

## WSPÓLPRACA FALOWNIKA HYBRYDOWEGO Z LITOWO-ŻELAZOWYM MAGAZYNEM ENERGII

W ostatnich latach coraz bardziej popularnymi stają się instalacje odnawialnych źródeł energii wyposażonych w systemy magazynowania energii elektrycznej. Systemy te nazywane są systemami hybrydowymi. Coraz częściej jako magazyny energii elektrycznej wykorzystywane są litowo-żelazowe akumulatory. Charakteryzują się one długim okresem eksploatacji dochodzącym nawet do 20 lat oraz dużą liczbą cykli ładowania i rozładowania (do 7000). Jednym z głównych elementów hybrydowego systemu jest falownik hybrydowy. W instalacjach małej mocy pełni falownik pełni również rolę urządzenia nadrzędnego zarządzającego przepływem energii w systemie hybrydowym. Jego praca polega między innymi na wymianie energii elektrycznej z siecią elektroenergetyczną. Aspekty tej współpracy zostały zaprezentowane w niniejszym artykule. Szczegółowej analizie podane zostały stany pracy takie jak ładowanie i rozładowanie litowo-żelazowego magazynu energii elektrycznej.

### WSTĘP

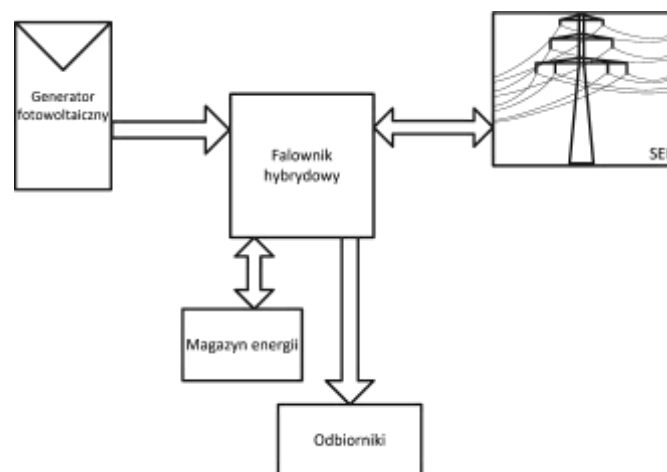
Systemy hybrydowe to kolejny krok w rozwoju systemów fotowoltaicznych służących do produkcji energii elektrycznej. Systemy te są przeznaczone dla osób, które chcą w całości zużywać energię produkowaną przez instalacje fotowoltaiczne na własne potrzeby oraz zapewnić działanie urządzeń w przypadku awarii sieci elektroenergetycznej. Do tej pory instalacje tego typu wymagały zastosowania kilku urządzeń [1]. Istotną wadą była również żywotność akumulatorów, która w zależności od wybranej technologii gwarantowała pracę akumulatorów jedynie od 3 do 7 lat. Kolejnym problemem była spadająca pojemność akumulatorów oraz konieczność utrzymania ich stanu naładowania na odpowiednim poziomie. Rozwiązania oferowane dziś dla inwestorów pozbawione są wyżej wymienionych wad oraz dają możliwość gromadzenia nadwyżek energii elektrycznej, która jest produkowana w instalacji fotowoltaicznej. Zgromadzone nadwyżki są wykorzystywane w okresie zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz podczas braku energii promieniowania słonecznego [2]. W przypadku wystąpienia awarii sieci elektroenergetycznej, sieć domowa zostaje przełączona na zasilanie z wyspowego źródła zasilania wykorzystującego zgromadzoną w akumulatorach energię elektryczną. Pomimo wyższych nakładów inwestycyjnych przy budowie instalacji hybrydowej w porównaniu z instalacją On-Grid, zwrot poniesionych kosztów może być krótszy, dzięki wykorzystywaniu całej wyprodukowanej energii na potrzeby własne. Zastosowanie hybrydowej instalacji fotowoltaicznej niezależnia użytkownika od dostawcy energii elektrycznej oraz daje gwarancję, że nawet w przypadku awarii sieci elektroenergetycznej odbiorniki będą nadal zasilane [3,8].

### 1. FOTOWOLTAICZNY FALOWNIK HYBRYDOWY

Fotowoltaiczny falownik hybrydowy może zasilać urządzenia elektryczne energią pozyskaną z generatora fotowoltaicznego, z sieci energetycznej lub z magazynu energii w postaci akumulatora. Gdy moc wyjściowa z generatora fotowoltaicznego jest wystarczająca, możliwe jest jednoczesne zasilanie odbiorników, ładowanie magazynu energii oraz dostarczanie nadwyżki wyprodukowanej energii

do sieci elektroenergetycznej. Przy braku promieniowania słonecznego, falownik hybrydowy zasila odbiorniki energii elektrycznej z magazynu energii lub sieci elektroenergetycznej [5,8].

Falowniki hybrydowe posiadają możliwość konfigurowania parametrów dotyczących współpracy z siecią oraz magazynem energii. Możliwe jest ustawienie żądanych priorytetów dotyczących kolejności wykorzystania źródeł zasilania, ładowania/rozładowania magazynu energii, czy możliwości oddawania nadwyżek energii do systemu elektroenergetycznego (SEE). Przykładowa konfiguracja instalacji hybrydowej zilustrowana została na rysunku 1 [5,7].



Rys. 1. Schemat blokowy instalacji hybrydowej

Falowniki hybrydowe zapewniają możliwość dwukierunkowego przepływu energii z siecią elektroenergetyczną oraz z magazynem energii. Połączenie z generatorem fotowoltaicznym oraz odbiornikami energii elektrycznej ma charakter jednokierunkowy (rys. 1.) [5].

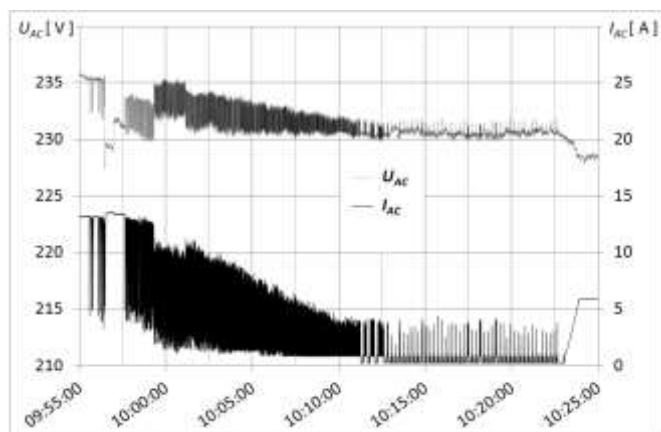
### 2. LITOWO-ŻELAZOWY MAGAZYN ENERGII

Zastosowanie magazynów energii w systemach fotowoltaicznych pozwala na gromadzenie nadwyżek występujących w trakcie produkcji energii elektrycznej. Zgromadzoną energię można wykorzystać przy braku promieniowania słonecznego spowodowanego



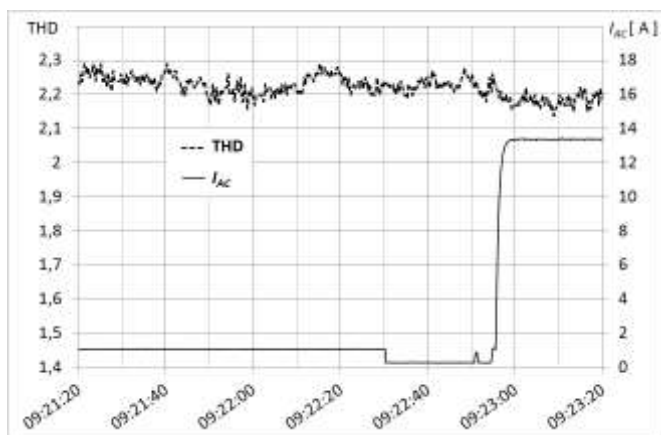
Pod koniec procesu rozładowywania magazynu energii występują spadki wartości prądu  $I_{AC}$ , które stabilizują się, by po chwili znów wrócić do pracy niestabilnej. Napięcie  $U_{AC}$  odpowiednio zmniejszało wartość przy rosnącym prądzie  $I_{AC}$  i zwiększało się kiedy prąd  $I_{AC}$  utrzymywał się na niższym poziomie (rys. 5).

Na rysunku 5 można zaobserwować wahania prądu  $I_{AC}$  w przebiegu 27 minut (9:56 do 10:23). Doprowadzają one do całkowitego spadku wartości prądu  $I_{AC}$ , co wiąże się z rozładowaniem magazynu do zadanego napięcia minimalnego  $U_{DCmin}$ . Do końca procesu rozładowania napięcie  $U_{AC}$  waha się od około 226 do 236V (rys. 5).



Rys. 5. Koniec procesu rozładowania magazynu energii

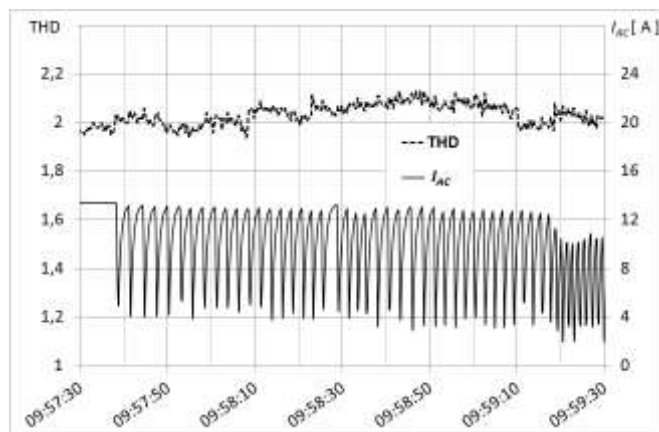
Nie rozładowano magazynu energii w 100% ponieważ falownik przy niskim stanie napięcia  $U_{DC}$  na zaciskach magazynu energii (46,2 V) przełączał pracę rozładowywania magazynu na jego ładowanie, po czym po chwili wracał do rozładowania, pomimo tego, że zadane minimalne napięcie  $U_{ACmin}$  rozładowania magazynu energii przez falownik ustawione było na wartość 40,6 V.



Rys. 6. Zmiana współczynnika THD oraz prądu  $I_{AC}$

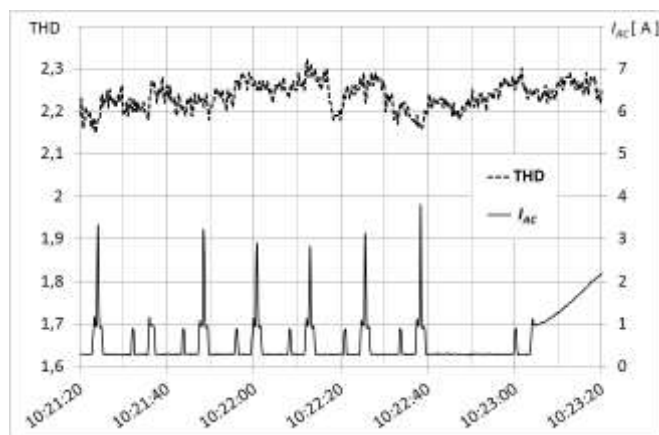
Czas niestabilnej pracy falownika trwał kilka minut. Nie odnotowano zmian napięcia  $U_{DC}$  na zaciskach magazynu energii, a wartość prądu  $I_{AC}$  wahała się między 0,27 A a 3,78 A. Stan ten zachodził przy 38% naładowania magazynu energii. Osiągnięta eksperymentalnie głębokość rozładowania magazynu energii wynosiła jedynie 62%. Na tym etapie zakończono proces rozładowywania magazynu energii.

Rysunek 6 przedstawia zmianę wartości współczynnika THD podczas załączenia falownika w stan pracy rozładowywania magazynu energii. Początek przebiegu pokazuje ładowanie magazynu energii do pełnego naładowania. Wartość prądu  $I_{AC}$  spadała do minimalnej wartości. Współczynnik THD utrzymywał się na poziomie 2,2 do 2,3. Wzrost prądu spowodował nieznaczny spadek współczynnika THD (do wartości nieprzekraczającej 2,2).



Rys. 7. Zmiana współczynnika THD przy niestabilnej pracy falownika

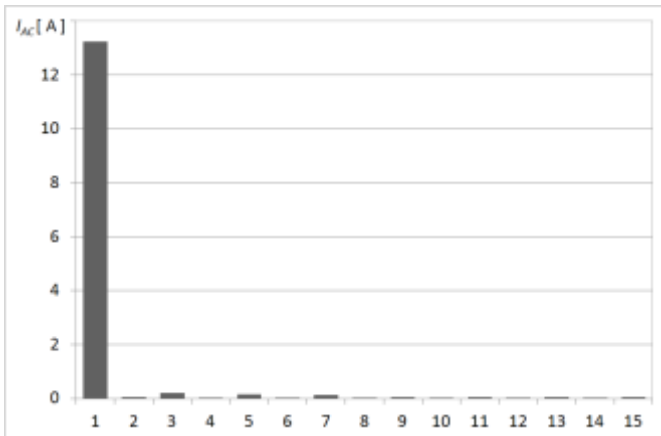
W trakcie niestabilnej pracy falownika, przy wahaniami prądu  $I_{AC}$  rzędu od 4 do 13 A (rys. 7) współczynnik THD nadal zachowywał się stabilnie i nie przekraczał wartości 2,2. Wahania prądu  $I_{AC}$  obserwowane na rysunku 7 są spowodowane spadkiem napięcia  $U_{DC}$  magazynu energii. Pobór energii z magazynu powoduje spadek napięcia na zaciskach magazynu energii. Gdy napięcie  $U_{DC}$  na zaciskach magazynu spadnie poniżej wartości minimalnej  $U_{DCmin}$ , zadanej w oprogramowaniu falownika, to falownik przestaje obciążać magazyn energii. Napięcie nieobciążonego magazynu energii nieznacznie wzrasta. Falownik odczytuje wartość napięcia  $U_{DC}$ , która w porównaniu z napięciem  $U_{DCmin}$ , jest większa i rozpoczyna rozładowywanie magazynu. Jest to moment w którym falownik niestabilnie obciąża magazyn energii (rys. 7).



Rys. 8. Zmiana współczynnika THD przy rozładowanym magazynie

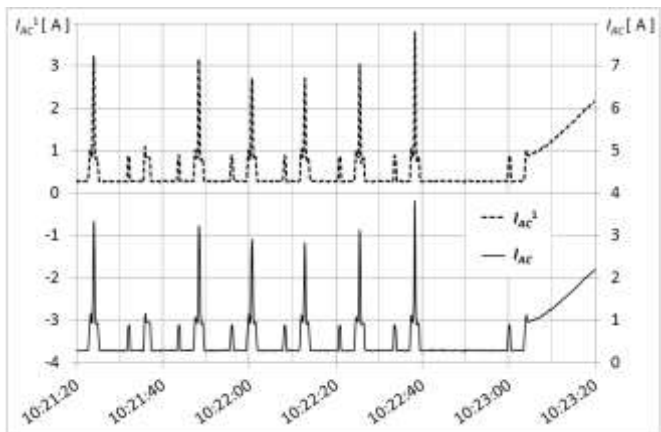
Gdy magazyn jest całkowicie rozładowany, falownik rozpoczyna ładowanie. Przy pustym magazynie energii oraz w trakcie rozpoczęcia jego ładowania, współczynnik THD utrzymuje swoją wartość na poziomie między 2,2 a 2,3.

Niewielki poziom zawartości harmonicznych w trakcie stabilnego rozładowania magazynu można zaobserwować analizując rysunek 9. Pierwsza harmoniczna jest sygnałem o częstotliwości równej częstotliwości analizowanego sygnału okresowego, zaś częstotliwości kolejnych harmonicznych są wielokrotnościami tej częstotliwości. W badanym przypadku, pierwsza harmoniczna odpowiada wartości prądu o częstotliwości sieciowej, a każda kolejna jest jej całkowitą wielokrotnością (rys. 9). Pierwsza harmoniczna ma najwyższą wartość. Zauważalne są: trzecia, piąta i siódma harmoniczna. Mają one jednak wartości znacznie mniejsze i wprowadzają niewielkie zakłócenia do sieci elektroenergetycznej. Kolejne harmoniczne prądu  $I_{AC}$  (rys. 9) mają wartości bliskie zeru.



**Rys. 9.** Harmoniczne prądu  $I_{AC}$  w trakcie stabilnego rozładowywania magazynu energii

Największe harmoniczne prądu występują kiedy poziom naładowania magazynu energii jest coraz niższy, co powoduje niestabilną pracę falownika. Przebiegi prądu  $I_{AC}$  i jego pierwszej harmonicznej nie pokrywają się (rys. 10).

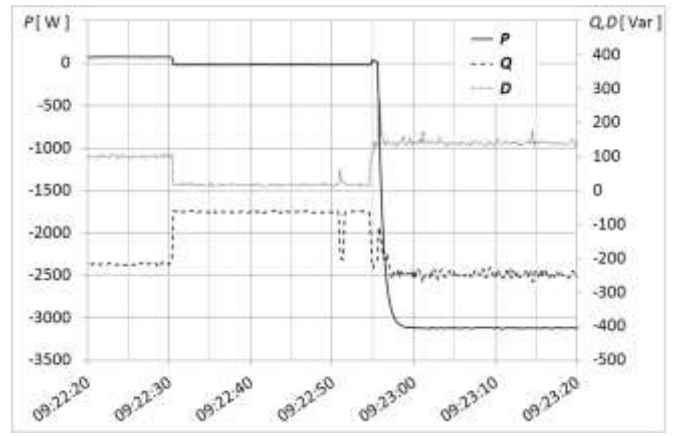


**Rys. 10.** Zmiana wart. prądu  $I_{AC}$  oraz jego pierwszej harmonicznej

Warto zwrócić uwagę na zachowanie się współczynnika mocy  $\cos\phi$  w trakcie procesu rozładowywania magazynu energii do sieci elektroenergetycznej. W momencie kiedy falownik włącza tryb rozładowania magazynu energii, wartość współczynnika mocy  $\cos\phi$  spada do wartości ujemnej. Gdy prąd  $I_{AC}$  zaczyna rosnąć, wartość współczynnika  $\cos\phi$  spada do wartości -1. Jest to efekt oddawania energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej. Podczas, gdy falownik zmienia swój tryb pracy na ładowanie magazynu energii i prąd  $I_{AC}$  rośnie do wartości 6A współczynnik mocy  $\cos\phi$  osiąga wartość 1.

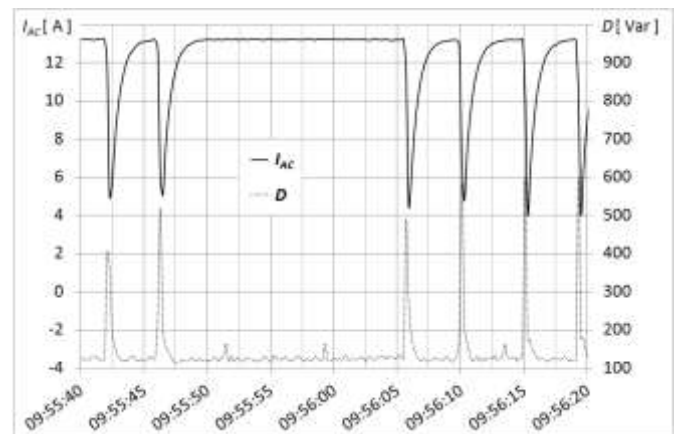
Kolejnymi parametrami analizowanymi w trakcie badań były moce falownika. Jedną z nich jest moc odkształcenia  $D$ , która jest wynikiem występowania przesunięć fazowych między harmonicznymi napięcia  $U_{AC}$  i prądu  $I_{AC}$  oraz niejednakowym rzędem tych harmonicznych. Drugą jest moc bierna  $Q$ , która w obwodach prądu przemiennego jest wielkością opisującą pulsowanie energii elektrycznej między elementami obwodu. Występowanie tej mocy powoduje zwiększenie natężenia prądu  $I_{AC}$ , co zwiększa straty energii elektrycznej w urządzeniach wytwarzających i przesyłających energię elektryczną prądu przemiennego.

W momencie załączenia procesu rozładowania magazynu energii zmienia się udział składowych w całkowitej mocy generowanej przez falownik. Moc czynna  $P$  oraz moc bierna  $Q$  mają wartości ujemną – energia oddawana jest do sieci, natomiast moc odkształcenia  $D$  ma wartość dodatnią i wynosi około 20 W (rys. 11).

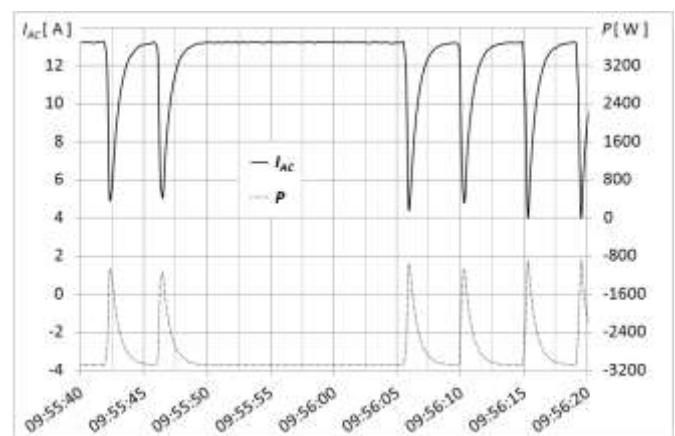


**Rys. 11.** Zmiana wartości mocy czynnej  $P$  oraz biernej  $Q$  w procesie rozładowywania magazynu energii

Gdy prąd rozładowywania  $I_{AC}$  osiąga wartość 13,31 A, moce  $P$  oraz  $Q$  utrzymują stałą wartość. Sytuacja ta utrzymuje się do momentu gdy wartość prądu  $I_{AC}$  zaczyna maleć. Wtedy przy każdorazowym spadku prądu  $I_{AC}$  wzrastają obydwie moce. Jednak to moc  $D$  odkształcenia wielokrotnie zwiększa swoją wartość (rys. 12). Gdy prąd  $I_{AC}$  chwilami wraca do swojej maksymalnej wartości to moce wracają do poprzednich poziomów. Takie zjawiska zaczynają występować przy osiągnięciu maksymalnego poziomu rozładowania magazynu energii.



**Rys. 12.** Moc odksz.  $D$  i prąd  $I_{AC}$  przy niestabilnej pracy falownika

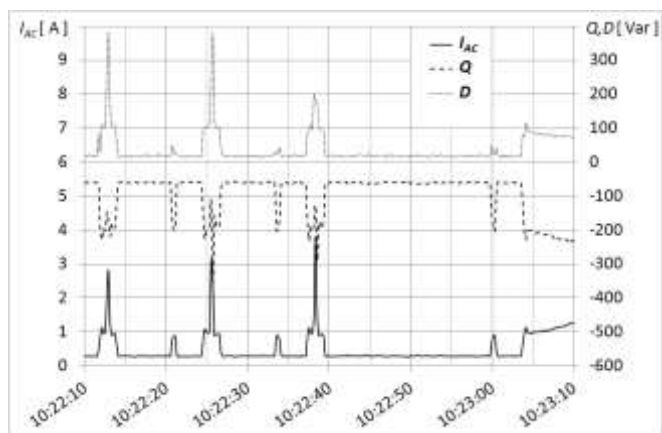


**Rys. 13.** Zmiana wartości mocy odkształcenia  $D$  i prądu  $I_{AC}$  przy niestabilnej pracy falownika

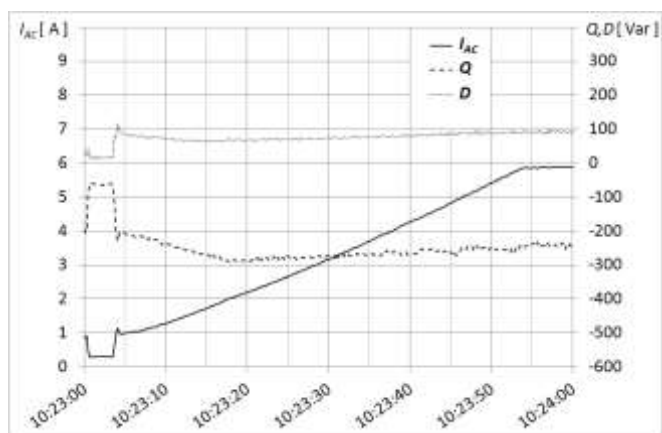
Przy chwilowych wzrostach wartości prądu i pobieraniu ostatnich ładunków elektrycznych z magazynu energii odnotowano chwilowy wzrost mocy odkształcenia  $D$  wynoszący do około 500 Var (rys. 12),

a wzrost wartości mocy czynnej  $P$  waha się w granicach do -3200 Var (rys. 13).

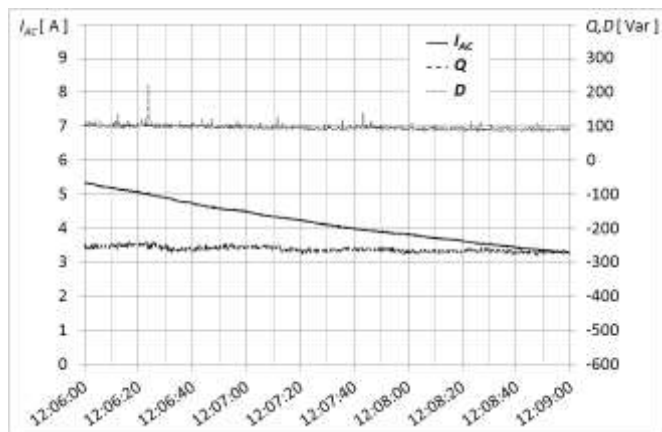
Gdy magazyn energii zostanie rozładowany do zadanego minimalnego poziomu, występuje stan w którym pojawiają się krótkie piki prądowe (rys. 14).



**Rys. 14.** Zmiana wartości mocy i prądu przy rozładowanym magazynie energii



**Rys. 15.** Zmiana wartości mocy  $Q$  i  $D$  wywołana zmianą prądu  $I_{AC}$



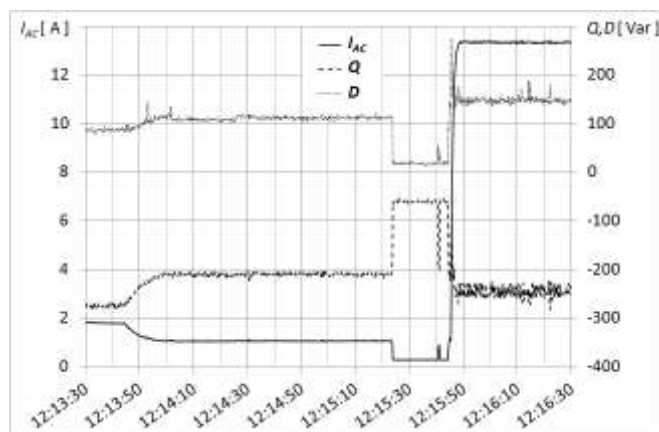
**Rys. 16.** Zmiana wartości mocy  $Q$  oraz  $D$  w trakcie ładowania magazynu energii

Podczas ładowania magazynu energii falownikiem z sieci elektroenergetycznej, wartości mocy  $Q$  oraz  $D$  utrzymują podobny poziom pomimo wzrostu prądu  $I_{AC}$  (rys. 15). Jedynie chwilowy skok prądu  $I_{AC}$  wywołuje skoki mocy - mocy  $D$  oraz mocy  $Q$ .

Przy wzroście prądu  $I_{AC}$  widocznym na rysunku 15 wartości mocy spadają do pewnego ustalonego poziomu, a kiedy prąd łado-

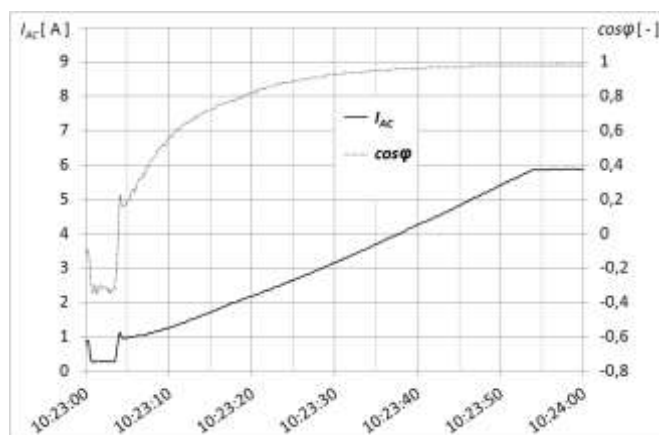
wania  $I_{AC}$  osiągnie stałą wartość to poziom mocy utrzymuje się odpowiednio w granicach 90-100 Var dla mocy odkształcenia  $D$  oraz 230 - 250 Var dla mocy bierniej  $Q$ . Prąd  $I_{AC}$  przez czas ładowania magazynu energii wzrasta z poziomu 5,8A do poziomu 6,8A.

Gdy poziom naładowania magazynu energii jest coraz wyższy, prąd  $I_{AC}$  zaczyna spadać, a moce odkształcenia  $D$  oraz bierna  $Q$  odnotowują niewielkie spadki. Gdy prąd  $I_{AC}$  ma wartość 5A moc odkształcenia  $D$  spada poniżej poziomu 100Var, a moc bierna  $Q$  osiąga wartość poniżej poziomu -250Var. Wahania przebiegów mocy wynoszą  $\pm 15$ Var (rys. 16).



**Rys. 17.** Koniec procesu ładowania magazynu energii

Po naładowaniu magazynu energii do poziomu 100% prąd ładowania  $I_{AC}$  spada poniżej 0,5A (rys. 17). Falownik przestaje ładować magazyn energii, aby uniknąć efektu przeladowania.

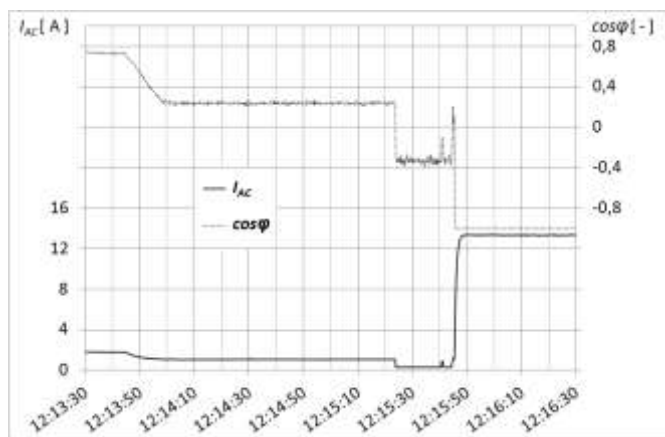


**Rys. 18.** Zmiana współczynnika  $\cos\phi$  mocy przy ładowaniu magazynu energii

Przy zmniejszeniu wartości prądu ładowania  $I_{AC}$  można zaobserwować zmianę mocy odkształcenia  $D$  oraz bierniej  $Q$ . Gdy prąd ładowania  $I_{AC}$  spada poniżej poziomu 0,5 A wartość mocy bierniej  $Q$  zmienia się do poziomu -60 Var, a wartość mocy odkształcenia przyjmuje wartość 20 Var.

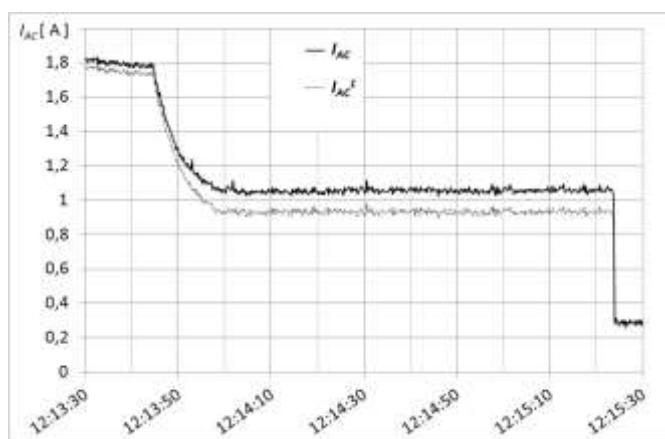
Kolejnym analizowanym parametrem procesu ładowania magazynu energii przez falownik jest współczynnik mocy  $\cos\phi$  (rys. 18). Współczynnik mocy  $\cos\phi$  rośnie wraz ze wzrostem wartości prądu  $I_{AC}$ . Gdy wartość prądu  $I_{AC}$  stabilizuje się na poziomie około 6A, współczynnik mocy  $\cos\phi$  osiąga wartości bliską jedności.

Współczynnik mocy  $\cos\phi$  utrzymuje się na poziomie 1, aż wartość prądu ładowania  $I_{AC}$  zaczyna maleć. Przez ostatnie 10 minut ładowania magazynu energii odnotowano spadek  $\cos\phi$  do wartości 1/3 do ponownego rozpoczęcia procesu rozładowywania (rys. 19).



**Rys. 19.** Zmiana prądu ładowania  $I_{AC}$  oraz współczynnika mocy  $\cos\phi$  magazynu energii

Przez prawie cały czas ładowania magazynu energii pierwsza harmoniczna prądu  $I_{AC}^1$  nakłada się na przebieg prądu  $I_{AC}$ . Trwa to do momentu zakończenia ładowania (rys. 20).



**Rys. 20.** Zmiana wartości prądu  $I_{AC}$  oraz wartości pierwszej harmonicznej prądu  $I_{AC}^1$

W trakcie procesu ładowania magazynu energii prąd ładowania  $I_{AC}$  płynął zgodnie z charakterystyką ładowania magazynu, a zakłócenia wprowadzane do sieci elektroenergetycznej przez falownik mieściły się w zakresie dopuszczalnym przez normę. Obydwie próby: ładowania i rozładowania magazynu energii pozwoliły na obserwację zjawisk towarzyszących tym procesom. Niewątpliwie na uwagę zasługuje fakt niestabilnej pracy falownika zarówno w zakresie podtrzymania naładowanego magazynu energii jak i momentu całkowitego rozładowania magazynu.

## PODSUMOWANIE

Litowo-żelazowe magazyny energii są coraz częściej wykorzystywane w celu magazynowania energii wytworzonej z odnawialnych źródeł. Są elementem stabilizującym wymianę energii z systemem elektroenergetycznym, oraz dają możliwość wykorzystania wyprodukowanej energii elektrycznej w okresie przerw w dostawie energii elektrycznej lub braku energii ze źródła odnawialnego. Współpraca litowo-żelazowego magazynu energii wymaga jednak precyzyjnego zaprogramowania urządzenia współpracującego z magazynem ener-

gii, ponieważ przekroczenie parametrów krytycznych pracy magazynu energii grozi jej uszkodzeniem i w konsekwencji pożarem wywołanym przez wyciekający z wnętrza magazynu energii lit. W zależności od konstrukcji falownika hybrydowego można spodziewać się wprowadzania zakłóceń do sieci elektroenergetycznej. Zakłócenia te związane są głównie z odkształceniem generowanego prądu wprowadzanego do SEE. W artykule zaprezentowano wyniki badań i analizę wybranych parametrów elektrycznych będących efektem współpracy falownika hybrydowego z siecią elektroenergetyczną w trakcie procesu ładowania i rozładowania litowo-żelazowego magazynu energii elektrycznej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Figura R.: *Laboratorium fotowoltaiki – baza badawczo-dydaktyczna dla przemysłu*, Logistyka 6/2014 grudzień 2014, ISSN: 1231-5478
2. Figura R., Gutowski R.: *Analiza uzysków energetycznych z instalacji fotowoltaicznej*, Logistyka 4/2015 sierpień 2015, ISSN: 1231-5478
3. Dec B., Krupa J.: *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w aspekcie ochrony środowiska*, Rzeszów, 2012
4. ICPT: *Instrukcja obsługi baterii litowo-żelazowej „FONA”*, Państwów, 2015
5. Orvaldi Power Protection: *Instrukcja użytkownika Orvaldi Solar Infini 3KW*, Długoleka
6. Sonel SA.: *Instrukcja obsługi przyrządów pomiarowych, kamer termowizyjnych*
7. Stała R.: *Sterowanie systemów fotowoltaicznych dołączonych do sieci elektroenergetycznej*, Kraków, 2012
8. Szczerbowski R.: *Instalacje fotowoltaiczne- aspekty techniczno-ekonomiczne*, Poznań, 2014

## Hybrid inverter and lithium-iron energy storage cooperation

*Renewable energy sources with energy storage are becoming more and more popular in recent years. These systems are called hybrid systems. Increasingly, the lithium-iron technology are used as energy stores. They are characterized by a long service life (up to 20 years) and a charge and discharge cycles up to 7000. The hybrid inverter is a one of the main components of the hybrid system. The inverter is a master device managing the energy flow in small hybrid system. The inverter exchange electricity between hybrid system and the power grid. Aspects of this cooperation have been presented in this article. The charging and discharging lithium-iron energy storage conditions were analyzed.*

Autorzy:

dr inż. **Radosław Figura** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, [r.figura@uthrad.pl](mailto:r.figura@uthrad.pl)

inż **Robert Chochlewicz** – absolwent Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, e-mail: [rupeciat@op.pl](mailto:rupeciat@op.pl)

mgr inż. **Marek Wroński** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, [m.wronski@uthrad.pl](mailto:m.wronski@uthrad.pl)