Prof. dr inż. Jan Szargut
Politechnika Śląska, Instytut Techniki Cieplnej

Efekt ekonomiczny regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej w elektrowni parowej

Wykorzystanie pary upustowej do podgrzewania wody zasilającej w elektrowni parowej można uważać za szczególny przypadek skojarzonego wytwarzania ciepła i elektryczności. Do podgrzewania wody zasilającej wykorzystuje się bowiem parę, która już wykonała pewną pracę w turbinie z tym, że wytworzone ciepło jest zużywane wewnątrz obiegu.

Podgrzewanie wody zasilającej parą upustową zapewnia uzyskanie oszczędności paliwa w kotle parowym w porównaniu z podgrzewaniem spalinowym.

Omawiany proces wyłącza z procesu rozprężania jego najmniej efektywną część i dlatego zapewnia korzyści energetyczne i ekonomiczne tym większe im rozpatrywany upust znajduje się bliżej skraplacza.

Przyrostowa sprawność energetyczna wyłączonej części procesu rozprężania

Poprawę efektów energetycznych w siłowniach cieplnych uzyskuje się zwykle przez zwiększenie zużycia paliwa i zwiększenie produkowanej mocy elektrycznej. Taki efekt uzyskuje się np. przez uzupełnienie siłowni parowej węglowej czołowym członem turbogazowym. Uzyskaną poprawę efektywności energetycznej można wówczas określić za pomocą sprawności energetycznej przyrostowej, wyrażającej stosunek przyrostu produkowanej mocy elektrycznej do przyrostu zużycia energii chemicznej.

Efektywność energetyczna siłowni poprawia się, jeżeli sprawność przyrostowa jest większa od początkowej sprawności siłowni.

Przy regeneracyjnym podgrzewaniu wody zasilającej za pomocą pary upustowej składniki efektu energetycznego są przeciwne.

Przy danym strumieniu pary świeżej, zmniejsza się produkcja energii elektrycznej, jednak równocześnie zmniejsza się zużycie paliwa. Łączny efekt energetyczny jest pozytywny jeżeli stosunek zmniejszenia produkcji elektryczności ($-\Delta E_{el}$) do zmniejszenia zużycia energii chemicznej ($-\Delta E_{ch}$) jest mniejszy od początkowej sprawności energetycznej siłowni. Dlatego użyto określenia „przyrostowa sprawność energetyczna wyłączonego procesu rozprężania".

Sprawność tę można wyrazić wzorem:

$$\eta_{\nabla} = \frac{-\Delta E_{el}}{-\Delta E_{ch}} \tag{1}$$

Można ją obliczyć oddzielnie dla każdego podgrzewacza regeneracyjnego. Rozwinięta postać wzoru (1) zależy od schematu układu regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej.

Zmniejszenie produkcji energii elektrycznej można wyrazić wzorem:

$$-\Delta E_{eli} = \eta_{me} \Delta G_i (i_i - i_0) \tag{2}$$

gdzie: η_{me} = sprawność elektromechaniczna turbozespołu,
ΔG_i = strumień pary pobieranej z i-tego upustu,
i_i, i_0 = entalpia właściwa pary w i-tym upuście i przy dopływie do skraplacza.

W celu obliczenia oszczędności energii chemicznej należy porównać bilans energii dotyczący kotła przed wprowadzeniem i po wprowadzeniu podgrzewania regeneracyjnego wody zasilającej.

Regeneracyjne podgrzewanie wody zasilającej wymaga wprowadzenia do kotła, w celu zachowania wysokiej sprawności energetycznej, innego odbiornika ciepła. Tym dodatkowym odbiornikiem ciepła jest spalinowy podgrzewacz powietrza. W celu obliczenia oszczędności energii chemicznej uzyskanej dzięki regeneracyjnemu podgrzewaniu wody zasilającej, należy porównać dwa bilanse energii. Przed wprowadzeniem podgrzewania wody zasilającej parą upustową bilans energii ma postać:

$$PW_d = Q_P + Q_w + Q_0 + PS(T_s - T_0) \tag{3}$$

gdzie: P, W_d = zużycie i wartość opałowa paliwa,
$Q_P + Q_w$ = ciepło pochłonięte przez wodę i parę,
Q_w = ciepło pochłonięte przez wodę i przeznaczone do wyeliminowania przez podgrzewanie regeneracyjne,
Q_0 = ciepło tracone do otoczenia,
S = pojemność cieplna spalin na jednostkę paliwa,
T_s, T_0 = temperatura spalin i otoczenia.

Bilans energii po wprowadzeniu podgrzewania regeneracyjnego sformułowano przyjmując stałą temperaturę spalin i stałe ciepło tracone do otoczenia. W bilansie tym nie występuje ciepło pochłonięte przez podgrzewane powietrze, gdyż wraca ono do kotła:

$$(P + \Delta P) W_d = Q_P + Q_0 + (P + \Delta P) S (T_s - T_0) \tag{4}$$

Z równań (3) i (4) wynika:

$$-\Delta P = \frac{Q_w}{W_d - S(T_s - T_0)} \tag{5}$$

przy czym można podstawić:

$$W_d - S(T_s - T_0) = W_d(\eta_{Ek} + \varepsilon_0) \tag{6}$$

gdzie ε_0 = względna strata ciepła do otoczenia.

Oszczędność energii chemicznej można więc wyrazić wzorem:

$$-\Delta E_{ch} = \frac{Q_w}{\eta_{Ek} + \varepsilon_0} \tag{7}$$

Jeżeli założy się, że kondensat pary upustowej odpływa z każdego podgrzewacza do kolejnego podgrzewacza i jego entalpia jest dana, to po rozwinięciu wzoru (1) otrzymuje się dla i-tego przyrostową sprawność energetyczną wyłączenia części strumienia pary z procesu rozprężania:

$$\eta_{\nabla i} = \frac{(\eta_{Ek} + \varepsilon_0)\,\eta_{me}\Delta G_i(i_i - i_0)}{\Delta G_i(i_i - i_{wi}) + (i_{w,i-1} - i_{wi})\sum_{m=1}^{m=i-1}\Delta G_m} \tag{8}$$

gdzie: η_{Ek}, η_{me} = sprawność energetyczna kotła i elektromechaniczna turbozespołu,
ΔG_i, ΔG_m = strumień pary pobieranej z *i*-tego oraz *m*-tego upustu,
i_{wi}, i_{wm} = entalpia właściwa skroplin przy odpływie z *i*-tego oraz *m*-tego podgrzewacza,
i, m = numer kolejny podgrzewacza, poczynając od najwyższego.

Wzór (8) dotyczy podgrzewaczy należących do zespołu połączonego kaskadowym systemem odprowadzania kondensatu. Przy stosowanym zwykle schemacie obejmuje więc podgrzewacze wysokoprężne, łącznie z odgazowywaczem i oddzielnie podgrzewacze niskoprężne.

W tabeli 1 podano wyniki przykładowego obliczenia przyrostowej sprawności energetycznej wyłączenia ekspansji dla trzech niskoprężnych podgrzewaczy regeneracyjnych bloku kondensacyjnego o mocy 360 MW.

Tabela 1

Przyrostowa sprawność energetyczna wyłączenia ekspansji regeneracyjnych podgrzewaczy wody zasilającej

Numer kolejny podgrzewacza	1	2	3
Ciśnienie w upuście, MPa	0,314	0,106	0,038
Strumień pary upustowej, kg/s	18	13	17
Entalpia właściwa pary i kondensatu, kJ/kg	2875; 547	2695; 415	2565; 305
Przyrostowa sprawność energetyczna wyłączenia ekspansji $\eta_{\nabla i}$	0,1988	0,1212	0,0731

Przyjęto sprawność energetyczną kotła $\eta_{Ek} = 0{,}935$, wskaźnik strat ciepła do otoczenia $\varepsilon_0 = 0{,}006$, sprawność elektromechaniczną turbozespołu $\eta_{me} = 0{,}97$, sprawność wewnętrzną niskoprężnej części turbiny $\eta_i = 0{,}84$, ciśnienie w skraplaczu $p_0 = 0{,}007$ MPa [1], [2]. Entalpia właściwa pary płynącej do skraplacza wynosi 2368 kJ/kg.

Zgodnie z przewidywaniem, sprawność energetyczna wyłączenia ekspansji jest mniejsza od sprawności energetycznej bloku i staje się tym mniejsza (a więc tym korzystniejszy) im bliżej skraplacza znajduje się rozpatrywany upust.

Efekt ekonomiczny regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej

Roczny efekt ekonomiczny regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej obliczono przy stałym strumieniu pary świeżej.

Składa się on z kosztu ΔK_{el} dodatkowej produkcji energii elektrycznej w systemie, zmniejszenia kosztu $(-\Delta K_F)$ paliwa spalanego w kotle elektrowni oraz stałego kosztu K_{reg} podgrzewacza regeneracyjnego. Ze względu na stały strumień pary świeżej można pominąć zmianę stałego kosztu kotła:

$$\Phi = -\Delta K_{el} + (-\Delta K_F) - K_{reg} \tag{9}$$

Wprowadzenie spalinowego podgrzewacza powietrza prowadzi w zasadzie do podwyższenia temperatury spalania, może więc sprzyjać zmniejszeniu powierzchni ogrzewanej w kotle. Zwykle jednak przez zastosowanie pierwotnych metod ograniczenia emisji tlenków azotu ogranicza się wysokość temperatury spalania. Przyjęcie niezmiennego kosztu stałego kotła jest więc uzasadnione.

Koszt dodatkowej produkcji elektryczności można wyznaczyć podobnie przy rozpatrywaniu skojarzonego wytwarzania ciepła i elektryczności, tj. za pomocą zasady unikniętych kosztów produkcji elektryczności [1], a raczej w rozpatrywanym przypadku za pomocą marginalnego kosztu wytwarzania elektryczności w systemie elektroenergetycznym.

Dla *i*-tego podgrzewacza uzyskuje się:

$$\Delta K_{eli} = \tau_n k_{el} \eta_{me} = \Delta G_i(i_i - i_0) \tag{10}$$

gdzie: τ_n = roczny czas wykorzystania nominalnej mocy bloku,
k_{el} = jednostkowy koszt marginalny produkcji elektryczności w systemie.

Oszczędność kosztu paliwa dzięki działaniu *i*-tego podgrzewacza regeneracyjnego można więc wyrazić następującym wzorem:

$$-\Delta K_{Fi} = \frac{k_F}{k_{el}} \frac{\Delta K_{eli}}{\eta_{\nabla i}} \tag{11}$$

gdzie k_F = koszt jednostkowy energii chemicznej paliwa.

Tabela 2

Zmniejszenie kosztów eksploatacji bloku energetycznego dzięki regeneracyjnemu podgrzewaniu wody zasilającej

Numer kolejny podgrzewacza	1	2	3
Koszt produkcji dodatkowej energii elektrycznej, mln zł/rok	6,88	3,21	2,53
Oszczędność kosztu paliwa, mln zł/rok	8,08	6,18	8,08
Łączna oszczędność kosztu eksploatacji, mln zł/rok	1,20	2,97	5,55

W tabeli 2 podano wartości efektów eksploatacyjnych zapewnionych przez regeneracyjne podgrzewanie wody zasilającej dla danych przyjętych w tabeli 1.

Przyjęto:

- koszt graniczny energii elektrycznej $k_{el} = 30$ zł/GJ,
- koszt jednostkowy energii chemicznej paliwa $k_F = 1$ zł/GJ,
- roczny czas wykorzystania mocy znamionowej $\tau_n = 7200$ h/rok.

Oszczędność kosztu eksploatacji jest tym większa, im bliżej skraplacza znajduje się rozpatrywany upust.

Wnioski

Przedstawiona metoda obliczania efektów energetycznych i ekonomicznych regeneracyjnego podgrzewania wody zasilającej może służyć do optymalizacji wielkości powierzchni przepływu ciepła w poszczególnych podgrzewaczach regeneracyjnych, a nawet do optymalizacji całego systemu podgrzewania regeneracyjnego.

Przedstawiona metoda pozwala uniknąć rozpatrywania wpływu regeneracji na sprawność całego bloku energetycznego.

LITERATURA

[1] Szargut J., Ziębik A.: Podstawy energetyki cieplnej. Wyd. 2 poprawione, PWN, Warszawa 2000

[2] Szargut J.: Application of steam from regenerative bleeds for the production of network heat in large steam power plants. Archiwum Energetyki, XXVIII (1999), nr 1—2, 83—93

Katedra
Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa
Wydziału Górnictwa i Geologii
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Sekcja
Elektrotechniki i Automatyki Górniczej
Stowarzyszenia Elektryków Polskich

Centrum
Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa
EMAG w Katowicach

organizują w dniach 8–10 września 2004 r. w Jarnołtówku

Jubileuszową

X Krajową Konferencję Elektryki Górniczej

pod tytułem

Nowoczesne urządzenia elektryczne zasilajace i napędowe w zakładach górniczych

Zakres tematyczny konferencji:

- nowe rozwiązania rozdzielnic, stacji transformatorowych i łączników manewrowych,
- nowe konstrukcje kabli i przewodów oponowych górniczych,
- stosowanie podwyższonego napięcia do zasilania maszyn górniczych,
- elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa,
- układy nadzoru, kontroli i sterowania,
- środki ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym,
- nowe rozwiązania górniczych silników jedno- i dwubiegowych,
- przekształtnikowe układy zasilające i napędowe,
- technika mikroprocesorowa w górniczych układach napędowych i zasilających,
- urządzenia trakcji elektrycznej,
- modelowanie i symulacja kopalnianych układów zasilajacych i napędowych,
- komputerowe wspomaganie projektowania kopalnianych układów zasilajacych i napędowych,
- badania i diagnostyka górniczych urządzeń zasilających i napędowych.

Adres organizatorów:

Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice
tel. (032) 237 11 75, tel./faks (032) 237 15 37
e-mail: kkeg@polsl.gliwice.pl
www: http://zeus.polsl.gliwice.pl/~kkeg