

# Oddziaływanie przemienników częstotliwości na jakość energii elektrycznej w układzie potrzeb własnych elektrowni.

## Część II - Badania symulacyjne

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono ocenę oddziaływania układów napędowych z przemiennikami częstotliwości na jakość energii elektrycznej w sieci elektrycznego układu potrzeb własnych (EUPW) bloku energetycznego 50+. Oceny dokonano na podstawie badań symulacyjnych. Zaprezentowano sposób odwzorowania układu napędowego oraz założenia przyjęte od określenia mocy obciążenia jednej sekcji rozdzielni EUPW. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz wartości wskaźników, na podstawie których dokonano oceny jakości energii w rozdzielni EUPW.

**Abstract.** The assessment of influence of frequency converter drives on power quality in ancillary services network (ASN) of power unit 50+ is presented in the paper. The assessment was made on the basis of simulation. The way of modeling of converter drives is shown and assumptions for determination of load connected to ASN is discussed. Simulation results are presented as well as power quality indices, on the basis of which the assessment of power quality in ASN was done. (Influence of frequency converters on power quality in power station ancillary services network. Part II – Simulation investigations)

**Słowa kluczowe:** przemienniki częstotliwości, napędy przekształtnikowe, jakość energii, parametry napięcia zasilającego

**Keywords:** frequency converters, converter drives, power quality, supplying voltage indices

doi:10.12915/pe.2014.01.08

### Wstęp

Zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju wymaga modernizacji i rozwoju krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE), w tym także istniejącego podsystemu wytwórczego. Jednym z proponowanych działań jest zastosowanie w elektrowniach ciepłych bloków węglowych nowej generacji na parametry nadkrytyczne. Układy takie charakteryzują się większą sprawnością; w porównaniu do poziomu 36-38% brutto, uzyskiwanego w krajowych elektrowniach na parametry podkrytyczne, sprawność procesu wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach na parametry nadkrytyczne wzrasta do poziomu około 43-47 % brutto [1].

W ramach projektu strategicznego „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” prowadzone są prace badawcze mające na celu analizę możliwości wprowadzenia do KSE zero-emisyjnych bloków o mocy 900 MW na parametry ultra-nadkrytyczne, o sprawności brutto powyżej 50% (w dalszej części artykułu bloki te będą nazywane blokami 50+). Jedno z realizowanych zadań dotyczy analizy pracy elektrycznego układu potrzeb własnych (EUPW) przewidywanego dla takich bloków. Zwiększenie mocy bloku (w stosunku do mocy bloków aktualnie istniejących) oraz integracja obiegu ciepłego z instalacją wychwytu CO<sub>2</sub> powoduje zwiększone zapotrzebowanie na moc urządzeń potrzeb własnych. W EUPW przewidziano zastosowanie nowoczesnych układów napędowych średniego napięcia, z regulacją prędkości obrotowej za pomocą przemienników częstotliwości [2]. Układy takie charakteryzują się lepszymi własnościami eksploatacyjnymi oraz wyższą efektywnością energetyczną [3, 4, 5]. Ponieważ napędy z przemiennikami częstotliwości są dla sieci elektroenergetycznej odbiorami zaburzającymi, rozwiązanie takie wymaga analizy ich oddziaływania na pracę sieci pod kątem jakości napięcia zasilającego. Dla nowo projektowanego układu ilościowa ocena oddziaływań jest możliwa jedynie na drodze symulacyjnej.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, na podstawie których określono wpływ układów napędowych na jakość energii elektrycznej w sieci potrzeb własnych bloku 50+.

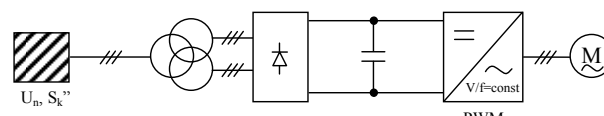
Przyjęto następującą metodologię badań. W celu zweryfikowania modelu napędu z przemiennikami częstotliwości wykonano pomiary wskaźników jakości energii elektrycznej w sieci rzeczywistej, do której

przyłączony był napęd przekształtnikowy dużej mocy. Wyniki pomiarów oraz ich analiza zostały przedstawione w części I artykułu. Układ rzeczywisty odwzorowano za pomocą modelu matematycznego opracowanego w środowisku programu Matlab, a parametry modelu dobrano na podstawie wyników wykonanych pomiarów. Model symulacyjny zaadaptowano następnie do potrzeb EUPW projektowanego bloku 50+. Wykonano badania symulacyjne pracy układu napędowego w sieci potrzeb własnych i na podstawie wyznaczonych wskaźników jakości napięcia zasilającego dokonano oceny oddziaływań napędu na pracę sieci.

W dalszej części artykułu przedstawiono kolejno sposób modelowania układu napędowego z przemiennikami częstotliwości oraz wybrane wyniki symulacji, ilustrujące rezultaty przeprowadzonych badań.

### Model układu napędowego

Schemat blokowy modelowanego układu napędowego przedstawiono na rysunku 1.



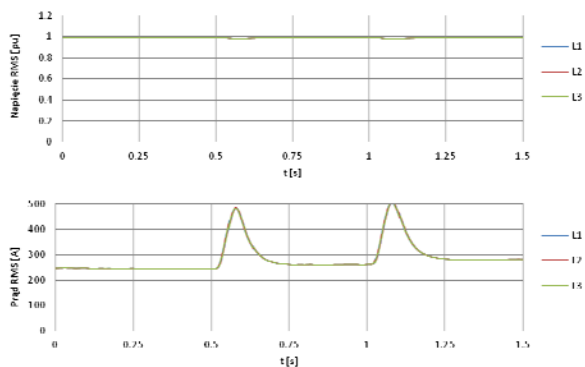
Rys. 1. Schemat blokowy modelu układu napędowego

W modelu odwzorowano wszystkie elementy układu, tj.: mostki prostownicze 6D połączone równolegle, falownik PWM ze sterowaniem wektorowym (VSI) oraz silnik indukcyjny obciążony momentem mechanicznym [6, 7, 8]. Uwzględniono regulator prędkości obrotowej oraz układ generacji impulsów sterujących zaworami przekształtnika.

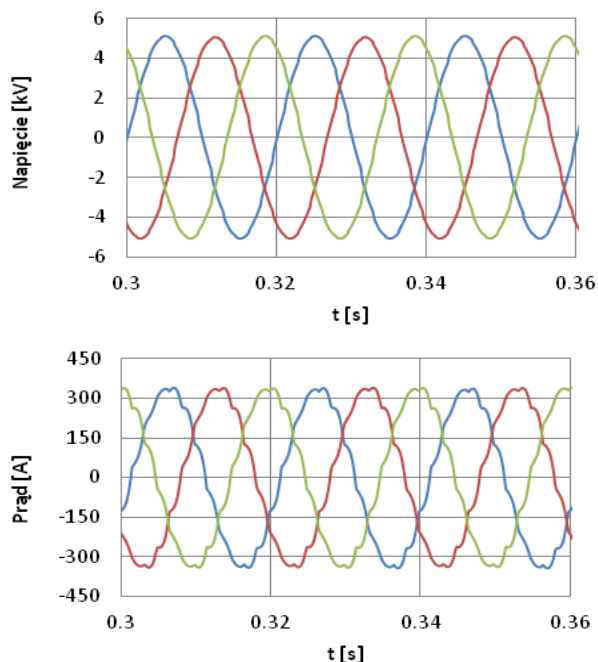
Na etapie weryfikacji modelu wykonano obliczenia dla następujących danych: silnik  $P_{ms} = 3000$  kW,  $U_{ms} = 4,16$  kV, transformator przekształtnikowy  $S_{nr} = 3150/3150/3150$  kVA,  $U_{nr} = 6300/4150/4150$  V,  $Y_{d11}$ , moc zwarciova sieci po stronie GN transformatora  $S_k'' = 100$  MVA. Dane te są analogiczne do występujących w rzeczywistym układzie pomiarowym, opisanym w części I artykułu.

Analizie poddano przebiegi prądów i napięć fazowych w punkcie przyłączenia układu do sieci elektroenergetycznej. Na rys. 2 pokazano zmiany wartości skutecznych napięć i prądów fazowych przy zmianach prędkości silnika.

Wartości chwilowe napięć i prądów w zmniejszonej skali czasu pokazano dodatkowo na rys. 3 dla prędkości  $n_1$  (mocy pobieranej przez silnik  $P_1$ ), przy czym  $n_1 < n_2 < n_3$  oraz  $P_1 < P_2 < P_3$ . Na kolejnym rysunku (rys. 4) przedstawiono spektrum wyższych harmonicznych napięcia i prądu.



Rys. 2. Wartości skuteczne napięć i prądów fazowych układu napędowego



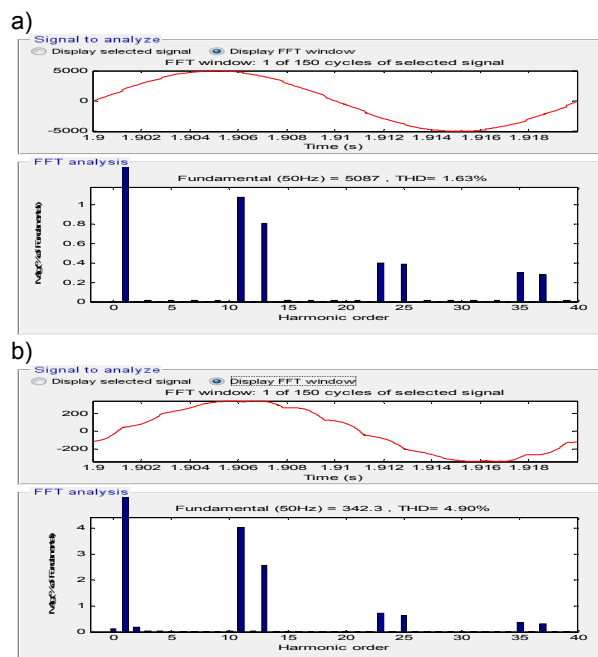
Rys. 3. Przebiegi napięć i prądów układu napędowego dla prędkości  $n_1$  ( $n_1 < n_2 < n_3$ )

Uzyskane z symulacji wartości napięć, prądów oraz mocy pobieranej przez układ porównano z wartościami pomierzonymi w układzie rzeczywistym, co pozwoliło na zweryfikowanie parametrów modelu.

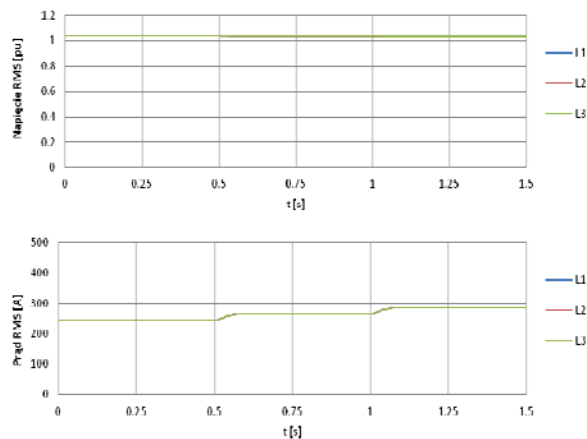
Ze względu na duży stopień skomplikowania modelu i nadmiernie długi czas symulacji, w dalszych badaniach zrezygnowano z dokładnego odwzorowania układu napędowego falownik-silnik, zastępując go rezystorem o zmiennej wartości rezystancji. Na rysunkach 5 i 6 porównano wartości skuteczne i przebiegi chwilowe napięcia i prądu pobieranego przez układ napędowy, a na rysunku 7 przedstawiono spektrum wyższych harmonicznych napięcia i prądu dla tego przypadku.

Wyniki uzyskane dla stanu ustalonego pracy układu napędowego za pomocą modelu dokładnego i uproszczonego są bardzo podobne, zarówno w odniesieniu do wartości skutecznych napięcia i prądu, jak również ich analizy spektralnej. Wartości skuteczne prądów

pobieranych z sieci przy kolejnych wartościach mocy, którą był obciążony silnik, uzyskane w symulacji pracy obu modeli wynoszą odpowiednio 243 A, 259 A i 280 A w modelu dokładnym oraz 247 A, 267 A i 288 A w modelu uproszczonym (różnica nie przekracza wartości 3%). Wartości współczynników całkowitego odkształcenia harmonicznymi napięć i prądów prezentowanych na rysunkach 4 i 7 są natomiast praktycznie identyczne:  $THD_U$  wynosi 1.63% w modelu dokładnym i 1.65% w modelu uproszczonym,  $THD_I$  zaś odpowiednio 4.90% w modelu dokładnym i 4.86% w modelu uproszczonym. Model uproszczony nie odwzorowuje natomiast właściwie stanów przejściowych spowodowanych zmianą obciążenia.

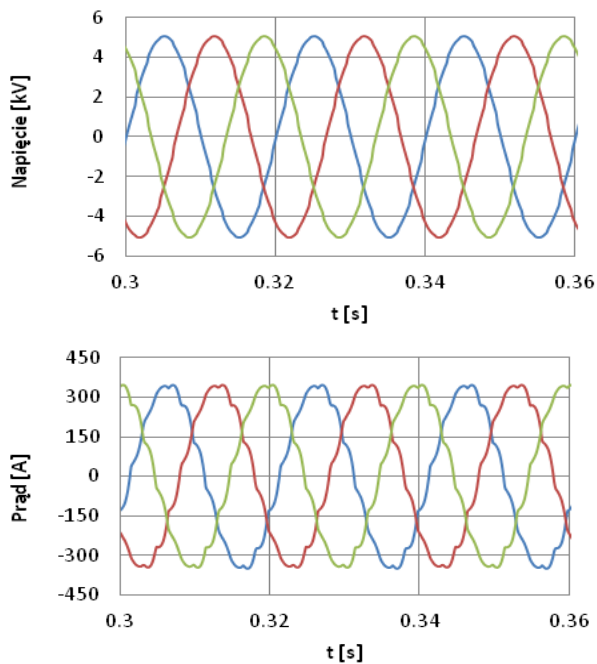


Rys. 4. Spektrum wyższych harmonicznych napięcia (a) i prądu (b) układu napędowego

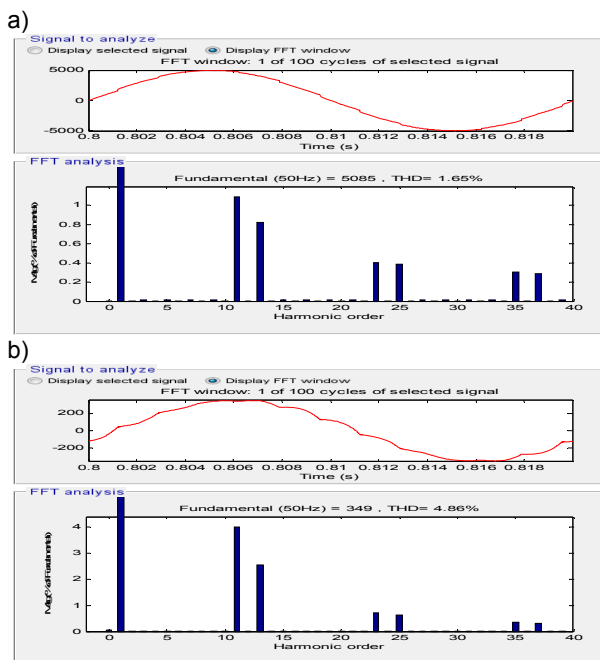


Rys. 5. Wartości skuteczne napięć i prądów fazowych układu napędowego w modelu uproszczonym

Ponieważ jednak ocena jakości energii elektrycznej dotyczy stanów ustalonych, można stwierdzić, że model uproszczony jest wystarczająco dokładny dla celów oceny wpływu przekształtnikowego układu napędowego na parametry jakościowe napięcia sieci zasilającej. Badania symulacyjne dla układu potrzeb własnych bloku 50+ przeprowadzono więc z wykorzystaniem modelu uproszczonego.



Rys. 6. Przebiegi napięć i prądów układu napędowego dla prędkości  $n_1$  ( $n_1 < n_2 < n_3$ ) w modelu uproszczonym



Rys. 7. Spektrum wyższych harmonicznych napięcia (a) i prądu (b) układu napędowego w modelu uproszczonym

### Potrzeby własne bloku referencyjnego 50+

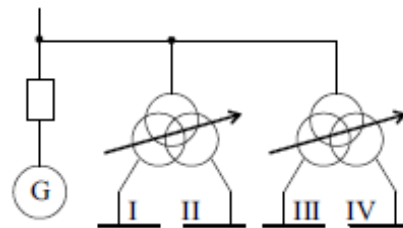
Jako blok referencyjny przyjęto blok energetyczny o mocy 900 MW, na parametry ultra-nadkrytyczne: ciśnienie pary świeżej 30 MPa/650°C i wtórnie przegrzanej 6 MPa/670°C, przy temperaturze wody zasilającej 310 °C i ciśnieniu w skraplaczu 5 kPa [9]. Zastosowanie cyklu energetycznego o parametrach nadkrytycznych prowadzi do wzrostu sprawności bloku, czego efektem jest obniżenie jednostkowego zużycia paliwa, wody zasilającej oraz innych czynników roboczych. Zwiększenie temperatury wody zasilającej wpływa dodatkowo na zmniejszenie strumienia kondensatu głównego i wody chłodzącej skraplacz.

Podwyższanie parametrów początkowych obiegu pociąga za sobą zmniejszenie zapotrzebowania na moc większości urządzeń potrzeb własnych. Jedynie moc pobierana przez pompy wody zasilającej ulega zwiększeniu, ze względu na wzrost ciśnienia pary dolotowej do turbiny. Zatem, pomimo zmniejszenia jednostkowego zużycia pary i poprawy sprawności pomp, rośnie udział ich mocy w całkowitym zapotrzebowaniu na moc potrzeb własnych bloku [12].

Pompy wody zasilającej (PWZ) są podstawowym odbiornikiem w układzie potrzeb własnych elektrowni. Pozostałe odbiorniki o znaczących mocach, typowe dla EUPW elektrowni konwencjonalnych, obejmują: młyny węglowe (MW), wentylatory młynowe (WM), wentylatory powietrza (WP), wentylatory spalin (WS), pompy kondensatu głównego (PK) i pompy cyrkulacyjne (PC). Uwzględnienie instalacji wychwytu CO<sub>2</sub> wymaga zainstalowania sprężarek (SP) oraz dodatkowych wentylatorów i pomp.

Przyjmując wartości mocy znamionowej odbiorników zgodnie z istniejącymi EUPW elektrowni konwencjonalnych, na podstawie obliczeń układu cieplnego, zrealizowanych w programie IPSEpro, wyznaczono moce grup urządzeń oraz sumaryczną moc zapotrzebowaną EUPW rozważanego bloku referencyjnego; dla bloku na węgiel brunatny moc ta wynosi 144 570 MW [2].

EUPW bloku zwykle zasilany jest z odczepu generatora, za pomocą transformatora trójzwojowego. Napędy podzielone są na dwie sekcje będące przedłużeniem po stronie elektrycznej ciągów technologicznych kotła i turbozespołu, co zapewnia korzystną strukturę niezawodnościową. Ze względu na zwiększoną moc EUPW dla niskoemisyjnego bloku 900 MW, przewidziano zastosowanie dwóch odczepowych transformatorów trójzwojowych o mocach znamionowych  $S_n = 100/50/50$  MVA i udział odbiorników potrzeb własnych na 4 sekcje. Strukturę zasilania EUPW pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Struktura zasilania EUPW bloku referencyjnego [2, 12]

Do dalszej analizy założono, że obciążenie czynne każdej sekcji wynosi ok. 1/4 obciążenia całkowitego EUPW. Odbiory rozdzielono na sekcje biorąc pod uwagę tory technologiczne i względy niezawodnościowe, zgodnie z zasadami stosowanymi w elektrowniach. Wzoruując się na istniejących rozwiązaniach (blok 858 MW), przyjęto przykładowy zestaw odbiorów o największych mocach, które mogą być przyłączone do jednej sekcji rozdzielnic:

- PWZ o mocy 12000 kW
- MW - 3 silniki o mocy 1500 kW każdy
- WP o mocy 3150 kW
- PK o mocy 800 kW
- SP o mocy 10500 kW

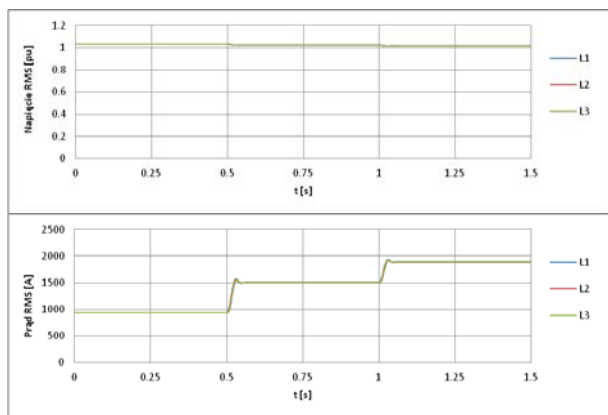
Założono, że napięcie rozdzielni wynosi 10 kV oraz, że wszystkie napędy wymienionych odbiorników mają regulację prędkości za pomocą przemienników.

## Ocena jakości energii elektrycznej w EUPW bloku referencyjnego 50+

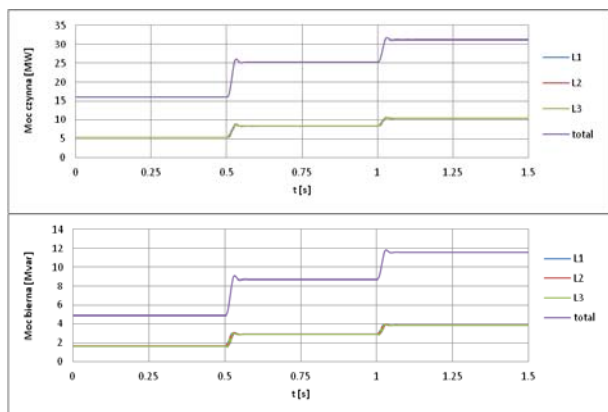
Analizę jakości przeprowadzono dla układu zastępczego, uwzględniającego sumaryczne oddziaływanie na sieć wszystkich przyłączonych do jednej sekcji rozdzielni układów napędowych, co odpowiada najgorszemu możliwemu wariantowi pracy. Przyjęto moc zwarcia na szynach rozdzielni 10 kV równą  $S''_k = 500$  MVA.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla zmieniających się poziomów obciążenia układu: kolejno 50 %, 80 % i 100 %.

Zamieszczone poniżej rysunki 9 i 10 pokazują wartości napięć, prądów oraz mocy układu dla różnych wartości obciążenia.



Rys. 9. Wartości skuteczne napięć i prądów fazowych sumarycznego układu napędowego przyłączonego do jednej sekcji rozdzielni EUPW



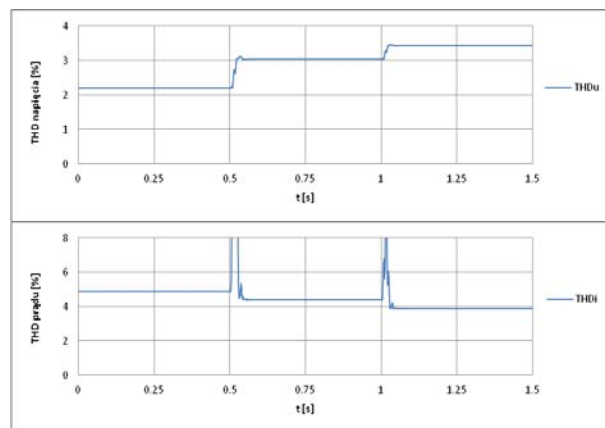
Rys. 10. Wartości mocy czynnych i biernych sumarycznego układu napędowego przyłączonego do jednej sekcji rozdzielni EUPW

Kolejne rysunki dotyczą analizy jakościowej prądu i napięcia. Na rys. 11 przedstawiono zmiany wartości współczynników  $THD$  napięcia i prądu, zaś na rys. 12 i 13 analizę spektralną tych wielkości.

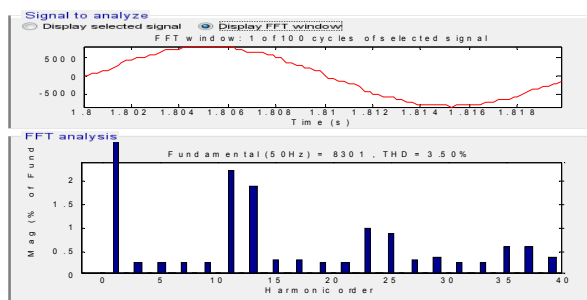
Otrzymane wartości parametrów w stanach ustalonych zestawiono Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry elektryczne w punkcie przyłączenia do szyn rozdzielni EUPW dla różnych wartości obciążenia układu napędowego

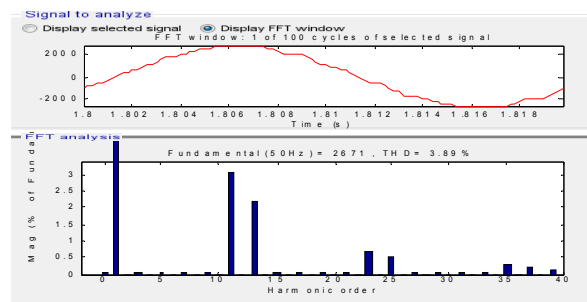
Obciążenie układu	Moc czynna pobierana z sieci	Moc bierna pobierana z sieci	Napięcie fazowe na szynach	Prąd fazowy pobierany z sieci	$THD_u$	$THD_i$
[%]	[MW]	[Mvar]	[p.u.]	[A]	[%]	[%]
50	15.99	4.89	1.04	933	2.21	4.90
80	25.22	8.72	1.03	1504	3.06	4.39
100	31.19	11.57	1.02	1890	3.44	3.86



Rys. 11. Wartości współczynników  $THD$  napięcia i prądu sumarycznego układu napędowego przyłączonego do jednej sekcji rozdzielni EUPW



Rys. 12. Spektrum wyższych harmonicznych napięcia sieci zasilającej dla obciążenia znamionowego jednej sekcji rozdzielni EUPW



Rys. 13. Spektrum wyższych harmonicznych prądu pobieranego przez sumaryczny układ napędowy przyłączony do jednej sekcji rozdzielni EUPW przy obciążeniu znamionowym

Jak wynika z przedstawionych wyników praca napędu przekształtnikowego nie powoduje nadmiernego zniekształcenia krzywych prądu i napięcia w układzie potrzeb własnych bloku 50+.

Poziom napięcia na szynach rozdzielni mieści się w wymaganym przedziale  $(0,9 \div 1,1) U_n$ . Wartości  $THD_u$  napięcia wynoszą odpowiednio 3,5 % dla obciążenia znamionowego, 2,99 % dla obciążenia 0,8  $P_n$  oraz 2,21 % dla obciążenia równego 0,5  $P_n$ , a więc są znacznie niższe od dopuszczalnej wartości  $THD_u$  równej 8 % [10, 11]. Zawartość harmonicznych charakterystycznych w napięciu waha się wokół wartości dopuszczalnych wynoszących 3,5% dla harmonicznej 11-tej i 13-tej oraz 1,5% dla harmonicznych 23-ciej i 25-tej. Współczynnik asymetrii napięcia jest pomijalny – mostek diodowy 12-pulsowy stanowi idealny odbiór symetryczny.

## Podsumowanie

Ocenę wpływu przekształtnikowych napędów dużej mocy zainstalowanych w układzie potrzeb własnych projektowanego bloku 50+ przeprowadzono przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków, tj. wszystkie napędy wyposażone są w układy regulacji prędkości za pomocą przemienników częstotliwości oraz wszystkie pracują jednocześnie obciążone mocą znamionową. Stwierdzono, że wartości parametrów jakościowych mieszczą się w dopuszczalnych granicach. W warunkach rzeczywistych, uwzględniających różny stopień obciążenia napędów oraz fakt, że nie wszystkie układy napędowe zostaną wyposażone w przemienniki do regulacji prędkości, można spodziewać się jeszcze mniejszych wartości parametrów jakościowych w rozdzielni EUPW.

Przedstawione wyniki uzasadniają stwierdzenie, iż praca nowoczesnych układów napędowych dużej mocy z przemiennikami częstotliwości w EUPW bloku 50+ nie spowoduje jest pogorszenia jakości energii elektrycznej w stopniu uzasadniającym konieczność zastosowania jakichkolwiek dodatkowych rozwiązań i środków zaradczych.

*Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub> ze spalin*

## LITERATURA

- [1] Pawlik M., Kottlicki T.: Innowacyjne technologie węglowe dla ograniczania emisji CO<sub>2</sub>, Rynek Energii 2011 Vol.94 nr 3 s.57-63
- [2] Praca bloków 50+ w systemie elektroenergetycznym. Sprawozdanie merytoryczne z realizacji etapu IV.3.1.a, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki. Łódź 2011

- [3] Dubownik R., Opałka B., Elektryczne układy zasilania i regulacji prędkości obrotowej, <http://www.elektroenergetyka.pl>
- [4] Koczara W., Szulc Z., Efektywność energetyczna regulowanych układów napędowych pomp wody zasilającej i pomp sieciowych, X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-techniczna „Elektrownie ciepłe”, 6-8.06.2011, Słok/Belchatowa
- [5] Kubera T., Szulc Z., Poprawa efektywności energetycznej układu napędowego pompy wody zasilającej dużej mocy, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 78 (2007)
- [6] Dane producenta napędów Siemens - <http://www.automation.siemens.com>
- [7] Strączyński M., Gizicki A., Regulacja parametrów pracy układów pompowych pomp głębinowych poprzez zmianę obrotów silników głębinowych. Część 1, Forum Eksploatatora, (2010), nr 4, 66-69
- [8] Świtalski P., Jędral W., Rozruch pompy wirowej, *Pompy, Pompownie*, 139 (2010) nr 4, 35-37
- [9] Obieg referencyjny 900 MW. Raport wewnętrzny IMiUE (PBS1). Red. H. Łukowicz, Gliwice 2010
- [10] PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, PKN, 2010
- [11] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw z 2007 r., nr 98, poz. 623
- [12] Buchta J., Pawlik M.: Electrical drives in high-efficient coal-fired power plants, SPEEDAM 2008. IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, s.866-871

---

**Autorzy:** dr hab. inż. Irena Wasiak, prof. nadzw., Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [irena.wasiak@p.lodz.pl](mailto:irena.wasiak@p.lodz.pl); mgr inż. Piotr Gburczyk, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [piotr.gburczyk@p.lodz.pl](mailto:piotr.gburczyk@p.lodz.pl); dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [ryszard.pawelek@p.lodz.pl](mailto:ryszard.pawelek@p.lodz.pl).