

# JAKOŚĆ DOSTAWY ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECIACH TYPU SMART

Zbigniew Hanzelka<sup>1</sup>

## Koncepcja sieci typu SMART

Wobec pojawiających się zagrożeń zarówno w zakresie deficytu pierwotnych zasobów energii jak i zbyt niskiej efektywności jej wytwarzania, przesyłu, rozdziału i użytkowania narasta przekonanie o potrzebie wprowadzenia nowej jakości do sieci elektroenergetycznych – stworzenia inteligentnych systemów dostawy energii znanych powszechnie jako „smart grids” (SG). W najbardziej potocznym rozumieniu termin ten oznacza dostarczanie odbiorcom energii elektrycznej lub szerzej - usług energetycznych - z wykorzystaniem środków IT, zapewniające obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności oraz zintegrowanie rozproszonych źródeł energii, także odnawialnej [1,17]. W ostatnim czasie przyrost informacji dotyczących SG w postaci książek, konferencji, artykułów, odrębnych czasopism, raportów (technicznych i nietechnicznych) jest ogromny.

## Jakość dostawy energii elektrycznej

W porównaniu do *smart grids* tematyka jakości dostawy energii elektrycznej (JEE) jest znacznie starsza. Liczba publikacji dotyczącej tej tematyki jest w skali kolejnych lat stała, a nawet z tendencją malejącą. Można więc postawić pytanie – czy nadal istnieją w obszarze JEE nowe tematy badawcze i czy JEE jest ciągle atrakcyjnym tematem w ramach *smart grids*? Celem tego artykułu jest przedstawienie relacji pomiędzy JEE i *smart grids* oraz wskazanie, jak wyniki przyszłych badań w obszarze JEE będą wpływać na transformację sieci w kierunku *smart* [2,4].

Pomiędzy obydwooma obszarami badawczymi istnieją liczne związki, przykładowo:

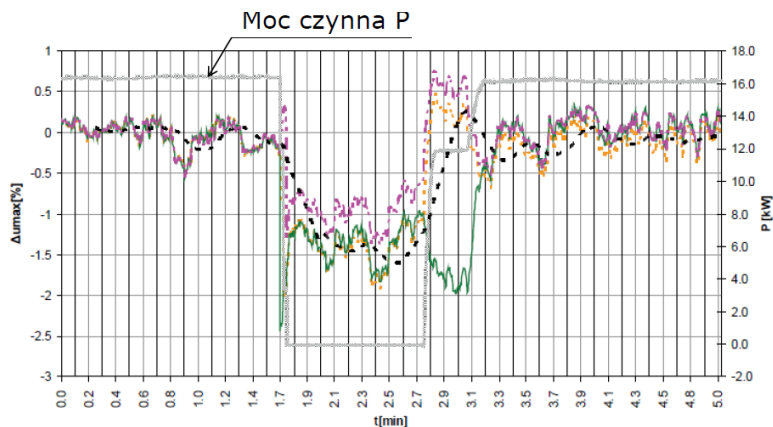
- nowe technologie, regulacje i reguły rynkowe tworzone dla potrzeb SG, mogą być także zastosowane do poprawy JEE. Dotyczy to przykładowo rozwoju energoelektroniki na potrzeby SG, w tym w szczególności tych układów, które są także dedykowane do poprawy JEE i rozwoju usług sieciowych (*custom power* [9]). Należy uwzględnić także inne obszary rozwoju tj. zaawansowane sterowanie napięcia (wykorzystujące dane z wielu lokalizacji) i rynek JEE.
- nowe wyzwania techniczne, „jakościowe” wytworzone w sieciach zasilających na skutek wdrażania koncepcji SG, przykładowo:
  - wzrosty napięcia spowodowane przyłączaniem do sieci nN instalacji fotowoltaicznych (PV),
  - składowe wysokoczęstotliwościowe związane z procesami łączenia elementów półprzewodnikowych w interfejsach energoelektronicznych rozproszonych źródeł energii – np. instalacje PV i elektrownie wiatrowe
  - odkształcenie napięcia wywołane pracą stacji ładowania pojazdów elektrycznych
  - wahania napięcia związane z procesami łączenia pomp ciepłych
- pojawienie się nowych, dotychczas nierozważanych zaburzeń, ważnych zarówno ze względów badawczych jak i aplikacyjnych związanych z pojawieniem się nowych rodzajów odbiorników/źródeł energii elektrycznej.
- możliwość ustalenia nowych ograniczeń technicznych dla sieci elektroenergetycznych dzięki wykorzystaniu wiedzy z obszaru JEE, np. dopuszczalnych przeciążeń linii lub granic stabilnej pracy sieci.

---

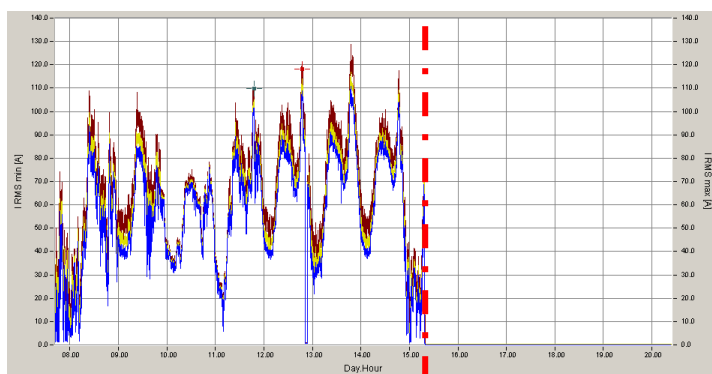
<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicz 30; Email: hanzel@agh.edu.pl

## Współpraca rozproszonych źródeł energii z siecią zasilającą

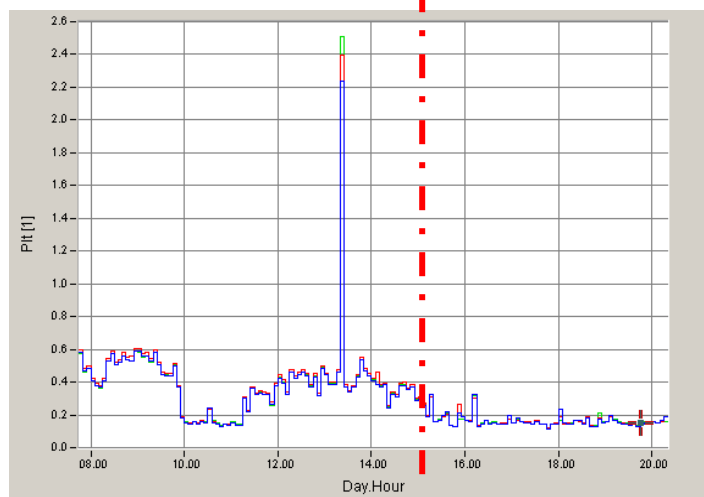
Rozproszone źródła energii (RZE) ze względu na często losowy charakter ich generacji (szczególnie źródeł odnawialnych – OZE) oraz sprzęgający je z siecią interfejs energoelektroniczny degradują jakość napięcia w miejscu ich przyłączenia. Rodzaj tego negatywnego oddziaływania może mieć bardzo różny charakter, co przykładowo przedstawiono na rysunkach 1-4.



Rys. 1. Wzrost napięcia wywołany generacją mocy czynnej  $P$  przez instalację fotowoltaiczną (źródło T. Sikorski)

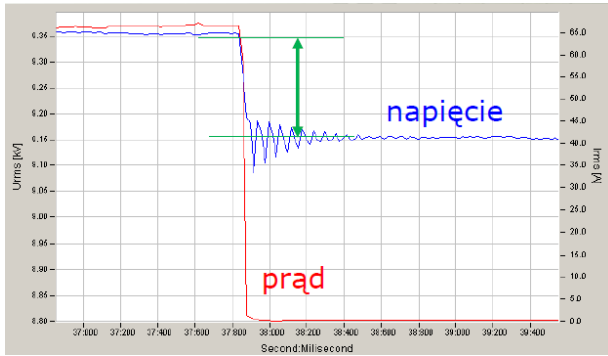


Wartość skuteczna prądu farmy wiatrowej

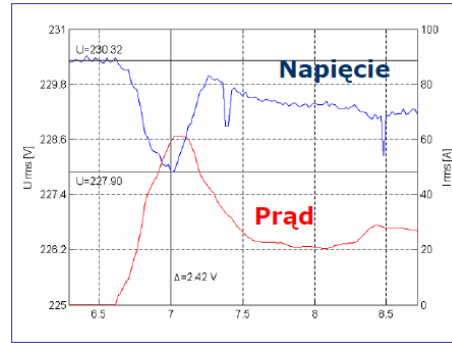


Wskaźnik wahań napięcia  $P_{It}$

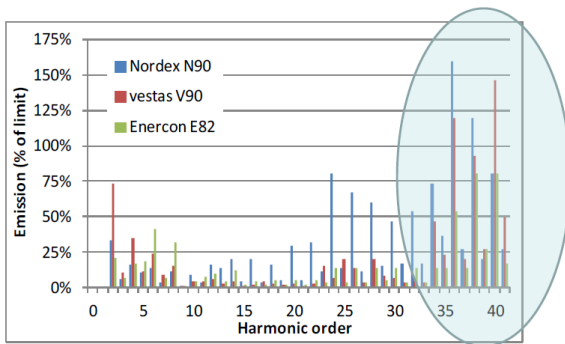
Rys. 2. Wahania napięcia wywołane pracą farmy wiatrowej (linia pionowa – chwila wyłączenia turbiny)



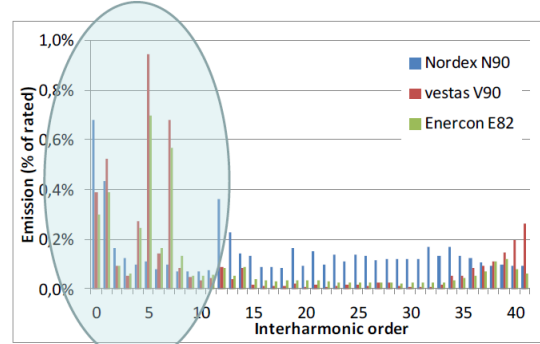
Rys. 3. Szybka zmiana napięcia spowodowana wyłączeniem źródła energii



Rys. 4. Zapad napięcia wywołany rozruchem turbiny wiatrowej



(a)

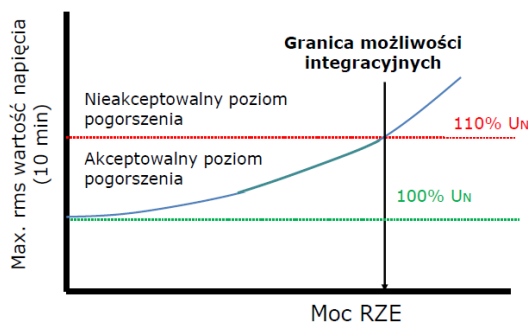


(b)

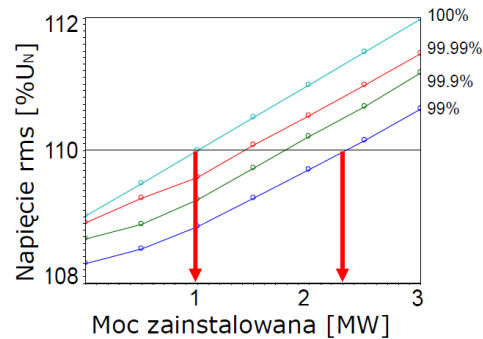
Rys. 5. Przykładowe poziomy harmonicznych i interharmonicznych zarejestrowane dla trzech turbin wiatrowych [7]

### Zdolność przyłączeniowa rozproszonych źródeł energii

Celem tej koncepcji (tzw. *hosting capacity* [3,16]) jest wykorzystanie wskaźników JEE do wyznaczenia granicznych mocy źródła/źródeł, które można przyłączyć do rozważanej sieci bez groźby nieakceptowalnej degradacji jakości napięcia. Jej istotę przedstawiono na rysunku 6, przykładowo dla wartości skutecznej napięcia. To samo rozumowanie można przeprowadzić dla innych miar liczbowych JEE. Gdy choć jeden ze wskaźników „jakościowych” jest przekroczony, oznacza to, że została osiągnięta granica zdolności przyłączeniowej źródła. Przyłączenie większej liczby/mocy źródeł sprawi, że sieć zasilająca nie będzie w stanie zagwarantować jakości i bezpieczeństwa dostawy energii jej odbiorcom



(a)



(b)

Rys. 6. Kryterium napięcia jako podstawa określania możliwej mocy przyłączanego źródła energii [7]

Zmienność wartości napięcia w punkcie przyłączenia farmy wiatrowej jest jednym z podstawowych kryteriów określenia maksymalnej mocy źródła (rys. 6a). Przykładowo, jeżeli jako kryterium przyłączenia przyjąć maksymalną wartość skuteczną napięcia (100%, rys. 6b) dostępna moc źródła będzie wynosić 1 MW. Jeżeli podstawą decyzji o przyłączeniu będzie wartość percentyla CP99% napięcia, moc dostępna wzrośnie do 2,3 MW. Oznacza to znaczne zwiększenie dostępnej dla źródeł mocy przyłączeniowej z jednoczesnym ryzykiem przekroczenia dopuszczalnego poziomu wartości napięcia przez 1% czasu obserwacji.

### Nowe rodzaje zaburzeń

Nowe technologie obecne w sieciach typu smart mogą być źródłem nowych dotychczas nierozważanych zaburzeń.

#### *Harmoniczne parzyste*

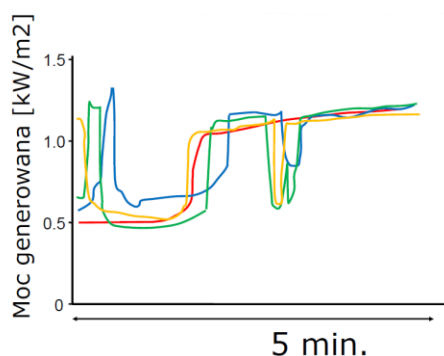
W widmach współczesnych turbin wiatrowych, prócz harmonicznym nieparzystym rzędów (o relatywnie małych wartościach) pojawiają się składowe wyższych rzędów np. 36, 38, 40 ... których wartości graniczne są powszechnie ustalone na poziomie 25% sąsiednich harmonicznym nieparzystym (rys. 5a). Powstaje pytanie, jakie racjonalne argumenty techniczne stały za przyjęciem tej wartości i czy nie jest możliwa jej rewizja [6,18].

#### *Interharmoniczne*

Prócz harmonicznym turbiny wiatrowe generują także interharmoniczne jak pokazano przykładowo na rysunku 5b [11, 18]. Poziom interharmonicznym jest wyraźnie większy niż dla innych odbiorników. Większość operatorów nie stosuje żadnych ograniczeń dla interharmonicznym.

#### *Zaburzenia o średniej zmienności w czasie*

Taki rodzaj zaburzenia, bez oceny stopnia jego szkodliwości, przedstawiono na rysunku 7. Jest to zmiana generowanej mocy czynnej, a w konsekwencji zmiana wartości skutecznej napięcia w PWP spowodowana zmiennością zachmurzenia. Gdyby stosować standardowe metody oceny jakości napięcia to zaburzenie byłoby niezauważalne. Jest zbyt „szybkie”, aby mieć wpływ na wartości agregowane w czasie 10 min. Równocześnie jest zbyt „wolne”, aby wpływać na wskaźniki wahań napięcia. Wymaga to zaproponowania nowych miar liczbowych dla oceny szkodliwości takich zaburzeń.

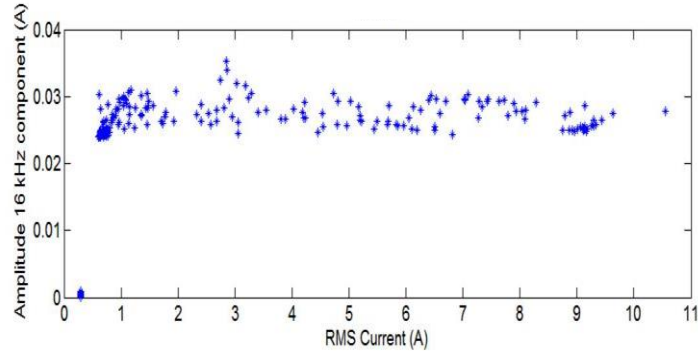


Rys. 7. Zmiana mocy czynnej generowanej przez instalację PV spowodowana ruchem chmur dla kilku przykładowych instalacji PV przyłączonych blisko siebie

#### *Zaburzenia wysokiej częstotliwości*

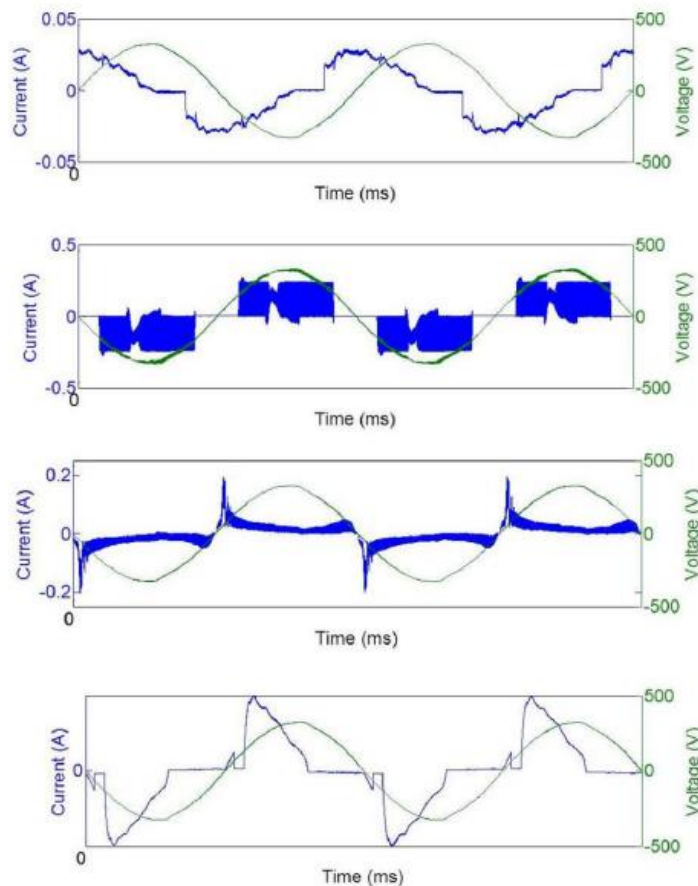
W literaturze technicznej coraz częściej zaburzenia te określane są terminem „supraharmoniczne” i dotyczą składowych napięć i prądów w przedziale 2-150 kHz. Ich źródłem są głównie (lecz nie tylko) przekształtniki z aktywnym kształtowaniem prądu, które są w wielu przyłączonych do sieci urządzeniach

[14,15]. Widać wyraźnie, że eliminacja harmonicznych niższych rzędów wykreowała obecność nowego zaburzenia. Przykład pokazano na rysunku 8. Wartość składowej prądu instalacji PV o częstotliwości 16 kHz jest niezależna od generowanej mocy, zależy wyłącznie od częstotliwości łączenia elementów półprzewodnikowych w energoelektronicznym przekształtniku sprzęgającym źródło PV z siecią.



Rys. 8. Zależność składowej prądu o częstotliwości 16 kHz emitowanej przez instalację PV (2,5 kW) od wartości skutecznej prądu [14]

Inny przykład pokazano na rysunku 9. Odnosi się on do emisji czterech źródeł światła typu LED. Najniższy czwarty przebieg prądu dotyczy lampy o tzw. małym współczynniku mocy. Pozostałe trzy charakteryzują małą emisją harmonicznych niskich rzędów, lecz dużą emisją w paśmie supraharmonicznych



Rys. 9. Przebiegi napięcia i prądu czterech przykładowych źródeł światła typu LED [13]

W ramach technologii *smart grid* konieczna jest komunikacja pomiędzy licznikami odbiorców i dostawców energii oraz licznikami bilansującymi, a dalej bazami danych wykorzystywanymi dla rozliczeń finansowych, zarządzania popytem, sterowania przepływami energii elektrycznej, diagnostyką itp. Obecnie głównym celem tej komunikacji są przede wszystkim rozliczenia i diagnostyki. Pozostałe funkcjonalności będą możliwe do wdrożenia po osiągnięciu przez strukturę komunikacyjną dużej niezawodności i dużej szybkości przesyłania informacji w układzie: liczniki, teletransmisja lokalna, koncentratory, teletransmisja na dużych obszarach oraz systemy komputerowe, hurtownie danych. Podstawowym problemem jest wybór sposobu komunikacji licznik – koncentrator. W Polsce dystrybutorzy energii elektrycznej realizują komunikację w tej warstwie w oparciu o technologię transmisji liniami zasilającymi (ang. *Power Line Communication* – PLC). W ostatnim czasie w gremiach normalizacyjnych zgłoszono potrzebę pilnego uzupełnienia aktualnych wymagań kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) o poziomy EMC w zakresie częstotliwości od 2 kHz do 150 kHz. Niestety zadanie to okazało się trudne, ponieważ ujawniły się wyraźnie sprzeczne interesy grupy producentów urządzeń elektrycznych oraz operatorów sieci elektroenergetycznych.

Należy zauważyć, że problem właściwego działania systemów PLC nie jest jedynym zagadnieniem technicznym wymagającym uwagi w aspekcie zapewnienia EMC w paśmie częstotliwości poniżej 150 kHz. Oprócz zakłócania pracy systemów PLC obserwuje się również zakłócanie innych urządzeń przez sygnały transmisyjne PLC, a także wzajemne zakłócanie się urządzeń niezwiązanych z PLC [12]. Przypadki należące do tej ostatniej kategorii (niezwiązanej z PLC) stanowią większość przykładów opisanych w raporcie CENELEC [10]. Zidentyfikowanymi źródłami zaburzeń w zakresie częstotliwości poniżej 150 kHz są m.in.: elektroenergetyczne przetwornice impulsowe (na przykład przeznaczone do prosumenckich elektrowni fotowoltaicznych), układy sterowania, energoelektroniczne układy napędowe, przetwornice do źródeł światła LED oraz zasilacze impulsowe różnego przeznaczenia, w tym zasilacze urządzeń powszechnego użytku.

Dyskusję na temat poziomów EMC utrudnia brak reprezentatywnej, opartej o wyniki badań, informacji odnośnie charakterystyk impedancji sieci nN w zakresie częstotliwości poniżej 150 kHz. Dane te są ważne, ponieważ wpływ impedancji sieci nN na zapewnienie EMC jest równie kluczowy, jak przyjęty poziom emisji lub odporności urządzeń przyłączonych do sieci. Wiadomo również, że impedancja sieci nN jest zmienna w czasie, co utrudnia analizę zagadnień EMC oraz badanie propagacji sygnałów PLC.

### **Jakość dostawy energii elektrycznej w sieciach przesyłowych**

Koncepcja *smart grids* wpływa także na JEE na poziomie przesyłowym. Systemy HVDC, których liczba szybko rośnie, mogą być źródłem zaburzeń nowego rodzaju. Są one dobrze rozpoznany źródłem harmonicznych. Ponieważ są zwykle wyposażone w filtry zaczynają filtrować także harmoniczne innych odbiorników i stwarzają groźbę rezonansów. Na to zjawisko mają także wpływ pojemności kabli w sieciach przesyłowych poprzez przesunięcie częstotliwości rezonansowych w zakres harmonicznych niższych rzędów [5,8]. Sytuację może pogorszyć zwiększony udział generacji z dużych farm wiatrowych i elektrowni PV, które nie uczestniczą w podnoszeniu mocy zwarciovych. Ten efekt nie jest jeszcze wystarczająco rozpoznany.

### **JEE i BIG DATA**

Obecnie tysiące rejestratorów przyłączonych do sieci gromadzi w trybie ciągłym dane „jakościowe”. W niedługim czasie operatorzy sieci zasilających staną się posiadaczami ogromnych baz z danymi pomiarowymi wskaźników JEE. Problemem stanie się nie tyle archiwizowanie, lecz przede wszystkim ich przetwarzanie oraz trudność w znalezieniu użytecznej i wartościowej informacji, bez potrzeby gromadzenia wszystkich danych i bez konieczności ich przeszukiwania dla każdego przypadku. Istnieje pilna potrzeba rozwijania zdalnych metod analizy. Jeżeli to nie nastąpi rosnące bazy danych mogą stać się barierą dla dalszego rozwoju sprzętu monitorującego i jego aplikacji.

## Wnioski

Jakość dostawy energii elektrycznej jest dziedziną nauki i techniki ciągle rozwijającą się, ciągle konfrontowaną z nowymi potrzebami praktyki inżynierskiej. Kształt przyszłej sieci typu *smart* nie jest jeszcze oczywisty, trudno więc szczegółowo zdefiniować przyszłe relacje pomiędzy JEE i SG. Ale już teraz uwidaczniają się wyraźnie pewne problemy związane z poznawaniem nowych zaburzeń występujących w sieciach *smart*, opracowaniem nowych miar liczbowych dla ich oceny oraz wypracowaniem metod analizy dużych baz danych „jakościowych”. Niezwykle ważne jest także wyposażenie licznej kadry inżynierów w wiedzę niezbędną dla sprostania tym oczekiwaniom.

## LITERATURA

1. *Adapting electricity networks to a sustainable energy system - smart metering and smart grids*, Energy Market Inspectorate, EIR 2011:03. [www.ei.se](http://www.ei.se).
2. Berger L.T., Iniewski K.: *Smart grids applications, communications and security*, Wiley 2012.
3. Bollen M.H.J., Yang Y., Hassa F.: *Integration of distributed generation in the power system – a power quality approach*, International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Wollongong, Australia, September 2008.
4. Bollen N.H.J.: *The smart grid – adapting the power system to the new challenges*, Morgan and Claypool Publishers, September 2011.
5. Bollen N.H.J., Hassan F.: *Integration of distributed generation in the power system*, Willey IEEE Press 2011.
6. Bollen N.H.J., Yang K.: *Harmonics – another aspect of the interaction between wind-power installations and the grid*, International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Stockholm, Sweden, June 2013.
7. Bollen M.: *Overview of smart grids and power quality*, CIGRE C4.24 - Chapter 3 - v.1, March 2014.
8. Faria da Silva F., Bak C.L., Holst P.B.: *Study of harmonics in cable-based transmission network*, CIGRE 2012, Paris, France.
9. Ghosh A., Ledwich G.: *Power quality enhancement using custom power devices*, Springer 2002.
10. CLC/SC205A Study Report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz Edition 3, CENELEC TC210/Sec0898/INF, October 2015.
11. Larosse C.: *Type-III wind power plant harmonic emissions: field measurements and aggregation guidelines for adequate representation of harmonics*, IEEE Transactions Sustainable Energy, vol. 4, no 3, pp. 797-804, 2013.
12. Power quality and EMC issues with future electricity network, Joint Working Group, C4.24/CIRED, 2018.
13. Rönnberg S.K., Bollen M.H.J., Wahleberg M.: *Interaction between narrowband power line communication and end-user equipment*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 26, no 3, pp. 2034-2039, July 2011.
14. Rönnberg S.K., Bollen M.H.J.: *Emission from four types of LED lamps at frequencies up to 150 kHz*, International Conference on Harmonics and Power Quality (ICHQP), Hong Kong, June 2012.
15. Rönnberg S.K.: *Emission and interaction from domestic installations in the low voltage electricity network, up to 150 kHz*, PhD thesis, Lulea University of Technology, Sweden 2013.
16. Rönnberg S.K., Bollen M.H.J., Larson A.: *Grid impact from PV-installations in northern Scandinavia*, International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Stockholm, Sweden, June 2013.
17. Smith J., Rylander M.: *US experience determining feeder hosting capacity for solar PV*, IEEE PES General Meeting, 2013.
18. [www.smartgrid.agh.edu.pl](http://www.smartgrid.agh.edu.pl).
19. Yang K., Bollen M.H.J., Larsson E.O.A., Wahlberg M.: *Measurements of harmonic emission versus active power from wind turbines*, Electric Power System Research, vol. 108, pp. 304-314, 2014.