

Janusz Rak¹, Kazimierz Jagiela^{2,3}, Marian Kępiński¹, Marek Gala¹

¹Politechnika Częstochowska, Częstochowa, ²ATH, Bielsko-Biała, ³Oddział Częstochowski SEP

POPRAWA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W WYNIKU MODERNIZACJI UKŁADU NAPĘDOWEGO WALCARKI

IMPROVEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AS A RESULT OF MODERNIZATION OF THE ROLLING MILL'S DRIVE SYSTEM

Streszczenie: Artykuł przedstawia metodę określenia strat mocy w układach napędowych z układami przekształtnikowymi. Obliczenia wykonano na przykładzie walcarki napędzanej pierwotnie przez silnik prądu stałego zasilany z przekształtnika tyrystorowego, a po modernizacji przez silnik asynchroniczny sterowany prze-miennikiem częstotliwości. W obu układach po stronie sieci zasilającej zastosowano pasywny filtr L-C. W analizie strat mocy uwzględniono niesinusoidalny przepływ prądu w elementach instalacji elektrycznej obejmującej transformator oraz kable średniego napięcia. Na podstawie pomiarów komputerowych obliczono wartości mocy oraz zawartości wyższych harmonicznych prądów w systemie zasilania układów napędowych walcarki. Wykonane obliczenia umożliwiły oszacowanie strat mocy i energii elektrycznej w układzie walcarki.

Abstract: The article presents a method for calculating power losses in drive systems with converter systems. Calculation was made on the example of a rolling mill originally driven by a DC motor supplied from a thyristor converter, and after modernization with asynchronous motor controlled by a frequency converter. Passive L-C filter was used on the supply side in both systems. The power loss analysis includes the non-sinusoidal currents in the electrical installation including the transformer and medium voltage cables. Power values and harmonic currents were calculated in the power system of the mill drive systems on the basis of computer measurements. The calculations made it possible to estimate electrical power losses in the rolling mill system.

Słowa kluczowe: układ napędowy, straty mocy, efektywność energetyczna, wyższe harmoniczne

Keywords: drive system, power losses, energy efficiency, harmonics

1. Wstęp

Industrializacja, wzrost aglomeracji miejskich i podniesienie standardu życia człowieka, jakie dokonały się na przestrzeni XX wieku stały się przyczyną obecnych problemów naszego globu, jakimi są zanieczyszczenie atmosfery, gleby i wody oraz zmiany klimatyczne. Za stan ten w dużej mierze odpowiada energetyka, a ściślej procesy związane z wytwarzaniem i użytkowaniem energii w różnych jej formach. Dlatego obecnie w krajach Unii Europejskiej realizowana jest strategia zrównoważonego rozwoju polegająca na oszczędności energii pierwotnej, rozwoju kogeneracji i odnawialnych źródeł energii (OZE), ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych oraz wdrażaniu budownictwa inteligentnego i energooszczędnego. Podstawą tej strategii w sektorze energetycznym jest zwiększenie efektywności energetycznej przez wytwórców i użytkowników energii, a celem jest obniżenie o 20% zużycia energii pierwotnej w Unii do roku 2020, redukcja o 40% emisji gazów cieplarnianych do roku 2030 oraz ostateczne przejście na konkurencyjną gospodarkę niskoemisyjną do roku 2050. Program ten wymaga również określonych działań w sektorze

elektroenergetycznym związanych z poprawą efektywności energetycznej w obszarze wytwarzania, dystrybucji oraz u odbiorców końcowych. Oszczędność energii elektrycznej jest związana bezpośrednio z poziomem jej strat w urządzeniach oraz instalacjach odbiorców przemysłowych i komunalnych.

2. Uwarunkowania prawne i techniczne w zakresie efektywności energetycznej układów napędowych

Cele ilościowe zawarte w pierwszym pakiecie energetyczno-klimatycznym przyjętym przez kraje Unii Europejskiej w 2008 roku zakładały:

- redukcję do 2020 r. emisji gazów cieplarnianych o 20% poniżej poziomu z roku 1990,
- racjonalizację zużycia energii i zwiększenie efektywności energetycznej o 20% w odniesieniu do prognoz na rok 2020,
- zwiększenie do 20% udziału energii ze źródeł odnawialnych w ogólnym bilansie energetycznym krajów UE w roku 2020.

Konieczność przyjęcia zintegrowanego podejścia w celu wykorzystania całego istniejącego potencjału w zakresie oszczędności energii

oraz przewyciężenia kryzysu gospodarczego, stanowiły główne podstawy przyjęcia przez Parlament Europejski w 2012 r. dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej [3]. Wskazuje ona obszary, w których zintensyfikowanie działań ma doprowadzić do osiągnięcia zamierzonego ograniczenia zużycia energii, w tym energii elektrycznej.

Także w Polsce wzrost efektywności energetycznej traktowany jest priorytetowo, a jako główne cele przyjęto [13]:

- dążenie do osiągnięcia zeroenergetycznego wzrostu gospodarczego,
- obniżenie do 2030 r. energochłonności gospodarki w Polsce do poziomu UE-15 z 2005 r.

Zgodnie z aktualną ustawą z dnia 20 maja 2016 roku o efektywności energetycznej [17] pojęcie „efektywność energetyczna” oznacza „*stosunek uzyskanej wielkości efektu użytkowego danego obiektu, urządzenia technicznego lub instalacji, w typowych warunkach ich użytkowania lub eksploatacji, do ilości zużycia energii przez ten obiekt, urządzenie techniczne lub instalację, albo w wyniku wykonanej usługi niezbędnej do uzyskania tego efektu*”. Ustawa definiuje też „*przedsięwzięcie służące poprawie efektywności energetycznej*” jako „*działanie polegające na wprowadzeniu zmian lub usprawnień w obiekcie, w urządzeniu technicznym lub w instalacji, w wyniku których uzyskuje się oszczędność energii*”.

W sektorze elektroenergetycznym poprawa efektywności energetycznej jest możliwa do osiągnięcia m.in. w wyniku [12]:

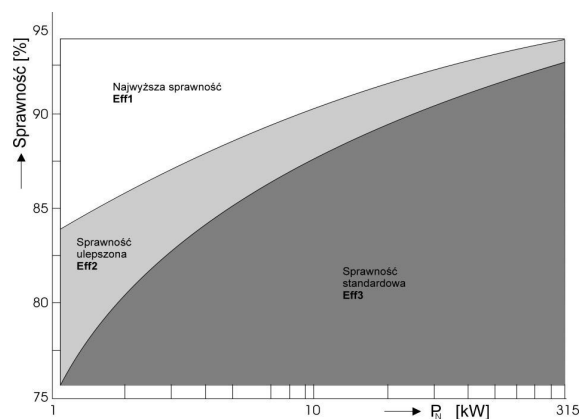
- modernizacji oświetlenia,
- modernizacji lub wymiany urządzeń i instalacji wykorzystywanych w procesach przemysłowych, w tym silników, napędów i układów sterowania,
- ograniczenia strat związanych z poborem energii biernej przez odbiorniki energii elektrycznej,
- ograniczenia strat sieciowych związanych z przesyłaniem lub dystrybucją energii elektrycznej oraz strat na transformacji.

Biorąc pod uwagę, że napędy elektryczne zużywają około 70 % energii elektrycznej pobieranej przez przemysł, ich energooszczędność ma istotne znaczenie dla poprawy efektywności energetycznej. Warunki energooszczędności w największym stopniu spełniają napędy przekształtnikowe o regulowanej w sposób ciągły prędkości obrotowej [10]. Ze względu na sposób działania układów energoelektronicznych

spełnienie w tych napędach wymagań kompatybilności elektromagnetycznej i uzyskania odpowiednich parametrów jakości energii wymaga stosowania filtrów wyższych harmonicznych.

Warunkiem dobrej efektywności energetycznej jest taki dobór konfiguracji i elementów układu napędowego, aby zminimalizować straty mocy, a tym samym uzyskać wysoką sprawność przetwarzania energii. Obecnie w technice napędowej, ze względu na ich właściwości (niski koszt, niezawodność), stosuje się najczęściej silniki asynchroniczne klatkowe zasilane z przekształtników częstotliwości. W ostatnich latach podjęto działania w celu podwyższenia ich sprawności. W 1998 roku Europejska Komisja Producentów Maszyn Elektrycznych i Energoelektroniki CEMEP, dla trójfazowych silników indukcyjnych klatkowych o mocach z zakresu 1,1÷90 kW, ustaliła trzy klasy sprawności (rys. 1) [1, 10]:

- Eff3 – sprawność standardowa,
- Eff2 – sprawność ulepszona,
- Eff1 – sprawność najwyższa.



Rys. 1. Klasy sprawności silników klatkowych o liczbie biegunów $2p=4$ [1]

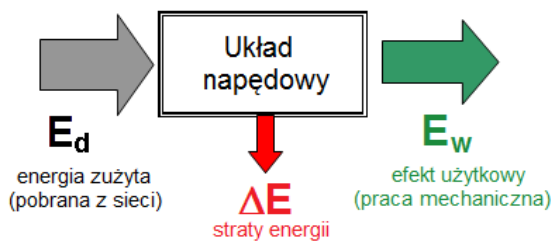
Obecnie normą bazową jest dokument IEC 60034-30-1:2014 opracowany przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną, który został przyjęty w Polsce jako PN-EN 60034-30-1 Maszyny elektryczne wirujące - Część 30-1: Klasy sprawności silników prądu przemiennego bezpośrednio zasilanych z sieci. Klasyfikacja ta obejmuje silniki o mocy od 0,12 kW do 1 MW, napięciu znamionowym od 50 V do 1 kV, o 2, 4, 6 i 8 biegunach, przeznaczone do pracy ciągłej S1 przy obciążeniu nominalnym. Norma IEC rozróżnia cztery klasy sprawności:

- IE1 (Standard Efficiency),
- IE2 (High Efficiency),
- IE3 (Premium Efficiency),
- IE4 (Super Premium Efficiency).

Norma nie obejmuje sprawności całego systemu napędowego, a w szczególności strat silnika wynikających z harmonicznych napięcia zasilającego, strat w kablach, filtrach oraz przekształtnikach częstotliwości.

3. Efektywność energetyczna w aspekcie parametrów jakości energii elektrycznej

Wychodząc z definicji ustawowej [17] istotę efektywności energetycznej układu napędowego można przedstawić w sposób pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Istota efektywności energetycznej układu napędowego

Miara efektywności energetycznej jest sprawność układu napędowego η_{un} , którą można wyrazić zależnością:

$$\eta_{un} = \frac{E_w}{E_d} = \frac{\int_0^t T_{ob}(t) \omega_m(t) dt}{\int_0^t T_{ob}(t) \omega_m(t) dt + \int_0^t \sum_i \Delta P_i(t) dt} \quad (1)$$

gdzie: $T_{ob}(t)$ - moment obciążenia napędu,
 $\omega_m(t)$ - prędkość kątowna,
 $\Delta P_i(t)$ - straty mocy w i -tym elemencie układu napędowego (łącznie z torem zasilania).

Suma strat mocy $\sum \Delta P_i(t)$ w równaniu (1) obejmuje straty w transformatorach, kablach zasilających, przekształtniku, silniku napędowym, przekładni oraz filtry pasywnym L-C.

Przekształtnikowe układy napędowe należą do odbiorników nieliniowych, których prąd jest odkształcony i zawiera wyższe harmoniczne, które są „wstrzykiwane” do systemu zasilania. Przepływ odkształconych prądów w sieci elektroenergetycznej powoduje wiele negatywnych skutków w postaci [4, 5, 6, 11, 14, 15, 20]:

- odkształcenia napięć w poszczególnych węzłach sieci elektroenergetycznych,
- wzrostu spadków napięcia,
- zwiększenia obciążenia przewodów oraz uzwojeń transformatorów,
- dodatkowych strat mocy czynnej i biernej w liniach i transformatorach,

- powstawania zjawisk rezonansowych,
- przedwczesnego starzenia się instalacji i urządzeń elektrycznych.

Oznacza to degradację jakości energii elektrycznej i ma niekorzystny wpływ na pracę odbiorników podłączonych do sieci oraz efektywność procesów technologicznych, realizowanych z użyciem tych urządzeń.

Ilościowo zawartość harmonicznych w napięciu i prądzie odkształconym można wyrazić za pomocą współczynników THD_U i THD_I określanych następująco [5, 6, 9]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N U_h^2}}{U_1} \quad (2) \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (3)$$

gdzie: U_1, I_1 - wartości skuteczne pierwszej harmonicznej napięcia/prądu,
 U_h, I_h - wartości skuteczne h -tej harmonicznej napięcia/prądu do rzędu $N = 40$ [16].

Wówczas wartości skuteczne przebiegów napięcia U i prądu I wyrażają formuły [6]:

$$U = U_1 \sqrt{1 + THD_U^2} \quad (4) \quad I = I_1 \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (5)$$

Wykorzystując wzory (4) i (5) można współczynnik mocy PF (ang. *power factor*) dla odbiornika nieliniowego wyrazić zależnością:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 + THD_U^2)} \sqrt{(1 + THD_I^2)}} \approx \cos \varphi_1 \cdot h_D \quad (6)$$

gdzie: P - moc czynna, S - moc pozorna, S_1 - moc pozorna harmonicznej podstawowej.

Ze wzoru (6) wynika, że przy odkształconych przebiegach współczynnik mocy PF ma dwie składowe. Jedna związana jest z przesunięciem fazowym między pierwszą harmoniczną prądu i napięcia, a druga ze stopniem odkształcenia przebiegów - współczynnik deformacji h_D .

Rozpatrując wg modelu Budeanu bilans mocy w węzle sieci zasilającej można moc pozorną S przedstawić jako funkcję trzech ortogonalnych mocy - czynnej P , biernej Q i deformacji D :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (7)$$

Moc deformacji D spowodowana obecnością wyższych harmonicznych prądu powoduje zwiększenie strat mocy w sieci i obniża efektywność energetyczną dostawy energii do odbiorców w systemie elektroenergetycznym.

4. Obliczanie strat mocy w układach zasilania przy przebiegach odkształconych

Straty mocy w transformatorze stanowią sumę strat jałowych i strat obciążeniowych [11, 19]:

$$\Delta P_T = \Delta P_j + \Delta P_{ob} \quad (8)$$

Straty jałowe występują w rdzeniu transformatora i pochodzą od prądów wirowych oraz histerezy. Są one niezależne od prądu obciążenia transformatora, a na ich wielkość wpływa jedynie wartość i stopień odkształcenia napięcia zasilającego, przy czym jeśli $THD_U < 5\%$, wpływ harmonicznym napięcia na wielkość strat jałowych można pominąć [19].

Natomiast straty obciążeniowe ΔP_{ob} zgodnie z normą IEEE Std C57.110-2008 [8] dzieli się na straty podstawowe ΔP_p i dodatkowe ΔP_d , które są sumą strat dodatkowych spowodowanych przez prądy wirowe w uzwojeniach ΔP_{wd} oraz w metalowych częściach konstrukcyjnych transformatora ΔP_{md} [14, 15, 19]:

$$\Delta P_{ob} = \Delta P_p + \Delta P_d = \Delta P_p + \Delta P_{wd} + \Delta P_{md} \quad (9)$$

Obciążeniowe straty podstawowe wynikają z rezystancji uzwojeń (I^2R). Odnośnie podziału strat dodatkowych norma IEEE Std C57.110 wskazuje, że dodatkowe straty wirowe ΔP_{wd} w transformatorach suchych stanowią 67 % strat dodatkowych ΔP_d , a w transformatorach olejowych odpowiednio 33 %.

Odnosząc straty obciążeniowe do parametrów znamionowych można równanie (9) dla sinusoidalnego prądu obciążenia transformatora wyrazić w jednostkach względnych następująco:

$$\Delta P_{ob} = i^2 \Delta P_{p-N} (1 + p_{wd-R} + p_{md-R}) \quad (10)$$

ΔP_{p-N} to straty podstawowe przy znamionowym sinusoidalnym prądzie obciążenia I_N , a pozostałe wielkości oznaczają:

$$i = \frac{I}{I_N}, \quad p_{wd-R} = \frac{\Delta P_{wd-N}}{\Delta P_{p-N}}, \quad p_{md-R} = \frac{\Delta P_{md-N}}{\Delta P_{p-N}} \quad (11)$$

gdzie: I - wartość skuteczna prądu obciążenia,

ΔP_{wd-N} - straty dodatkowe w uzwojeniach przy prądzie I_N ,

ΔP_{md-N} - straty dodatkowe w konstrukcji przy znamionowym prądzie I_N .

Odształcony przez obecność wyższych harmonicznym prąd obciążenia transformatora wywołuje odkształcone strumienie rozproszenia, które powodują zwiększenie strat dodatkowych od prądów wirowych w uzwojeniach i częściach metalowych. Wzór na wielkość strat obciążeniowych przyjmuje wówczas postać [20]:

$$\Delta P_{ob} = i^2 \Delta P_{p-N} (1 + F_{HL} p_{wd-R} + F_{HL-STR} p_{md-R}) \quad (12)$$

Współczynnik F_{HL} przyrostu strat wirowych na skutek odkształcenia prądu wyższymi harmonicznymi wyraża zależność [8]:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^N \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^N \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (13)$$

Natomiast współczynnik F_{HL-STR} przyrostu strat dodatkowych w elementach metalowych spowodowany wyższymi harmonicznymi wynosi:

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^N \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^N \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (14)$$

Straty mocy w liniach kablowych wynikają z przepływu prądu i są określane jako iloczyn wartości rezystancji i kwadratu prądu (I^2R). Przy przepływie odkształconego prądu wielkość strat mocy rośnie ze względu na zwiększenie rezystancji przewodów na skutek zjawiska naskórkowości (ang. *skin effect*) oraz bliskości przewodów (ang. *proximity effect*). W przypadku kabli wyposażonych w metalowy ekran lub pancierz, należy również zwrócić uwagę na wpływ tych elementów konstrukcyjnych [11]. Wzrost rezystancji żyły kabla R_{AC} dla prądu przemiennego o częstotliwości f względem rezystancji R_{DC} dla prądu stałego określa norma IEC-60287-1-1 [7] następującą formułą:

$$R_{AC}(f) = R_{DC} [1 + y_s(f) + y_p(f)] \quad (15)$$

gdzie: $y_s(f)$ - współczynnik wzrostu rezystancji spowodowany efektem naskórkowości,

$y_p(f)$ - współczynnik wzrostu rezystancji spowodowany zjawiskiem zbliżenia.

Współczynniki y_s i y_p zostały określone w normie IEC-60287-1-1 następująco:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad \text{gdzie} \quad x_s^2 = \frac{8\pi f}{r_{DC}} 10^{-7} k_s \quad (16)$$

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right]$$

$$\text{gdzie} \quad x_p^2 = \frac{8\pi f}{r_{DC}} 10^{-7} k_p \quad (17)$$

d - średnica żyły, mm;

s - odległość pomiędzy osiami żył, mm;

r_{DC} - rezystancja 1 m żyły kabla (prąd DC),
 k_s i k_p - współczynniki zależne od wykonania żyły kabla (okrągłe, sektorowe, jednodrutowe, wielodrutowe) [7].

W przypadku kabli opancerzonych taśmami stalowymi (Ft) zależność (15) zostaje uzupełniona do postaci (18), która ujmuje efekt oddziaływania pancerza kabla:

$$R_{AC}(f) = R_{DC}[1 + y_s(f) + y_p(f) + y_a(f)] \quad (18)$$

gdzie: $y_a(f)$ - współczynnik wzrostu rezystancji spowodowany oddziaływania pancerza.

Współczynnik przyrostu rezystancji żyły kabla y_a wyznaczany jest według zależności [2]:

$$y_a(f) = 0,5 [y_s(f) + y_p(f)] \quad (19)$$

5. Charakterystyka techniczna zespołów napędowych walcarki prętów

Układy rozdzielcze zasilania silników napędu walcarki przed modernizacją oraz po przedstawiono na rysunkach 3a i 3b.

W pierwszym przypadku maszyna prądu stałego o mocy 1,8 MW i nominalnym napięciu twornika 1100 V była zasilana przez nawrotny prostownik tyrystorowy DC (PT) z transformatora T2 o mocy 2,5 MVA podłączonego do sieci przemysłowej o napięciu 6kV.

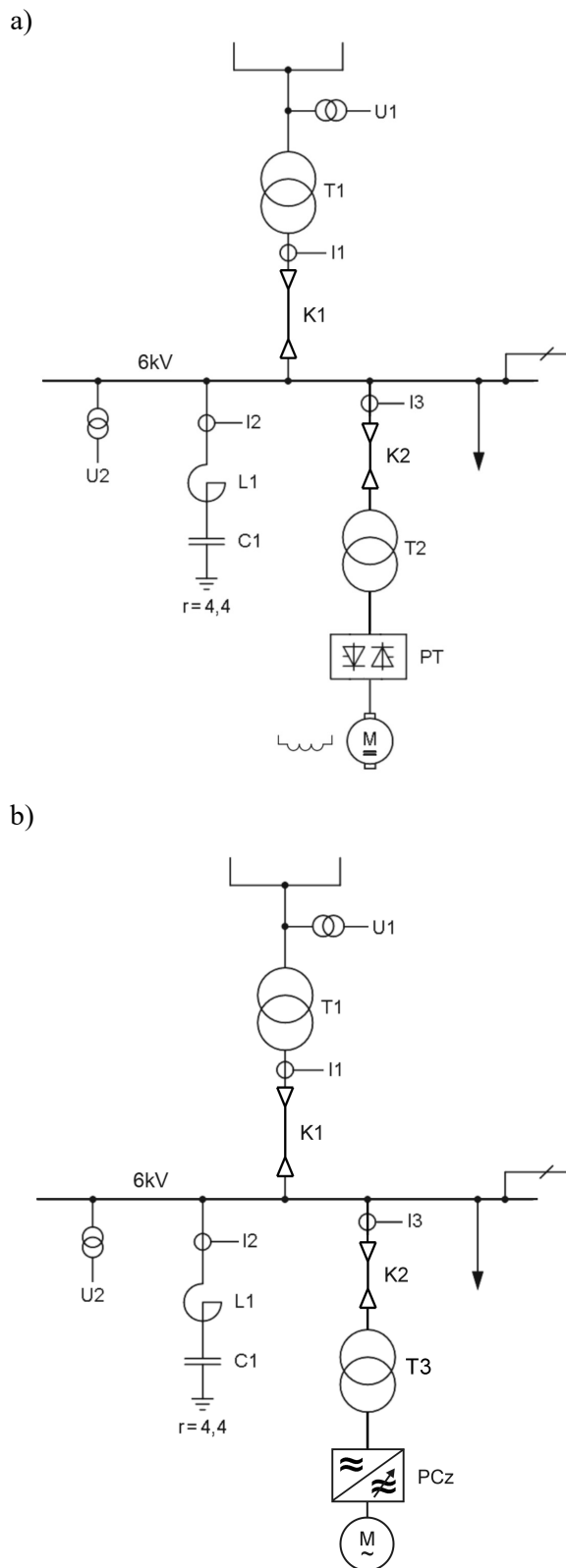
W drugim przypadku zastosowano silnik prądu przemiennego o mocy 2 MW zasilany przez przemiennik częstotliwości (PCz) z transformatora T3 o takiej samej mocy jak T2, lecz o innym napięciu strony wtórnej.

Dane silników dla obu konfiguracji napędu głównego walcarki zamieszczono w tabeli 1, natomiast parametry transformatorów (stacyjnego T1 oraz przekształtnikowych T2 i T3) oraz linii kablowych K1 i K2 w torze zasilania układów napędowych walcarki podano w tab. 2.

Tabela 1. Wartości nominalne silników napędu walcarki przed i po modernizacji

| P_N [kW] | n_N [obr/min] | U [V] | I_N [A] | M_N [Nm] | η [-] |
|---|--------------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| Napęd tyrystorowy prądu stałego | | | | | |
| 1800 | 900 | 1200 | 1630 | 19110 | 0,921 |
| Napęd asynchroniczny z przemiennikiem DTC | | | | | |
| 2000 | 894 | 690 | 1981 | 21370 | 0,972 |

Z danych, które zestawiono w tabeli 1 można stwierdzić, iż istnieje duża zbieżność w zakresie nominalnych parametrów elektromechanicznych dla analizowanych napędów walcarki.



Rys. 3. Konfiguracje zasilania napędu głównego walcarki z sieci 6 kV:
 a) dla silnika DC z prostownikiem sterowanym;
 b) dla silnika AC z przemiennikiem częstotliwości DTC.

Tabela 2. Parametry transformatorów i linii kablowych

| Transformator stacyjny i przekształtnikowe | | | | | |
|--|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| Nr | S_N [MVA] | U_{1N}/U_{2N} [kV/kV] | u_z [%] | ΔP_j [kW] | ΔP_{obN} [kW] |
| T1 | 16 | 115±10%/6,3 | 11,5 | 21,5 | 86,8 |
| T2 | 2,5 | 6/1,04 | 7,2 | 4,8 | 24,5 |
| T3 | 2,5 | 6/0,69 | 5,8 | 4,5 | 22,1 |
| Linie kablowe | | | | | |
| Nr | Typ kabla | l [m] | R_{DC} [Ω] | | |
| K1 | 2xAKnFtA 3x240 mm ² | 500 | 0,03125 | | |
| K2 | AKnFtA 3x240 mm ² | 60 | 0,0075 | | |

Istotne różnice w układzie zasilania obu rodzajów napędów walcarki dotyczą filtrów pasywnych L-C (tabela 3) ze względu na mniejszy pobór mocy biernej przez napęd AC.

Tabela 3. Parametry filtrów wh dla napędu walcarki

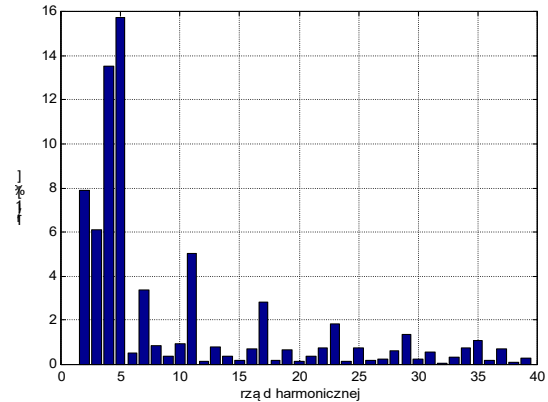
| Q_C [kVar] | $C1$ [μ F] | $L1$ [mH] | ω_r [s ⁻¹] | Rząd r [-] |
|---|--------------------|--------------|----------------------------------|-----------------|
| Napęd tyrystorowy prądu stałego | | | | |
| 1240 | 110 | 4,76 | 1384 | 4,41 |
| Napęd asynchroniczny z przemiennikiem DTC | | | | |
| 413 | 36,6 | 4,76 | 2397 | 7,63 |

6. Analiza wybranych wskaźników efektywności energetycznej napędu

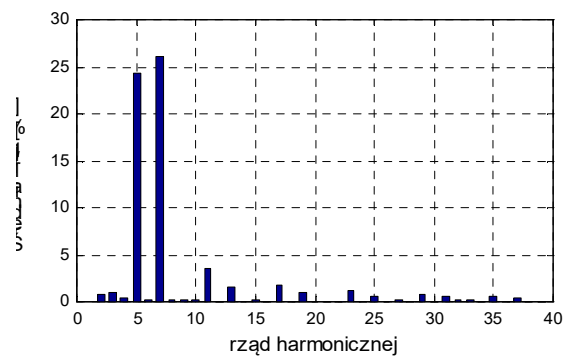
W trakcie badań jakości energii w sieci rozdzielczej huty zarejestrowano komputerowo przebiegi napięć na szynach rozdzielni 6 kV oraz prądów w polu zasilającym (kabel K1) i odpływowym do transformatora przekształtnikowego (kabel K2). Dane poddano analizie harmonicznnej (FFT) oraz wyznaczono parametry elektroenergetyczne zestawione w tabeli 4. Otrzymane widma harmonicznnych prądów podano na rysunkach od 4 do 7.

Tabela 4. Parametry elektroenergetyczne transformatorów

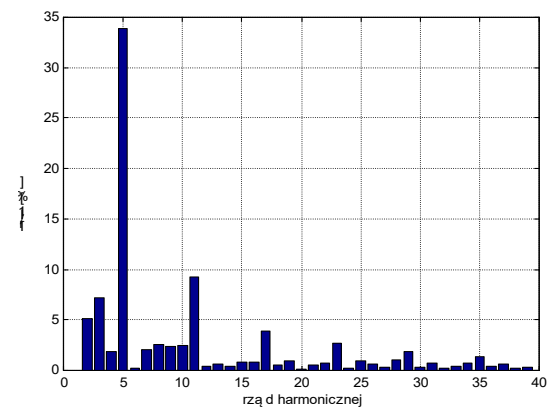
| I [A] | S [kVA] | P [kW] | Q [kvar] | D [kvar] | PF [-] | THD_I [%] |
|--|--------------|-------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| Parametry obciążenia transformatora T1 dla DC | | | | | | |
| 160 | 1680 | 1585 | 335 | 444 | 0,944 | 25,8 |
| Parametry obciążenia transformatora T1 dla AC | | | | | | |
| 131,6 | 1413 | 1330 | 83 | 471 | 0,941 | 36,1 |
| Parametry zasilania transformatora T2 napęd DC | | | | | | |
| 178 | 1880 | 830 | 1540 | 689 | 0,441 | 37,2 |
| Parametry zasilania transformatora T3 napęd AC | | | | | | |
| 86,8 | 916,3 | 835,7 | 163,6 | 338,3 | 0,912 | 39,7 |



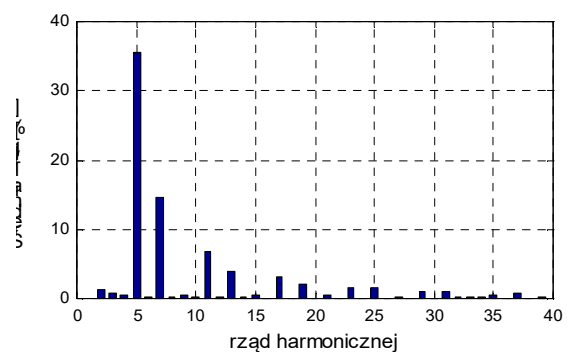
Rys. 4. Harmoniczne prądu transformatora T1 po stronie 6 kV dla napędu DC walcarki



Rys. 5. Harmoniczne prądu transformatora T1 po stronie 6 kV dla napędu AC walcarki



Rys. 6. Harmoniczne prądu transformatora T2 po stronie 6 kV dla napędu DC walcarki



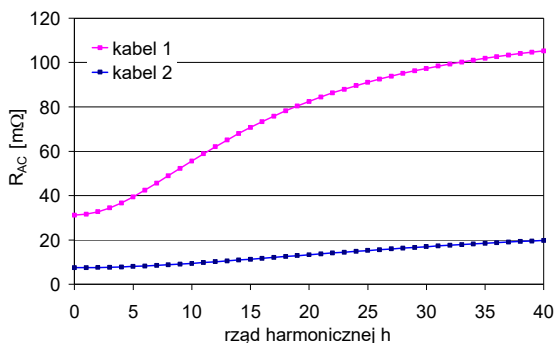
Rys. 7. Harmoniczne prądu transformatora T3 po stronie 6 kV dla napędu AC walcarki

Na podstawie wartości rezystancji uzwojeń transformatorów T1, T2, T3 oraz wytycznych normy IEEE Std C57.110-2008 [8] dokonano rozdziału znamionowych strat obciążeniowych na podstawowe ΔP_{p-N} oraz dodatkowe ustalając względne wskaźniki ich podziału p_{wd-R} i p_{md-R} . Dysponując widmami rozkładu harmonicznym prądów obciążenia transformatorów wyznaczono wg wzorów (13) i (14) wskaźniki F_{HL} i F_{HL-STR} przyrostu strat dodatkowych ze względu na wyższe harmoniczne. Następnie ustalono wartości strat obciążeniowych ΔP_{ob} transformatorów, kierując się zależnością (12). Wyliczone wskaźniki oraz wartości strat obciążeniowych zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Straty w transformatorach w torze zasilania napędu walcarki przed i po modernizacji

| Nr | ΔP_{p-N} [kW] | p_{wd-R} [-] | p_{md-R} [-] | F_{HL} [-] | F_{HL-STR} [-] | ΔP_{ob} [kW] |
|---|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| Napęd tyrystorowy prądu stałego | | | | | | |
| T1 | 61,5 | 0,135 | 0,275 | 3,27 | 1,16 | 1,29 |
| T2 | 20,42 | 0,134 | 0,066 | 6,17 | 1,36 | 21,35 |
| Napęd asynchroniczny z przemiennikiem DTC | | | | | | |
| T1 | 61,5 | 0,135 | 0,275 | 5,66 | 1,38 | 1,06 |
| T3 | 17,68 | 0,1675 | 0,0825 | 6,13 | 1,41 | 4,94 |

Straty mocy w liniach kablowych K1 i K2 dla obu konfiguracji napędu głównego walcarki wyznaczono na podstawie parametrów kabli (tabela 2), wytycznych normy IEC-60287-1-1 oraz wzorów (15) do (19). Wartości d (średnica żyły) oraz s (odległość pomiędzy osiami żył) niezbędne do wyznaczenia współczynników $y_s(f)$, $y_p(f)$ i $y_a(f)$ wzrostu rezystancji określono wg danych katalogowych kabli [18]. Wyniki obliczeń wzrostu rezystancji R_{AC} żył kabli K1 i K2 od częstotliwości przepływającego prądu (w funkcji rzędu h harmonicznym prądu) pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność wzrostu rezystancji R_{AC} żył kabli K1 i K2 od częstotliwości prądu

Znając zależność wzrostu rezystancji żył kabli od częstotliwości $R_{AC}(h)$ oraz widma harmonicznym prądów w sieci rozdzielczej huty wyznaczono straty mocy w kablach wg wzoru (20):

$$\Delta P_K = 3 \sum_{h=1}^{N=40} I_h^2 \cdot R_{AC}(h) \quad (20)$$

Wyniki obliczeń dla obu konfiguracji napędu głównego walcarki podano w tabeli 6.

Tabela 6. Straty w liniach kablowych w torze zasilania napędu walcarki przed i po modernizacji

| Nr | Typ kabla | l [m] | ΔP_K [kW] |
|---|--------------------------------|---------|-------------------|
| Napęd tyrystorowy prądu stałego | | | |
| K1 | 2xAKnFtA 3x240 mm ² | 500 | 2,46 |
| K2 | AKnFtA 3x240 mm ² | 60 | 0,72 |
| Napęd asynchroniczny z przemiennikiem DTC | | | |
| K1 | 2xAKnFtA 3x240 mm ² | 500 | 1,71 |
| K2 | AKnFtA 3x240 mm ² | 60 | 0,17 |

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kompleksową metodę obliczania strat w instalacjach elektroenergetycznych z odbiornikami nieliniowymi powodującymi generację wyższych harmonicznym prądu do sieci. Porównując przekształtnikowy układ napędowy DC dużej mocy walcarki prętów modernizowany na napęd AC wykazano różnice strat mocy występujące w różnych elementach instalacji. Największą oszczędność uzyskuje się w wyniku wyższej sprawności silnika AC w stosunku do silnika DC, która może osiągać przy pełnym nominalnym obciążeniu silnika do ok. 90 kW. Z braku obwodu wzbudzenia wynika obniżenie mocy o 4,3 kW (wzbudzenie 110 V, 39A). Z punktu widzenia przetwarzania energii elementami instalacji są transformatory: sieciowy i przekształtnikowy. W rozdziale 4. i 5. wyliczono straty mocy dla obu napędów przy zastosowaniu transformatorów o tej samej mocy S_N . Z tabeli 4. wynika, że obciążenie silników DC i AC jest prawie identyczne, co pokazują wartości mocy czynnej, natomiast względne prądy transformatorów i , obliczone wg wzoru (11), różnią się zasadniczo i wynoszą $i_{DC}=0,738$ oraz $i_{AC}=0,361$. Konsekwencją tego są znacznie niższe straty obciążeniowe transformatora ΔP_{ob} dla napędu AC. Duża wartość i_{DC} wynika z prawie dziesięciokrotnie większego poboru mocy biernej (tab. 4), co wymaga zainstalowania dla napędu DC baterii kondensatorów filtrów L-C o trzykrotnie

większej mocy biernej (tabela 3). Z uwagi na znaczne przewymiarowanie mocy transformatora sieciowego T1 obniżenie jego strat jest niewielkie. Przy zastosowaniu normy IEC 60287, wykorzystując analizę harmoniczną prądów zasilających transformatory obliczono straty mocy występujące w dwóch odcinkach kabli średniego napięcia. W tabeli 6 wykazano różnice strat mocy w torach kablowych, które łącznie wynoszą 1,3 kW na korzyść napędu AC. W analizie pominięto straty mocy czynnej w dławikach filtrów oraz straty w kablach zasilających filtr, które wynoszą ok. 0,5 kW. Różnica strat w instalacjach obu układów napędowych wyniesie około 68 kW, przy średniorocznym wskaźniku obciążenia silnika na poziomie 50%. Koszt zaoszczędzonej energii elektrycznej w skali roku, przy założeniu 70% wskaźnika wykorzystania czasu pracy i średniej ceny energii elektrycznej 250 PLN/MWh wyniesie ok. 105 tys. PLN.

8. Literatura

- [1]. Bernatt J., Bałkowiec M., Gawron S., Glinka T., Polak A.: *Silniki energooszczędne dowzbudowane magnesami trwałymi*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe - Nr 2/2017 (114), s. 205-210.
- [2]. Degeneff R.C., Halleran T.M., McKernan T.M., Palmer J.A.: *Pipe - type cable ampacities in the presence of harmonics*. IEEE Transactions on Power Delivery, 8 (1993), No.4, pp. 1689-1695.
- [3]. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z 25 października 2012 roku w sprawie efektywności energetycznej, zmiany dyrektyw 2009/125/WE i 2010/30/UE oraz uchylenia dyrektyw 2004/8/WE i 2006/32/WE (Dz.U. UE L 315 z 14.11.2012 r.).
- [4]. Fryc E., Kochel Z., Krakowiak J., Ziarno R.: *Możliwości poprawy efektywności wykorzystania energii elektrycznej czynnej i biernej*. Elektroenergetyka, Nr 1-2 (11-12)/2012, s. 78-95.
- [5]. Gała M.: *Jakość energii elektrycznej a poprawa efektywności energetycznej*. Energia dla przemysłu, Nr 1/2013, s. 30-35.
- [6]. Ghorbani M.J., Mokhtari H.: *Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems*. International Journal of Electrical and Computer Engineering, Nr 1/2015, pp. 166-174.
- [7]. IEC 60287-1-1, *Electric cables – Calculation of current rating – Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – Section 1: General*, 2006.
- [8]. IEEE Std C57.110-2008 *IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*.
- [9]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M., Gała M.: *Wpływ rodzaju silników na parametry elektroenergetyczne napędu walcarki prętów miedzianych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 71/2005, s. 65-70.
- [10]. Jakubiec M.: *Energooszczędność i kompatybilność w napędach elektrycznych*. Wyd. BOBRME „Komet”, Katowice 2005.
- [11]. Kot A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R.: *Analysis of impact of nonlinear loads on losses in power network elements*. Przegląd Elektrotechniczny, Rok 88 Nr 8/2012, s. 327-330.
- [12]. Obwieszczenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowego wykazu przedsięwzięć służących poprawie efektywności energetycznej (MP z 2016 r., poz. 1184).
- [13]. *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku. Załącznik do obwieszczenia Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2009 r.* (MP z 2010, nr 2, poz. 11).
- [14]. Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M.: *Analiza obciążenia i strat w transformatorach przekształtnikowych układów napędowych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 89/2011, s. 139-147.
- [15]. Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M.: *Straty mocy w transformatorach stacji przemysłowych zasilających odbiorniki nieliniowe*. Przegląd Elektrotechniczny, R.88 NR 4a/2012, p. 60-63.
- [16]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. z 2007, Nr 93 poz. 623 z późn. zm.).
- [17]. Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej (Dz.U. 2016 poz. 831).
- [18]. Tele-Fonika Kable S.A., Kable i przewody elektroenergetyczne, Katalog 2017, s. 281-282.
- [19]. Yazdani-Asrami M., Mirzaie M., Shayegani Akmal A.: *Calculation of Transformer Losses under Non-Sinusoidal Currents Using: Two Analytic Methods and Finite Element Analysis*. World Applied Sciences Journal, Vol. 9 N°8, 2010, 889-897.
- [20]. Youhannaoui M., Mokhtari H., Honarmand M.E., Sharifi A., Talebi J.: *Penalty calculation of nonlinear loads in electric power distribution network*. 23rd International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2015, paper 0392.

Autorzy

dr hab. inż. Kazimierz Jagieła, prof. ATH,
e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com
Akademia Techniczno-Humanistyczna
w Bielsku-Białej
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała
dr inż. Janusz Rak, e-mail: jrak@el.pcz.czest.pl
dr inż. Marek Gała, e-mail: m.gala@el.pcz.czest.pl
mgr inż. Marian Kępiński,
e-mail: mkepinski@el.pcz.czest.pl
Politechnika Częstochowska
Wydział Elektryczny
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa