

SKŁADOWE MOCY I ICH ROZDZIAŁ MIĘDZY RÓWNOLEGLE PRACUJĄCE PRĄDNICE NA PROMIE PASAŻERSKO-SAMOCODOWYM Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM

Stale rosnąca liczba odbiorników nieliniowych, w szczególności układów energoelektronicznych napędu głównego statku, powoduje zniekształcenia prądu oraz napięcia sieci i tym samym generuje moce harmonicznych. W takich warunkach analiza rozdziału mocy jedynie dla składowych podstawowych może być niepełna i prowadzić do niewłaściwych wniosków. Wstępne badania wykazały, że dla zniekształconych przebiegów napięcia i prądu pojawiają się rozbieżności w wartościach wskaźników rozdziału obciążeń wyznaczonych z mocy całkowitych i składowych podstawowych.

W pracy omówiono wskaźniki rozdziału obciążeń: mocy czynnej, biernej, nieczynnej oraz prądu i wyniki ich pomiaru na promie pasażersko-samochodowym z napędem elektrycznym. Wyznaczono parametry rozdziału obciążeń według aktualnie obowiązującej normy IEEE 1459-2010. Wstępne badania wykazały, że pojawiają się różnice w wielkości wskaźników, w zależności od tego, jakie składowe moce zniekształconych przebiegów prądów i napięć będą uwzględniane w pomiarze.

WPROWADZENIE

W czasie pracy eksploatacyjnej moc źródła zmienia się zależnie od zapotrzebowania na energię elektryczną, a więc zmienia się konfiguracja elektrowni, czyli liczba zespołów prądotwórczych pracujących równolegle na szyny zbiorcze rozdzielnic głównej statku. Podczas procesu załączania kolejnych źródeł, a także w czasie pracy systemu istotne jest, aby prawidłowo rozdzielić obciążenie – równomiernie do mocy znamionowej między pracujące równolegle generatory wszystkich składowych, tj. podstawowych oraz pozostałych harmonicznych. Brak informacji o rozdziale mocy lub jej niepoprawne określenie może przyczynić się do zakłócenia bezpiecznej eksploatacji statku. Nieproporcjonalny rozdział obciążeń pracujących równolegle prądnic może spowodować pozorne przeciążenie elektrowni i tym samym doprowadzić do zaniku zasilania w całej sieci elektroenergetycznej (z ang. *black-out*), co w czasie np. manewrów jednostki może stanowić zagrożenie dla ludzi, statku i środowiska naturalnego [2]. Poza tym pojawiające się przeciążenia w wyniku nieproporcjonalnego rozdziału obciążeń prądu sprawiają, że zwiększa się ryzyko uszkodzenia termicznego generatorów i skraca czas ich bezawaryjnej pracy, co w konsekwencji także może mieć fatalne skutki dla bezpieczeństwa statku i życia ludzi [1].

Aby nie dopuścić do wyżej wspomnianej sytuacji, towarzystwa klasyfikacyjne (m.in. Polski Rejestr Statków) określiły wskaźniki charakteryzujące rozdział obciążeń między pracującymi zespołami prądotwórczymi: współczynnik rozdziału mocy czynnych, współczynnik rozdziału mocy biernych i współczynnik rozdziału prądów. Parametry te dostarczają informacji o stopniu obciążenia połączonych równolegle prądnic, a przy proporcjonalnym rozdziale zmniejszają ryzyko zaniku zasilania, czyli zapewniają większe bezpieczeństwo statku. Dopuszczalne wartości ww. wskaźników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dopuszczalne wartości wskaźników rozdziału obciążeń wg PRS [6]

Table 1. The permissible values of the loads distribution indexes according to Polish Register of Shipping Rules (PRS) [6]

Wskaźnik	Dopuszczalna wartość [%]
Rozdział obciążeń czynnych	15
Rozdział obciążeń biernych	10
Rozdział prądów	15

W dzisiejszych czasach systemy energetyczne współpracują z dużą liczbą odbiorników nieliniowych, które wprowadzają harmoniczne prądu i powodują zniekształcenia napięcia w sieci, a tym samym mają negatywny wpływ na pracę źródeł i innych odbiorników zasilanych z tej samej sieci. W takim systemie oprócz trzech podstawowych wielkości charakteryzujących przepływ energii w sieci, tj. mocy pozornej, czynnej i biernej składowych fundamentalnych, pojawia się problem wynikający z przepływu nieczynnej energii wprowadzanej przez harmoniczne prądu i napięcia [4]. Do analizy przepływu energii w sieci należy wówczas włączyć moc zniekształceń prądu D_I (1), moc zniekształceń napięcia D_U (2) oraz moc pozorną harmonicznych napięcia i prądu S_H (3), w tym moc czynną i moc zniekształceń harmonicznych – P_H i D_H odpowiednio.

$$D_I = U_1 I_H, \quad (1)$$

$$D_U = U_H I_1, \quad (2)$$

$$S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2}, \quad (3)$$

gdzie:

U_1, I_1 – składowe podstawowe napięcia U i prądu I ,

U_H, I_H – składowe harmoniczne napięcia U i prądu I .

Podział składowych mocy na podstawowe oraz pozostałe harmoniczne, które są szkodliwe dla systemu energetycznego, stanowi wskazane podejście dla przedstawienia i analizy tego, co w systemie jest generowane, transmitowane, przesyłane od źródła do odbiorników, a co jest w systemie niepożądane i należy to wyeliminować.

Jak dotąd nie ma ogólnie przyjętej teorii mocy dla warunków niesinusoidalnych, co do której byłaby zgoda środowiska naukowego i która stanowiłaby wspólną bazę dla: rozliczania odbiorców za energię elektryczną, szacowania jakości energii elektrycznej, detekcji głównych źródeł zniekształceń przebiegów oraz projektowania filtrów czy kompensatorów [4]. W przyjętym i aktualnie powszechnie stosowanym standardzie IEEE 1459-2010 określone są definicje dla przebiegów zniekształconych, rozszerzone z dobrze znanej koncepcji przebiegów sinusoidalnych, i służą one jedynie jako wytyczne do pomiaru oraz projektowania instrumentarium dla określenia ilościowego składowych mocy i energii, a także jako punkt wyjścia do dalszego rozwoju teorii mocy [4]. Tak określone stanowisko stwarza możliwość różnego podejścia do interpretacji i analizy zjawisk związanych z przepływem mocy w systemie energetycznym, np. podczas badania rozdziału obciążeń między pracującymi równolegle zespołami prądotwórczymi.

Wyżej opisana sytuacja ma niebagatelne znaczenie w systemie elektroenergetycznym statku, gdzie z racji występowania sieci o charakterze „miękkim”, w których moc odbiorników jest porównywalna z mocą źródła, wpływ odbiorników nieliniowych może mieć duże znaczenie, szczególnie gdy statek posiada napęd elektryczny z przekształtnikami energoelektronicznymi (duża moc odbiornika). Wówczas na szynach głównych będą pojawiać się składowe harmoniczne, których zawartość będzie zależna od aktualnej mocy odbiornika oraz konfiguracji elektrowni, czyli liczby prądnic pracujących równolegle w systemie. Należy zatem mieć na uwadze, że oprócz mocy składowej podstawowej pojawi się dodatkowe obciążenie w postaci mocy wyższych harmonicznych wynikające ze zniekształceń przebiegów prądu i napięcia występujących w sieci.

Wskaźniki rozdziału obciążeń zdefiniowano w czasie, kiedy powszechnie były stosowane definicje mocy określone dla sinusoidalnych przebiegów prądów i napięć, a moce zniekształceń nie były oficjalnie rozważane (nie było wówczas normy dotyczącej opisu składowych mocy). Z chwilą pojawienia się standardu IEEE 1459 (pierwsza wersja w 2000 roku), na tle składowych mocy w nim opisanych, definicje wskaźników rozdziału obciążeń stają się niejednoznaczne i tym samym nie mogą w sposób wiarygodny określać wielkości rozdziału obciążeń między pracującymi równolegle prądnicami. Przy przyjmowaniu dotychczasowego podejścia informacja o rozdziale obciążeń istniejących w warunkach przebiegów niesinusoidalnych, czyli z zawartymi mocami harmonicznych wynikającymi z przepływu energii nieczynnej, może być niepełna. Według dzisiejszego stanu wiedzy moce w systemie energetycznym opisywane są z uwzględnieniem składowych podstawowych i pozostałych harmonicznych, a określona poprzez wskaźnik rozdziału obciążenia biernego moc bierna to moc tylko składowej podstawowej. Zatem niejednoznaczność definicji parametrów rozdziału obciążeń dla dzisiejszych warunków panujących w systemie energetycznym sugeruje, że należy przeprowadzić ponowną ich analizę z uwzględnieniem definicji składowych mocy opisanych w najnowszym standardzie IEEE 1459-2010 [4].

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, opracowane na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięć i prądów na promie pasażersko-

-samochodowym z dwoma elektrycznymi pędnikami azymutalnymi i przekształtnikami energoelektronicznymi napędu głównego statku w czasie pracy eksploatacyjnej, tj. manewrów w morzu. Dla tego stanu wyznaczono poszczególne moce, wskaźniki rozdziału mocy i prądów oraz poddano je analizie pod kątem oceny rozdziału obciążeń między pracujące równoległe źródła energii, w tym z podziałem na składowe podstawowe oraz pozostałe harmoniczne.

1. DEFINICJE WSKAŹNIKÓW ROZDZIAŁU OBCIĄŻEŃ

Dla poprawy bezpieczeństwa na statkach towarzystwa klasyfikacyjne zdefiniowały wskaźniki opisujące ryzyko utraty ciągłości zasilania przez nadmierne przeciążenie jednego z pracujących równoległe zespołów prądotwórczych, wynikające z nieproporcjonalnego rozdziału mocy. Współczynniki rozdziału mocy czynnej i -tej prądnicy δP_i i mocy bierniej i -tej prądnicy δQ_i pracującej równoległe określone są zależnościami [6, 7]:

$$\delta P_i = \frac{P_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k P_i}{P_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4)$$

$$\delta Q_i = \frac{Q_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k Q_i}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (5)$$

gdzie:

- P_i, Q_i – obciążenie czynne (bierne) i -tej prądnicy,
- P_n, Q_n – znamionowe obciążenie czynne lub biernie prądnicy o największej mocy pracującej równoległe albo znamionowe obciążenie czynne lub biernie rozpatrywanej prądnicy, jeżeli jej znamionowe obciążenie czynne jest mniejsze niż 0,6, a biernie mniejsze niż 0,4, znamionowego obciążenia czynnego lub biernego prądnicy o największej mocy pracującej równoległe,
- k – liczba pracujących równoległe prądnic,
- α_i – współczynnik proporcjonalności zależny od liczby i mocy współpracujących zespołów prądotwórczych ($\alpha_i = 0,5$ dla $k = 2$ i równych mocach współpracujących zespołów).

Innym istotnym parametrem, bezpośrednio nawiązującym do rozdziału mocy między pracujące równoległe prądnice, jest współczynnik rozdziału prądów:

$$\delta I_i = \frac{I_{ei} - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k I_{ei}}{I_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (6)$$

gdzie:

- I_n – wartość znamionowa prądu prądnicy o największej mocy pracującej równoległe,

- k – liczba pracujących równolegle prądnic,
 α_i – współczynnik proporcjonalności zależny od liczby i prądów znamionowych współpracujących zespołów prądowórczych ($\alpha_i = 0,5$ dla $k = 2$ i równych prądach znamionowych współpracujących zespołów),
 I_{ei} – wartość skuteczna efektywnego (zastępczego) prądu fazowego i -tej prądnicy obliczana z zależności [4]:

$$I_{ei} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}{3}}, \quad (7)$$

przy czym:

I_1, I_2, I_3 – odpowiednie prądy fazowe.

Na podstawie tak zdefiniowanych wskaźników wykonano badania rozdziału mocy dla składowych podstawowych przebiegów napięć i prądów. Dla określenia wskaźników rozdziału pozostałych harmonicznych przyjęto nieco zmodyfikowane, opracowane na podstawie standardu IEEE 1459-2010 [4], przedstawione poniżej definicje.

Dla rozdziału mocy czynnej harmonicznych przyjęto:

$$\delta P_{Hi} = \frac{P_{Hi} - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k P_{Hi}}{P_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (8)$$

gdzie:

P_{Hi} – moc czynna harmonicznych i -tej prądnicy,

$$P_{Hi} = P - P_1 \quad (9)$$

przy czym:

P – całkowita moc czynna,

P_1 – moc czynna składowej podstawowej i -tej prądnicy.

Zamiast mocy bierniej do uwzględnienia tylko składowych harmonicznych mocy nieczynnej zaproponowano parametr δD , jako wskaźnik rozdziału mocy zniekształceń.

$$\delta D_i = \frac{D_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k D_i}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (10)$$

gdzie:

D_i – moc zniekształceń i -tej prądnicy,

$$D_i = \sqrt{D_{ei}^2 + D_{eU}^2 + D_{eH}^2 - 2 \cdot P_1 \cdot P_H}, \quad (11)$$

przy czym:

D_{ei} – moc zniekształceń prądu,

D_{eU} – moc zniekształceń napięcia,

D_{eH} – moc zniekształceń harmonicznych i -tej prądnicy.

Wzory definiujące wymienione wielkości są następujące [4]:

$$D_{eI} = 3U_{eI}I_{eH}, \quad (12)$$

$$D_{eU} = 3U_{eH}I_{eI}, \quad (13)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_H^2}, \quad (14)$$

gdzie:

U_{eI} – wartość skuteczna składowej podstawowej napięcia,

$$U_{eI} = \sqrt{\frac{U_{121}^2 + U_{231}^2 + U_{311}^2}{9}}, \quad (15)$$

przy czym:

$U_{121}, U_{231}, U_{311}$ – składowe podstawowe kolejnych napięć międzyfazowych,

I_{eI} – wartość skuteczna składowej podstawowej prądu,

$$I_{eI} = \sqrt{\frac{I_{11}^2 + I_{21}^2 + I_{31}^2}{3}}, \quad (16)$$

przy czym:

I_{11}, I_{21}, I_{31} – składowe podstawowe kolejnych prądów fazowych,

U_{eH} – wartość skuteczna składowych harmonicznich napięcia:

$$U_{eH} = \sqrt{U_e^2 - U_{eI}^2}, \quad (17)$$

przy czym:

U_e – napięcie efektywne wyznaczane analogicznie jak (15), ale dla wszystkich składowych,

I_{eH} – wartość skuteczna składowych harmonicznich prądu:

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{eI}^2}, \quad (18)$$

przy czym:

I_e – prąd efektywny wyznaczany wg zależności (7) dla wszystkich składowych,

S_{eH} – moc pozorna harmonicznich:

$$S_{eH} = 3U_{eH}I_{eH}. \quad (19)$$

W ocenie rozdziału prądów harmonicznich przyjęto

$$\delta I_{Hi} = \frac{I_{eHi} - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k I_{eHi}}{I_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (20)$$

gdzie:

I_{eHi} – jest zdefiniowany wg zależności (18) dla i -tej prądnicy [4].

Do wyznaczenia wskaźników rozdziału obciążeń całkowitą mocą czynną i prądem (tzn. ze wszystkimi składowymi) przyjęto zależności (4) i (6), natomiast dla całkowitej mocy nieczynnej zmodyfikowana zależność (5), tj.:

$$\delta N_i = \frac{N_i - \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^k N_i}{Q_n} \cdot 100 \quad [\%], \quad (21)$$

gdzie:

N_i – całkowita moc nieczynna i -tej prądniczy,

$$N_i = \sqrt{S_e^2 - P^2} \quad (22)$$

przy czym:

S_e – moc pozorna efektywna,

P – całkowita moc czynna i -tej prądniczy.

Moc pozorna efektywna zdefiniowana jest następująco:

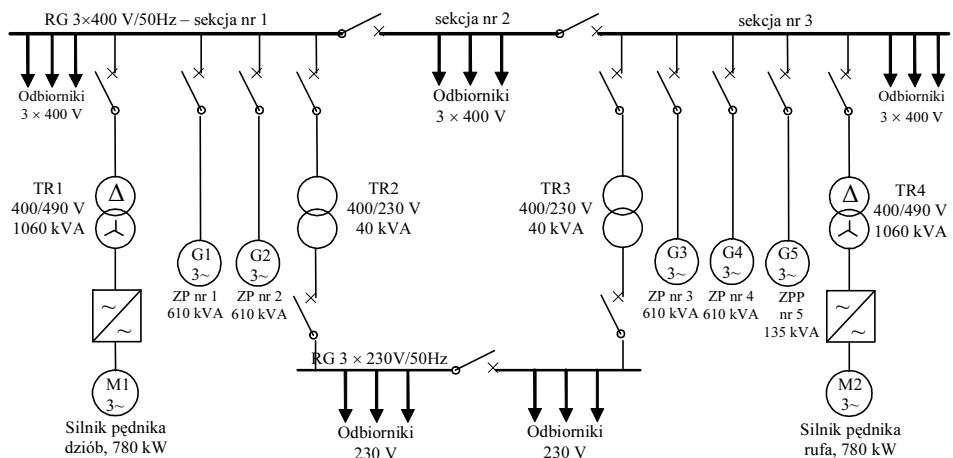
$$S_e = 3U_e I_e, \quad (23)$$

gdzie:

U_e, I_e – odpowiednio: napięcie efektywne i prąd efektywny opisane powyżej.

2. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

2.1. Charakterystyka obiektu badań



Rys. 1. Schemat elektrowni promu pasażersko-samochodowego z napędem elektrycznym: RG – rozdzielnica główna, TR – transformator, ZP – zespół prądotwórczy, ZPP – zespół prądotwórczy portowy [oprac. własne na podst. dokumentacji technicznej statku]

Fig. 1. Power plant diagram of the passenger-car ferry with electric drive: RG – main switchboard, TR – transformer, ZP – generating set, ZPP – port generating set [based on the technical documentation of the ship]

Rozważany prom pasażersko-samochodowy to statek z zainstalowanym nowoczesnym azymutalnym napędem elektrycznym. Napęd jednostki stanowią dwa silniki elektryczne o mocy 780 kW, zasilane za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych $2 \times 900 \text{ kV}\cdot\text{A}$. Jako źródło energii na statku zainstalowano cztery generatory o mocach $610 \text{ kV}\cdot\text{A}$ (488 kW, 366 kvar) oraz jeden generator przeznaczony wyłącznie do pracy portowej o mocy $135 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ($3 \times 400 \text{ V}/50 \text{ Hz}$). Układ elektrowni z wymienionymi elementami pokazano na rysunku 1.

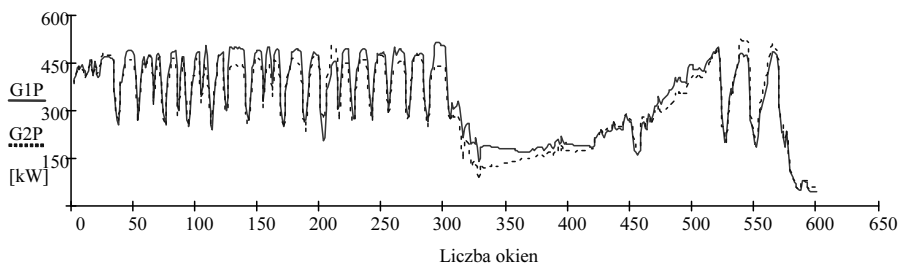
2.2. Wyniki badań

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch kart akwizycji danych PXIe-6124 i rejestratora – komputera przemysłowego National Instruments z kontrolerem NI PXIe-8106. Do pomiarów przyjęto częstotliwość próbkowania równą 25 kHz i równoległą rejestrację we wszystkich kanałach pomiarowych, tj. trzech napięć i czterech prądów (po dwa prądy na generator). W torach napięciowych znajdował się układ kondycjonowania z przetwornikami LEM CV3-1500. W przypadku sygnałów prądowych zastosowano sondy prądowe (cewki Rogowskiego) PEM LFR 1/15. Częstotliwość odcięcia filtrów antyaliasingowych ustawiona była na 10 kHz.

Sterowanie zestawem pomiarowym odbywało się za pomocą dedykowanego oprogramowania zrealizowanego w środowisku LabView. Próbkki badanych sygnałów były zapisywane na twardym dysku komputera National Instruments i przetworzone w trybie offline za pomocą autorskiego oprogramowania, opracowanego w języku C++. Ostateczną analizę i wizualizację wyników pomiarów przeprowadzono w programie Mathcad. Zgodnie z wytycznymi dokumentu [3] wszystkie wskaźniki były wyznaczane dla okna pomiarowego równego 10 okresom, ze względu na znamionową częstotliwość systemu równą 50 Hz.

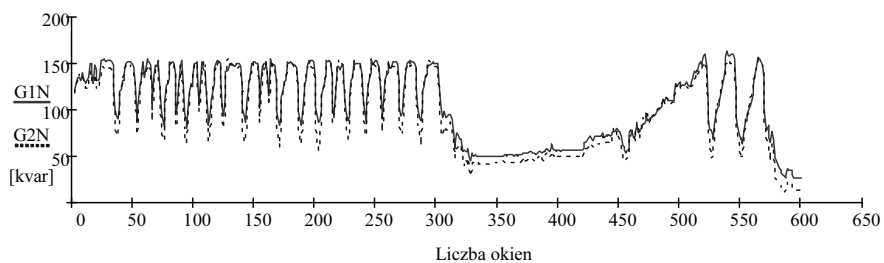
Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru mocy czynnych, biernych, nieczynnych oraz prądu i współczynników rozdziału ww. mocy, a także prądu wraz z podziałem na składowe podstawowe oraz pozostałe harmoniczne dwóch zespołów prądotwórczych (oznaczonych $G1$, $G2$), uzyskane w czasie manewrów rozważanej jednostki w morzu dla 600 okien o szerokości 200 ms (tj. razem ok. 2 min). W celu ograniczenia liczby rysunków w artykule nie pokazano zmian mocy i prądów samych składowych podstawowych (ich przebiegi są podobne do zmian całkowitych mocy i prądów). W czasie pomiarów na szyny załączone były do pracy równoległej dwie prądnice.

Na rysunkach 2–4 widać, że zdarzają się nierównomierności w obciążeniu prądnic całkowitą mocą czynną, nieczynną, a tym samym i prądem zarówno w stanach dynamicznych zmian obciążeń, jak i w stanach statycznych. Obserwacje te potwierdzają wyznaczone wskaźniki rozdziału (rys. 5–7) i ich osiągane wartości dochodzące do 8% dla δP , 4,2% dla δN i 6,1% dla δI .



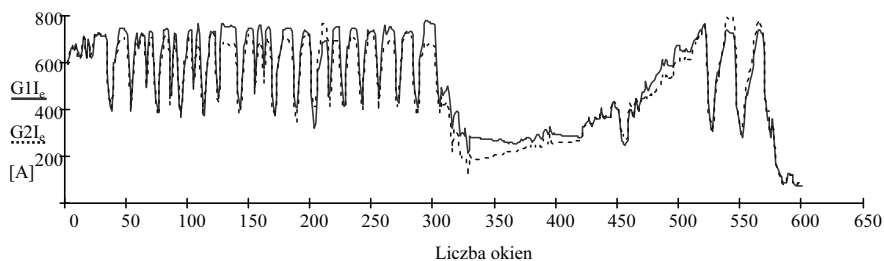
Rys. 2. Zmiany całkowitej mocy czynnej dla dwóch generatorów G1 i G2

Fig. 2. Changes of total active power of two generators G1 and G2



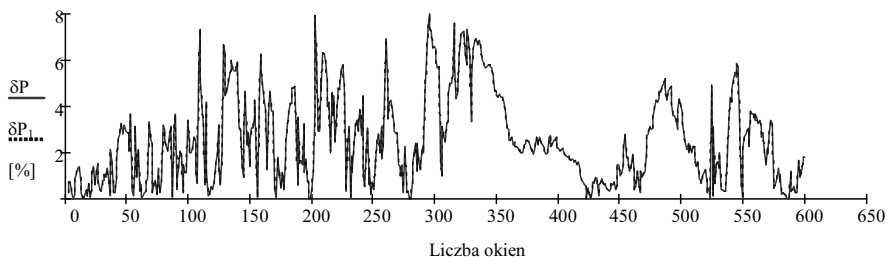
Rys. 3. Zmiany mocy nieczynnej dla dwóch generatorów G1 i G2

Fig. 3. Changes of nonactive power of two generators G1 and G2



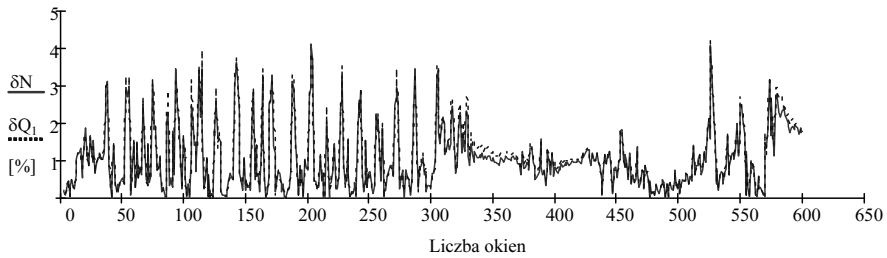
Rys. 4. Zmiany całkowitego prądu zastępczego dla dwóch generatorów G1 i G2

Fig. 4. Changes of total equivalent current of two generators G1 and G2



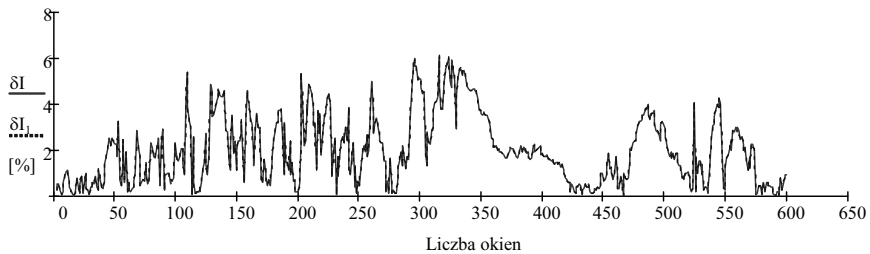
Rys. 5. Zmiany współczynników rozdziału mocy czynnej całkowitej P oraz składowej podstawowej P_1

Fig. 5. Changes of the distribution coefficients of the total active power P and the fundamental component P_1



Rys. 6. Zmiany współczynników rozdziału mocy nieczynnej N oraz biernej składowej podstawowej Q_1

Fig. 6. Changes of the distribution coefficients of the nonactive power N and reactive power of the fundamental component Q_1



Rys. 7. Zmiany współczynników rozdziału prądu całkowitego I oraz składowej podstawowej I_1

Fig. 7. Changes of the distribution coefficients of the total current I and the fundamental component I_1

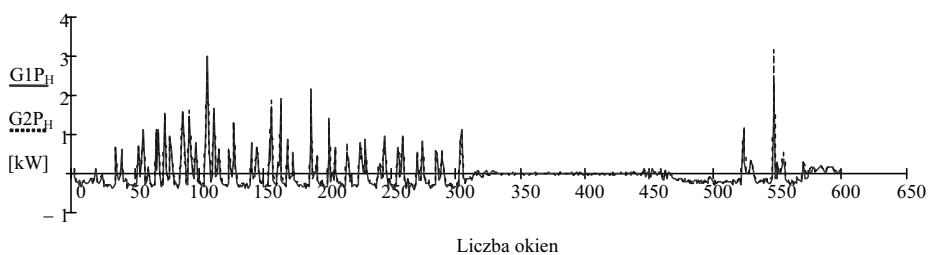
Na tych samych rysunkach dla porównania naniesiono przebiegi zmian wymienionych wskaźników określonych tylko dla składowych podstawowych napięć i prądów, a więc z pominięciem mocy harmonicznych. Należy zauważyć, że istnieją różnice w rozdziale mocy i prądów, szczególnie jeżeli porówna się wskaźniki δN i δQ_1 . Na podstawie wymienionych przebiegów nie można określić niewielkich różnic wartości analogicznych współczynników dla mocy czynnej i prądu. Jako uzupełnienie analizy w tabeli 2 zestawiono największe zarejestrowane wartości i różnice rozważanych wskaźników wyznaczonych dla wszystkich składowych i składowych podstawowych z wyłączeniem harmonicznych.

Aby dokładniej przyjrzeć się wpływowi mocy harmonicznych na rozdział obciążeń, w dalszej części obliczono moce składowych harmonicznych dla poszczególnych prądnic, tj. moce czynne (P_H), moce zniekształceń (D) oraz prądy harmoniczne (I_{eH}). Przebiegi ich zmian przedstawiono na rysunkach 8–10.

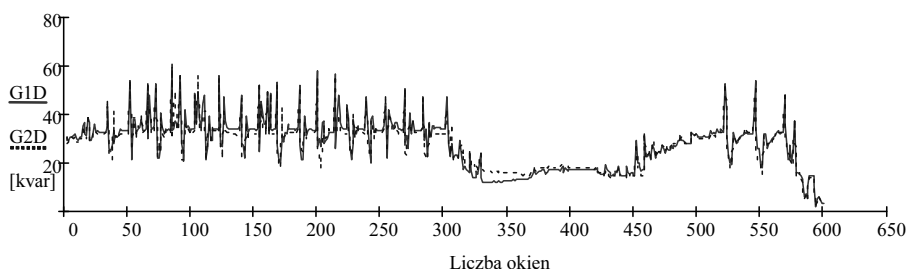
Tabela 2. Największe zarejestrowane wartości i różnice pomiędzy wskaźnikami rozdziału obciążeń całkowitych (δP , δN , δI) i składowych podstawowych (δP_1 , δQ_1 , δI_1)

Table 2. The highest registered values and the highest differences between the respective loads distribution indexes for total (δP , δN , δI) and the fundamental components (δP_1 , δQ_1 , δI_1)

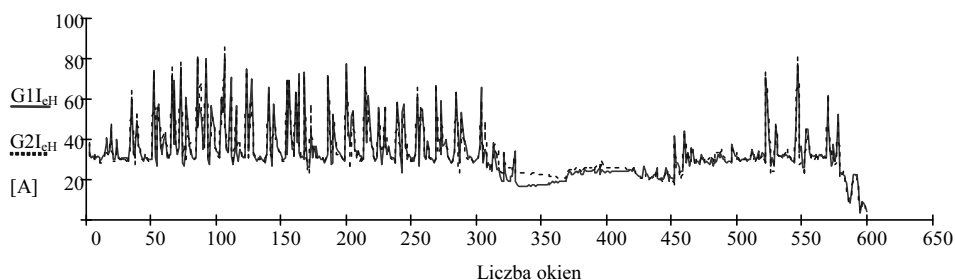
Wskaźnik	Największa wartość [%]	Największa różnica [%]
δP	7,98	0,08
δP_1	7,98	
δN	4,14	0,98
δQ_1	4,19	
δI	6,05	0,13
δI_1	6,11	



Rys. 8. Zmiany mocy czynnej harmonicznych dla dwóch generatorów G1 i G2
Fig. 8. Changes of harmonics active power of two generators G1 and G2

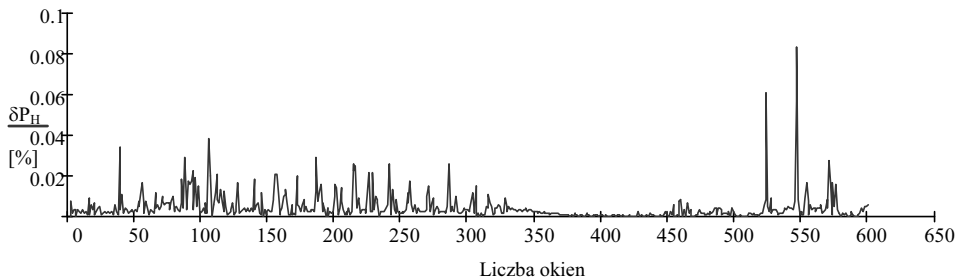


Rys. 9. Zmiany mocy zniekształceń dla dwóch generatorów G1 i G2
Fig. 9. Changes of distortion power of two generators G1 and G2

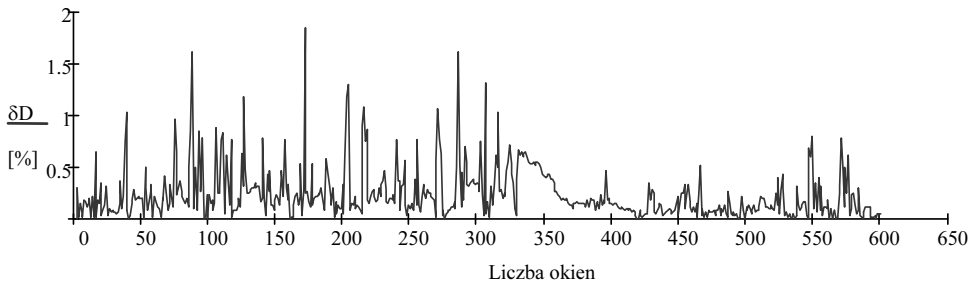


Rys. 10. Zmiany prądu zastępczego harmonicznych dla dwóch generatorów G1 i G2
Fig. 10. Changes of harmonics current of two generators G1 and G2

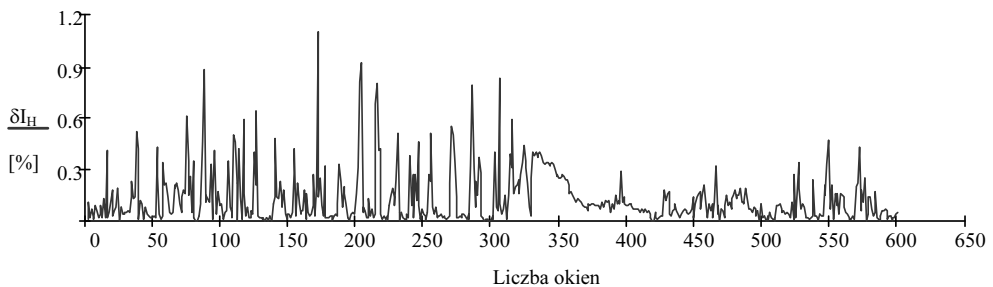
Widać, że między wymienionymi wielkościami dochodzi także do nieprawidłowości w rozdziale obciążeń, szczególnie dla mocy zniekształceń oraz prądu. Obserwacje te potwierdzają wyznaczone dla nich wskaźniki rozdziału obciążeń przedstawione na rysunkach 11–13. Największe osiągane wartości dla wskaźnika rozdziału mocy czynnej harmonicznych δP_H to 0,08%, dla wskaźnika rozdziału mocy zniekształceń δD to 1,85%, natomiast dla prądu harmonicznych δI_H – 1,1%.



Rys. 11. Zmiany współczynnika rozdziału mocy czynnej harmonicznych
Fig. 11. Changes of the distribution coefficient of the harmonics active power



Rys. 12. Zmiany współczynnika rozdziału mocy zniekształceń
Fig. 12. Changes of the distribution coefficient of the distortion power



Rys. 13. Zmiany współczynnika rozdziału prądu harmonicznych
Fig. 13. Changes of the distribution coefficient of the harmonics current

Podsumowując, należy stwierdzić, że nierównomierności w rozdziale składowych niefundamentalnych dla mocy czynnych nie mają znacznych wartości, natomiast dla mocy zniekształceń i prądu uzyskane wartości mogą wpłynąć na poprawną ocenę rozdziału obciążeń między równoległe pracujące źródła energii. Ponadto na wykresie mocy czynnej harmonicznych P_H dwóch generatorów (rys. 8) można zauważyć osiągnięte ujemne wartości, a więc przepływ mocy czynnej od odbiornika do źródła.

PODSUMOWANIE

W pracy poddano analizie rozpyły mocy i prądu dla wszystkich składowych mocy jednocześnie, z podziałem na składowe podstawowe oraz na harmoniczne. Na ogólnych wykresach wskaźników rozdziału obciążeń mocą i prądem nie widać wyraźnie różnic w rozdziale obciążeń między wszystkimi składowymi i składowymi fundamentalnymi, jednak po dodatkowym przeanalizowaniu jedynie składowych harmonicznych widać, że takie różnice o znaczącej wartości istnieją, przede wszystkim w części przepływu energii nieczynnej zniekształceń i prądu.

W warunkach pojawiających się zniekształceń przebiegów prądu i napięcia sieci powodowanych przez stale rosnącą liczbę odbiorników nieliniowych należy mieć na uwadze występowanie mocy niefundamentalnych, które mogą wpłynąć na poprawną ocenę rozdziału obciążeń między równoległe pracującymi zespołami prądotwórczymi. Ocena ta będzie uzależniona od tego, jakie składowe mocy zostaną wykorzystane do pomiaru wskaźników rozdziału obciążeń. Należy zatem precyzyjnie określić i prawnie unormować, które moce, tj. całkowite czy tylko podstawowe względem standardu IEEE 1459-2010, powinny być brane pod uwagę przy wyznaczaniu parametrów i kontroli rozdziału obciążeń. Wstępne badania wykazały, że przyjmują one różne wartości, w zależności od wybranych składowych.

O ile wyznaczanie wskaźników rozdziału mocy czynnej i prądu w warunkach przebiegów odkształconych może być jasne, ponieważ ma związek z obciążeniem i zjawiskami termicznymi, o tyle wyznaczanie wskaźnika mocy biernej już niekoniecznie i może budzić kontrowersje. W zależności od podejścia można wykonać pomiary na podstawie składowych fundamentalnych przebiegów prądu i napięcia – wówczas wyznaczony w taki sposób parametr, tj. wskaźnik rozdziału mocy biernej, będzie służył do testowania regulatorów napięcia zespołów prądotwórczych, lub uwzględnić wszystkie składowe przebiegów, a wyznaczony na ich podstawie parametr, zwany wskaźnikiem rozdziału mocy nieczynnej, będzie określał rozdział strat mocy w systemie energetycznym. Podsumowując, kwestię sposobu wyznaczania wskaźników rozdziału obciążeń należy rozwiązać tak, aby nie było niejednoznaczności i tym samym nie dochodziło do sytuacji spornych co do ich wartości i określania stanu obciążenia zespołów prądotwórczych pracujących równoległe na szyny zbiorcze rozdzielnic głównej.

W Katedrze Elektroenergetyki Okrętowej Akademii Morskiej w Gdyni został zaprojektowany i wykonany przyrząd do pomiaru parametrów rozdziału obciążeń

między równolegle pracującymi zespołami prądotwórczymi, którego autor artykułu jest jednym z głównych wykonawców (w części dotyczącej pomiaru składowych mocy i rozdziału obciążeń) [5]. Algorytm wyznaczania wskaźników oparto na całkowitych mocach: czynnej i nieczynnej oraz całkowitym prądzie zastępczym, obliczanych zgodnie z obowiązującym standardem IEEE 1459-2010.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/07/E/ST8/01688.

LITERATURA

1. Gnaciński P., *Prediction of windings temperature rise in induction motors supplied with distorted voltage*, Energy Conversion & Management (ELSEVIER), 2008, April, vol. 49, no. 4, s. 707–717.
2. Górnjak M., Szweđa M., *Analiza rozdziału obciążeń między równolegle pracujące prądnice na przykładzie wybranych statków*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2010, nr 66, s. 37–48.
3. IEC Std. 61000-4-30, *Electromagnetic Compatibility (EMC): Testing and measurement techniques – power quality measurement methods*.
4. IEEE Std. 1459-2010, *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*, New York, 19 March 2010.
5. Mindykowski J. et al., *Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu rozwojowego nr R0102703 pt. „Uniwersalne analizatory/estymatory jakości energii elektrycznej, w szczególności do zastosowań w izolowanych systemach elektroenergetycznych”*, Gdynia 2011.
6. Polski Rejestr Statków, *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Część VIII. Instalacje elektryczne i systemy sterowania*, PRS, Gdańsk 2007.
7. Tarasiuk T., *Ocena jakości energii elektrycznej w okrętowych systemach elektroenergetycznych z wykorzystaniem procesorów sygnałowych*, Prace Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2009.

POWER COMPONENTS AND THEIR DISTRIBUTION BETWEEN GENERATORS WORKING IN PARALLEL ON PASSENGER-CAR FERRY WITH ELECTRIC DRIVE

Summary

In the paper were discussed the active, reactive, nonactive power and current distribution indexes as well as its measurement results on passenger-car ferry with electric drive. Mainly taking into account changes, that have taken place over the last years on the description of power definitions the load distribution parameters were determined according to the currently valid, standardizing power definitions document IEEE 1459-2010. Initial research have shown, that there are differences in the indexes size, depending on what components of power of currents and voltages distorted waveforms will be considered in the measurement.