

Ocena efektywności energetycznej regulowanych układów napędowych w pompowniach wodociągowych

Zbigniew Szulc

1. Wstęp

Efektywność energetyczna układów napędowych przedstawia jakość przetwarzania energii elektrycznej na energię mechaniczną. W praktyce energia elektryczna pobierana jest z trójfazowej sieci energetycznej, a układ napędowy składa się z przemiennika częstotliwości i silnika elektrycznego, najczęściej trójfazowego klatkowego. Względy technologiczne i ekonomiczne coraz częściej wymuszają stosowanie takich układów napędowych w pompowniach wodociągowych. Do oceny efektywności energetycznej takich układów potrzebna jest dobra znajomość procesów energetycznych. Opisane są one liczbowo poprzez moce i straty mocy. W regulowanych układach napędowych przebiegi prądów i napięć są odkształcone od przebiegów sinusoidalnych. Specyfika trójfazowego układu elektrycznego i przebiegów odkształconych wymusza skomplikowany opis matematyczny mocy [1, 2]. W praktyce zachodzi potrzeba doboru i porównania układów napędowych o różnych topologiach obwodów głównych, wejściowych i wyjściowych. Mówienie o efektywności energetycznej układów napędowych z przekształtnikiem lub porównanie ich ze sobą, aby wybrać do danej aplikacji optymalny pod względem technologicznym i ekonomicznym, są bardzo utrudnione lub niemożliwe. Wynika to z różnych opisów matematycznych i różnych parametrów używanych w praktyce.

Autor proponuje zastosować opis efektywności energetycznej na podstawie parametrów, które są możliwe do wyznaczenia ich wartości na podstawie dostępnych w praktyce wielkości, oraz ich pomiar w eksploatacji [3]. Ułatwi także podejście do wyboru układu napędowego na etapie projektowania, a potem praktycznego sprawdzenia.

2. Opis zjawisk energetycznych w regulowanym układzie napędowym

W każdym układzie napędowym energia elektryczna zamieniana jest na mechaniczną. Energia elektryczna w procesie zamiany ulega częściowym stratom. Różnego rodzaju straty występują w przekształtnikach i silnikach. Niektóre zjawiska energetyczne są konsekwencją działania układu z założoną skończoną dokładnością, wynikającą z szeregu przyczyn. Ogólnie można stwierdzić, że praca regulowanego układu napędowego z energoelektronicznymi przekształtnikami powoduje następujące straty energii:

- straty wynikające z przepływu prądu przez rezystancję: uzwojeń, przewodów, elementów rezystancyjnych układów pomiarowych itp.;

Streszczenie: Efektywność energetyczna układów napędowych należy do najważniejszych ich właściwości. Na podstawie jej oceny można przewidywać efekty techniczne i ekonomiczne zastosowania regulowanych układów napędowych w pompowniach wodociągowych.

W artykule została przedstawiona ilościowa metoda oceny efektywności energetycznej. Zostały przedstawione parametry opisujące zjawiska energetyczne, mające główny wpływ na ocenę efektywności energetycznej.

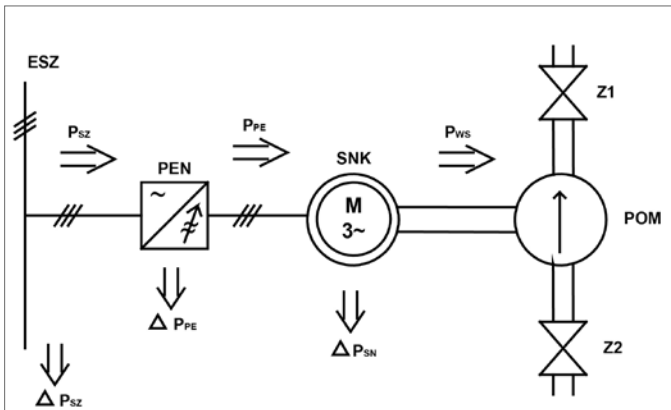
THE ENERGETIC EVALUATION OF CONTROL DRIVE SYSTEMS IN THE WATER PUMPING STATIONS

Abstract: *The energy efficiency of drive systems is their most important feature. Based on it's evaluation it is possible to envisage technical effects and economical usage of the control drive systems in the water pumping stations.*

In the article was presented a quantitative evaluation of the energy efficiency. There were also presented parameters describing energetic phenomenons which have main impact on the energy efficiency evaluation.

- straty wynikające z działania strumienia magnetycznego na obwody magnetyczne: silnika, transformatorów, przekładników itp.;
- straty wynikające ze zjawisk mechanicznych: głównie zjawiska tarcia przy ruchu obrotowym.

Tak jak było przedstawione powyżej, specyfika obwodu trójfazowego i istnienie wyższych harmonicznych znacznie utrudniają dokładną analizę zjawisk energetycznych. Efektywność energetyczna musi uwzględniać wszystkie zjawiska powodujące straty energii. Jeżeli w praktyce pomijamy niektóre zjawiska, to należy oszacować, z jaką dokładnością to robimy (np. straty energii w izolacji silników, kabli, przewodów). Miejsce występowania tych strat energii zostało przedstawione na rys. 1. Przy opisie matematycznym zjawisk energetycznych energia (W) jest rzadziej stosowana, gdyż musi uwzględniać czas pracy układu. Znacznie częściej stosuje się pojęcie mocy (P) jako łatwiejsze do opisu różnych zjawisk. Traktując te wielkości jako funkcje czasu (t) można napisać:



Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego z zaznaczeniem strat mocy: ESZ – energetyczna sieć zasilająca; PEN – przekształtnik energoelektroniczny; SNK – silnik napędowy klatkowy; POM – pompa wodociągowa; Z1, Z2 – zawory na króćcu tłocznym (Z1) i ssawnym (Z2)

$$P(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (1)$$

Na rys. 1 zostały zaznaczone przepływy mocy oraz miejsce start mocy występujących w układzie napędowym. Poniżej zostały przedstawione oznaczenia mocy:

- P_{SZ} – moc pobrana z sieci zasilającej;
- ΔP_{SZ} – straty mocy w sieci zasilającej;
- P_{PE} – moc wyjściowa przekształtnika energoelektronicznego;
- ΔP_{PE} – straty mocy w przekształtniku energoelektronicznym;
- P_{WS} – moc mechaniczna na wale silnika napędowego klatkowego;
- ΔP_{SN} – straty mocy w silniku napędowym.

Oszacowanie tych strat jest możliwe na etapie projektu regulowanego układu napędowego. Straty mocy w silniku napędowym (SNK) wynoszą:

$$\Delta P_{SN} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{me} \quad (2)$$

przy czym:

- ΔP_{Cu} – straty mocy w uzwojeniach, proporcjonalne do wartości skutecznej prądu (I_{RMS});
- Jeżeli przy przebiegach prądów odkształconych:

$$I_{RMS} = I_1 \sqrt{1 + (THD)^2} \quad (3)$$

dla oznaczeń:

- I_1 – pierwsza harmoniczna (podstawowa) prądu;
- THD – współczynnik odkształcenia prądu, moment na wale silnika SNK rozwijają tylko pierwsze harmoniczne prądu i napięcia;
- ΔP_{Fe} – straty mocy w obwodach magnetycznych silnika.

$$\Delta P_{Fe} = \sum_{h=1}^n \Delta P_{Feh} = f_1(f_{h1} U_h) \quad (4)$$

gdzie:

- f_h, U_h – częstotliwość i napięcie rzędu „h” dla przebiegu odkształconego napięcia;
- n – rząd harmonicznej, do którego rozpatrujemy odkształcenie przebiegu.

ΔP_{me} – straty mechaniczne w silniku

$$\Delta P_{me} = f_2(\Omega) \quad (5)$$

przy czym:

- Ω – prędkość kątowna silnika.

Straty mocy w przekształtniku energoelektronicznym ΔP_{PE} zależą od topologii tego układu oraz parametrów wyjściowych, tzn. mocy P_{PE} i częstotliwości wyjściowej f_{PE} . Najczęściej do chwili obecnej PEN jest przemiennikiem częstotliwości (PCZ), więc ogólnie należy stwierdzić, że jego prądy wejściowe i wyjściowe są odkształcone. Podobnie i napięcie wyjściowe będzie odkształcone. Najlepszą formą do obliczeń strat mocy w przekształtniku PCZ jest znajomość jego charakterystyki sprawności (η_{PE}):

$$\eta_{PE} = f_3(P_{PE}, f_{PE}) \quad (6)$$

w eksploatowanym zakresie obciążeń. Wówczas straty mocy w PEN wynoszą:

$$\Delta P_{PE} = P_{PE} \frac{1 - \eta_{PE}}{\eta_{PE}} \quad (7)$$

Sieć elektroenergetyczna zasilająca przekształtnik jest eksploatowana przez użytkownika pompowni i zasilą również inne odbiorniki. Charakter mocy P_{SZ} (jej jakości) ma wpływ na moc pobieraną przez te inne odbiorniki energii. Jakość tej mocy i jej wartość mają decydujący wpływ na zużycie energii elektrycznej przez obiekt pompowni. Analiza zjawisk energetycznych przy przebiegach odkształconych, trójfazowych i, ogólnie rzecz biorąc, niesymetrycznych jest utrudniona przez fakt istnienia kilku teorii w tej dziedzinie. W chwili obecnej teoria składowych fizycznych prądów (CPC) przedstawiona w [2] jest najszybciej rozwijana. Autor niniejszego artykułu proponuje następujące podejście do oszacowania efektów energetycznych w sieci zasilającej: należy założyć, że cały obiekt pompowni (razem z jego siecią zasilającą ESZ) zasilany jest ze źródła o bardzo dużej mocy zwarciowej (S_z), tzn.: $S_z \rightarrow \infty$. Przebiegi napięcia zasilającego są więc sinusoidalne. Jakość obwodów wejściowych PEN (pod względem generowania wyższych harmonicznych prądów) decyduje o współczynniku odkształcenia prądów wejściowych (THD_{WE}), a ich pierwsza harmoniczna jest przesunięta o kąt 1 względem napięcia. Dla punktu zasilającego PEN można więc napisać:

$$P_{SZ1} = \sqrt{3} U_{SZ1} \cdot I_{ISZ1} \cdot \cos\phi_1 \quad (8)$$

Jest to moc czynna pierwszej harmonicznej prądu zasilającego (I_{ISZ}) przy sinusoidalnym (założenie) napięciu przewodowym sieci zasilającej U_{SZ1} .

Ponieważ prąd I_{SZ} jest odkształcony, więc jego wartość skuteczna:

$$I_{RMSZ} = I_{1SZ} \sqrt{1 + (THD_{WE})^2} \quad (9)$$

przy czym:

- I_{1SZ} – wartość skuteczna pierwszej harmonicznej straty mocy (ΔP_{CuZ}) sieci zasilającej na rezystancjach (R_{SZ} – rezystancja zastępcza jednej fazy ESZ)

$$\Delta P_{CuZ} = 3R_{SZ} \cdot I_{RMSZ} \quad (10)$$

Kolejnym zjawiskiem energetycznym powodującym straty mocy może być asymetria prądów zasilających. Generowana wówczas moc niezrównoważenia obciąża system zasilający, a więc generuje straty mocy czynnej na rezystancji R_{SZ} . W zależności od teorii mocy różnie jest opisywana. Autor niniejszego artykułu wprowadza pojęcie niesymetrii prądów zasilających (n_I), którą można zdefiniować:

$$n_I = \frac{I_{SZM}}{I_{SZM} + \Delta I} \quad (11)$$

przy czym:

- ΔI – największa różnica pomiędzy jednym z trzech prądów zasilających a średnią wartością tych trzech prądów.

Straty mocy mechanicznej zależą od prędkości obrotowej. Zależność ta może być liniowa lub kwadratowa. Straty te mogą wzrosnąć na skutek pulsacji prędkości obrotowej spowodowanej pulsującym momentem silnika. Pulsujący moment może mieć przyczynę w niesymetrycznej pracy PCZ lub w niestabilności układu napędowego, pracującego np. ze sprzężeniem zwrotnym od ciśnienia wyjściowego lub natężenia przepływu. Podobnie jak w poprzednich stratach wynikających z niesymetrii prądów zasilających, można wprowadzić definicję pulsacji prędkości obrotowej:

$$p_\Omega = \frac{\Omega}{\Omega + \Delta\Omega} \quad (12)$$

przy czym:

- $\Delta\Omega$ – amplituda pulsacji;
- Ω – średnia wartość prędkości kątowej.

W celu ujednoczenia tych wielkości autor proponuje opisanie efektywności energetycznej regulowanego układu napędowego, stosując metodę współczynników zaproponowanych w [3].

3. Liczbowe określenie efektywności

Dla danego punktu pracy regulowanego układu napędowego możliwe jest obliczenie (zmierzenie) wszystkich strat. Bezpośrednie obliczenie wartości strat mocy czy energii może być utrudnione ze względu na brak ujednoczonego opisu mocy przez różne teorie. Dlatego zjawiska trudne do bezpośredniej oceny liczbowej można opisać za pomocą współczynników. Współczynniki te powinny mieć wymierny zakres wartości, np. od 0 do 1. Jeżeli założymy, że 0 to jest najgorsza wartość opisująca zjawisko energetyczne, a im większa, aż do 1, opisuje coraz efektywniejsze zjawiska. Autor proponuje przyjąć:

$$k_1 = \eta_{CA} \quad (13)$$

$$k_2 = \cos\phi_{1WE} \quad (14)$$

$$k_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_{WE})^2}} \quad (15)$$

$$k_4 = n_I \quad (16)$$

$$k_5 = p_\Omega \quad (17)$$

Współczynnik k_3 wynika z przyjęcia za współczynnik [1] odkształcenia przebiegu prądów, współczynnik występujący czasem w literaturze:

$$\gamma = \frac{I_1}{I_{RMS}} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}} \quad (18)$$

Wszystkie współczynniki (13–17) mieszczą się co do wartości w przedziale 0–1. Pominięcie jakiejś wielkości powoduje, że należy przyjąć wartość 1. Jeżeli wskaźnik efektywności energetycznej opiszemy literą k_{ee} , to można go w poniższy sposób zdefiniować:

$$k_{ee} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (19)$$

Przyjmując dla wszystkich tych współczynników następujący sposób obliczeń:

- wyznaczamy punkt pracy układu napędowego (wybranego), zakładając określoną wydajność (Q) pompy (lub ciśnienie);
- dla tego parametru technologicznego obliczamy obciążenie silnika, prądy w jego uzwojeniach, prędkość obrotową, parametry PCZ (napięcia, częstotliwość, prądy), prądy pobierane z sieci zasilającej (przy założeniu $S_Z \rightarrow \infty$);
- obliczamy współczynniki k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 ;
- wyznaczamy dla założonego zakresu regulacji parametru technologicznego (Q) przebieg $k_{ee} = f(Q)$;
- przebieg wykresu określa przebieg efektywności energetycznej, przy czym jeżeli chcemy dokonać porównania możliwości wyboru kilku układów napędowych, to można zastosować kryterium większego pola pod krzywą $k_{ee} = f(Q)$, tzn.:

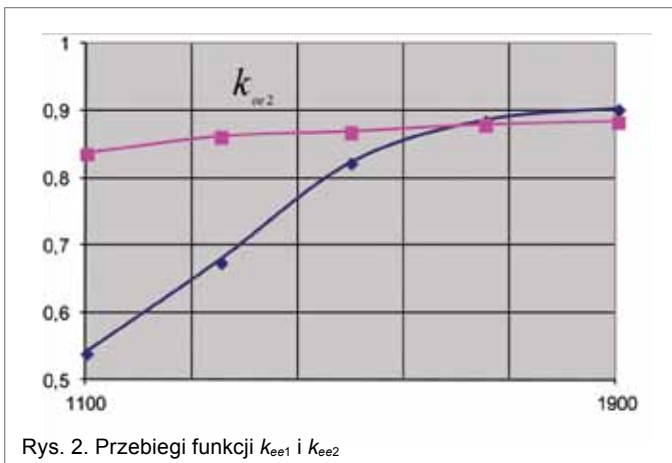
$$\int_{Q_1}^{Q_2} k_{ee1} \cdot dQ \geq \int_{Q_1}^{Q_2} k_{ee2} \cdot dQ \quad (20)$$

przy czym:

- k_{ee1} – przebieg efektywności dla układu napędowego 1;
- k_{ee2} – przebieg efektywności dla układu napędowego 2.

Przedstawiony powyżej sposób wyboru układu napędowego lub przeprowadzenie porównania układów napędowych pod względem efektywności energetycznej mogą wydawać się zbyt skomplikowane. Jednak przy współczesnych metodach symulacji nie są czasochłonne, chociaż wymagają identyfikacji wartości kilku współczynników.

Powyższe podejście daje jednak dużą możliwość wyboru układu napędowego, który eksploatuje się przecięź wiele lat.

Rys. 2. Przebiegi funkcji k_{ee1} i k_{ee2}

4. Przykład zastosowania obliczeń

Powyższe zależności posłużyły do doboru układu napędowego w pompowni wodociągowej, obsługującej osiedle mieszkaniowe i obiekt przemysłowy. W pompowni mają pracować dwie pompy serii B napędzane regulowanymi układami napędowymi. Jedna pompa z regulowaną prędkością obrotową ma pracować w sposób ciągły, a druga ma stanowić rezerwę.

Typ pompy: 35 B 50.

Producent: Warszawska Fabryka Pomp (obecnie POWEN).

Zaprojektowany wymagany zakres natężenia przepływu (Q – m^3/h) oraz moc na wale pompy regulowanej prędkością obrotową silnika napędowego (na podstawie charakterystyk pompy i rurociągu) zostały podane w tabeli 1.

Zaproponowano dwa układy napędowe do wyboru:

- Silnik, typ Sh 400H4Es:
 - moc znamionowa: 560 kW;
 - prędkość znamionowa: 1491 obr/min;
 - napięcie znamionowe: 400 V;
 - prąd znamionowy: 959 A;
 - współczynnik mocy: 0,87;
 - przemiennik częstotliwości: napięciowy, wejście dwunastopulsowe.
- Silnik, typ Sh 400H4E:
 - moc znamionowa: 560 kW;
 - prędkość znamionowa: 1489 obr/min;
 - napięcie znamionowe: 6000 V;
 - prąd znamionowy: 66,3;
 - współczynnik mocy: 0,84;
 - przemiennik częstotliwości: prądowy, obwód wejściowy regulowany.

Przeprowadzono wszystkie obliczenia przedstawione powyżej i dla wymaganych zmian natężenia przepływu (od 1100 m^3/h do 1900 m^3/h) wyznaczono funkcję efektywności energetycznej $k_{ee} = f(Q)$ dla dwóch układów napędowych. Pierwszy z silnikiem i przemiennikiem częstotliwości niskiego napięcia (400 V) ($k_{ee1} = f(Q)$) oraz drugi z silnikiem i przemiennikiem częstotliwości średniego napięcia (6000 V). Drugie rozwiązanie jest droższe od pierwszego, ale efektywność jego jest lepsza, co obrazują krzywe k_{ee1} i k_{ee2} . W tabeli 2 podano wartości tych funkcji dla punktów pracy pompy, a na rys. 2 przedstawiono ich przebieg.

Tabela 1

Q [m^3/h]	1100	1300	1500	1700	1900
P_{ws} [kW]	170	215	300	405	520
n [obr/min]	1010	1100	1210	1320	1450

Tabela 2

Q [m^3/h]	1100	1300	1500	1700	1900
k_{ee1}	0,540	0,676	0,823	0,886	0,904
k_{ee2}	0,837	0,862	0,870	0,880	0,885

5. Wnioski

Na podstawie powyższych rozważań można określić liczbę efektywność energetyczną układu napędowego z regulacją prędkości obrotowej, zastosowanego do pompy. Ze względu na dużą liczbę parametrów sposób oceny efektywności energetycznej może się wydawać trudny. Jednak dokładne dane układu napędowego (silnik oraz przemiennik częstotliwości) są dostępne u producenta tych urządzeń. Wykonanie tych obliczeń, które prowadzą do otrzymania funkcji $k_{ee} = f(Q)$, nie jest obecnie skomplikowane ze względu na istnienie szeregu programów komputerowych ułatwiających pracę. W przedstawionym przykładzie uzyskano ocenę efektywności proponowanych układów napędowych i znacznie ułatwiło to podjęcie ostatecznej decyzji, który układ jest lepszy w eksploatacji.

Literatura

- [1] CZARNECKI L.S.: *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [2] STRZELECKI R., SUPRONOWICZ H.: *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [3] Grant badawczy nr 3139/B/T02/2011/40.

Zbigniew Szulc – Politechnika Warszawska,
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej,
ZAKŁAD NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO

artykuł recenzowany

reklama