

## MOŻLIWOŚCI POPRAWY OBSERWOWALNOŚCI SIECI SN/nn W OPARCIU O INFRASTRUKTURĘ AMI DLA CELÓW PLANOWANIA I PROWADZENIA RUCHU SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

Tomasz PAKULSKI<sup>1</sup>, Rafał MAGULSKI<sup>2</sup>, Leszek BRONK<sup>3</sup>, Aleksander BABS<sup>4</sup>

1. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
tel.:58 349 8211 e-mail: t.pakulski@ien.gda.pl
2. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
tel.:58 349 8211 e-mail: r.magulski@ien.gda.pl
3. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
tel.:58 349 8211 e-mail: l.bronk@ien.gda.pl
4. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
tel.:58 349 8230 e-mail: aleksander.babs@ien.gda.pl

**Streszczenie:** W referacie zaprezentowano możliwości poprawy obserwowalności sieci średniego (SN) oraz niskiego (nn) napięcia poprzez wykorzystanie istniejących systemów inteligentnego opomiarowania AMI, które są wykorzystywane przez operatorów sieci dystrybucyjnych (OSD), a których główną - i jak dotąd jedyną funkcją jest zbieranie i dostarczanie informacji o zużyciu energii elektrycznej. W artykule, w kontekście przydatności systemów AMI do wspomagania prowadzenia ruchu, przedstawiono charakterystyki techniczne systemów AMI wdrożonych w kraju. Zaprezentowano zaproponowaną metodykę ich wykorzystania dla planowania i prowadzenia ruchu w sieci SN oraz przedstawiono modelowe wyniki wdrożenia. Referat oparto na doświadczeniach zebranych w trakcie realizacji projektu „Budowa Lokalnego Obszaru Bilansowania (LOB) jako elementu zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności energetycznej pracy systemu dystrybucyjnego”.

**Słowa kluczowe:** lokalny obszar bilansowania, system AMI, prowadzenie ruchu sieci SN.

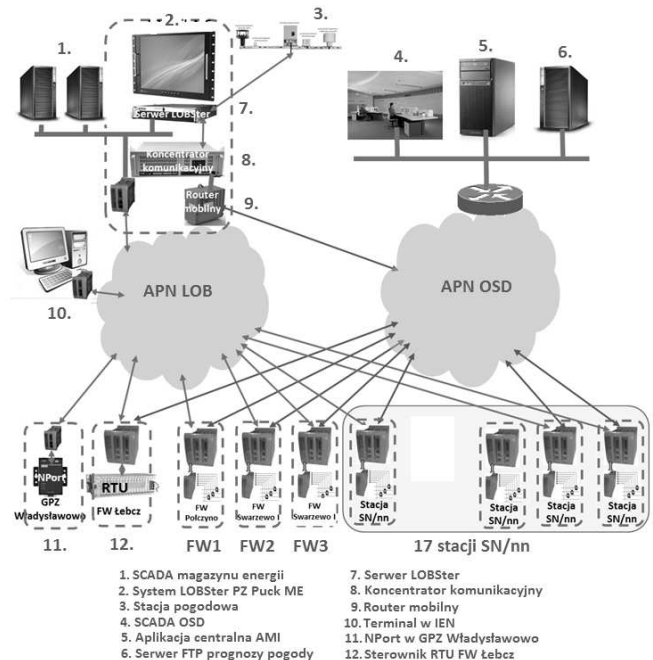
### 1. WSTĘP

Rozwój mikrogeneracji OZE oraz rosnąca zmienność profili zapotrzebowania odbiorców na moc powodują, że metody planowania i prowadzenia ruchu w sieciach dystrybucyjnych SN oraz nn wymagają dostosowania do nowych warunków. Kluczowym elementem by sprostać nowym wyzwaniom jest poprawa obserwowalności sieci dystrybucyjnej, która obecnie, w odniesieniu do sieci SN jest niewystarczająca, a w przypadku sieci nn praktycznie nie istnieje [1]. W celu poprawy obserwowalności sieci SN i nn proponowane jest wykorzystanie istniejących systemów inteligentnego opomiarowania AMI, które są wykorzystywane przez OSD, a których główną (i jak dotąd jedyną) funkcją jest zbieranie i dostarczanie informacji o zużyciu energii elektrycznej.

Możliwości wykorzystania istniejącej infrastruktury AMI dla zwiększenia obserwowalności sieci badano w obrębie Lokalnego Obszaru Bilansowania (LOB) zasilanego z GPZ Władysławowo i obejmującego 70 stacji SN/nn.

Celem działania LOB jest zapewnienie niezawodnej i bezpiecznej pracy sieci w warunkach dużego udziału energii z rozproszonych źródeł, z uwzględnieniem jakości dostarczanej energii oraz efektywności jej wykorzystania.

Centralnym elementem systemu sterowania LOB jest oprogramowanie LOBSter, którego zadaniem jest planowanie i prowadzenie ruchu w LOB (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy komunikacji w systemie LOBSter

Na wejście systemu podawane są dane pomiarowe gromadzone w trybie *online* lub z pewnym opóźnieniem, co wymaga wykorzystania odpowiednich mechanizmów estymacji. Na podstawie wykonywanych prognoz zapotrzebowania odbiorców na moc i prognoz generacji rozproszonej, system wypracowuje plan wykorzystania zasobów sterowanych na dobę następną, oraz wartości

zadane dla zasobów sterowanych w czasie rzeczywistym [2]. Monitorowanie bieżących warunków pracy sieci SN w trybie operacyjnym jest realizowane na podstawie modelu bazowego, aktualizowanego o dane pomiarowe AMI oraz dane estymowane [3].

## 2. WYKORZYSTANIE INFRASTRUKTURY POMIAROWEJ W OBSZARZE LOB

Przyjęto koncepcję, że prowadzenie ruchu LOB jest realizowane w oparciu o prognozy zapotrzebowania na moc czynną ( $P$ ) i bierną ( $Q$ ) w poszczególnych węzłach sieci SN/nn oraz wykonywanych na ich podstawie analiz rozptylowych, pozwalających na wyznaczenie przepływów mocy liniami oraz poziomów napięć w węzłach SN/nn. Prognozy wykonywane są z wykorzystaniem pomiarów:

- mocy czynnej i biernej pozyskiwanych z liczników bilansujących systemu AMI;
- pomiarów *online* z wybranych, referencyjnych stacji SN/nn, pozwalających na korygowanie prognoz zapotrzebowania na moc: czynną i bierną w stacjach nie objętych monitorowaniem, rejestrowanych i przesyłanych z wykorzystaniem sieci komórkowej GSM, w czasie krótszym niż 15 minut.

Prowadzenie operacyjnego ruchu sieci wymaga uzyskania wiarygodnych informacji dotyczących bieżącego zapotrzebowania na moc w stacjach SN/nn [4, 5, 6].

Profile zużycia energii czynnej i biernej dotyczące okresów 15-minutowych, mierzonych przez liczniki bilansujące na stacjach SN/nn, dostępne są w systemie AMI z opóźnieniem typowo od 2 do 6 godzin. Opóźnienie takie jest zbyt duże dla prowadzenia ruchu obszaru sieci na bieżąco, dlatego wielkości te przyjęto wykorzystując mechanizm estymacji.

Innym skutecznym sposobem prowadzącym do zmniejszenia opóźnienia w pozyskiwaniu danych z liczników bilansujących jest rekonfiguracja harmonogramów odczytu danych z tych liczników. Jest to możliwe, tym bardziej że częstość odczytów danych mierzonych przez licznik bilansujący może być różna niż częstość odczytów liczników zainstalowanych w głębi sieci, komunikujących się z koncentratorami danych z wykorzystaniem techniki PLC (ang. *Power Line Communication*). Liczniki bilansujące, które w niektórych rozwiązaniach są częścią koncentratora danych, komunikują się z systemem centralnym AMI zwykle poprzez sieć komórkową GSM. Możliwe jest zatem zwiększenie częstości odczytu danych profilowych z takich liczników. Zwiększenie częstości odczytów związane z częstszym nawiązywaniem sesji odczytowych, prowadzi do zwiększenia ruchu w wykorzystywanej sieci łączności. Wobec obserwowanego obecnie szybkiego rozwoju technik komunikacji radiowych i znacznego wzrostu ich przepustowości odczyt nawet znacznej liczby liczników bilansujących, tj. w przypadku OSD odczyt kilkudziesięciu tysięcy liczników, nie będzie stwarzał ograniczeń.

Pomiary pozyskiwane z systemu AMI wykorzystano do wykonania prognoz zapotrzebowania na moc na dobę następną dla wszystkich 70 stacji SN/nn [3, 7]. Ilość i zakres danych pozyskiwanych z sieci AMI wynika, oprócz własności konstrukcyjnych licznika, ze sposobu parametryzacji poszczególnych liczników. Parametryzacja ta dotyczy specyfikacji wartości pomiarowych, które będą rejestrowane, zapisywane a następnie udostępniane przez liczniki w sesjach odczytowych inicjowanych przez system

centralny AMI. W przypadku istotnych do realizacji obliczeń rozptylowych węzłów sieci – jakimi są m.in. stacje SN/nn, możliwa jest rejestracja takich wielkości jak:

- energia czynna zarówno pobrana ( $A_+$ ) jak i energia oddana ( $A_-$ );
- energia bierna zarejestrowana w czterech kwadrantach ( $E_I, E_{II}, E_{III}, E_{IV}$ );
- napięcia i prądy fazowe,
- moc maksymalna i minimalna w zadanym okresie ( $P_{max}, P_{min}$ ).

Liczniki bilansujące są typowo licznikami realizującymi pomiar pośredni po stronie sieci niskiego napięcia i pozwalają na obliczenie odpowiednich wartości fizycznych po stronie sieci średniego napięcia, po uwzględnieniu parametrów eksploatacyjnych i aktualnych nastaw transformatora SN/nn.

Prowadzone przez wielu OSD działania inwestycyjne zmierzające do poprawy jakości dostaw energii powodują, że znaczna liczba stacji jest wyposażana w układy automatyki sieci, które dokonują pomiaru napięć i prądów w stacjach SN/nn na poziomie średniego napięcia. Pomiary te są dostępne w systemach SCADA z niewielkim opóźnieniem rzędu kilkudziesięciu sekund i mogą stanowić uzupełnienie danych pozyskiwanych z systemów AMI, bądź też w przypadku masowego stosowania układów automatyki i pomiarów zapewnią obserwowalność sieci SN.

Estymacja zapotrzebowania na moc na obszarze LOB wykonywana w czasie quasi-rzeczywistym w ramach operacyjnego trybu pracy, odbywa się z wykorzystaniem prognoz na dobę następną dla poszczególnych stacji SN/nn oraz rzeczywistych pomiarów mocy czynnej i biernej ze zdefiniowanych stacji referencyjnych. Wybór referencyjnych stacji SN/nn przeprowadzono w oparciu o kryteria określone w tabeli 1.

Tabela 1. Kryteria wyboru referencyjnych stacji SN/nn

Kryterium	Ilość stacji Sn/nn
Korelacja zapotrzebowania na moc czynną z innymi stacjami SN/nn	3
Korelacja zapotrzebowania na moc bierną z innymi stacjami SN/nn	2
Lokalizacja w obszarze o wysokiej korelacji napięć z innymi obszarami sieci SN	2
Lokalizacja w obszarze o relatywnie niskich poziomach napięć w porównaniu do pozostałych obszarów	1
Lokalizacja w stacji SN/nn o nietypowym profilu zapotrzebowania na moc czynną i bierną odbiorców przemysłowych	9

W oparciu o analizę powyższych kryteriów wytypowano łącznie 17 stacji SN/nn, w których zainstalowano systemy telemetryczne rejestrujące zdalnie odczyt wartości przepływu mocy czynnej, biernej oraz napięcia. Pomiary te pozwalają na korygowanie prognoz zapotrzebowania na moc czynną i bierną w stacjach nie objętych monitorowaniem.

Każdej nieopomiarowanej stacji SN/nn przypisywano stację referencyjną, najlepiej skorelowaną pod względem zapotrzebowania na moc czynną i bierną, przy czym większe znaczenie przy wyborze stacji referencyjnej miała korelacja

w zakresie obciążenia mocą czynną. Stacje te zostały oznaczone szarą czcionką w tabeli 2.

Tabela 2. Korelacje mocy czynnej i biernej pomiędzy wybranymi stacjami SN/nn, dla których będzie wyznaczana estymacja zapotrzebowania na moc a stacjami referencyjnymi SN/nn, w których zostaną zainstalowane zestawy telemetrii

Stacja SN/nn	Stacja ref. 1		Stacja ref. 2		Stacja ref. 3		Stacja ref. 4	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Stacja 1	0.59	0.16	0.45	0.02	0.54	0.11	0.57	-0.05
Stacja 2	0.85	0.45	0.64	0.60	0.83	0.52	0.83	0.47
Stacja 3	0.68	0.60	0.89	0.86	0.78	0.64	0.67	0.59
Stacja 4	0.80	0.57	0.44	0.74	0.69	0.59	0.76	0.62

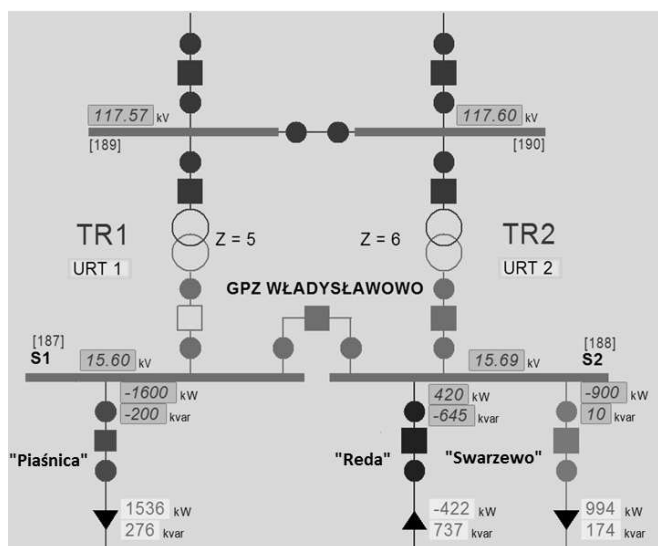
Estymacja zapotrzebowania na moc czynną i bierną dla nieopomiarowanych stacji SN/nn została wykonana z wykorzystaniem następujących danych wejściowych:

- prognozy długoterminowej w horyzoncie doby  $n + 1$ :
  - dla stacji SN/nn nieopomiarowanych;
  - dla stacji SN/nn referencyjnych;
  - temperatury otoczenia z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW);
- pomiarów *online* z referencyjnych stacji SN/nn.

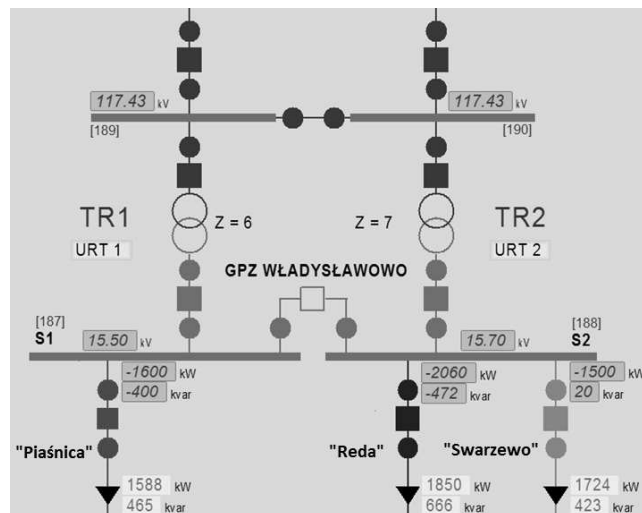
W wyniku uzyskuje się skorygowaną (estymowaną) prognozę zapotrzebowania na moc czynną i bierną dla poszczególnych nieopomiarowanych stacji SN/nn na obszarze LOB.

### 3. MODELOWE WYNIKI WDROŻENIA

Na rys.2 oraz rys. 3 przedstawiono porównanie rzeczywistego (wartości na szarym tle) oraz estymowanego (wartości na białym tle), chwilowego zapotrzebowania na moc czynną i bierną w trzech ciągach liniowych SN obszaru LOB, w dwóch wybranych przypadkach.



Rys. 2. Porównanie rzeczywistego oraz estymowanego chwilowego zapotrzebowania w trzech ciągach liniowych SN na obszarze LOB (przypadek 1)



Rys. 3. Porównanie rzeczywistego oraz estymowanego chwilowego zapotrzebowania w trzech ciągach liniowych SN na obszarze LOB (przypadek 2)

W tabeli 3 przedstawiono porównanie jakości estymacji zapotrzebowania na moc czynną i bierną w obszarze sieci SN dla trzech ciągów liniowych.

Tabela 3. Porównanie błędów estymacji zapotrzebowania na moc czynną i bierną w obszarze sieci SN

Ciąg liniowy SN	Dominujący odbiór	Błąd MAPE, %			
		Moc czynna		Moc bierna	
		Przyp.1	Przyp.2	Przyp.1	Przyp.2
Piaśnica	mieszany	4,1	0,7	38,0	16,3
Reda	komunalno-bytowy	0,5	10,2	14,3	41,4
Swarzewo Oczyszczalnia	przemysłowy	10,4	14,9	96,0	95,3

Wyniki modelowej sieci wykazały błąd MAPE estymacji zapotrzebowania na moc czynną na poziomie kilku – kilkunastu %, a mocy biernej kilkunastu – kilkudziesięciu %. Szczegółowe wyniki przedstawiono w [3].

### 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W warunkach wysokiego nasycenia sieci SN generacją rozproszoną, o zmiennym charakterze produkcji, dotychczasowy stopień obserwowalności wielkości przepływu mocy czynnej i biernej oraz poziomów napięć w poszczególnych jej obszarach jest niewystarczający na potrzeby prowadzenia ruchu w sposób bezpieczny i niezawodny. Ze względu na duże opóźnienie związane z odczytem pomiarów, dane z AMI nie mogą być bezpośrednio użyte w warunkach w czasie quasi-rzeczywistym. W artykule zaproponowano koncepcję wykorzystania dostępnej infrastruktury AMI oraz metodykę lokalizacji dodatkowych punktów pomiarowych mającą na celu stworzenie możliwości krótkoterminowego prognozowania stanu wybranego obszaru sieci SN na potrzeby zarządzania jej pracą. Opracowana metodyka pozwala na ograniczenie ilości zestawów telemetrycznych poprzez instalację jedynie w wybranych węzłach sieci. Dzięki czemu możliwe jest zwiększenie obserwowalności sieci przy jednoczesnym ograniczeniu nakładów

inwestycyjnych. Estymacja parametrów w nieopomiarowanych stacjach przy użyciu m.in. danych z dodatkowych zestawów telemetrycznych będzie się jednak wiązała z występowaniem odchyłek.

Na podstawie uzyskanych wyników modelowej sieci stwierdzono, że błąd MAPE estymacji zapotrzebowania na moc czynną wyniósł kilka %. W przypadku mocy biernej dokładność estymacji istotnie się zmniejszyła i wymagana będzie realizacja dalszych prac badawczych w celu zwiększenia dokładności odwzorowania.

Estymacja stanu sieci może być znacznie uproszczona w przypadku dopasowania częstości pozyskiwania danych z systemu AMI do potrzeb prowadzenia ruchu w sieci dystrybucyjnej. Obserwowany rozwój transmisji radiowej i znaczna redukcja jej kosztów stwarza możliwość częstego odczytu danych z liczników bilansujących. Po stronie systemów informatycznych akwizycji danych pomiarowych związane jest to z przeprowadzeniem obliczeń i symulacji w celu zapewnienia odpowiedniej wydajności tych systemów. Danymi wejściowymi do analizy jest liczba odczytywanych liczników bilansujących tj. kilkadziesiąt tysięcy oraz zakres koniecznych danych pomiarowych oraz częstość dokonywania pomiarów. Produkowane obecnie liczniki bilansujące umożliwiają rejestrację profili obciążenia nie tylko dla okresów 15-minutowych lub 60-minutowych, ale także krótszych – nawet 1-minutowych. Przy zapewnieniu odpowiedniej dostępności i prędkości kanału transmisyjnego pomiędzy licznikami bilansującymi a systemem centralnym AMI, możliwe jest udostępnienie na potrzeby prowadzenia ruchu w sieci danych pozyskiwanych w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

Zapisana w dokumencie PEP2040 [8] konieczność poprawy do 2025 r jakości dostaw energii do konsumenta i osiągnięcie poziomu średniej UE we wskaźnikach SAIDI i SAIFI związane będzie z wyposażeniem sieci SN w układy automatyzacji prowadzenia ruchu sieci instalowane na stacjach SN/nn. Układy te m.in. dokonują pomiarów napięć i prądów w sieci w celu wykrywania miejsca zwarcia. Pomiarzy te mogą być wykorzystywane do poprawy obserwowalności sieci SN i bieżącego obliczania rozplywów w sieci średniego napięcia.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Wasilewski J., Praktyczne aspekty statycznej estymacji stanu pracy elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych w warunkach krajowych, *Rynek Energii* 2013, nr 2 (105).
2. Czarnecki B., Wrocławski M., Koncepcja Lokalnego Obszaru Bilansowania jako narzędzia planowania i prowadzenia ruchu sieci dystrybucyjnej SN, Konferencja PTPiREE „Szacowanie i prognozowanie obciążeń w SEE”, Wisła, 2017.
3. Pakulski T., Bronk L., Power Demand Estimation in Quasi-Real Time in a Medium Voltage Grid Area Under Conditions of Limited Observability, *Acta Energetica*, 2018, No. 4/37.
4. Dobrzyński K. i in., Wykorzystanie liczników AMI w procesie optymalizacji pracy sieci niskiego napięcia, Konferencja naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce”, APE'17, Jastrzębia Góra, 2017.
5. Al-Wakeel A., Wu J., Jenkins N., State estimation of medium voltage distribution networks using smart meter measurements, School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, United Kingdom, 2016.
6. Chementova S., Ventim-Neves M., Santos P.J., Load Forecasting in Electrical Distribution Grid of Medium Voltage; 7<sup>th</sup> Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems (DoCEIS), Costa de Caparica, Portugal, 2016.
7. Praca zbiorowa, Budowa lokalnego obszaru bilansowania (LOB) jako elementu zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności energetycznej pracy systemu dystrybucyjnego. Zadanie 2. Badanie i analiza metod doboru parametrów elementów LOB. Podzadanie 2.3. Raport na temat metod doboru parametrów poszczególnych elementów LOB w obszarze zasilania GPZ Władysławowo, Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, Instytut Badawczy, Gdańsk, 2016.
8. Polityka energetyczna Polski do 2040 roku (PEP2040) Ministerstwo Energii, Warszawa, 2018.

## POSSIBILITIES TO IMPROVE MV/LV GRID OBSERVABILITY BASED ON AMI INFRASTRUCTURE FOR THE DISTRIBUTION NETWORK PLANNING AND OPERATION

The paper presents the possibilities to improve medium / low voltage (MV/LV) grid observability based on existing AMI infrastructure, which are used by Distribution Network Operators (DSO), whose main (and so far only) function is collecting and delivering information on electricity consumption. In the article, in the context of the usefulness of AMI systems to support distribution network operation, technical characteristics of AMI systems implemented in the Polish conditions are presented. The proposed methodology of their use for distribution network planning and operation as well as the model implementation results are presented. The paper is based on the experienced gathered during the project "The Building of a Local Balancing Area (LBA) as an Element of Increasing the Safety and Energy Efficiency of the Distribution System Operation". The task was financed under the GEKON Program by NCBiR National Centre of Research and Development and NFOŚiGW National Fund for Environmental Protection and Water Management and implemented with the participation of ENERGA-OPERATOR SA, the University of Zielona Gora and the Institute of Power Engineering, Gdansk Division.

**Keywords:** MV grid operation, local balancing area, AMI infrastructure.