

International Ukraine-Poland Seminar

Power quality in distribution networks with distributed generation

Kiev, July 4-5, 2019

DOI: 10.32073/iepl.2019.03

**ZARZĄDZANIE PRACĄ SIECI DYSTRYBUCYJNEJ NISKIEGO
NAPIĘCIA Z UWZGLĘDNIENIEM AKTYWNEJ ROLI PROSUMENTA**

**Irena Wasiak, Rozmysław Mieński, Michał Szypowski, Paweł Kelm,
Michał Małaczek, Przemysław Urbanek, Ryszard Pawelek, Andrzej Wędzik**

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

Abstract: The paper presents the simulation model of the distribution network nN with a dedicated control system developed by the authors of the publication. The simulator was developed as part of the project " Management of low voltage distribution network operation with prosumers' active participation", co-financed by the Polish National Center for Research and Development. The presented simulator was developed in order to evaluate a new service based on active participation of the prosumer in operation of this network. The benefits of the service are dedicated for both: the distribution network operator, by reducing network operation and development costs, and for the prosumer thanks to the profits from the provision of this service. Due to better network management capabilities, the quality of energy supplied will be improved. Also, the number and nominal power of renewable energy sources, that can be connected to the grid without the need to rebuild, will be increased.

1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój liczby źródeł odnawialnych w sieciach dystrybucyjnych wpływa na europejski rynek energii elektrycznej jak i znajdujące się w jego obrębie rynki poszczególnych krajów przyczyniając się do jego transformacji. Nowe wyzwania dla operatorów, po stronie operacyjnej i technologicznej są związane z podmiotowym traktowaniem konsumenta, który staje się aktywnym uczestnikiem rynku energii. Sposób zarządzania siecią dystrybucyjną musi stopniowo zmieniać swój charakter, w celu uwzględnienia zmian przepływów energii w sieci: z jednokierunkowych, od „centralnego

¹ Artykuł został opracowany przy wsparciu przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju na podstawie umowy nr POIR.04.01.02-00-0007/17.

wytwórcy" do odbiorcy, na dwukierunkowy, także od odbiorcy/prosumenta do sieci. Prowadzi to do sytuacji, w której sieć musi być bardziej zaawansowana technologicznie (w szczególności w zakresie sterowania, nadzoru i szybkiego przetwarzania informacji), żeby sumarycznie dystrybuować mniejsze wolumeny energii elektrycznej (część wolumenu produkcji źródeł OZE jest zużywana na miejscu), a z drugiej strony gwarantować pełne bezpieczeństwo energetyczne dla użytkowników i osób odpowiedzialnych za ich utrzymanie. Zmianom modelu rynku towarzyszą nowe wyzwania, które wpływają i będą wpływały na rolę operatorów.

Celem projektu „Zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z uwzględnieniem aktywnej roli prosumenta” jest opracowanie systemu służącego do zarządzania pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia poprzez wprowadzenie usługi pozwalającej operatorowi na sterowanie urządzeniami zainstalowanymi w instalacjach prosumenckich, w tym w szczególności sterowanie mocą wytwarzaną w źródłach i zasobnikach energii będących własnością prosumenta [1]. Partnerami projektu są: Politechnika Łódzka, PGE Dystrybucja Spółka Akcyjna, Politechnika Lubelska oraz APATOR ELKOMTECH Spółka Akcyjna.

W projektowanym systemie przekaz sygnałów odbywa się poprzez sieć dystrybutora z wykorzystaniem inteligentnych liczników energii (AMI) zainstalowanych u prosumenta oraz nadzorującego systemu informatycznego zainstalowanego częściowo u operatora (CLE) a częściowo u prosumenta (LLE). Tego typu system współtworzyć będzie przyszłe mikrosystemy elektroenergetyczne, które mieć będą cechy sieci inteligentnej (smart grid).

Korzyści z budowy nowej usługi w sieci przyszłości pozwolą na:

- zbudowanie transparentnego systemu zarządzania generacją z mikroinstalacji,
- przygotowanie rynku do bilansowania lokalnego - optymalizacja produkcji i zużycia energii elektrycznej w jednym miejscu sieci,
- zapewnienie bezpiecznego dla użytkowników i służb utrzymaniowych systemu zarządzania infrastrukturą nN, transparentne algorytmy funkcjonowania zaproponowanego rozwiązania,
- instalowanie dla odbiorcy systemu zarządzania zgodnie jego potrzebami energetycznymi,
- przyspieszenie procesu wdrożenia e-mobility.

Ponadto, celem dodatkowym projektu jest zbudowanie standardu dla urządzeń mikroinstalacji instalowanych w obszarze zarządzanym przez spółkę PGE Dystrybucja.

Zgodnie z założeniami projektu, w ramach etapu nr 1 zrealizowano następujące zadania:

- zbudowano w programie PSCAD symulator sieci nN z instalacjami prosumenckimi.
- dokonano połączenia symulatora sieci i instalacji producenckich z systemem zarządzania siecią nN.
- opracowano program badań służący do zweryfikowania poprawności działania zaprojektowanego systemu zarządzania.
- przeprowadzono badania symulacyjne w celu analizy pracy sieci w trakcie pracy normalnej, podczas zakłóceń oraz po likwidacji zakłócenia.
- przeprowadzono analizę wyników badań w celu weryfikacji oraz ewentualnej korekty algorytmu bloku systemu zarządzania.

W artykule opisano symulator sieci dystrybucyjnej nN wykonany w środowisku PSCAD oraz wyniki symulacji potwierdzające poprawne działanie symulatora.

2. SYMULATOR SIECI NN Z INSTALACJAMI PROSUMENCKIMI

Zgodnie z założeniami projektu, symulator sieci nN wykonano w środowisku PSCAD [2]. Jako sieć referencyjną wybrano sieć w miejscowości Stróża (Łódzkie). Szczegółowe dane

wejściowe do budowy symulatora dostarczone przez operatora PGE Dystrybucja obejmowały:

- schemat sieci (rys. 2a),
- typ i parametry transformatora,
- długości, rodzaje i przekroje kabli (rys. 2a),
- moce przyłączeniowe odbiorców i moce znamionowe układów PV w instalacjach prosumenckich, w tym numery faz, do których przyłączone systemy PV,
- łączną liczbę instalacji odbiorczych i prosumenckich.

2.1. Model symulacyjny instalacji odbiorczej (model Odbiorcy)

Odbióry mocy czynnej oraz biernej (przyjęto współczynnik mocy równy 0,4) odwzorowano jako sterowane źródła prądowe. Na podstawie wskazanych przez PGE wartości mocy przyłączeniowych (dla każdego Odbiorcy) wyznaczano prądy referencyjne tych źródeł.

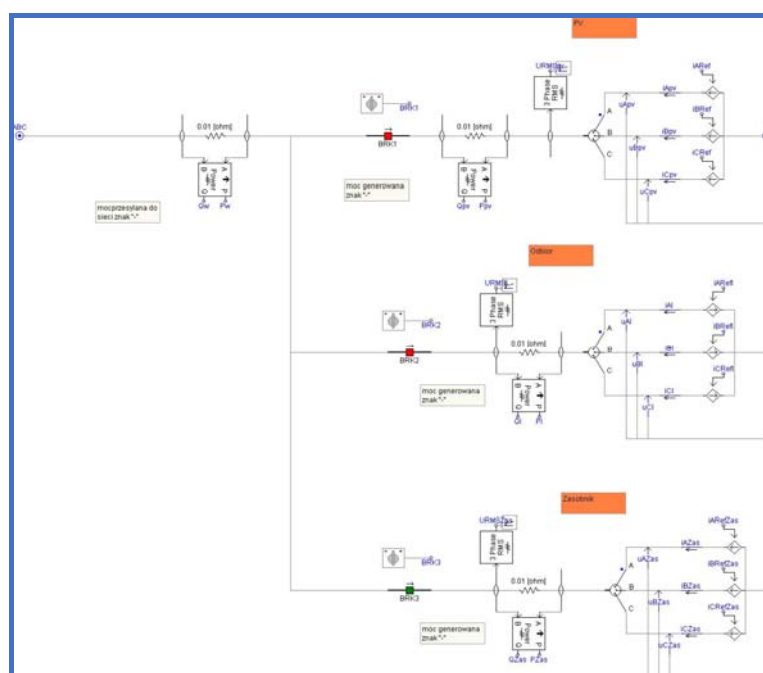
Opracowane modele Odbiorcy wykonano jako trójfazowe z możliwością pracy tylko na jedną fazę. Przełączenie z układu jednofazowego na trójfazowy zrealizowano u każdego z Odbiorców za pomocą dedykowanego łącznika.

2.2. Model symulacyjny instalacji prosumenckiej (model Prosumenta)

Analogicznie do modelu Odbiorcy opracowano modele Prosumentów (rys.1). W instalacjach prosumeckich, poza odbiorami mocy czynnej i biernej zainstalowano:

- instalacje PV, o mocach 3 kW każda, przyłączone do sieci poprzez przekształtniki 1-fazowe (do wskazanych przez operatora faz) [3],
- akumulatorowe zasobniki energii elektrycznej. Zasobniki były wykorzystywane tylko w trakcie testowania algorytmu systemu zarządzania siecią nN.

Opracowane modele Prosumenta wykonano jako trójfazowe z możliwości pracy źródeł PV tylko na jedną fazę (co odpowiada rzeczywistym warunkom pracy istniejącej sieci). Przełączenie źródeł PV z układu jednofazowego na trójfazowy zrealizowano za pomocą dedykowanego łącznika u każdego z Prosumentów.



Rys. 1. Struktura instalacji prosumenckiej w programie PSCAD

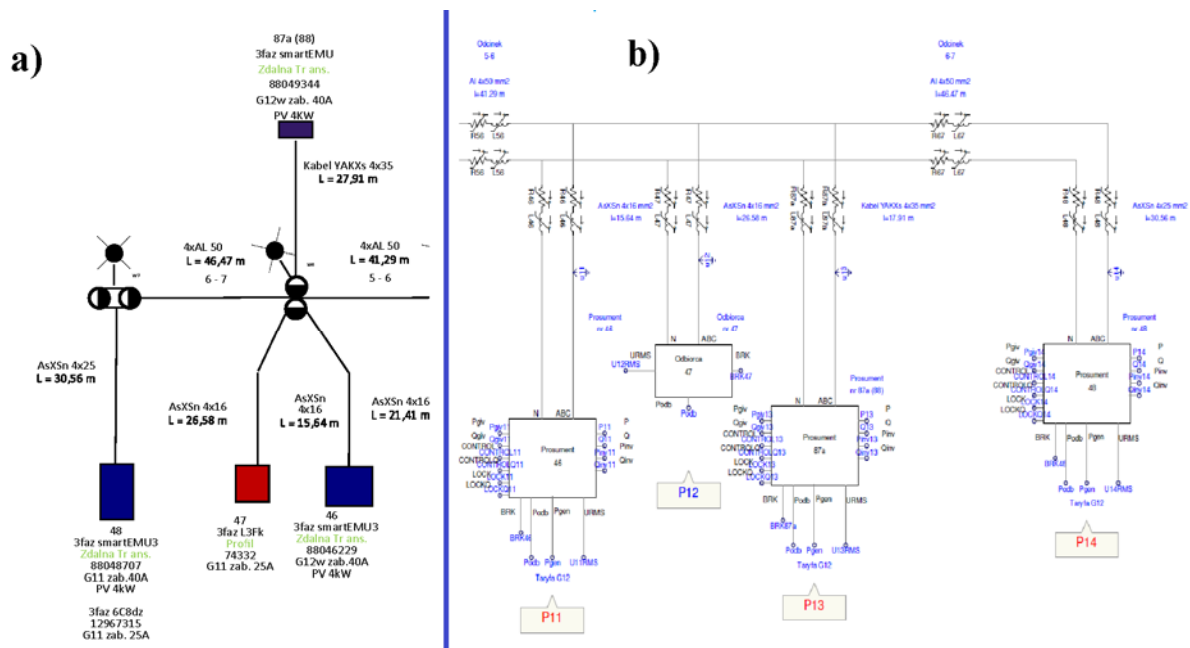
2.3. Model symulacyjny sieci dystrybucyjnej (model Sieci)

Przy budowie symulatora wykorzystano bibliotekę oprogramowania PSCAD zawierającą m.in. elementy systemu elektroenergetycznego. Parametry wybranych obiektów zamieszczono poniżej:

- sieć elektroenergetyczną po stronie 15 kV: idealne źródło napięciowe,
- transformator SN/nN:
 - o moc: 63 kVA, liczba faz: 3
 - o napięcie znamionowe GN: 15,75 kV/DN: 0,42 kV
 - o grupa połączeń: DY, napięcie zwarcia: 4,5 %
 - o straty jałowe: 130 W, straty obciążeniowe: 1216 W
- liczba przewodów w sieci nN: 4,
- odcinki sieci nN odwzorowano jako elementy RL. Poszczególne wartości R i L obliczono w oparciu o dane katalogowe przewodów i kabli oraz ich długości.

Fragment schematu zamodelowanej w programie PSCAD sieci nN wraz modelami Odbiorców i Prosumentów zamieszczono na rysunku 2b.

Wykorzystując zastosowane układy pomiarowe, zawierające mierniki wartości chwilowych oraz RMS, dokonano analizy pracy sieci i wprowadzono ewentualne korekty w symulatorze.



Rys. 2 . Fragment rozpatrywanej sieci w miejscowości Stróża (a), fragment symulatora sieci w środowisku PSCAD (b)

3. INTEGRACJA SYMULATORA Z SYSTEMEM ZARZĄDZANIA SIECIĄ NN

W celu integracji symulatora sieci nN z blokiem systemu zarządzania siecią nN dokonano połączenia dwóch środowisk obliczeniowych, tj.: PSCAD i Matlab.

Działanie to było konieczne, ponieważ blok systemu zarządzania siecią nN, wykorzystujący tzw. „współczynniki wrażliwości”, opracowano i testowano w programie Matlab. Integracja obu środowisk obliczeniowych umożliwiła dwukierunkowe przesyłanie danych między symulatorem PSCAD i blokiem obliczeniowym MATLAB w trakcie trwania symulacji.

Dane obliczeniowe mocy i napięć w węzłach sieci są cyklicznie przesyłane (zadaną częstotliwością) z symulatora PSCAD do bloku zarządzania siecią w MATLAB. Następnie obliczone nastawy dla sterowalnych inwerterów (wartości mocy czynnej i biernej) są przesyłane do symulatora.

4. PROGRAM BADAŃ TESTUJĄCYCH I WYNIKI BADAŃ

Celem testów było sprawdzenie, w wirtualnej sieci i kontrolowanych warunkach, poprawności działania algorytmu projektowanego systemu zarządzania.

W badanej sieci nN w miejscowości Stróża, przy istniejącej liczbie instalacji prosumenckich z źródłami PV, nie zaobserwowano dotychczas zdarzeń wymagających interwencji operatora sieci. Z drugiej strony operator, w oparciu o doświadczenia z pracą tej sieci (uwzględniając m.in. przyrost nowych instalacji PV), wskazał kierunek potencjalnych zagrożeń, w szczególności przekroczeń dopuszczalnych wartości napięć w węzłach sieci związanych z generacją źródeł prosumenckich. Z tego powodu w symulatorze do testów przyjęto zmodyfikowany scenariusz pracy sieci, który miał na celu wymuszenie spodziewanych zaburzeń. Harmonogram badań został uzgodniony z PGE i uwzględnia następujące stany pracy: normalna, podczas zakłóceń oraz po likwidacji zakłócenia. W modelu sieci wprowadzono zmiany, które spowodowały pojawienie się przekroczeń dopuszczalnych wartości skutecznych napięć fazowych określonych na następujących poziomach:

- wartość maksymalna: 245 V,
- wartość minimalna: 215 V.

Badania testujące system zarządzania przeprowadzono dla dwóch wariantów zmian obciążenia i generacji:

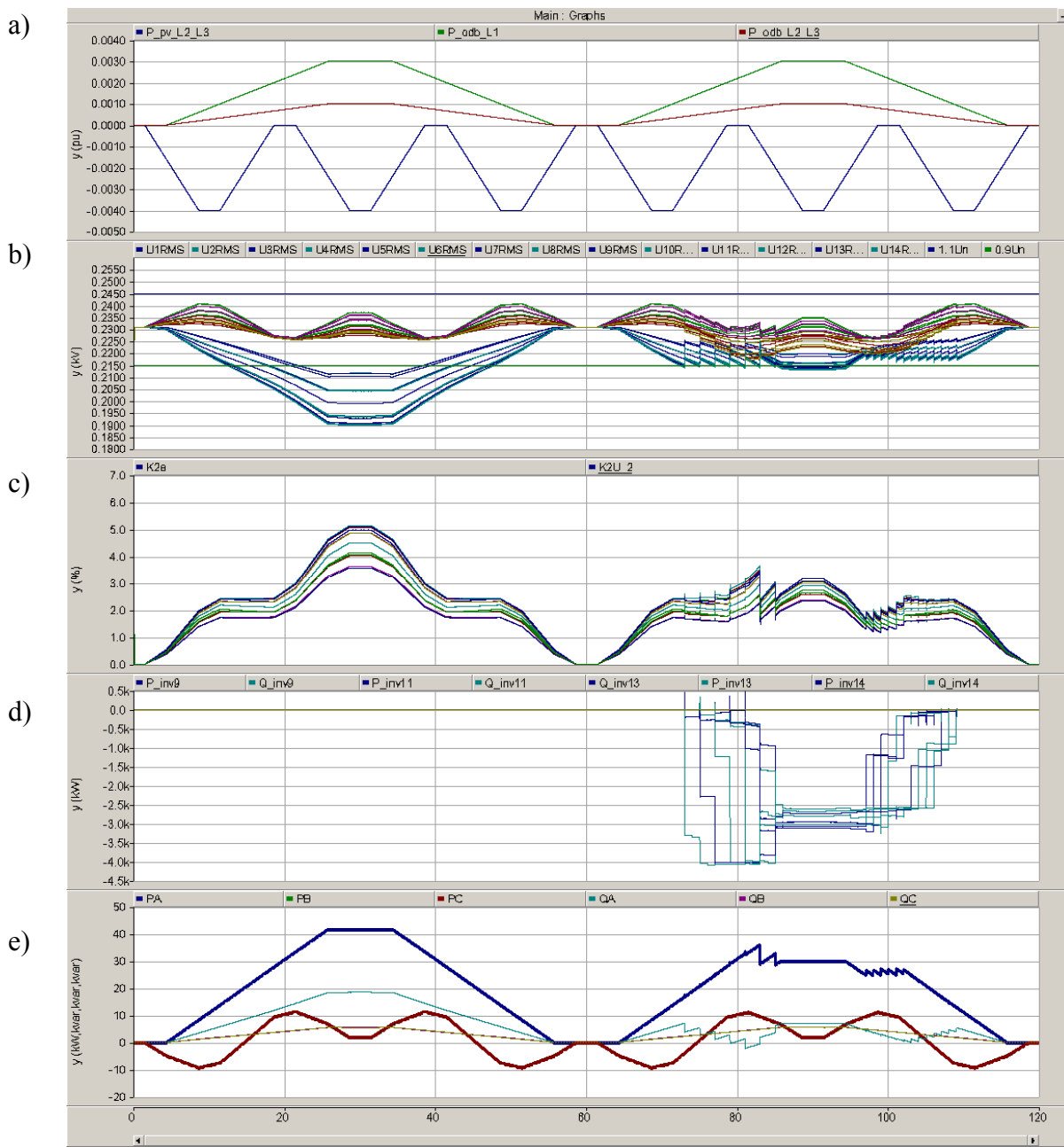
- ciągle zmiany obciążeń i generacji,
- skokowe zmiany obciążeń i generacji.

4.1. Wariant I - ciągle zmiany obciążeń i generacji

Obliczenia dla wariantu I (ciągle zmiany generacji i obciążeń) wykonano przy następujących założeniach:

1. Całkowity czas trwania symulacji: 120 s. Przez pierwsze 60 s system zarządzania siecią nN był wyłączony (przebieg odniesienia), a przez kolejne 60 s system był aktywny (wykonywał działania zmierzające do eliminacji zaburzeń).
2. Przyjęto identyczny profil generacji PV dla każdego prosumenta. Moce znamionowe przekształtników 1-fazowych instalacji PV wynosiły 4 kWp przy $\cos\varphi = 1$, przekształtniki podłączono do faz L2 i L3.
3. W ciągu 120 sekund symulacji generacja PV zmieniała się 6-krotnie od 0 do 1 [pu] zgodnie z przebiegiem piłokształtnym.
4. Przyjęto identyczny profil obciążenia dla każdego odbiorcy i prosumenta. Moce fazowe odbiorników wynosiły: 3 kW w fazie L1 oraz 1 kW w fazach L2 i L3 przy współczynniku mocy $\text{tg}\varphi = 0,4$.
5. W ciągu 120 sekund symulacji, obciążenie zmieniło się 2-krotnie od 0 do 1 [pu] zgodnie z przebiegiem piłokształtnym.
6. Moc znamionowa przekształtnika zasobnika zarządzanego przez system zarządzania siecią wynosiła 4 kVA na fazę.

Wyniki obliczeń dla wariantu I przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wyniki obliczeń przy ciągłych zmianach obciążeń i generacji (wariant I)

Wyniki obliczeń prezenrowane na rysunku 3 obejmują:

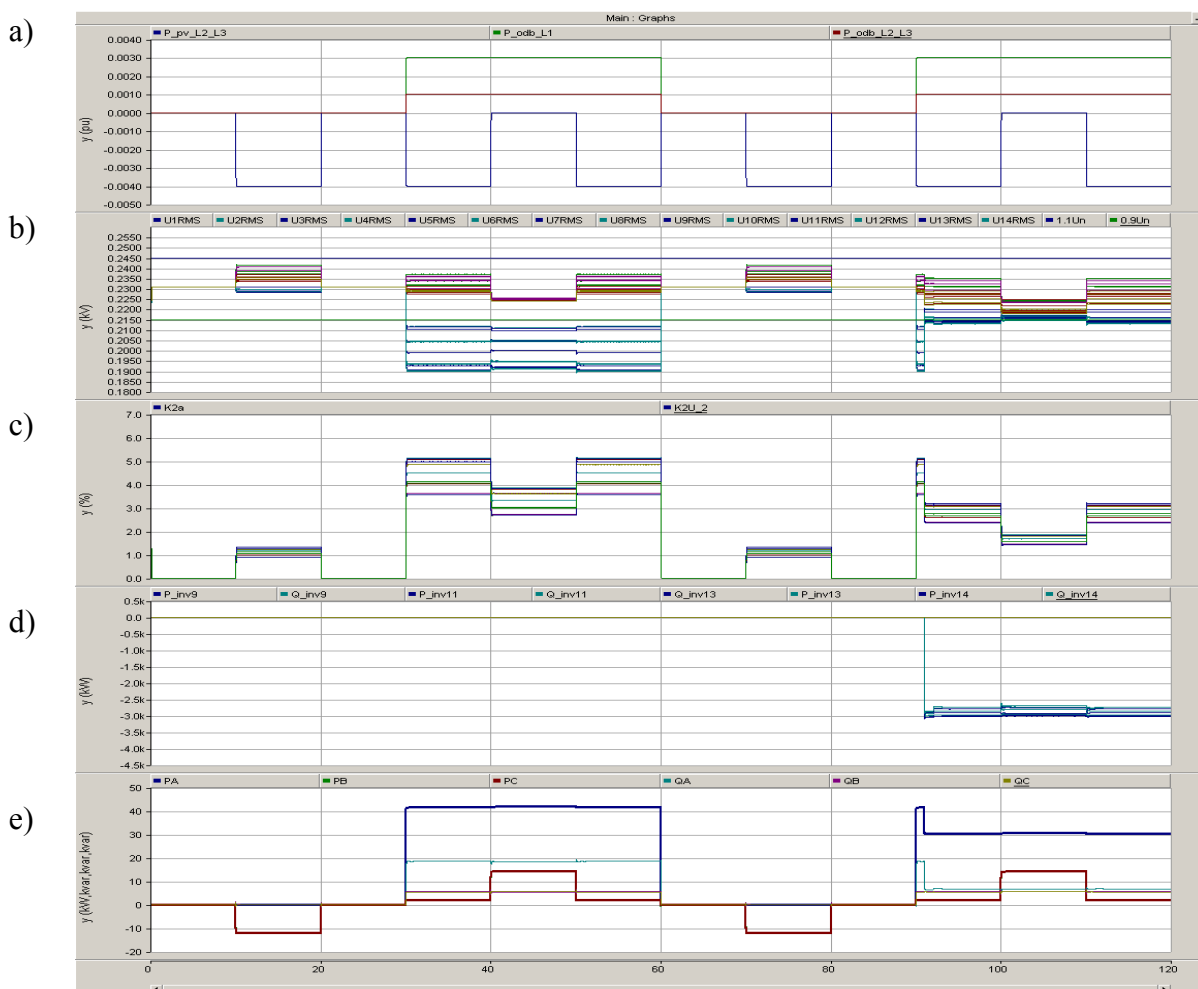
- a) Profile odbiorów i generacji źródeł PV:
 2. linia zielona – odbiory faza L1,
 3. linia czerwona – odbiory fazy L2 i L3,
 4. linia niebieska – generacja PV – fazy L2 i L3.
- b) Zmiany wartości skutecznych napięć w węzłach sieci:
 5. linia zielona – wartość minimalna: 215 V,
 6. linia niebieska – wartość maksymalna: 245 V,
- c) Zmiany współczynników asymetrii napięć w węzłach sieci K_{2U} .
- d) Fazowe moce czynne i bierne inwerterów sterowanych wykorzystanych do eliminacji zidentyfikowanych zaburzeń w sieci.
- e) Fazowe moce czynne i bierne transformatora.

4.2. Wariant II - skokowe zmiany obciążeń i generacji

Obliczenia dla wariantu II (skokowe zmiany generacji i obciążeń) wykonano przy następujących założeniach:

1. Całkowity czas trwania symulacji: 120 s. Przez pierwsze 60 s system zarządzania siecią nN był wyłączony (przebieg odniesienia), a przez kolejne 60 s system był aktywny (wykonywał działania zmierzające do eliminacji zaburzeń).
2. Przyjęto identyczny profil generacji PV dla każdego prosumenta. Moce znamionowe przekształtników 1-fazowych instalacji PV wynosiły 4 kWp przy $\cos\varphi = 1$, przekształtniki podłączono do faz L2 i L3.
3. W ciągu 120 sekund symulacji generacja PV zmieniała się 6-krotnie skokowo od 0 do 1 [pu] zgodnie z przebiegiem prostokątnym.
4. Przyjęto identyczny profil obciążenia dla każdego odbiorcy i prosumenta. Moce fazowe odbiorników wynosiły: 3 kW w fazie L1 oraz 1 kW w fazach L2 i L3 przy współczynniku mocy $\text{tg}\varphi = 0,4$.
5. W ciągu 120 sekund symulacji, obciążenie zmieniło się 2-krotnie skokowo od 0 do 1 [pu] zgodnie z przebiegiem prostokątnym.
6. Moc znamionowa przekształtnika zasobnika zarządzanego przez system zarządzania siecią wynosiła 4 kVA na fazę.

Wyniki obliczeń dla wariantu II przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki obliczeń przy skokowych zmianach obciążeń i generacji (wariant I)

Opisy wyników obliczeń prezenrowanych na rysunku 4 są zgodne z opisami wyników dla wariantu I.

5. WNIOSKI

Dynamiczny rozwój źródeł odnawialnych w sieciach dystrybucyjnych stwarza nowe wyzwania dla operatorów, po stronie operacyjnej i technologicznej. Z drugiej strony rozwój technologii zasobnikowych oraz transformacja z sieci pasywnych w aktywne stwarzają możliwości sterowania siecią dystrybucyjną. To z kolei może przynieść wymierne korzyści zarówno dla operatora jak i dla prosumentów.

Problemem pozostaje możliwość testowania nowych usług, systemów zarządzania czy ewaluacja algorytmów sterowania, która w warunkach rzeczywistych jest trudna i kosztowna w realizacji. Między innymi dlatego autorzy opracowali symulator, który odwzorowuje wybraną rzeczywistą sieć dystrybucyjną (w miejscowości Stróża w województwie łódzkim).

W symulatorze został zaimplementowany autorski algorytm sterowania siecią (opis algorytmu nie wchodzi w zakres tej publikacji) wykorzystujący tzw. współczynniki wrażliwości napięć węzłowych na zmiany mocy czynnej i biernej. Działanie algorytmu przetestowano na symulatorze. Przeprowadzone badania pozwoliły na dopracowanie algorytmu i przetestowanie go w pełni kontrolowanych warunkach. Ponadto testy potwierdziły, że algorytm sterowania siecią nN:

1. Umożliwia utrzymanie wartości napięć na zadanym poziomie w trakcie zaburzeń wywołanych pracą źródeł odnawialnych i odbiorów. Zakres zmian napięć w węzłach, wywołany pracą zasobników, jest ściśle powiązany z ich liczbą i mocą znamionową.
2. Do regulacji napięć należy wykorzystywana zarówno moc bierną i czynną. Zaproponowany algorytm, w pierwszej kolejności, do korekcji napięć wykorzystuje moc bierną. Gdy obliczony efekt jest niewystarczający algorytm wprowadza do sterowania również moc czynną.
3. Po zaniku przyczyn zaburzenia następuje wyłączenia sterowania nadrzędnego (realizowanego przez sterownik centralny - CLE) i powrót do sterowania lokalnego (realizowanego przez sterownik lokalny – LLE).
4. Osiągnięcie wartości napięć na zadanym poziomie następuje po jednym kroku obliczeniowym. Ewentualne korekty nie przekraczają kilku procent wartości napięcia osiągniętej w pierwszym kroku.
5. Ponadto algorytm sterowania siecią nN umożliwia zmniejszenie asymetrii napięć. Jednak asymetria jest wskaźnikiem pomocniczym, dlatego w ogólnym przypadku nie ma możliwości całkowitej kompensacji asymetrii.

6. LITERATURA

1. Wniosek projektowy “Zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z uwzględnieniem aktywnej roli prosumenta”
2. Technical Manual. Introduction to PSCAD/EMTPDC. Manitoba HVDC Research Centre INC, March 31, 2000.
3. Instrukcja. „Instrukcja obsługi Inwerter fotowoltaiczny Wolta Star”, Spirvent

prof. dr hab. inż. Irena Wasiak

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

dr inż. Rozmysław Mieński

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

dr inż. Michał Szypowski

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

dr inż. Paweł Kelm

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

mgr inż. Michał Malaczek

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

mgr inż. Przemysław Urbanek

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

dr inż. Ryszard Pawelek

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

dr inż. Andrzej Wędzik

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

