

Andrzej FIRLIT

# Innowacyjne rozwiązania techniczne i technologiczne w obszarze energetyki rozproszonej – podsumowanie sesji technicznej I Kongresu Energetyki Rozproszonej

**Abstrakt:** W artykule podsumowano obrady jednej z sesji I Kongresu Energetyki Rozproszonej dotyczącej innowacyjnych rozwiązań technicznych i technologicznych w obszarze energetyki rozproszonej. Ten szeroki i wielopłaszczyznowy temat dotyczy istotnego aspektu trwającej właśnie transformacji energetycznej oraz silnie wiąże się z rozwojem i wdrażaniem inteligentnych systemów elektroenergetycznych *smart grids*.

**Słowa kluczowe:** inteligentne systemy elektroenergetyczne, *smart grids*, mikrosieci, *grid forming*, agregacja źródeł energii i odbiorników, zarządzanie źródłami energii i odbiornikami, *smart metering*

## Wprowadzenie

W ramach VI Forum Energetyki Rozproszonej (będącego częścią I Kongresu Energetyki Rozproszonej, zorganizowanego w Krakowie w dniach 25–26 września 2023 r.) odbyła się sesja (9C) dotycząca innowacyjnych rozwiązań technicznych i technologicznych w obszarze energetyki rozproszonej. Niniejszy artykuł stanowi podsumowanie najistotniejszych wątków poruszonych przez uczestników. Wystąpienia były podzielone na dwa panele. W pierwszej części prelegenci przedstawili siedem prezentacji, które są dostępne na portalu [energetyka-rozproszona.pl](http://energetyka-rozproszona.pl) (VI Forum Energetyki Rozproszonej). Poniżej wymieniono tytuły tych wystąpień.

- *Przyszłość energetyki rozproszonej, Grid Forming jako rozwiązanie problemów stabilności sieci. RFG 2.0.* – Marcin Kłomski, Solution Team Expert, Huawei Polska.

- *Inwertery nowej generacji. Rozwiązania wzmacniające stabilność systemu elektroenergetycznego* – Rafał Koziół, ekspert techniczny, SMA Solar Technology.
- *Zielone sieci energetyczne. Dystrybucja energii wytwarzanej z OZE z zerowym śladem węglowym* – Łukasz Trześniewski, prezes zarządu ZKlaster.
- *Akceleracja integracji OZE z wykorzystaniem technologii HVDC (systemy wysokiego napięcia prądu stałego)* – Mariusz Wójcik, kierownik Grupy R&D MACH PL, Hitachi Energy.
- *Agregacja rozporoszonych źródeł wytwórczych, magazynowych i odbiorczych w wirtualną elektrownię z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi IT* – Piotr Błach, kierownik zespołu ds. rynku OZE, Transition Technologies Systems.
- *Mikrosieć przemysłowa* – Jacek Stankiewicz, prezes zarządu Elsta.
- *Licznik w roli inteligentnego asystenta energetycznego* – Paweł Pisarczyk, prezes zarządu Phoenix Systems.

Część drugą panelu stanowiła dyskusja moderowana przez przewodniczącego całej sesji – dra Krzysztofa Hellera reprezentującego Krajową Izbę Gospodarczą Elektroniki i Telekomunikacji. Obrady dotyczyły innowacyjnych rozwiązań technicznych i technologicznych w obszarze energetyki rozproszonej (ER) oraz inteligentnych systemów elektroenergetycznych (*smart grids*).

Uczestnicy skoncentrowali się na następujących zagadnieniach:

- stosowanie zaawansowanych układów energoelektronicznych,
- stosowanie systemów magazynowania energii elektrycznej,
- stosowanie rozproszonych systemów pomiarowych przeznaczonych do ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci zasilających,
- budowanie mikrosieci, czyli wydzielonych, autonomicznych systemów elektroenergetycznych,
- tworzenie wirtualnych elektrowni poprzez agregację źródeł energii i magazynów energii oraz ich integrację z częścią odbiorczą,
- stosowanie systemów wysokiego napięcia prądu stałego HVDC,
- „zielona dystrybucja” – plan (cel) modernizacji infrastruktury elektroenergetycznej klastra energii,
- zapewnienie cyberbezpieczeństwa infrastruktury elektroenergetycznej, a szczególnie jej krytycznym fragmentom.

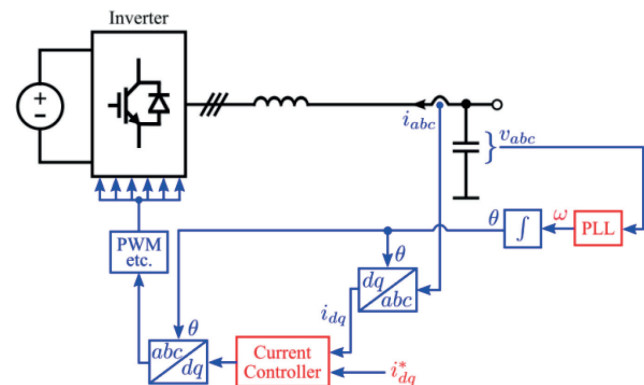
Rozwinięcie zasygnalizowanych powyżej tematów znajduje się w dalszej części niniejszego artykułu.

## Zaawansowane układy energoelektroniczne

Zaawansowane układy energoelektroniczne mogą być wykorzystywane do kompleksowego i efektywnego przetwarzania oraz kondycjonowania energii elektrycznej. Na szczególną uwagę zasługują falowniki (inwertery) wykonane w technologii zwanej *grid forming*. Dzięki jej zastosowaniu uzyskujemy układy zachowujące się jak źródło napięcia, w odróżnieniu od falowników *grid following*, które działają jak źródło prądu (Rys. 1). Systemy wyposażone w falowniki *grid forming* (źródła energii elektrycznej, magazyny energii) mogą pełnić funkcję wzorca napięcia zasilającego (pod względem jego wartości i częstotliwości). Posiadają możliwość autonomicznej pracy poza siecią operatora/dostawcy (praca wyspowa).

Charakteryzują się krótszym czasem reakcji oraz są odporniejsze na zdarzenia pojawiające się w systemie elektroenergetycznym, co jest bardzo istotne w przypadku „słabych/miękkich” sieci zasilających o niskiej wartości mocy zwarciowej. Mogą współpracować z układami typu *grid following*. Inne pożądane funkcje układów energoelektronicznych związane są z ograniczeniem zakresu zmienności napięć zasilających, redukcją wyższych harmonicznych napięć i prądów, symetryzacją napięć i prądów oraz kompensacją mocy bierniej.

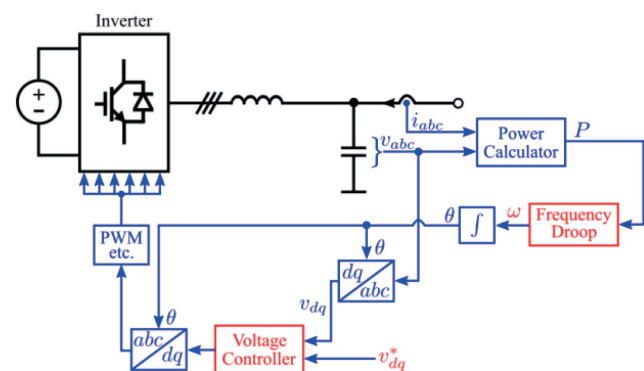
a)



Układ energoelektroniczny typu *grid following*:

- źródło prądu,
- zależny od napięcia sieci w punkcie przyłączenia,
- zakres odpowiedzi czasowej prądu: od 20 ms do 40 ms

b)



Układ energoelektroniczny typu *grid forming*:

- źródło napięcia,
- niezależny od napięcia sieci w punkcie przyłączenia,
- zakres odpowiedzi czasowej prądu: od wartości chwilowych do 10 ms

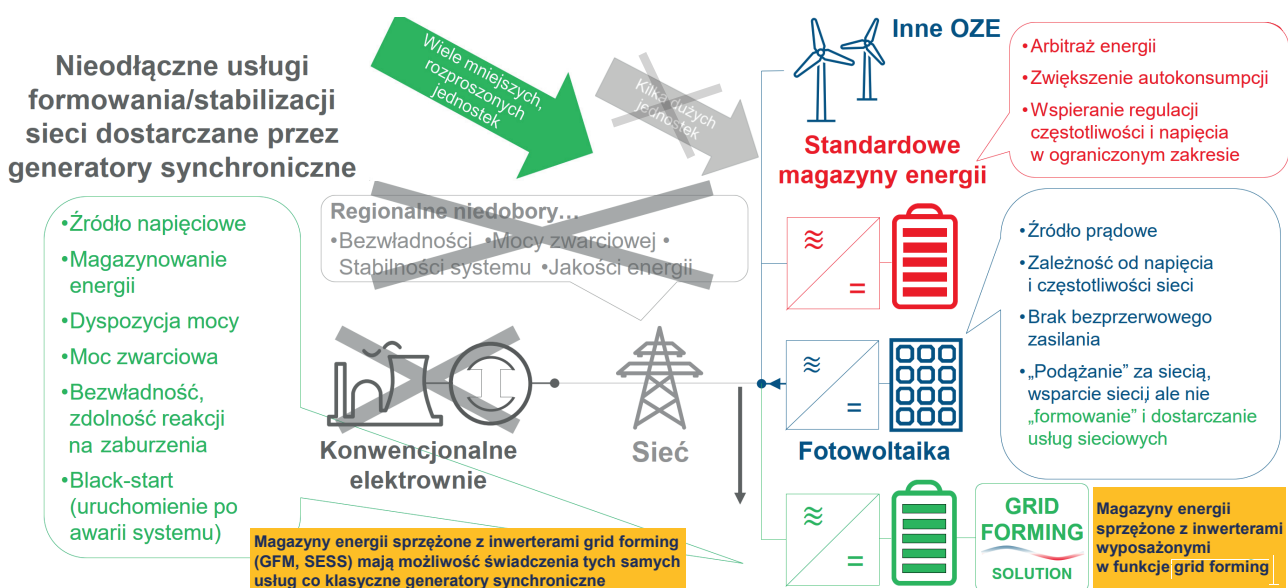
Rys. 1. Układ energoelektroniczny (falownik, inwerter) typu: a) *grid following*; b) *grid forming* (źródło: prezentacja Huawei Polska)

## Magazynowanie energii elektrycznej

W dyskusji skoncentrowano się przede wszystkim na bateryjnych systemach magazynowania energii elektrycznej. Zwrócono jednak uwagę na potrzebę rozwijania różnych technologii i rozwiązań, w tym wodorowych, co już można obserwować i co daje obiecujące perspektywy na przyszłość. Coraz więcej tradycyjnych źródeł energii (elektrowni) bazujących na generatorach synchronicznych jest odłączanych od sieci, co skutkuje zmniejszeniem inercji (bezwładności) systemu elektroenergetycznego. Tymczasem odpowiedni poziom inercji jest niezbędny do stabilizowania częstotliwości oraz minimalizowania ryzyka występowania awarii systemu. Rekomendowano stosowanie magazynów energii wykorzystujących układy energoelektroniczne wykonane w technologii *grid forming*. Przy odpowiedniej implementacji (sterowaniu) zapewniają one inercję (*synthetic inertia*), dzięki czemu zwiększają niezawodność (stabilność) systemu zasilającego, nawet w przypadku awarii (Rys. 2). Podkreślono, że magazyny energii powinny być stosowane nie tylko przez klientów, ale również przez operatorów systemu dystrybucyjnego (OSD) i operatorów systemu przesyłowego (OSP) (Firlit et al. 2023b).

## Rozproszone systemy pomiarowe (RSP)

Stosowanie RSP z licznikami energii elektrycznej typu *smart to de facto* wdrażanie koncepcji smart meteringu. W tym celu można wykorzystać np. wysoce skalowalny system operacyjny czasu rzeczywistego Phoenix-RTOS (licencja typu *open source*) bazujący na opracowanej od podstaw architekturze mikrojądra. Dostępne są już kompatybilne liczniki energii elektrycznej oraz gazomierze z komunikacją GSM (Rys. 3). Istnieje możliwość tworzenia aplikacji dla użytkownika i instalowania ich w licznikach, co umożliwi wykorzystanie platform chmurowych i komunikację z przekształtnikami fotowoltaicznymi, magazynami energii oraz stacjami ładowania samochodów elektrycznych. W kluczowych punktach systemu elektroenergetycznego (zakładu przemysłowego, dużego i krytycznego odbiorcy, sieci dystrybucyjnych i przesyłowych) należy prowadzić monitorowanie z wykorzystaniem analizatorów jakości energii elektrycznej, najlepiej klasy A według normy PN-EN 61000-4-30, w celu poszerzania zbioru wskaźników jakości energii opisujących kompleksowo stan pracy sieci. W gminie Ochotnica Dolna (klaster energii „Zielone Podhale”) w ramach projektów KlastER i OTE (NCBR, program GOSPOSTRATEG) prowadzony jest pilotaż platformy *besmart.energy* (Rys. 4) (Firlit et al. 2023a; Hanzelka et Firlit 2015).

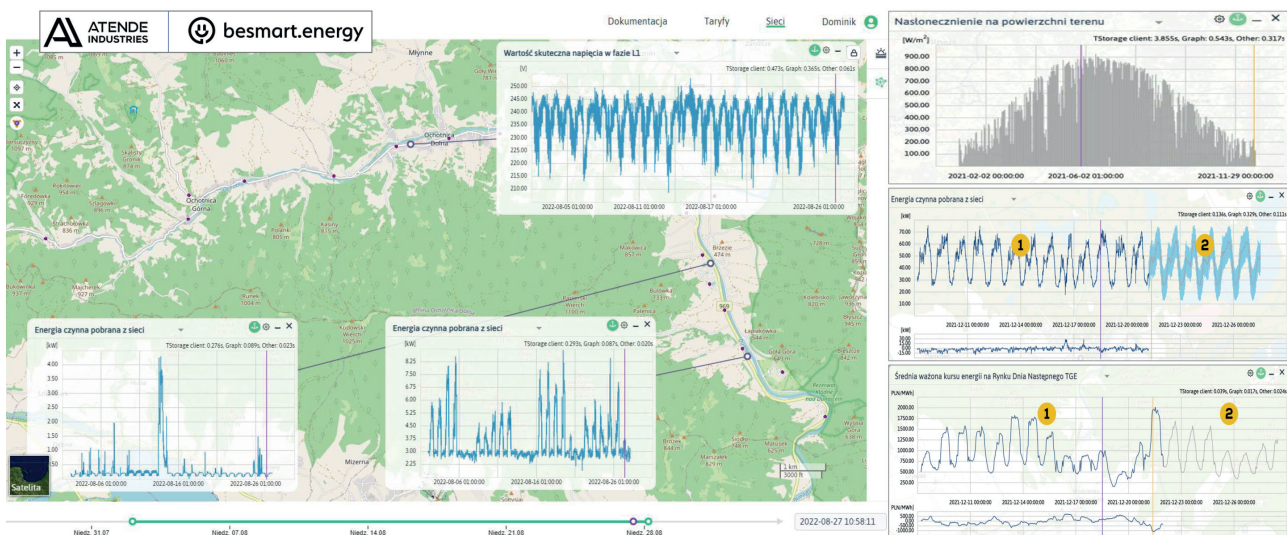


Rys. 2. Potrzeba stabilizacji pracy sieci zasilających z wysokim udziałem OZE (źródło: prezentacja SMA Solar Technology)



PLC (PRIME, G3-PLC)

Rys. 3. Smart metering – licznik energii elektrycznej typu smart meter jako „asystent energetyczny” (źródło: prezentacja Phoenix Systems)

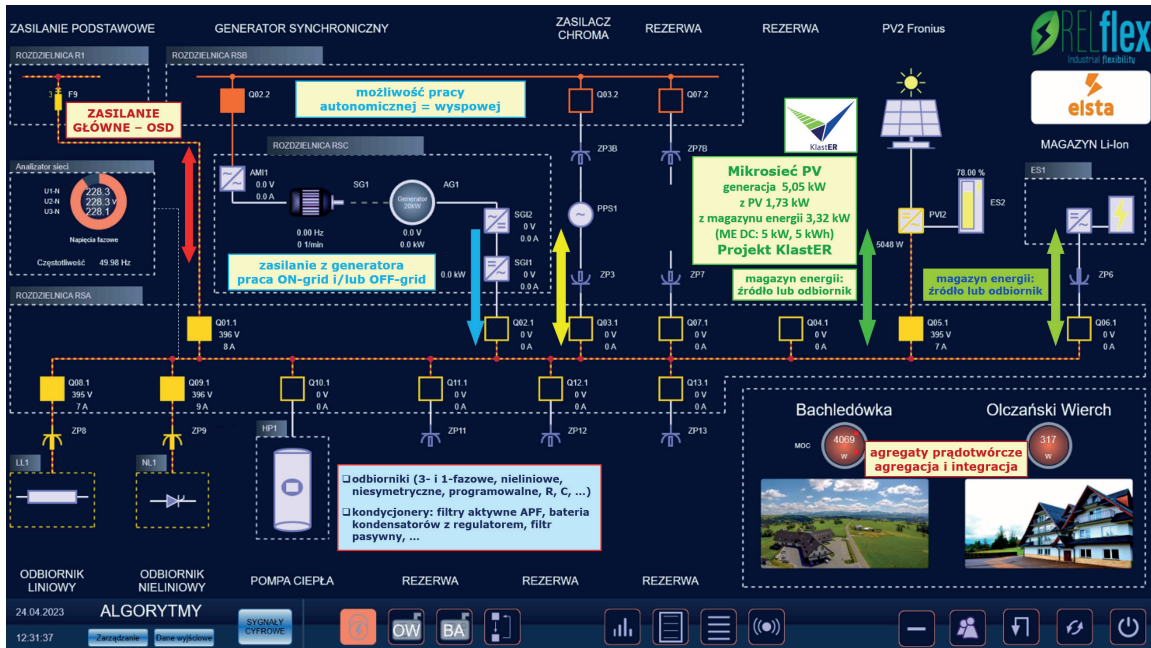


Rys. 4. Monitorowanie parametrów pracy sieci zasilających na przykładzie platformy besmart.energy. Przykładowe funkcjonalności: prognoza pogody wysokiej rozdzielczości (3-dniowa, aktualizacja co 12 godzin), indywidualna predykcja (sygnałów: 7-dniowa, ceny na TGE: rynek dnia następnego i bilansujący) (źródło: prezentacja Phoenix Systems)

## Mikrosieci

Budowanie mikrosieci, czyli wydzielonych, autonomicznych systemów elektroenergetycznych, polega na tworzeniu zbioru połączonych ze sobą odbiorców, rozproszonych źródeł energii (RZE) różnego typu (np. instalacje fotowoltaiczne i wiatrowe, biogazownie, agregaty prądotwórcze), kondycjonerów oraz magazynów energii (Rys. 5). Tego typu systemy zasilania mają określone granice i zazwyczaj jeden punkt przyłączenia do krajowej sieci elektroenergetycznej, posiadają także rozwiązania techniczne pozwalające na przejście w tryb pracy wyspowej. Mikrosieci stanowią

szczególny przykład inteligentnych systemów elektroenergetycznych *smart grids*. Tego typu systemy mogą mieć zastosowanie w zakładach przemysłowych i firmach, klastrach energii i społecznościach energetycznych, w infrastrukturze samorządowej, sieciach gmin wiejskich i małych miast, szpitalach, budynkach samowystarczalnych energetycznie, uczelniach wyższych i jednostkach badawczych. Wszystkie urządzenia wchodzące w skład mikrosieci powinny być opomiarowane i połączone liniami komunikacyjnymi z systemem centralnego zarządzania, zaś krytyczne obiekty, szczególnie źródła wytwórcze, powinny mieć możliwość sterowania.



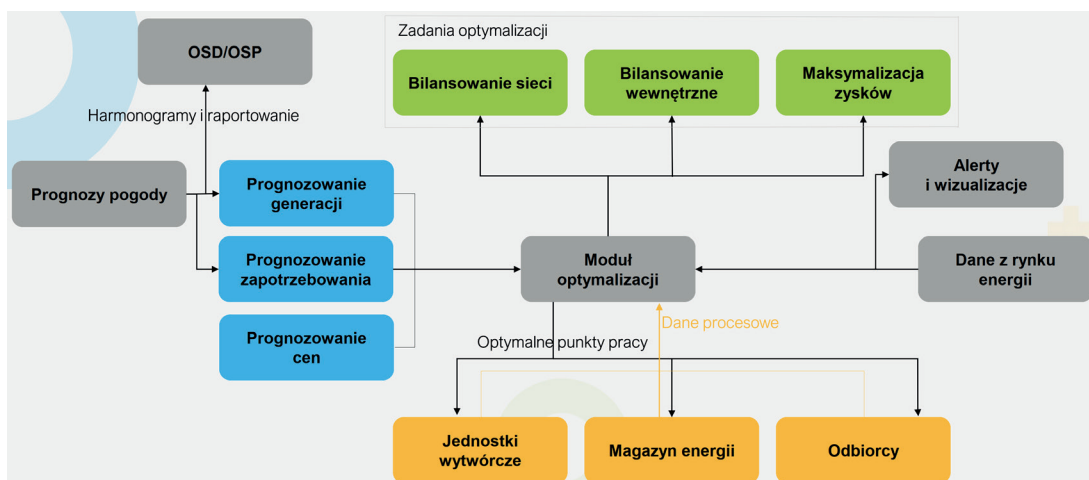
Rys. 5. Ekran główny aplikacji (ZENON Energy Edition) do zarządzania mikro siecią RELflex wdrożoną w Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej AGH. Przykład agregatora źródeł i magazynów energii oraz wirtualnego źródła energii (źródło: materiały własne AGH)

Istotną kwestią w przypadku pracy wyspowej jest odpowiednie zarządzanie mocą i energią elektryczną w zakresie podaży (produkcji) oraz popytu (zużycia i zapotrzebowania; DSM i DSR). Mikro sieci to systemy zasilania typu premium – są przykładem praktycznej realizacji koncepcji usług elastyczności energetycznej w skali mikro. Umożliwiają uzyskanie niezależności oraz maksymalizację wykorzystania energii z RZE. Ważną sprawą jest konieczność zapewnienia biernego i czynnego bezpieczeństwa przeciwpożarowego w związku z instalacją bateryjnych

magazynów energii (implementacja zabezpieczeń wewnętrznych i zewnętrznych) (Firlit et Hołdyński 2023; Firlit et al. 2023).

## Wirtualne elektrownie

Możliwe jest tworzenie wirtualnych elektrowni poprzez agregację źródeł i magazynów energii oraz ich integrację z częścią odbiorczą danej sieci elektroenergetycznej za pomocą odpowiedniego oprogramowania (Rys. 6).



Rys. 6. Agregacja źródeł i magazynów energii oraz ich integracja z częścią odbiorczą – tworzenie wirtualnych elektrowni, bilansowanie, prognozowanie i optymalizacja. Architektura systemu na przykładzie Energy Link (źródło: prezentacja Transition Technologies Systems)

Istotnym wyzwaniem w tym kontekście jest zarządzanie częścią wytwórczą i odbiorczą z uwzględnieniem narzędzi do prognozowania generacji energii z rozproszonych źródeł oraz sposobu pracy magazynów energii, a także zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorców. Zaawansowane platformy/środowiska software'owe oferują implementację algorytmów optymalizacji techniczno-ekonomicznej w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej oraz obniżenia kosztów (Hanzelka et Firlit 2015).

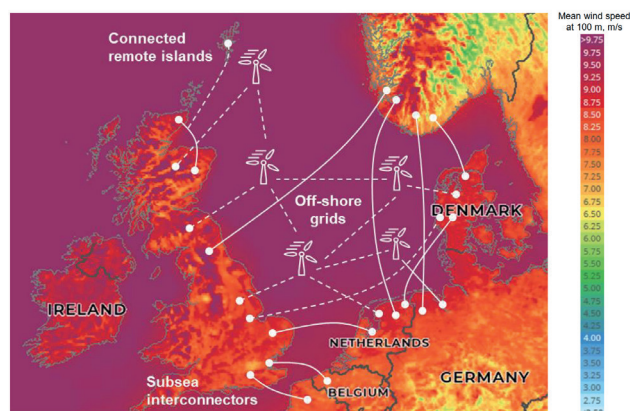
## Systemy wysokiego napięcia prądu stałego HVDC

Systemy wysokiego napięcia prądu stałego HVDC mogą być stosowane do wsparcia rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE). Tego typu rozwiązania techniczne przeznaczone są do przesyłania wysokich wolumenów energii z OZE na duże odległości. W przypadku połączeń lądowych dotyczy to linii o długości od kilkuset kilometrów, a w przypadku połączeń podmorskich – od ok. pięćdziesięciu kilometrów. Przypuszcza się, że rosnąca liczba morskich elektrowni wiatrowych przyłączana będzie do krajowych systemów elektroenergetycznych za pomocą układów HVDC, podobnie jak odległych dużych elektrowni lądowych i fotowoltaicznych. Systemy HVDC pozwalają na integrację różnych systemów elektroenergetycznych, np.:

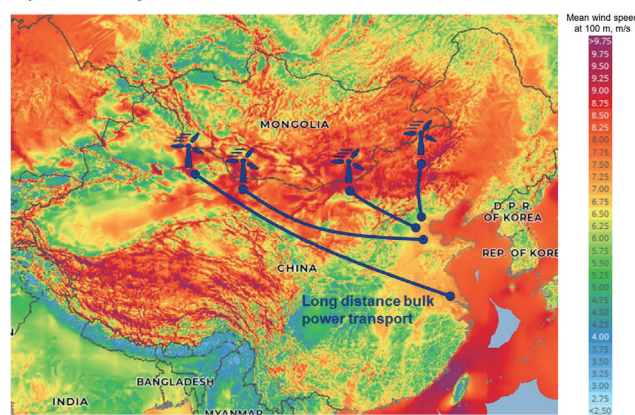
- między państwami,
- obszarów kontynentalnych z obszarami wyspiarskimi,
- o różnych parametrach nominalnych (takich jak częstotliwość, poziom napięcia itp.), np. w celu ich wzmocnienia.

Taka możliwość integracji jest istotna w kontekście rosnącego udziału w miksie odnawialnych źródeł energii silnie uzależnionych od zmiennych warunków pogodowych. Systemy elektroenergetyczne przyszłości będą potrzebowały elastycznych połączeń pomiędzy strefami czasowymi i klimatycznymi (Rys. 7).

### Morskie farmy wiatrowe oraz połączenia podmorskie



### Lądowe farmy wiatrowe



Rys. 7. System energetyczny przyszłości będzie potrzebował elastycznych połączeń (źródło: na podst. prezentacji Hitachi Energy)

## „Zielona dystrybucja”

Ambitnym celem dla klastrów energii jest „zielona dystrybucja”. Chodzi o podjęcie prac modernizujących infrastrukturę elektroenergetyczną klastra, tak by zastosować magazyny energii i doprowadzić do sytuacji, gdy 100% energii zużywanej na potrzeby własne będzie pochodziło z OZE. Zakłada się, że strategia sterowania magazynami realizowana byłaby w cyklu dobowym. Uzasadnieniem i motywacją do podjęcia takich działań jest fragment definicji klastra energii zamieszczony w Ustawie z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478): „klastery energii – cywilnoprawne porozumienie, w skład którego mogą wchodzić osoby fizyczne, osoby prawne, szkoły i uczelnie, lub jednostki samorządu terytorialnego, **dotyczące wytwarzania i równoważenia zapotrzebowania,**

dystrybucji lub obrotu energią z odnawialnych źródeł energii lub z innych źródeł lub paliw, w ramach sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV, na obszarze działania tego klastra nieprzekraczającym granic jednego powiatu lub 5 gmin (...)” (podkr. – AF) (za: Strategia Rozwoju Energetyki Rozproszonej... 2022).

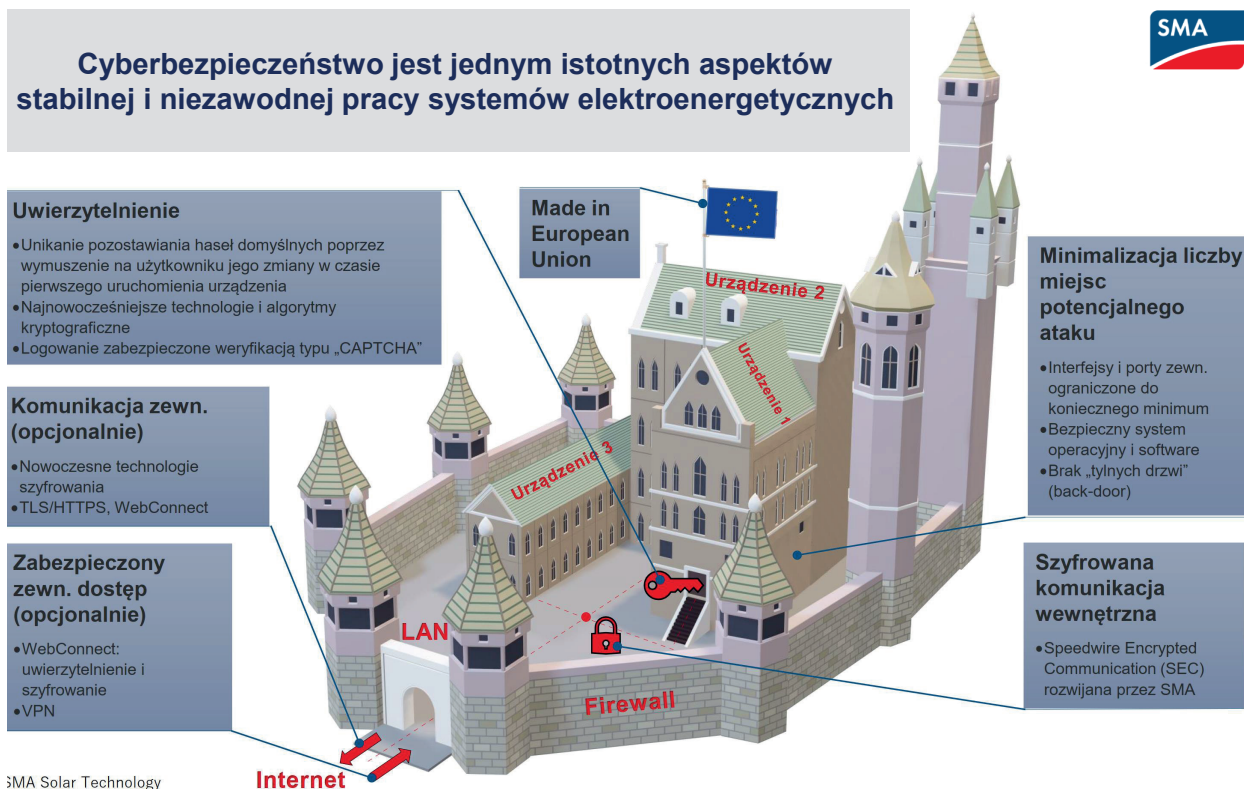
## Cyberbezpieczeństwo

Jednym z filarów niezawodnej i stabilnej pracy systemów elektroenergetycznych jest zapewnienie cyberbezpieczeństwa infrastrukturze krytycznej (Rys. 8). Związana jest z tym konieczność rozwoju i stosowania odpowiednich (bezpiecznych) narzędzi informatyczno-telekomunikacyjnych, a więc sprzętu i oprogramowania opracowanych dla elektroenergetyki. W ostatnim czasie można zaobserwować coraz częstsze próby włamania do systemów informatycznych organizacji rządowych, firm energetycznych, instytucji i obiektów

o istotnym znaczeniu. Ich celem jest m.in. próba destabilizacji infrastruktury technicznej.

## Podsumowanie

Nie ma jednego systemu technicznego ani jednej technologii mogącej rozwiązać wszystkie problemy czy odpowiedzieć na wszystkie potrzeby i wyzwania systemu elektroenergetycznego. Sugeruje się, by stawiać raczej na łączenie różnych rozwiązań fizycznych/energetycznych oraz informatycznych w obszarze wytwarzania, przesyłu, przetwarzania i odbioru energii. Należy zauważyć, że dzięki dużej aktywności badawczo-rozwojowej w ostatnich latach wielu dostawców, także krajowych, wypracowało szereg rozwiązań technicznych i technologii mogących wspomóc rozwój inteligentnych sieci elektroenergetycznych, a tym samym – rozwój energetyki rozproszonej. Za pozytywny należy uznać fakt, że wiele rozwiązań jest tworzonych przez polskie firmy i powstaje we współpracy z polskimi uczelniami.



Rys. 8. Znaczenie cyberbezpieczeństwa dla pracy systemów elektroenergetycznych (źródło: prezentacja SMA Solar Technology)

System elektroenergetyczny musi podlegać ciągłej modernizacji i rozwojowi. Konieczny jest wzrost poziomu jego automatyzacji, cyfryzacji i digitalizacji oraz innowacyjności. Ważną kwestią pozostaje opracowanie odpowiednich metod i algorytmów przetwarzania pozyskiwanych i gromadzonych danych w celu uzyskania użytecznych informacji. Dzięki temu sieci zasilające (lokalne i globalne) w coraz większym stopniu będą mogły być obserwowane i sterowane, zgodnie z założonymi kryteriami.

Działania inżynierskie powinny zostać wsparte odpowiednimi regulacjami prawnymi i ekonomicznymi, a przede wszystkim długofalową strategią rozwoju i modernizacji infrastruktury elektroenergetycznej w skalach mikro i makro oraz w różnych segmentach rynku (prosumenckim, przemysłowym, komercyjnym i wielkoskalowym). Jest to bardzo istotne ze względu na tworzenie modeli biznesowych oraz analizy opłacalności inwestycji. W tym kontekście rozwój usług elastyczności energetycznej jest z wielu powodów wskazany i oczekiwany.

Systemy elektroenergetyczne wyposażone w innowacyjne rozwiązania techniczne i technologiczne wraz z instalacjami generacji rozproszonej będą cechowały się wysokim poziomem elastyczności energetycznej. Dzięki temu uczestnicy rynku energii oraz innych rynków (finansowego, dóbr przemysłowych, usług, czynników produkcji, towarowego) uzyskają szereg korzyści, takich jak:

- zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego (utrzymanie równowagi bilansowej oraz wymaganego poziomu napięć i częstotliwości),
- poprawa jakości i efektywności energetycznej sieci elektroenergetycznych (poprawa wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej),
- poprawa niezawodności dostawy energii (ochrona przed blackoutami),
- zmniejszenie kosztów funkcjonowania systemu elektroenergetycznego,
- oszczędności oraz nowe możliwości dla odbiorców,
- rozwój techniki i nowych technologii,
- wdrażanie i rozwój koncepcji elektroprosumeryzmu – innowacji przełomowej, której propagatorem jest prof. Jan Popczyk.

Bardzo istotnym, a może kluczowym rezultatem będzie przeciwdziałanie negatywnym zmianom klimatycznym, redukcja emisji gazów cieplarnianych (dekarbonizacja) oraz wspieranie zrównoważonego rozwoju.

#### Bibliografia:

- VI Forum Energetyki Rozproszonej (2023), Energetyka-rozproszona.pl, [www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/vi-forum-energetyki-rozproszonej/#PrezentacjeIKER](http://www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/vi-forum-energetyki-rozproszonej/#PrezentacjeIKER) [dostęp: 6.11.2023].
- Firlit A., Hołdyński G. (2023), *Elastyczność energetyczna w Polsce*, [www.elastycznoscenergii.pl](http://www.elastycznoscenergii.pl) [dostęp: 6.11.2023].
- Firlit A., Hanzelka Z., Piątek K., Chmielowiec K., Barczeniewicz S., Dutka M., Siostrzonek T., Klempka R., Azebaze Mboving Ch.S., Skomudek W. (2023a), *Współczesne trendy i wyzwania w dziedzinie jakości dostawy energii elektrycznej – wybrane prace badawcze, eksperymentalno-rozwojowe oraz dydaktyczne Zespołu Jakości Energii Elektrycznej*, „Nauka – Technika – Technologia: Seria Wydawnicza AGH”, t. 7, Wydawnictwa AGH, Kraków: 41–64.
- Firlit A., Piątek K., Hanzelka Z., Szaniawski K., Piasecki S., Topolski Ł. (2023b), *Analiza pracy sieci zasilającej OSD po uruchomieniu magazynu energii elektrycznej w Ochothnicy Dolnej*, <https://www.energetyka-rozproszona.pl/artykuly/analiza-pracy-sieci-zasilajacej-osd-po-uruchomieniu-magazynu-energii-elektrycznej-firmy-apor-w-ochotnicy-dolnej/> [dostęp: 6.11.2023].
- Hanzelka Z., Firlit A. (red.) (2015), *Elektrownie ze źródlami odnawialnymi – zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Strategia Rozwoju Energetyki Rozproszonej w Polsce do 2040 roku* (2022), [www.energetyka-rozproszona.pl/media/ckeditor/2023/01/13/strategia-rozwoju-energetyki-rozproszonej-w-polsce-do-2040-roku.pdf](http://www.energetyka-rozproszona.pl/media/ckeditor/2023/01/13/strategia-rozwoju-energetyki-rozproszonej-w-polsce-do-2040-roku.pdf) [dostęp: 6.11.2023].
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20150000478/U/D20150478Lj.pdf> [dostęp: 19.12.2023].

### Innovative technical and technological solutions in the area of distributed power generation – summary of technical session I KER

**Abstract:** The article summarizes the issues raised during the session on innovative technical and technological solutions in the area of distributed energy. These topics are very broad and multidimensional, especially in the context of the energy transition we are currently undergoing. It is strongly related to the development and implementation of smart grids systems.

**Keywords:** smart grids systems, microgrids, grid forming, aggregation of energy sources and consumers, management of energy sources and consumers, smart metering

#### Dr inż. Andrzej Firlit

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
[afirlit@agh.edu.pl](mailto:afirlit@agh.edu.pl)

