować układ napędowy z p.cz. NN czy p.cz. SN? Poniżej zostały przedstawione te efekty z próbą rozwiązania powyższego problemu.

4.1. Efekty technologiczne

Jak wcześniej zostało stwierdzone, pompownia ma dostarczać wody w ilościach zmieniających się nawet ok. połowy wydajności znamionowych. W chwili obecnej ta zmiana realizo-

wana jest poprzez dławienie zasuwy. Jednak czas zamykania lub otwierania zasuwy jest zbyt długi w stosunku do wymagań technologicznych. Regulacja prędkości obrotowej pomp pozwala znacznie zmniejszyć ten czas. Warunkiem jest istnienie momentu napędowego i hamującego rozwijanego przez silnik. P.cz. SN posiada taką możliwość sterowania silnikiem rozwijającym oba typy momentu. P.cz. NN teoretycznie mógłby posiadać takie same właściwości, ale w praktyce do tych mocy (250 kW) nie buduje się standardowych p.cz. NN. Przedstawiony w powyższych rozważaniach układ napędowy z p.cz. NN nie posiada takich właściwości. Wykonanie p.cz. NN na zamówienie znacznie podwyższa cenę układu i termin realizacji. Z powyższych względów p.cz. SN umożliwia spełnienie warunków dynamicznych odbioru wody przez obsługiwana technologię.

4.2. Efekty energetyczne

W pompowni będą pracowały zawsze dwa zespoły układ napędowy – pompa. Wynika to z ilości wody potrzebnej do procesu technologicznego. Całkowita oszczędność energii elektrycznej w porównaniu z dławieniem tych pomp będzie wynosiła:

$$\Delta E_C = 2\Delta E = 2 \cdot 790 = 1580 \text{ MWh} \quad (6)$$

Oprócz wymiernych efektów energetycznych można wstępnie oszacować efekty trudno wymierne energetycznie po zastosowaniu p.cz. SN. Każdy proces przejścia pompowni ze stanu znamionowej wydajności do minimalnej wydajności (przewidziane 55% znamionowej) wymaga zmniejszenia prędkości obrotowej pomp też do 55% prędkości znamionowej. Energia (EK) w poruszających się obrotowo wirnikach silnika i pompy oraz poruszającej się liniowo w rurociągu wody wynosi:

$$E_{kN} = J_C \frac{\Omega_N^2}{2} \quad (7)$$

przy czym:

J_C – całkowity moment bezwładności sprowadzony do wału silnika.

$$J_C = J_S + J_P + J_W \quad (8)$$

J_S – moment bezwładności wirnika w silniku;

J_P – moment bezwładności wirnika pompy;

J_W – moment bezwładności wody w rurociągu.

Wartość J_W można obliczyć z zależności:

$$J_W = \frac{\rho \cdot l}{S} \left(\frac{Q_N}{\Omega_N} \right)^2 \quad (9)$$

przy czym:

ρ – masa właściwa wody;

l – długość rurociągu;

S – pole przekroju rurociągu;

Q_N – znamionowe natężenie przepływu pompy;

Ω_N – znamionowa prędkość kątowna pompy.

Przewiduje się, że w ciągu doby może być do kilkunastu takich zmian prędkości obrotowej z Ω_N do $0,55 \Omega_N$. Szacunkowe obliczenia wskazują, że dzięki hamowaniu ze zwrotem energii (realizuje taką funkcję p.cz. SN) można jeszcze zaoszczędzić kilka do kilkunastu tys. kWh energii elektrycznej rocznie. Również fakt, że p.cz. SN pobiera z sieci zasilającej prąd o współczynniku THDI rzędu kilku do 10% (p.cz. NN w najtańszej wersji pobiera prąd przy THDI rzędu nawet 30%), oraz że współczynnik mocy pierwszej harmonicznej prądu jest rzędu 0,92–0,94, można także zaoszczędzić jeszcze kilka tys. kWh energii elektrycznej rocznie.

4.3. Efekty ekologiczne

Zaoszczędzenie co najmniej 1580 MWh energii elektrycznej skutkuje zmniejszeniem wytworzonych zanieczyszczeń powietrza powstających przy produkcji energii elektrycznej.

Wyprodukowanie 1 MWh energii elektrycznej przez elektrownię systemową z blokami 200 MW, gdzie paliwem jest węgiel kamienny, powoduje emisję [2]:

- pyłu w ilości 0,61 kg;
- dwutlenku siarki w ilości 0,036 kg;
- tlenków azotu w ilości 1,485 kg;
- dwutlenku węgla w ilości 0,931 Mg.

Zaoszczędzenie 1580 MWh energii elektrycznej ograniczy emisję o następujące wartości:

- 96,4 kg (pył);
- 56,9 kg (SO₂);
- 2346 kg (NO_x);
- 1471 Mg (CO₂).

Oszczędność energii elektrycznej w tak niewielkiej pompowni ogranicza emisję zanieczyszczeń o konkretną wartość jej składników.

4.4. Efekty ekonomiczne

Oszczędność energii elektrycznej o wartości ΔE_C przy cenie energii za 1 MWh:

$$k_e = 265 \frac{\text{zł}}{\text{MWh}} \quad (10)$$

pozwala uzyskać kwotę ΔZ wynoszącą w ciągu roku:

$$\Delta Z = \Delta E_C \cdot k_e = 1580 \cdot 265 = 418\,700 \text{ zł} \quad (11)$$

Uwzględniając nakłady na modernizację, czas zwrotu wynosi:

- dla modernizacji przy zastosowaniu p.cz. NN nie więcej niż 2 lata (dokładnie 1,5);
- dla modernizacji przy zastosowaniu p.cz. SN nie więcej niż 4 lata (dokładnie 3,8).

Powyższe obliczenia dotyczą tzw. prostego czasu zwrotu. Uwzględniając stopę dyskonta można policzyć zdyskontowany czas zwrotu modernizacji [3, 4]. Jednak nie wykonano tych obliczeń, chociaż łatwo jest to zrobić, korzystając ze wskazanej literatury, ponieważ może się okazać, że każdy dzień trwania modernizacji przynosi duże straty ze względu na zatrzymanie procesu technologicznego. Ponieważ dla układu z p.cz. NN czas modernizacji wynosi ponad 20 dni, a dla p.cz. SN nie przekracza 5 dni oraz brak informacji o stosowanej w tym zakładzie

(gdzie pracuje pompownia) wartości stopy dyskonta, do takich obliczeń trudno jest przewidzieć, który wariant modernizacji będzie ekonomicznie lepszy. Szacunkowo przyjmując straty w ciągu 1 dnia rzędu 150 tys. zł, można wykazać, że wskaźniki ekonomiczne wskazują zdecydowanie na lepszy wariant modernizacji z p.cz. SN. Według UNIDO (Organizacja Rozwoju Przemysłowego Narodów Zjednoczonych) należy policzyć następujące wskaźniki ekonomiczne:

- zdyskontowany czas zwrotu nakładów – (DPBP);
- wartość zaktualizowaną netto – (NPV);
- wewnętrzną stopę zwrotu – (IRR).

Te wskaźniki znacznie lepiej oceniają, który typ modernizacji jest bardziej ekonomiczny.


5. Podsumowanie

Powyższe rozważania wskazują na kilka ważnych wniosków koniecznych do stosowania w przypadku przedstawionego przypadku modernizacji pompowni wodociągowej typu przemysłowego.

- Głęboka regulacja parametrów wyjściowych (ciśnienie, natężenie przepływu) pompowni prawie zawsze uzasadnia stosowanie układów napędowych pomp z przemiennikami częstotliwości.
- Stosowanie tych układów napędowych wymaga dokładnej analizy techniczno-ekonomicznej, gdy rozważany jest dobór urządzeń na napięcie niskie lub średnie.
- Cena samego przemiennika częstotliwości dla niskiego napięcia może być kilkakrotnie niższa niż dla napięcia średniego.
- Prowadzenie analizy techniczno-ekonomicznej wymaga bardzo dobrej znajomości procesu technologicznego obsługiwanego przez taką pompownię oraz bardzo dobrej znajomości eksploatacji regulowanych układów napędowych.
- Wskaźniki ekonomiczne są bardzo pomocne przy podejmowaniu decyzji o sposobie modernizacji, chociaż nie uwzględniają wszystkich zjawisk technicznych trudno wymiernych, mających czasem duże znaczenie.

Literatura

- [1] OSUCH–PAJDIŃSKA E., ROMAN M.: *Sieci i obiekty wodociągowe*. Oficyna wydawnicza PW, 2008.
- [2] KOCZARA W., SZULC Z.: *Poprawa sprawności wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej poprzez zwiększenie efektywności energetycznej napędów potrzeb własnych dużych mocy*. „Napędy i Sterowanie” 6/2012.
- [3] PASKA J.: *Ekonomika w elektroenergetyce*. Oficyna Wydawnicza PW, 2007.
- [4] Program Efektywnego Wykorzystania Energii PEMP, Wskaźniki ekonomiczne dla inwestycji. www.centrum.pemp.pl, 2006.

 Zbigniew Szulc – Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Napędu Elektrycznego

artykuł recenzowany