

International Ukraine-Poland Seminar

Power quality in distribution networks with distributed generation

Kiev, July 4-5, 2019

DOI: 10.32073/iepl.2019.14

**ANALIZA PRACY MIKROTURBINY GAZOWEJ
W MIKROSYSTEMIE ENERGETYCZNYM**

Patrycja Dylicka, Ryszard Pawełek

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

Abstract: Gas microturbines can be used in energy microsystems as a source of electricity and heat. The paper presents the results of tests carried out on a real object - microturbine C30 installed in the Distributed Generation Laboratory at the Institute of Electrical Power Engineering of the Lodz University of Technology. The research concerned the impact of microturbine on the supply network in the field of current distortion analysis and the efficiency of electricity and heat generation.

1. WSTĘP

Konieczność stopniowego odejścia od konwencjonalnych źródeł wytwarzania energii oraz wzmacniająca się rola prosumentów powodują powstawanie nowych koncepcji, do których należy idea mikrosystemów energetycznych. Spośród mikroźródeł Mikroturbiny gazowe wyróżnia: łatwa instalacja, relatywnie mały rozmiar, niewielka ilość części ruchomych, szybki rozruch i szeroka elastyczność zarówno pod względem dopasowania produkcji do potrzeb odbiorców, jak i wyboru paliwa, które może być gazem ziemnym, propanem, etanolem, olejem napędowym czy ropą naftową, jak i gazem wysypiskowym czy biopaliwami. Jednym ze źródeł, które mogą być w nich zastosowane i zapewniają ciągłość zasilania są mikroturbiny gazowe służące środowisku przez obniżanie emisji tlenków azotu oraz możliwość spalania m.in. biogazu i paliw odpadowych. Kogeneracja, czyli skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła przekłada się na poprawę efektywności energetycznej systemu i korzyść ekonomiczną. W literaturze można znaleźć wiele prac dotyczących modelowania pracy mikroturbin gazowych w mikrosystemach elektroenergetycznych [1, 2, 3, 4], ale brak pozycji prezentujących pomiary wykonane dla obiektu rzeczywistego. W związku z tym w artykule przedstawiono wyniki badań mikroturbiny gazowej Capstone C30 zainstalowanej w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Pozwoliło to wysunąć wnioski dotyczące opłacalności i korzyści płynących z użytkowania tego typu źródła rozproszonego. Zdefiniowano układy pracy mikroturbiny gazowej oraz określono charakterystyki energetyczne jej układów

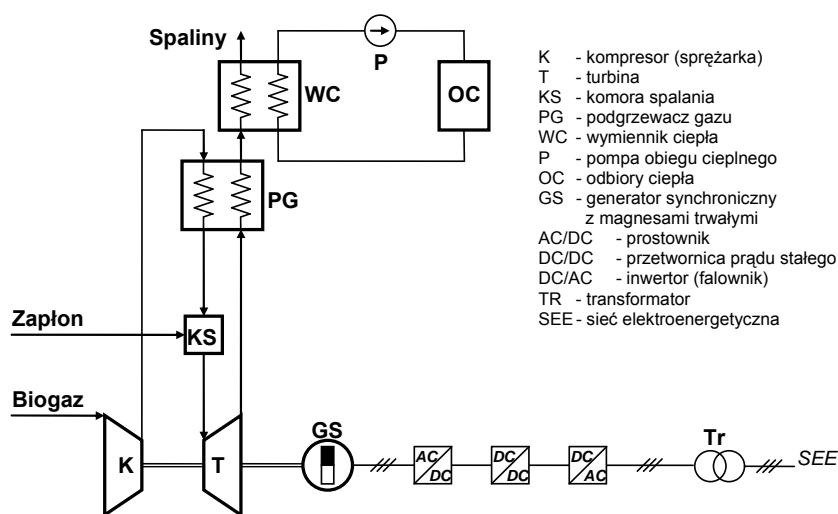
elektrycznych i cieplnych przy współpracy z siecią. Dokonano oceny układów sterowania i zaproponowano możliwe zastosowania mikroturebin gazowych.

Mikroturbiny gazowe spośród mikroźródeł wyróżnia: łatwa instalacja, relatywnie mały rozmiar, niewielka ilość części ruchomych, szybki rozruch i szeroka elastyczność zarówno pod względem dopasowania produkcji do potrzeb odbiorców, jak i wyboru paliwa, które może być gazem ziemnym, propanem, etanolem, olejem napędowym czy ropą naftową, jak i gazem wysypiskowym czy biopaliwami. Jako źródła zasilania rezerwowego mikroturebiny mogą pracować przez szczególnie długi czas, wymagając przy tym niewielkich nakładów konserwacyjnych. Pod względem ochrony środowiska mikroturebiny wyróżnia niska emisja hałasu i wibracji oraz tlenków azotu. Mikroturebiny gazowe zaliczane są do mikroźródeł kogeneracyjnych. Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej charakteryzuje się wysoką sprawnością, co podnosi efektywność energetyczną mikrosystemu. Energię, która w układach monogeneracyjnych jest tracona, tutaj wykorzystuje się do ogrzewania.

2. OPIS TECHNICZNY MIKROTURBINY CAPSTONE C30

2.1. Wprowadzenie

Mikroturbina gazowa C30 jest lokalnym źródłem kogeneracyjnym o mocy elektrycznej równej 30 kW i mocy cieplnej równej 60 kWc [5]. Schemat funkcjonalny działania mikroturebiny w układzie kogeneracyjnym pokazano na rysunku 1 [6]. Podstawowymi elementami układu mechanicznego mikroturebiny są mikroturebina T, sprężarka (kompresor) K i generator synchroniczny z magnesami trwałymi GS umieszczone na wspólnym wale. Gaz (biogaz) dostarczany do mikroturebiny jest przed procesem spalania w komorze spalania KS sprężany do odpowiedniego ciśnienia i wstępnie podgrzany w podgrzewaczu PG. Prędkość obrotowa mikroturebiny zależy od produkcji mocy i zmienia się od 40000 do 96000 obr/min przy obciążeniu znamionowym. W celu wyeliminowania strat związanych z tarciem w mikroturebinach stosuje się gazowe łożyska foliowe (łożyska powietrzne), w których podczas pracy warstwa gazowa oddziela wał od łożysk i chroni je przed zużyciem. Generator mikroturebiny wytwarza napięcie przemiennie o amplitudzie i częstotliwości zależnej od prędkości obrotowej. Napięcie to jest zamieniane na stałe przez prostownik AC/DC. W celu uzyskania stałej wartości napięcia stałego na wejściu falownika DC/AC stosuje się dodatkowy układ prądu stałego (przetwornicę DC/DC). Współpracę z siecią zasilającą umożliwia inwertor DC/AC wyposażony w filtr ograniczający odkształcenie napięcia.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny mikroturebiny

2.2. Układy sterowania pracą mikroturbiny

Celem utrzymania zadanych parametrów pracy mikroturbiny w układzie elektrycznym i obiegu cieplnym zastosowano odpowiednie układy regulacji i sterowania. Sterowaniu podlega wartość wytwarzanej mocy elektrycznej oraz stopień wykorzystania mocy cieplnej do celów użytkowych. Przy współpracy z zewnętrzną siecią elektroenergetyczną mikroturbina generuje moc czynną przy współczynniku mocy $\cos\varphi = 1$ (nie wytwarza mocy bierniej).

Układy regulacji w układzie wytwarzania energii elektrycznej

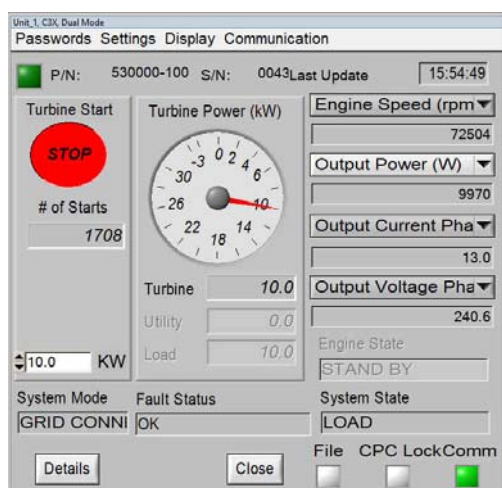
Przy pracy w połączeniu z siecią zasilającą jedyną wielkością podlegającą sterowaniu jest wartość zadana mocy czynnej wytwarzanej przez mikroturbinę. Możliwe są trzy sposoby zmiany wartości zadanej mocy czynnej:

- zmiana wartości zadanej mocy czynnej przez operatora mikroturbiny,
- realizacja zadanego tygodniowego harmonogramu pracy mikroturbiny,
- praca mikroturbiny w zamkniętym układzie regulacji, w którym wartość zadana mocy jest wyznaczana w zależności od funkcji realizowanej w mikrosystemie.

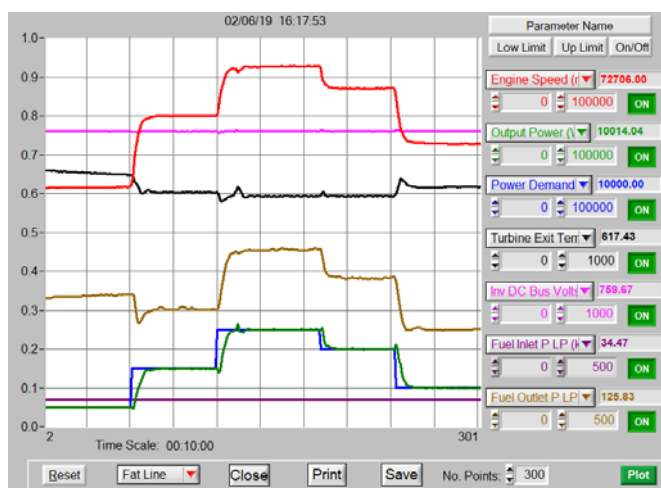
Na rysunku 2 pokazano widok panelu sterowniczego mikroturbiny obsługiwanej przez operatora. Wartość zadana mocy w tym przypadku wynosi 10 kW, a aktualna mocy czynnej wytwarzanej przez mikroturbinę jest równa 9,97 kW. Na panelu sterowniczym są widoczne też bieżące pomiary innych wielkości:

- prędkości obrotowej - 72504 obr./min,
- napięcia fazowego - 240,6 V,
- prądu fazowego - 13,0 A,
- oraz informacje o trybie pracy mikroturbiny i aktualnym czasie.

Na rysunku 3 pokazano efekt pracy operatora mikroturbiny zmieniającego wartość zadaną mocy czynnej (linia niebieska) co dwie minuty w cyklu: 5 – 15 – 25 – 20 – 10 kW. Należy zauważyć, że wartość mocy wytwarzanej przez mikroturbinę (linia zielona) nadąża za wartością zadaną, a zmiana wartości generowanej mocy nie trwa dłużej niż 30 sekund.



Rys. 2. Widok panelu sterowniczego mikroturbiny



Rys. 3. Zmiany parametrów pracy mikroturbiny w zależności od zmian mocy zadanej

W zależności od wartości zadanej mocy zmieniają się wartości innych parametrów pracy mikroturbiny, a w szczególności prędkości obrotowej (linia czerwona) w zakresie od 62000 do 93000 obr./min, ciśnienia gazu na wylocie ze sprężarki (linia brązowa) w zakresie od 125 do 225 kP oraz obserwuje się zmiany temperatury spalin wylotowych (linia czarna),

przy czym temperatura spalin jest niższa przy większych wartościach prędkości obrotowej mikroturbiny. Inne obserwowane parametry, tzn. napięcie w obwodzie prądu stałego układu przetwarzania energii równe 760 V (linia różowa) czy ciśnienie gazu na wlocie do mikroturbiny odpowiadające ciśnieniu w sieci gazowniczej równe 34,5 kP (linia fioletowa) mają stałe wartości.

Na rysunku 4 pokazano możliwości ustalania tygodniowego harmonogramu pracy mikroturbiny (grafiku generacji), czyli zadawania określonej wartości zadanej mocy w w przedziałach czasowych w poszczególnych dniach tygodnia. Przedziały czasowe mogą być skorelowane np. ze strefami czasowymi w taryfach za energię elektryczną w celu optymalizacji kosztów eksploatacji mikroturbiny.

W przypadku pracy wyspowej mikroturbina zapewnia zasilanie odbiorów energią elektryczną utrzymując zadane wartości napięcia i częstotliwości. Na rysunku 5 pokazano okno nastaw parametrów dedykowanych do realizacji pracy wyspowej. Oprócz podstawowych wartości napięcia (400 V) i częstotliwości (50 Hz) podane są tam nastawy zabezpieczeń podnapięciowego, nadnapięciowego, podczęstotliwościowego i nadczęstotliwościowego, po przekroczeniu których następuje wyłączenie mikroturbiny. Oczywiście mikroturbina może pracować przy innych wartościach napięcia i częstotliwości nastawionych przez jej użytkownika.

Event No.	Day of Week	Time (hh:mm)	Start On/Off	Power Demand (W)	Min. Power Capacity (W)	Spinning Reserve (W)
1	Monday	00:00	<input checked="" type="checkbox"/>	5000	0	0
2	Monday	08:00	<input checked="" type="checkbox"/>	20000	0	0
3	Monday	16:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
4	Tuesday	00:00	<input type="checkbox"/>	5000	0	0
5	Tuesday	08:00	<input type="checkbox"/>	20000	0	0
6	Tuesday	16:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
7	Wednesday	00:00	<input type="checkbox"/>	5000	0	0
8	Wednesday	08:00	<input type="checkbox"/>	20000	0	0
9	Wednesday	16:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
10	Thursday	00:00	<input type="checkbox"/>	5000	0	0
11	Thursday	08:00	<input type="checkbox"/>	20000	0	0
12	Thursday	16:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
13	Thursday	20:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
14	Friday	00:00	<input type="checkbox"/>	5000	0	0
15	Friday	08:00	<input type="checkbox"/>	20000	0	0
16	Friday	16:00	<input type="checkbox"/>	5000	0	0
17	Saturday	00:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
18	Saturday	12:00	<input type="checkbox"/>	20000	0	0
19	Sunday	00:00	<input type="checkbox"/>	10000	0	0
20	Sunday	12:00	<input type="checkbox"/>	20000	0	0

Rys. 4. Przykładowy tygodniowy harmonogram pracy mikroturbiny

Stand Alone Voltage and Frequency Settings, Unit_1

Standalone Settings

Auto Enable Power: Off On

Voltage Settings

Parameter	Value	Time (sec)
Voltage (Vrms)	400	
Voltage Start (Vrms)	0	
Voltage Ramp (V/sec)	3000	
Under Voltage (Vrms)	340	10.00
Over Voltage (Vrms)	500	10.00

Frequency Settings

Parameter	Value	Time (sec)
Frequency (Hz)	50.0	
Frequency Start (Hz)	0.0	
Frequency Ramp (Hz/sec)	2000	
Under Frequency (Hz)	47.0	10.00
Over Frequency (Hz)	52.0	10.00

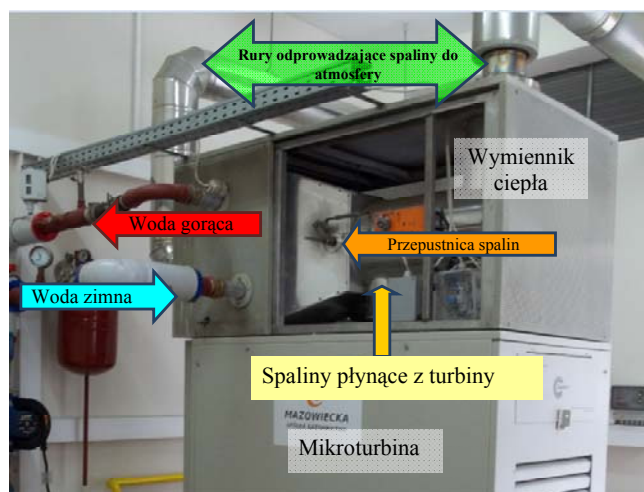
Buttons: Apply, Close

Rys. 5. Nastawy parametrów dla pracy wyspowej mikroturbiny

Układy regulacji w obiegu cieplnym

Mikroturbina C30 nie jest wyposażona fabrycznie w system wykorzystania ciepła zawartego w spalinach. W badanej mikroturbinie nabudowany został wymiennik ciepła pozwalający na taką funkcjonalność. Na rysunku 6 pokazano mikroturbinę gazową z nabudowanym wymiennikiem ciepła oznaczając na nim podstawowe elementy obiegu cieplnego.

Ilość ciepła wytwarzanego przez mikroturbinę jako produkt uboczny produkcji energii elektrycznej nie zależy od zapotrzebowania na ciepło. Wzrost zadanego obciążenia elektrycznego wiąże się z zwiększeniem ilości spalin. Należy więc z nich wydzielić strumień, który trafia do wymiennika, gdzie oddaje ciepło na cele użytkowe i grzewcze, a pozostała energia jest tracona. Strata wylotowa będzie więc tym większa im większe jest obciążenie elektryczne a mniejsze zapotrzebowanie na ciepło.

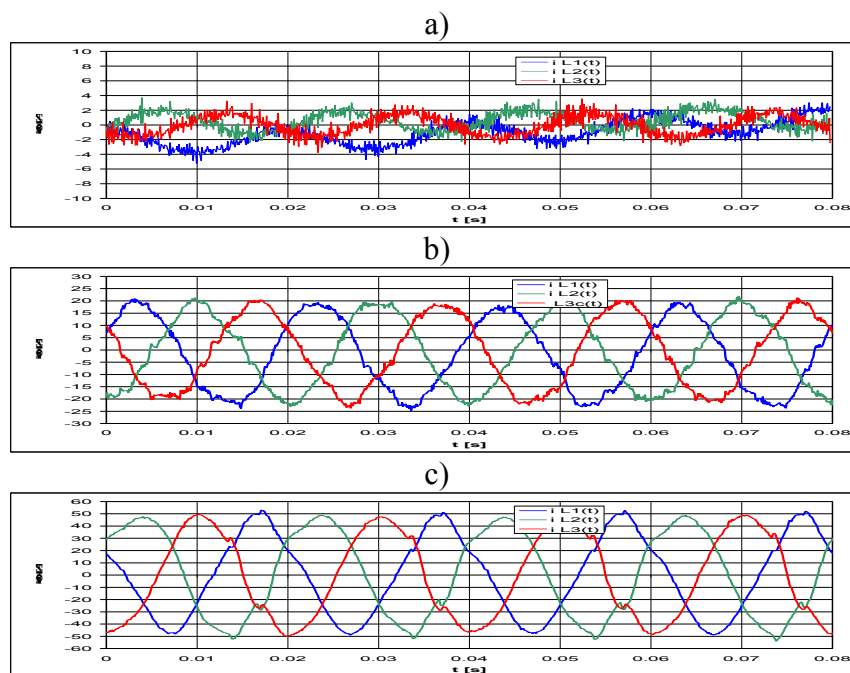


Rys. 6. Widok mikroturbiny z naborowanym wymiennikiem ciepła

Podział spalin odbywa się przez pracę układu regulacji poza mikroturbiną (w wymienniku ciepła), który steruje przepustnicą w taki sposób aby temperatura wody zasilającej (gorącej) nie przekroczyła 80°C . Każda zmiana mocy wytwarzanej mikroturbiną powoduje ustalenie nowego punktu położenia tego urządzenia. Jeśli temperatura wody gorącej nie przekracza 80°C to cały strumień spalin kierowany jest do wymiennika ciepła.

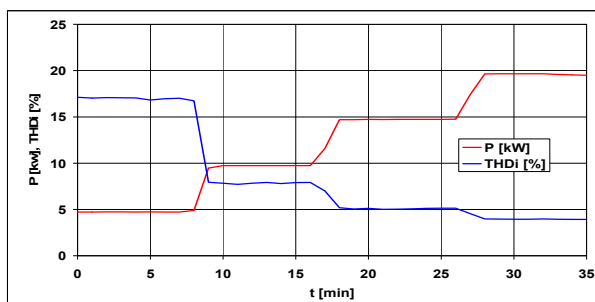
3. ODDZIAŁYWANIE MIKROTURBINY NA SIĘĆ ZASILAJĄCĄ

Mikroturbina gazowa wprowadza moc czynną do sieci elektroenergetycznej poprzez energoelektroniczny układ przetwarzania energii, a w związku z tym przebiegi prądów fazowych mikroturbiny są odkształcone. Odkształcenie prądu zależy od wartości mocy wytwarzanej przez mikroturbinę. Na rysunku 7 pokazano przebiegi prądów fazowych mikroturbiny zarejestrowane przy jej biegu jałowym oraz przy generowaniu mocy o wartości 10 kW i 25 kW.

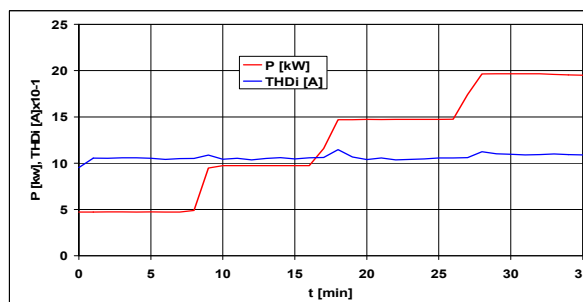


Rys. 7. Przebiegi prądów fazowych mikroturbiny zarejestrowane przy biegu jałowym (a) przy generowaniu mocy o wartości 10 kW (b) i 25 kW (c)

Aby ocenić odkształcenie prądów mikroinstalacji dokonano pomiarów wartości całkowitego współczynnika odkształcenia prądów harmonicznych (THD_I) przy następujących wartościach mocy czynnej wytwarzanej przez mikroinstalację: 5 kW, 10 kW, 15 kW i 20 kW. Na rysunku 8 pokazano wartości współczynnika THD_I prądu mikroinstalacji (w odniesieniu do harmonicznej podstawowej), a na rysunku 9 wartości skuteczne prądów wyższych harmonicznych w porównaniu z wartościami wytwarzanej mocy czynnej. Na podstawie wyników pomiarów należy stwierdzić, że odkształcenie prądów fazowych mikroinstalacji (wartości współczynników THD_I) maleje wraz ze wzrostem mocy generowanej przez mikroinstalację przy zachowaniu praktycznie stałej wartości skutecznej prądów harmonicznych.



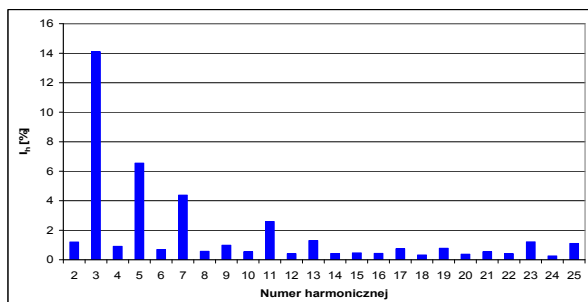
Rys. 8. Zależność współczynnika odkształcenia prądu THD_I od mocy mikroinstalacji



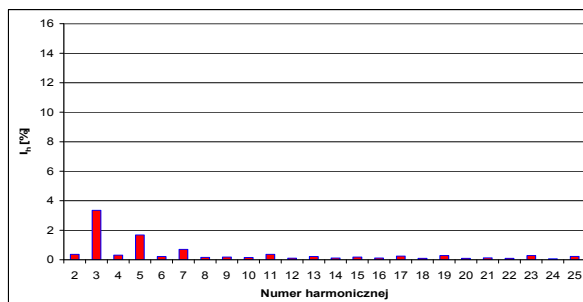
Rys. 9. Zależność wartości skutecznej wyższych harmonicznych prądu od mocy mikroinstalacji

Dla bardziej szczegółowego określenia wpływu mikroinstalacji na jakość energii porównano wartości względne (odniesione do harmonicznej podstawowej) i bezwzględne (wartości skuteczne) indywidualnych wyższych harmonicznych przy dwóch wartościach mocy czynnej mikroinstalacji równych 5 i 20 kW.

Porównanie udziałów wyższych harmonicznych pokazano odpowiednio na rysunkach 10 i 11. Z przedstawionych wykresów wynika, że w obu przypadkach obciążenia decydujący wpływ na odkształcenie prądu mają harmoniczne nieparzyste, tzn. harmoniczne charakterystyczne dla układów trójfazowych z przewodem neutralnym. Największe wartości względne ma 3. harmoniczna (14,4% przy obciążeniu 5 kW i 3,4 % przy 20 kW).

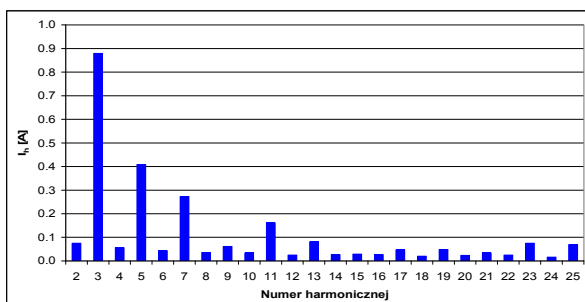


Rys. 10. Udziały wyższych harmonicznych prądu mikroinstalacji przy obciążeniu 5 kW

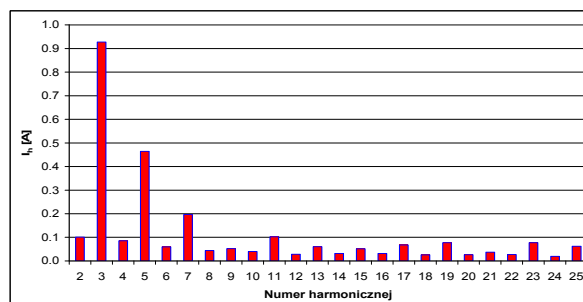


Rys. 11. Udziały wyższych harmonicznych prądu mikroinstalacji przy obciążeniu 20 kW

Natomiast porównanie wartości skutecznych wyższych harmonicznych dla mocy 5 kW i 20 kW pokazano na rysunkach 12 i 13. Na podstawie tych rysunków można stwierdzić, że wartości skuteczne poszczególnych wyższych harmonicznych są porównywalne niezależnie od generowanej mocy. Jak widać na wykresach wartość 3. harmonicznej prądu w fazie L1 ma wartość 0,88 A przy 5 kW oraz 0,93 A przy 20 kW, natomiast 5. harmoniczna odpowiednio 0,56 A i 0,48 A.



Rys. 12. Wartości skuteczne wyższych harmonicznych prądu mikroinstalacji przy obciążeniu 5 kW



Rys. 13. Wartości skuteczne wyższych harmonicznych prądu mikroinstalacji przy obciążeniu 20 kW

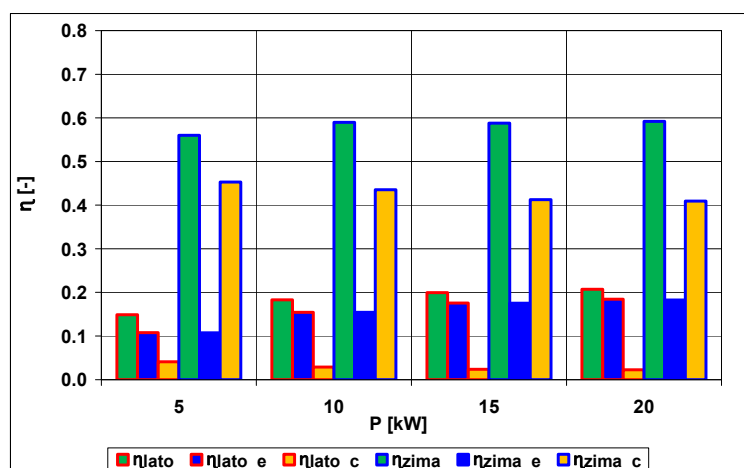
Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów można powiedzieć, że oddziaływanie mikroinstalacji na sieć zasilającą nie zależy od wartości generowanej mocy, bo zależy przede wszystkim od wartości skutecznych prądów wyższych harmonicznych wprowadzanych do sieci. Mimo pozornie dużego odkształcenia prądów fazowych mikroinstalacji pracującej na biegu jałowym jej oddziaływanie na jakość napięcia zasilającego będzie podobne jak przy obciążeniu znamionowym ponieważ prądy wyższych harmonicznych mają zbliżone wartości skuteczne.

4. EFEKTYWNOŚĆ WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPŁA

Mikroinstalacja gazowa C30 pracuje w układzie kogeneracyjnym z priorytetem wytwarzania zadanej wartości mocy czynnej. Ciepło powstające w wyniku spalania gazu jest wykorzystywane w zależności od zapotrzebowania odbioru. W artykule pokazano wyniki badań dotyczące efektywności pracy mikroinstalacji dla dwóch tygodniowych okresów:

- okresu zimowego, w którym wytwarzane ciepło wykorzystywane jest w całości na potrzeby ogrzewania,
- okresu letniego, w którym brak odbioru ciepła.

W obu okresach badania wykonano przy wartościach wytwarzanej mocy czynnej w zakresie od 5 do 20 kW. Zagregowane wyniki badań sprawności wykorzystania wytwarzanej energii elektrycznej i ciepła pokazano na rysunku 14.



Rys. 14. Porównanie sprawności wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w okresie grzewczym i poza nim

Jak wynika z przeprowadzonych badań sprawność wytwarzania energii elektrycznej w obu okresach jest podobna i nie przekracza 20%. Inaczej jest z wykorzystaniem ciepła zawartego w spalinach. W okresie letnim prawie całe ciepło jest odprowadzane ze spalinami

do atmosfery i całkowita sprawność mikroturbiny jest bliska sprawności elektrycznej. W okresie zimowym spaliny w całości przepływają przez wymiennik ciepła oddając energię na cele ogrzewania przy sprawności wykorzystania ciepła w granicach od 40 do 45%, a całkowita sprawność mikroturbiny wynosi prawie 60%.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania praktyczne (pomiarowe) wykazały, że mikroturbina nie wprowadza do sieci zaburzeń elektromagnetycznych mających wpływ na jakość energii. Z analizy wyników pomiarów wynika, że oddziaływanie mikroturbiny na sieć zasilającą w zakresie generowanych wyższych harmonicznych prądu nie zależy od wartości wytwarzanej mocy czynnej. Wartości skuteczne harmonicznych występujących przy różnych obciążeniach mikroturbiny są do siebie zbliżone, a odkształcenia prądów fazowych są wynikiem zmian wartości skutecznej harmonicznej podstawowej. Można też powiedzieć, że mikroturbina jest symetrycznym źródłem wytwórczym i nie powoduje pogorszenia symetrii napięć i prądów w sieci zasilającej.

Wyniki badań efektywności energetycznej (sprawności) jednoznacznie wskazują, że produkcja energii z mikroturbiny gazowej jest dużo bardziej opłacalna w okresie zimowym, czyli przy kogeneracyjnym wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła. Sprawność działania mikroturbiny w okresie letnim nie przekracza 20%, a w okresie zimowym osiąga prawie 60%. Na tej podstawie można stwierdzić, że eksploatacja mikroturbiny poza okresem grzewczym nie jest ekonomicznie uzasadniona.

5. LITERATURA

1. Nayak S.K., Gaonkar D.N.: Modeling and Performance Analysis of Microturbine Generation System in Grid Connected/Islanding Mode, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Bengaluru, 2012.
2. Fethi O., Dessaint L.-A., Al-Haddad K.: Modeling and Simulation of the Electric Part of a Grid Connected Micro Turbine, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2004
3. Crossley P.A., Chowdhury S., Saha A.K., Chowdhury S.P.: Modeling and Performance Analysis of a Microturbine as a Distributed Energy Resource, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, No 2, 2009, pp. 529 - 538
4. Guda S.R., Wang C., Nehrir M.H.: A Simulink-Based Microturbine Model for Distributed Generation Studies, 37th Annual North American Power Symposium, Ames, IA, USA, 2005.
5. Capstone Turbine Corporation, „Technical Reference. Capstone Model C30 Performance,” 2006.
6. Wasiak I., Pawełek R.: Jakość zasilania w sieciach z generacją rozproszoną, PWN, Warszawa, 2015

inż. Patrycja Dylicka

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź
patrycja.dylicka@edu.p.lodz.pl

dr inż. Ryszard Pawełek

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź
ryszard.pawelek@p.lodz.pl