



Politechnika Łódzka

Instytut Elektroenergetyki

Strategia sterowania elektroenergetycznym mikrosystemem niskiego napięcia umożliwiająca jego elastyczną pracę w trybie połączenia z siecią zasilającą i w trybie wyspowym

mgr inż. Michał Małaczek

Opiekun pracy

dr hab. inż. Irena Wasiak, prof. nadzw.



Instytut Elektroenergetyki

90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22, budynek A11
tel. 042 636 11 93, fax. 042 631 26 06, e-mail: i-15@adm.p.lodz.pl



Plan prezentacji

- Sformułowanie problemu, cel badań, teza pracy
- Metodyka i program badań
- Proponowana strategia sterowania
 - zakres stosowalności
 - założenia
 - algorytm sterowania przekształtnika zasobnika
 - mechanizmy regulacyjne
 - centralny regulator
- Badany mikrosystem
- Modelowanie i badania symulacyjne
- Badania eksperymentalne w rzeczywistym układzie
- Wnioski końcowe i plan dalszych badań
- Publikacje





Sformułowanie problemu

- Rosnąca liczba rozproszonych źródeł energii przyłączanych poprzez przekształtniki energoelektroniczne
- Zmiana charakteru sieci pasywnych na aktywne.
- Umożliwienie pracy wyspowej sieci aktywnych, w celu zwiększenia niezawodności zasilania odbiorców.
- Obowiązujące akty prawne nakładające obowiązek wyłącznie źródła energii w wyniku wystąpienia zakłócenia w SEE;
- Brak odpowiedniego sterowania pracą urządzeń w sieciach aktywnych, pozwalającego na wykorzystanie możliwości pracy wyspowej w celu zwiększenia niezawodność zasilania odbiorców.





Cel badań



1. Opracowanie koncepcji systemu sterowania, jaki można by zastosować do istniejącej sieci aktywnej niskiego napięcia ze źródłami energii i zasobnikiem dla umożliwienia utworzenia mikrosystemu i uzyskania zdolności do pracy wyspowej, przy założeniu, że struktura sieci jak i sposób sterowania źródeł energii nie ulega zmianie. System powinien umożliwiać przejście na pracę wyspową w sytuacji nadmiernego obniżenia napięcia zasilającego lub też innego zakłócenia parametrów jakości energii w sieci zasilającej.
2. Określenie strategii i opracowanie algorytmów sterowania dla mikrosystemu umożliwiających elastyczną pracę zarówno w połączeniu z siecią zasilającą, jak i w trybie wyspowym.





Teza pracy

Zastosowanie układu o zmiennej strukturze do sterowania zasobnikiem energii w mikrosystemie elektroenergetycznym, w połączeniu z implementacją centralnego regulatora (CR) oraz mechanizmów kontroli rezerwy mocy i energii zasobnika, umożliwia elastyczną pracę mikrosystemu zarówno w trybie połączenia z siecią zasilającą, jak i w trybie wyspowym oraz bezprzerwowe przejście pomiędzy nimi, bez ingerencji w sposób sterowania pracą źródeł energii.





Metodyka i program badań

- Analiza urządzeń generacji rozproszonej, sposobów ich przyłączenia do sieci zasilającej oraz stosowanych algorytmów sterowania pracą tych urządzeń (na podstawie literatury).
- Badanie funkcjonalności źródeł i zasobników energii sterowanych według różnych algorytmów na prostych modelach symulacyjnych zbudowanych w programie PSCAD/EMTDC.
- Sformułowanie założeń oraz wymagań dla układu sterowania stanowiących punkt wyjścia do opracowania koncepcji układu.
- Zaproponowanie strategii sterowania mikrosystemem i algorytmów sterowania urządzeniami.





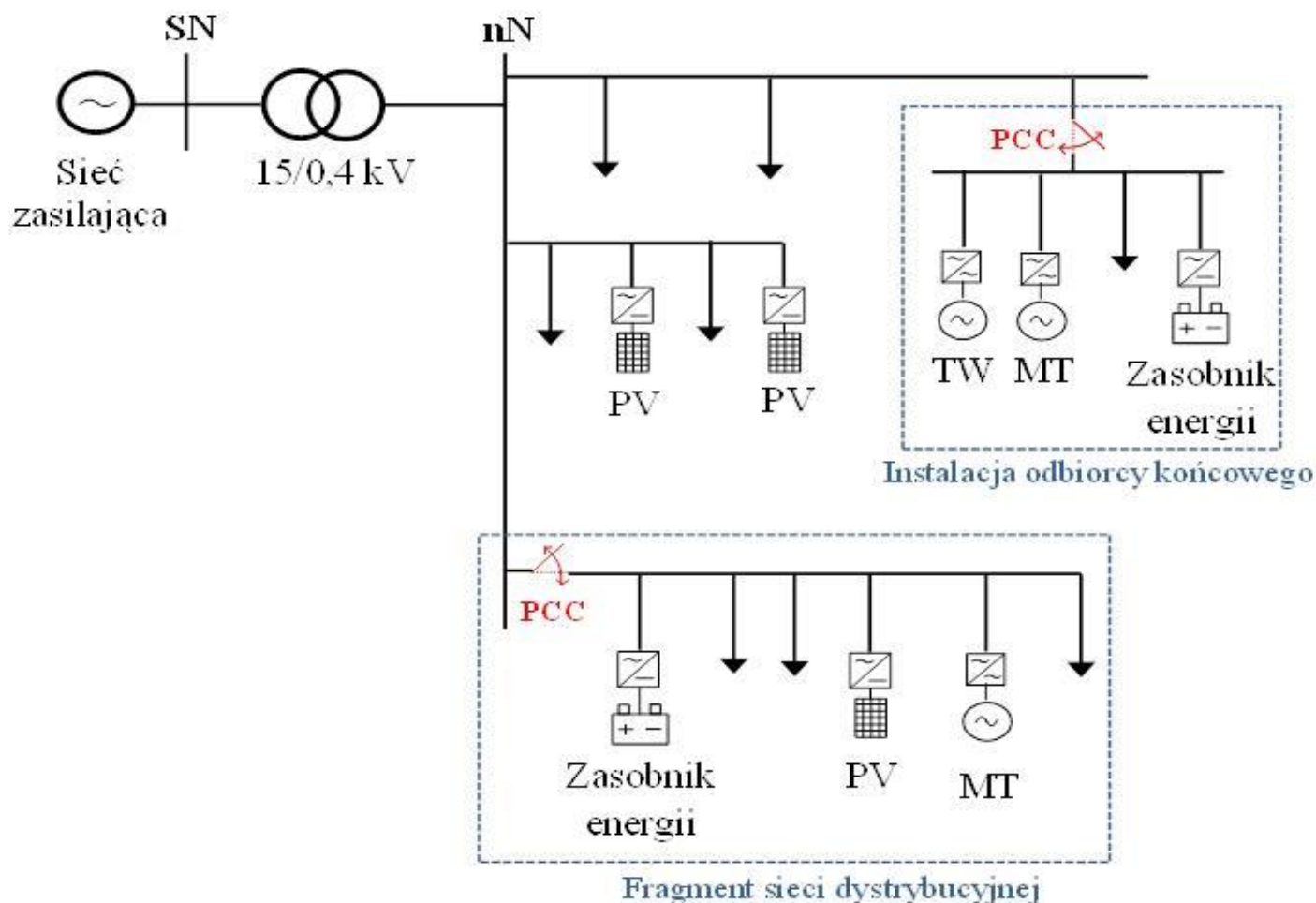
- Opracowanie, uruchomienie i zweryfikowanie modelu symulacyjnego rozpatrywanego układu w środowisku PSCAD/EMTDC,
- Przeprowadzenie badań testujących prawidłowość opracowanego systemu sterowania za pomocą symulatora,
- Przeprowadzenie badań eksperymentalnych w Laboratorium Generacji Rozproszonej Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego **RTDS** (ang. Real Time Digital Simulator).
- Podsumowanie i wnioski.





Proponowana strategia sterowania – zakres stosowalności – *klasa układów*

Przykładowa struktura układów, dla których dedykowana jest proponowana strategia sterowania.





Proponowana strategia sterowania – założenia

- Podstawowym trybem pracy mikrosystemu jest praca w połączeniu z siecią zasilającą.
- Struktura układu, jak i sposób sterowania źródeł energii nie ulegają zmianie.
- Rozpatrywany mikrosystem jest wyposażony w układ pomiarowy zdolny do akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych.
- Instalowanie dodatkowych urządzeń nie jest przewidziane.
- W sytuacji wystąpienia zaburzenia w sieci nadrzędnej, którego efektem jest znaczne obniżenie jakości energii elektrycznej, rozpatrywany mikrosystem zostaje odłączony od sieci i przechodzi do pracy wyspowej.
- Praca w trybie wyspowym trwa do momentu, aż zaburzenie zostanie usunięte, bądź samoistnie przeminie.





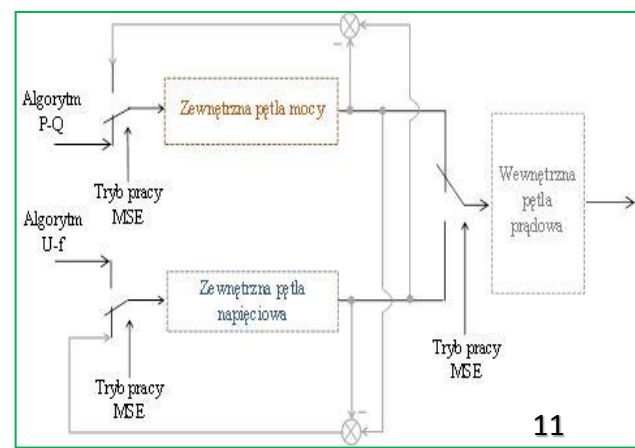
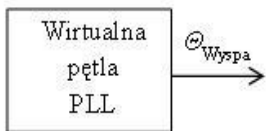
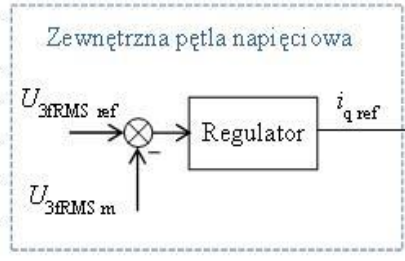
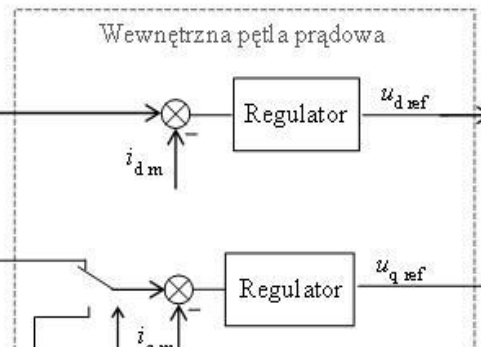
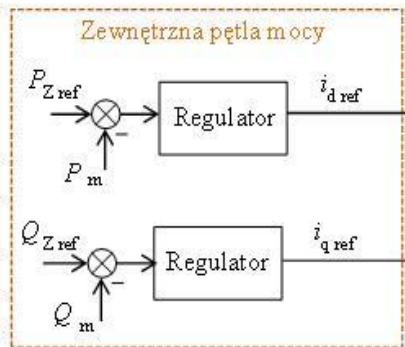
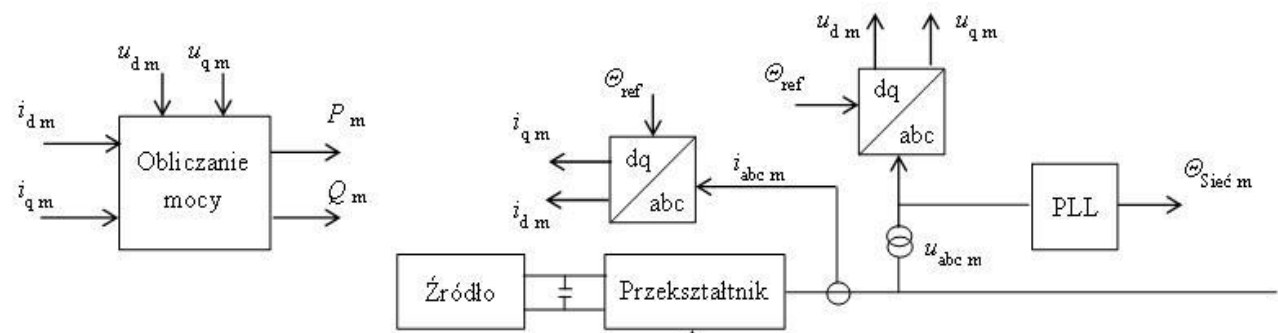
Proponowana strategia sterowania

- W trakcie pracy w połączeniu z siecią zasilającą źródła energii oraz zasobnik pracują jako źródła prądowe, według strategii P-Q. Zasobnik ogranicza mocy wymiany z siecią nadrzędną do zadanej wartości.
- Strategia sterowania dla pracy wyspowej – SMO (ang. *Single Master Operation*). Źródłem napięcia referencyjnego jest zasobnik energii (sterowanie U-f). Źródła energii pracują jako źródła prądowe, bez zmiany sterowania.
- Przejście na pracę wyspową odbywa się na podstawie krzywej odporności wyznaczonej dla rozpatrywanego układu, tzw. ang. *immunity curve*.



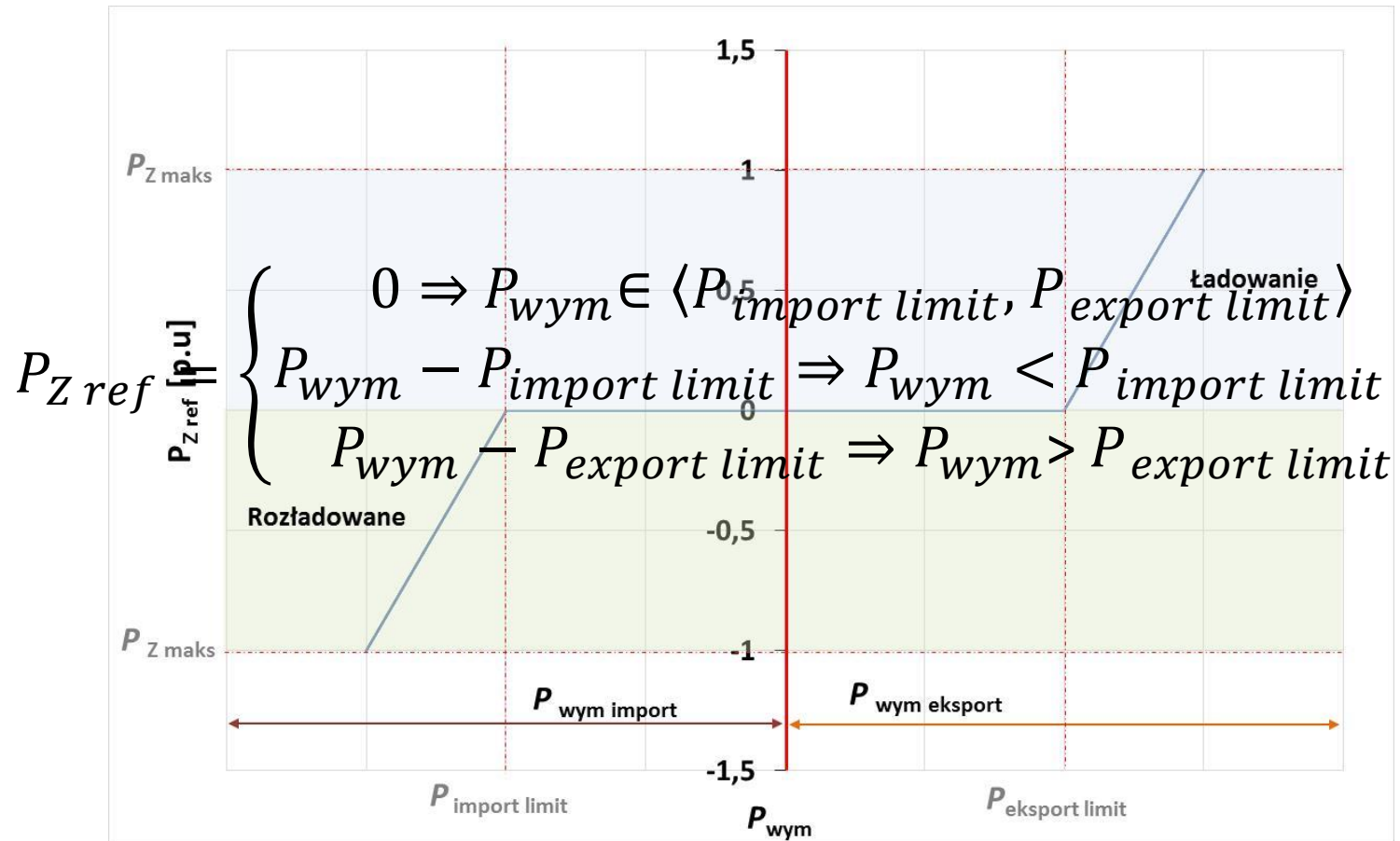


Proponowana strategia sterowania – algorytm sterowania przekształtnika zasobnika energii





Proponowana strategia sterowania – mechanizm kontroli mocy wymiany P_{wym} z siecią zasilającą



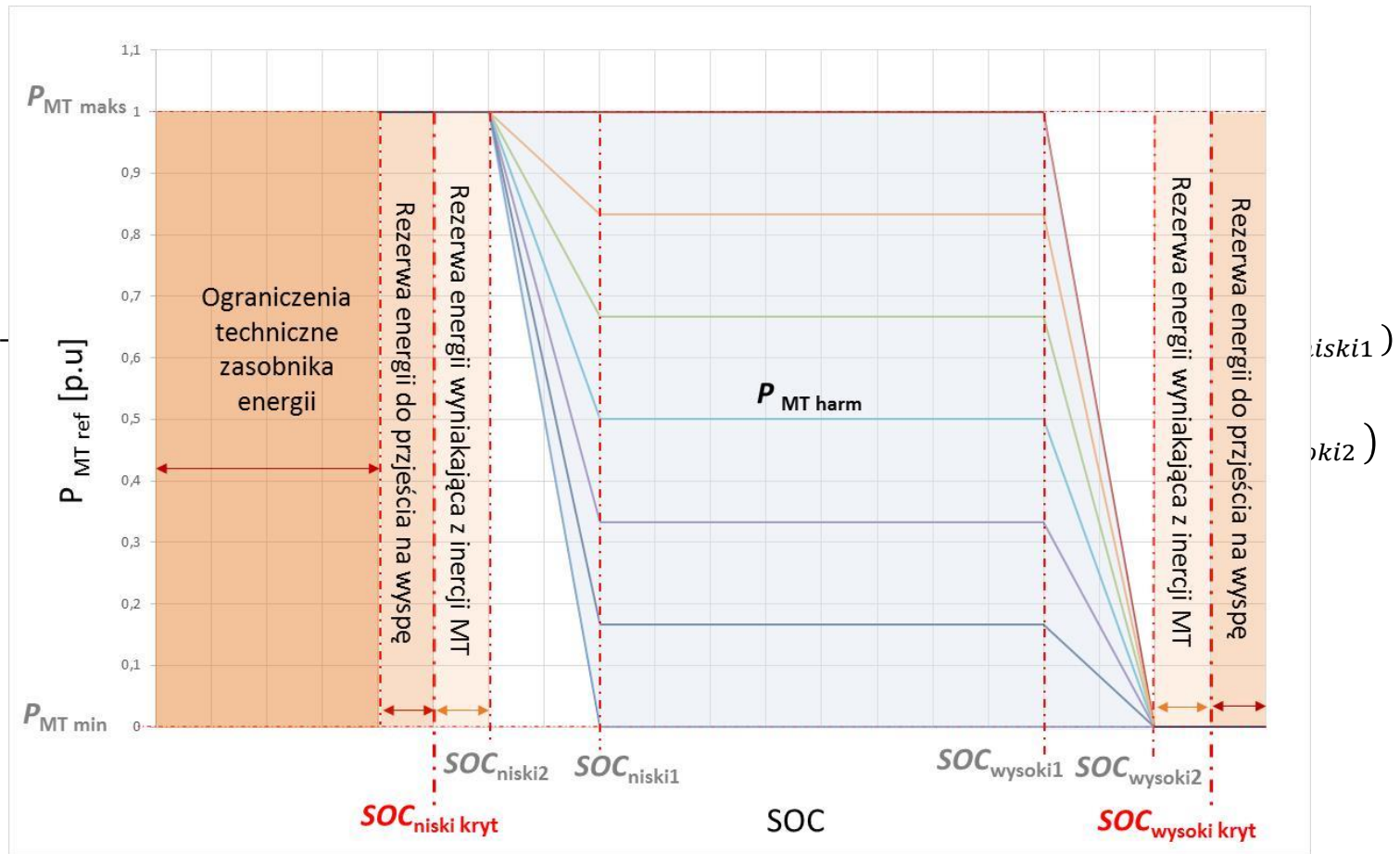
Charakterystyka regulacyjna zasobnika





Proponowana strategia sterowania – mechanizm kontroli SOC zasobnika

$$P_{MT\ ref} = \left\{ \begin{array}{l} P_{MT\ maks} \\ P_{MT\ ref} \\ P_{MT\ min} \end{array} \right.$$

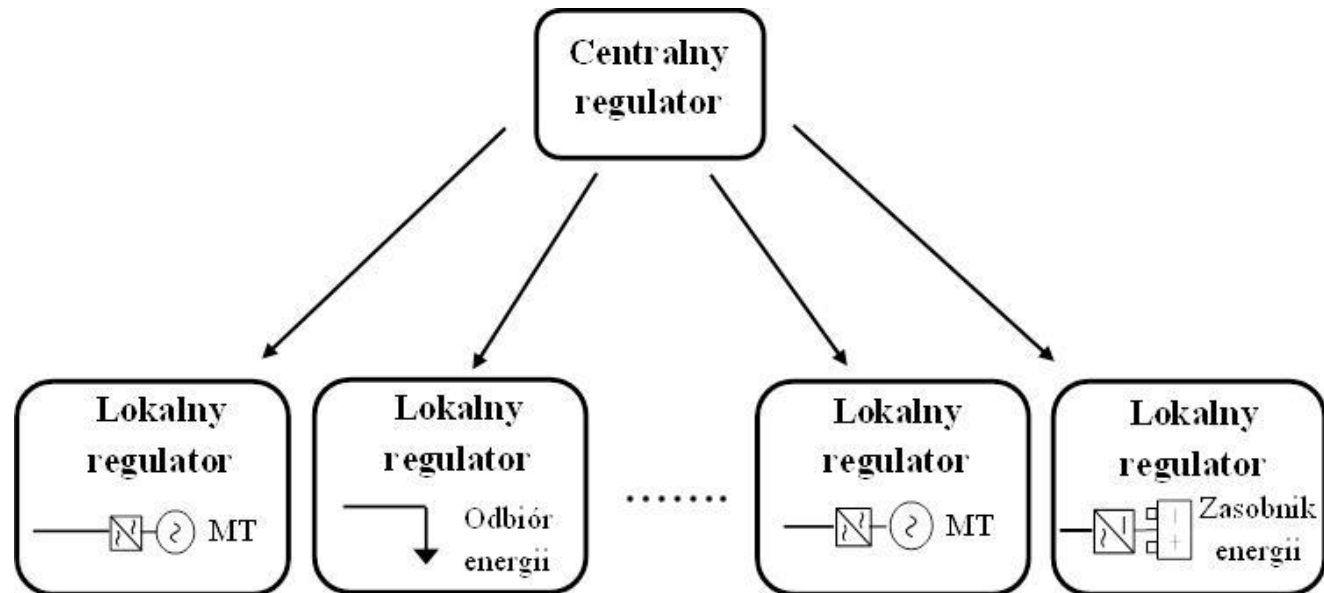


Charakterystyka regulacyjna mikroturbiny



Proponowana strategia sterowania

Hierarchiczna strategia sterowania: regulator centralny, regulatory lokalne urządzeń. Centralny regulator nadzoruje pracę całego mikrosystemu oraz wyznacza nastawy dla regulatorów lokalnych.





Proponowana strategia sterowania – CR

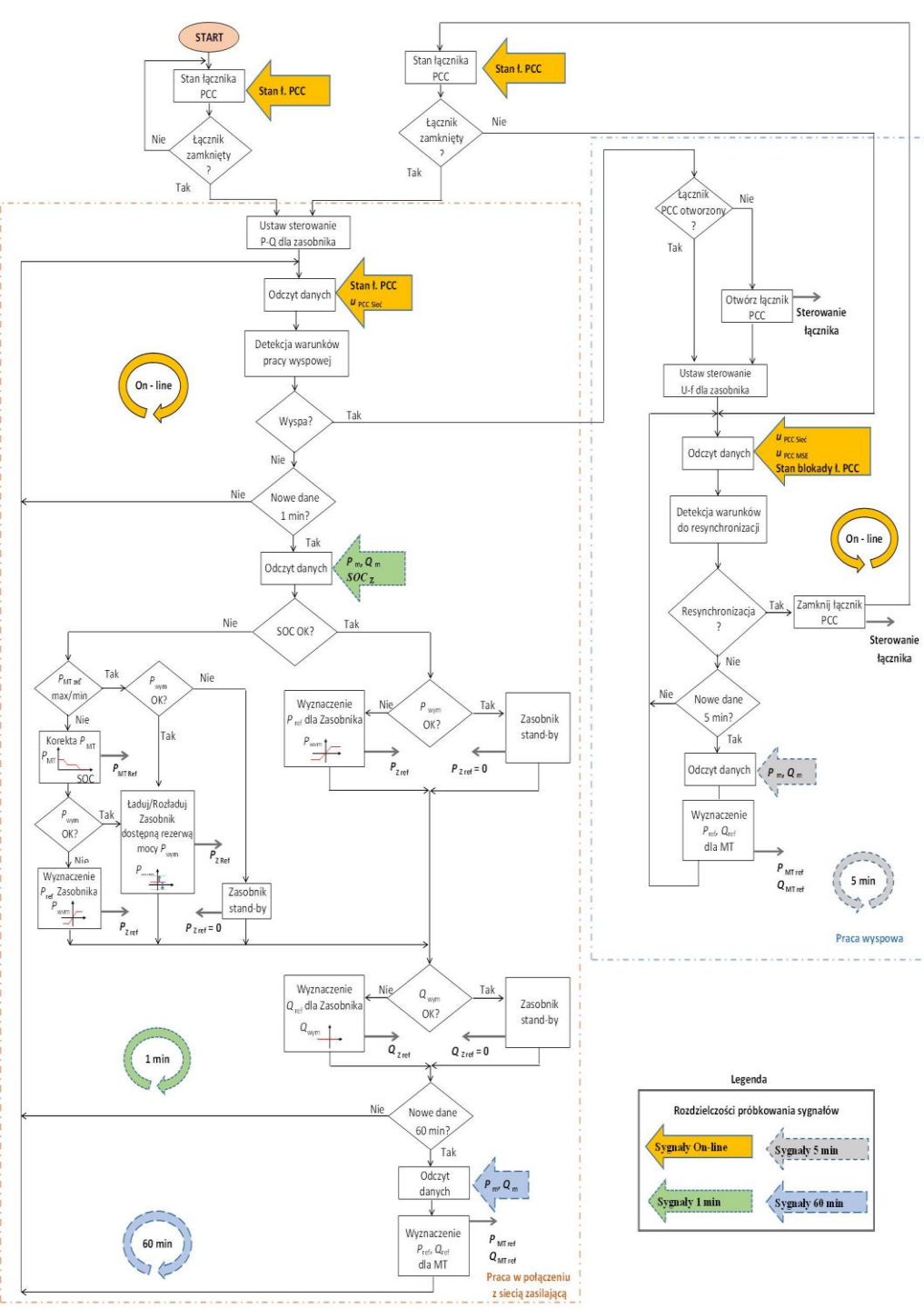
Funkcje pełnione przez Centralny Regulator:

- określanie referencyjnych wartości mocy czynnej P_{ref} i biernej Q_{ref} dla mikroturbiny i zasobnika energii w trakcie pracy w połączeniu z siecią;
- zmiana strategii sterowania zasobnika z P-Q (praca w połączeniu z siecią) na U-f (praca autonomiczna);
- identyfikacja warunków do przejścia na pracę wyspową oraz przeprowadzenia procesu resynchronizacji;
- wyznaczenie zadanych wartości mocy czynnej P_{ref} i biernej Q_{ref} dla mikroturbiny w trakcie pracy autonomicznej;

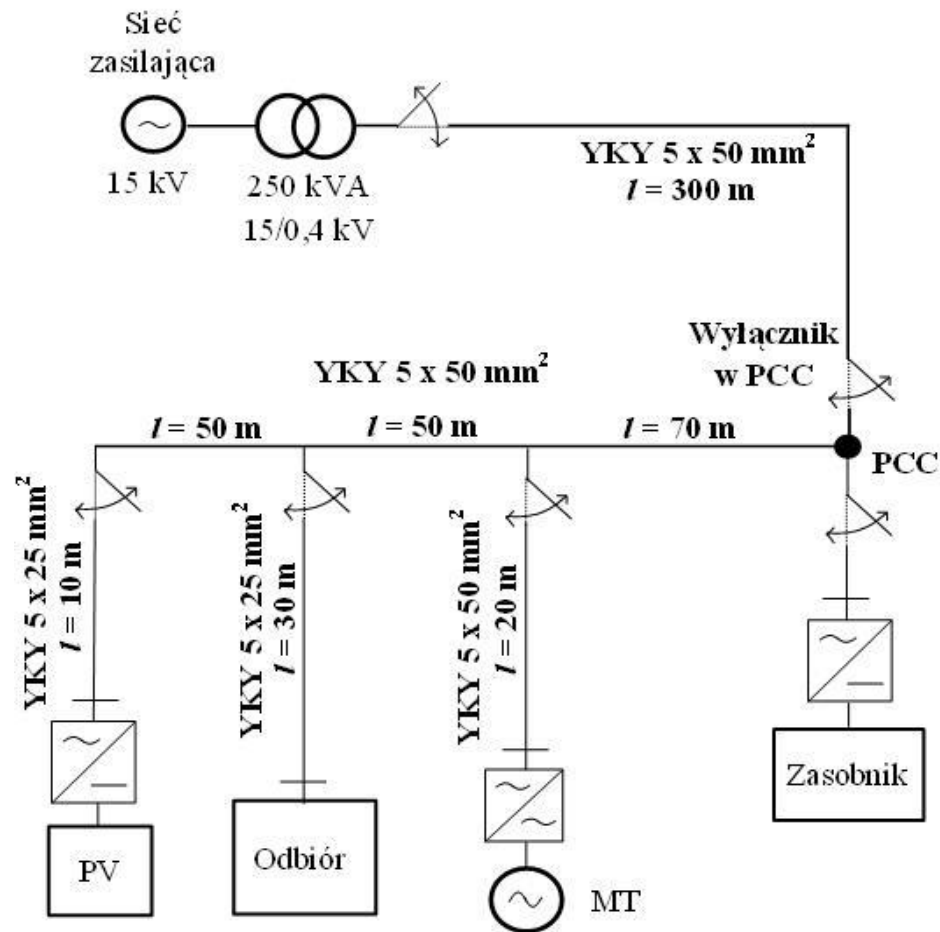


Proponowana strategia sterowania – CR

- Sygnalami wejściowymi do regulatora centralnego są :
- wartości chwilowe napięć po obu stronach łącznika w punkcie przyłączenia PCC,
 - moce czynne i bierne poszczególnych urządzeń w mikrosystemie,
 - stan łącznika w punkcie PCC,
 - sygnał mówiący o stanie blokady sterowania łącznika w punkcie PCC

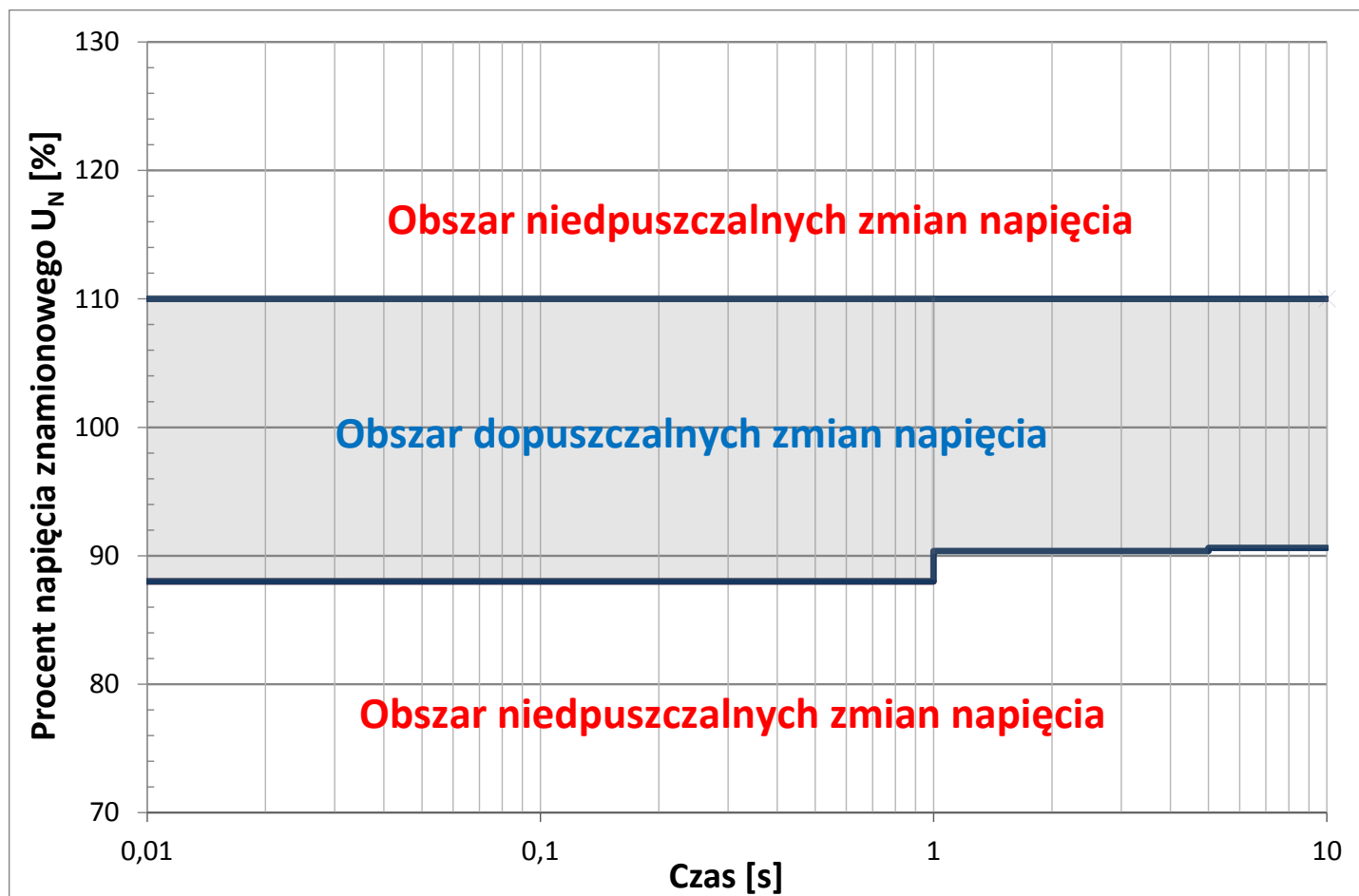


Badany układ



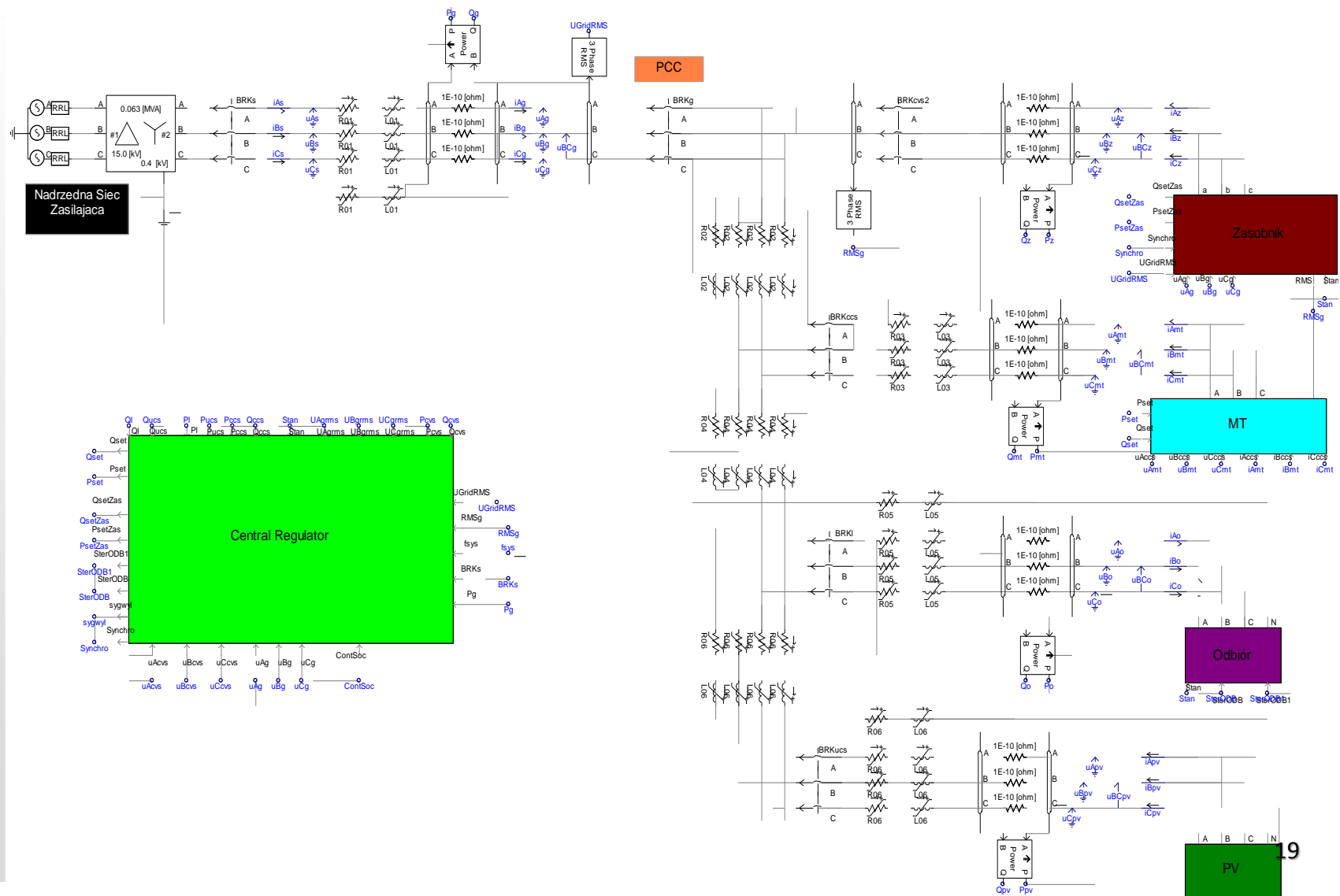


Charakterystyka odporności analizowanego układu na zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego



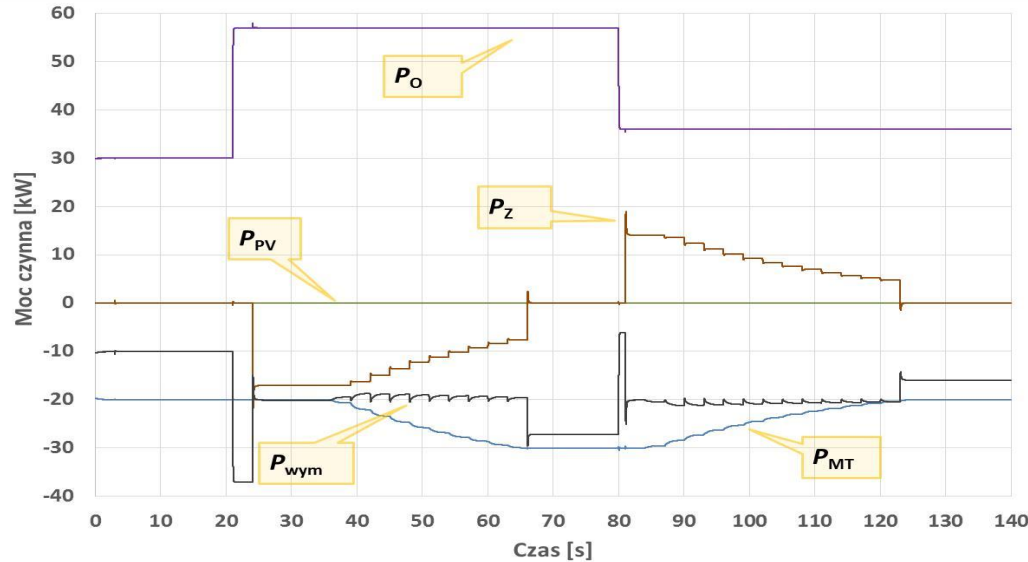


Model symulacyjny analizowanego układu utworzony w PSCAD/EMTDC





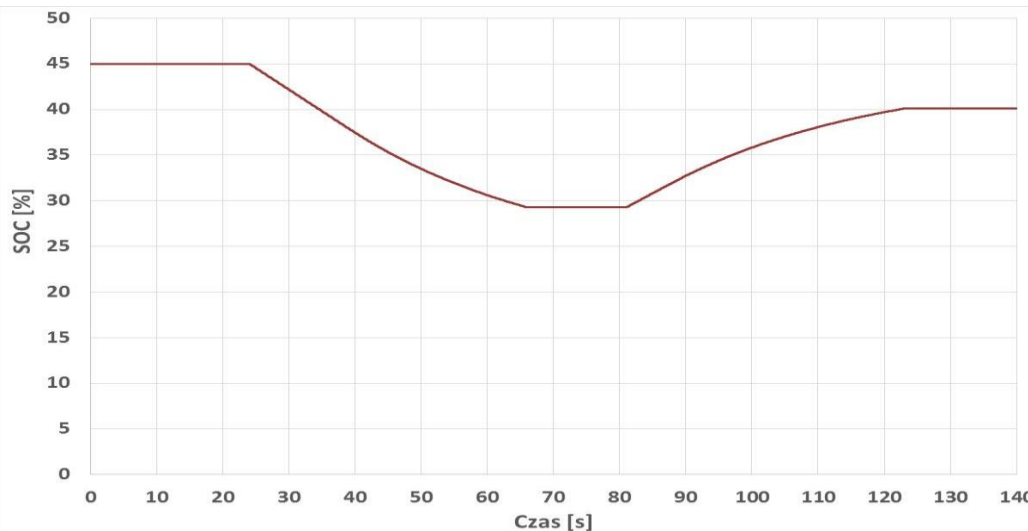
Badania symulacyjne – praca w połączeniu z siecią zasilającą



$$P_{wym} \in \langle -20, 20 \rangle \text{ kW}$$

$$SOC \in \langle 40, 80 \rangle \%$$

Przebieg mocy czynnej P w MSE



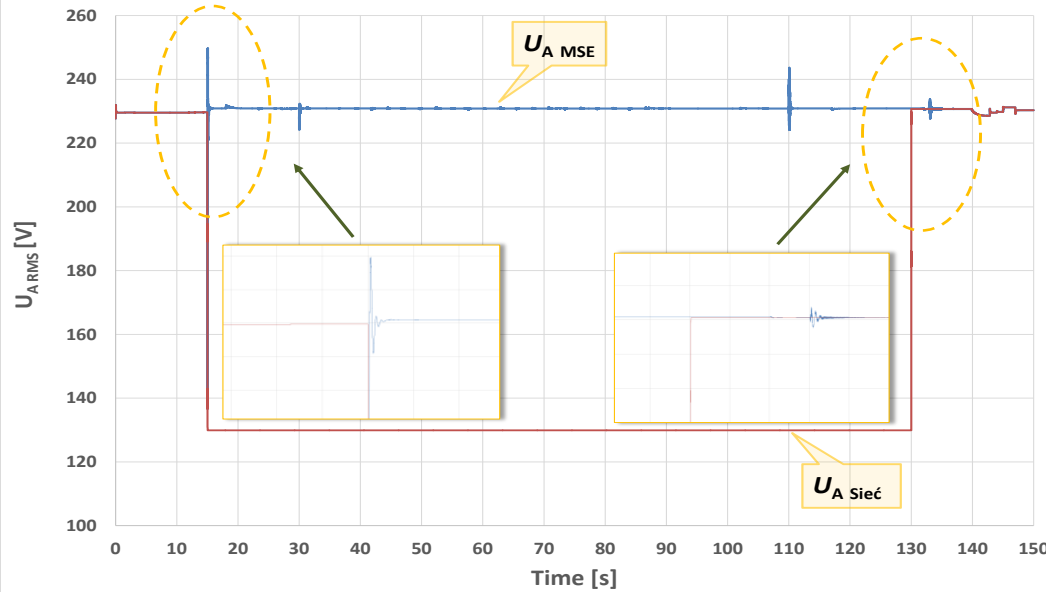
Stan naładowania zasobnika



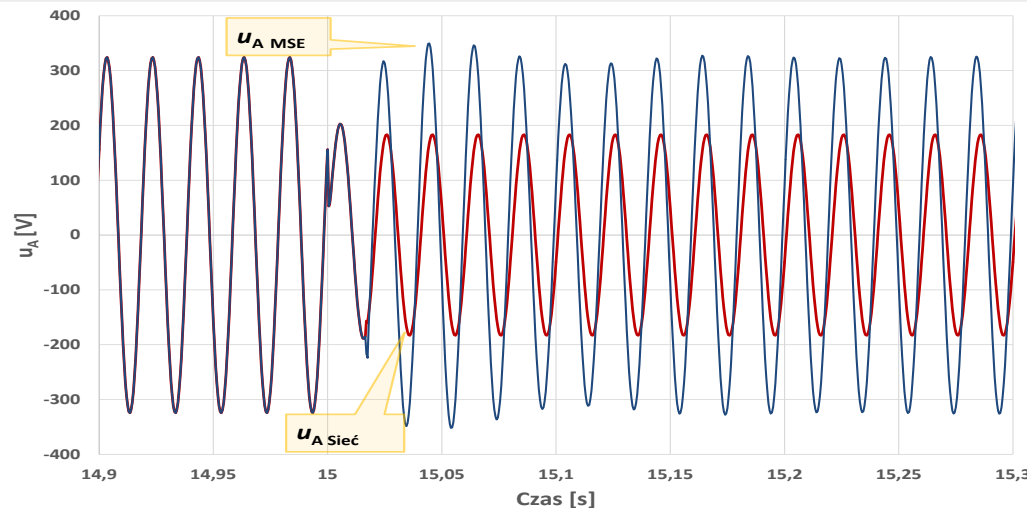


Badania symulacyjne

*praca w połączeniu z siecią zasilającą – przejście do pracy
wypowej – praca wypowa – resynchronizacja*



*Wartość skuteczna napięcia
w fazie A w punkcie PCC*



*Przebieg wartości chwilowej
napięcia w fazie A w punkcie PCC
w chwili przejścia MSE do pracy
wypowej*



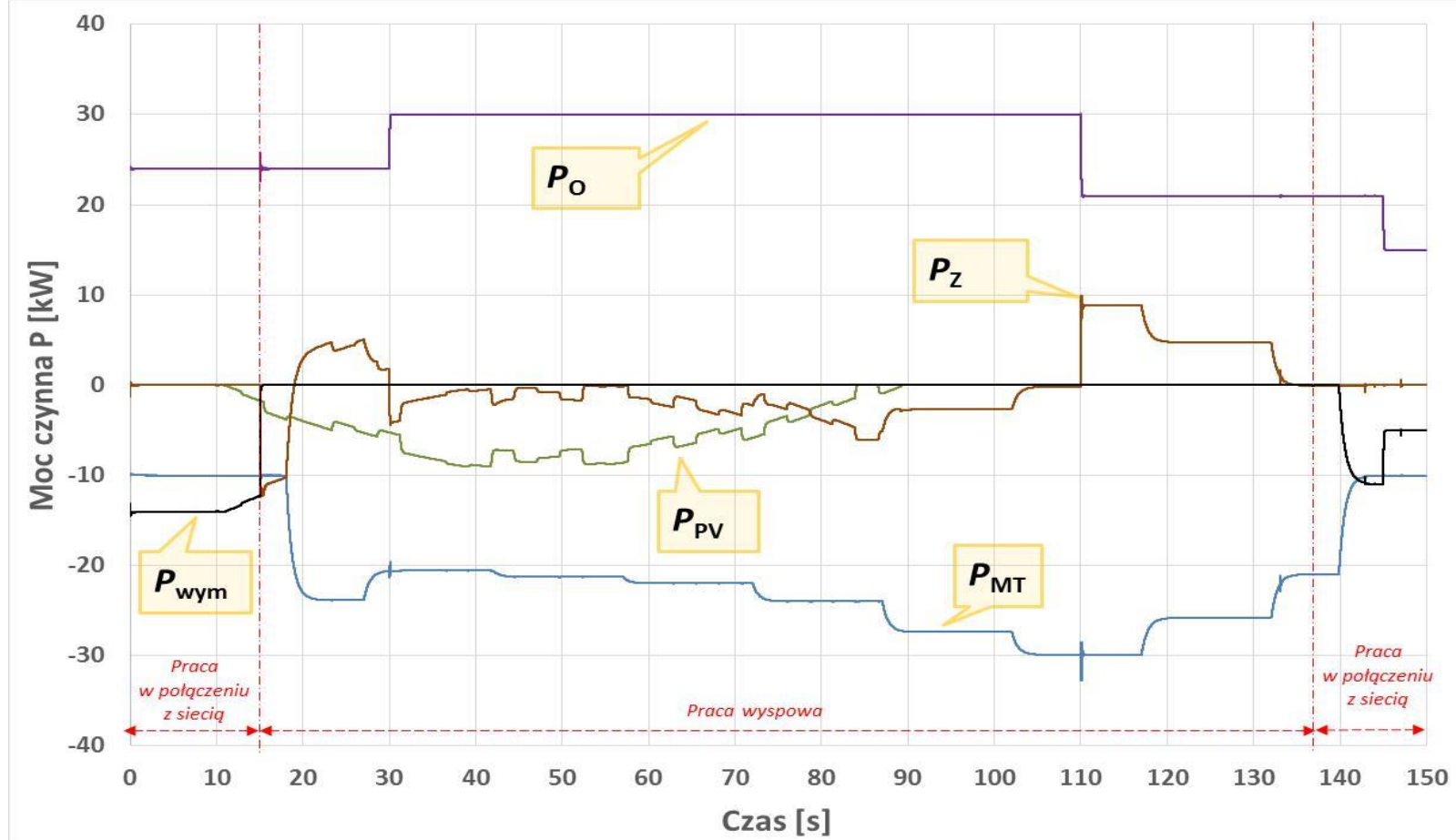


Politechnika Łódzka

Instytut Elektroenergetyki

Badania symulacyjne

*praca w połączeniu z siecią zasilającą – przejście do pracy
wyspowej – praca wyspowa – resynchronizacja*



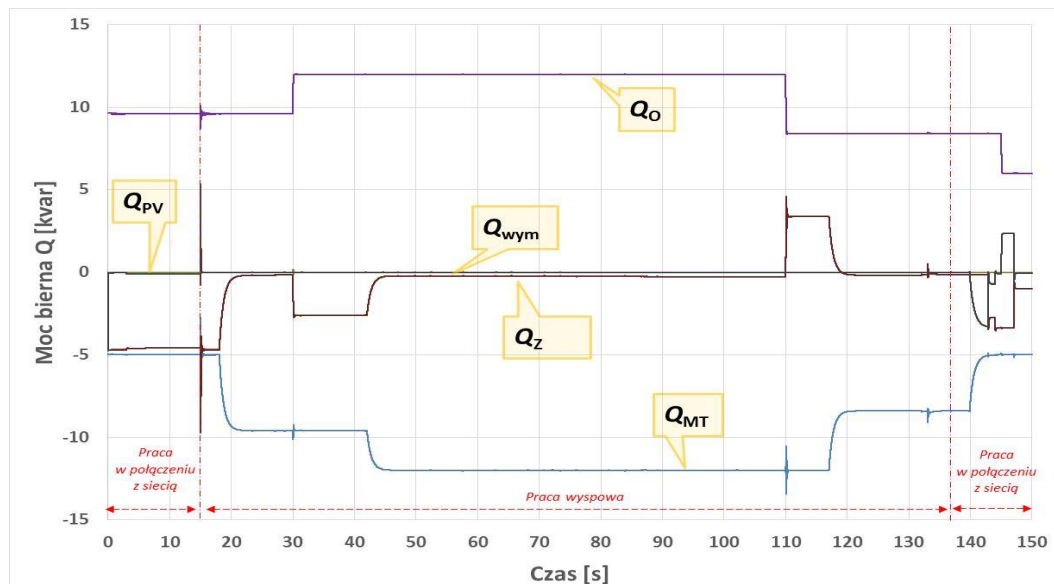
Przebieg mocy czynnej P w MSE



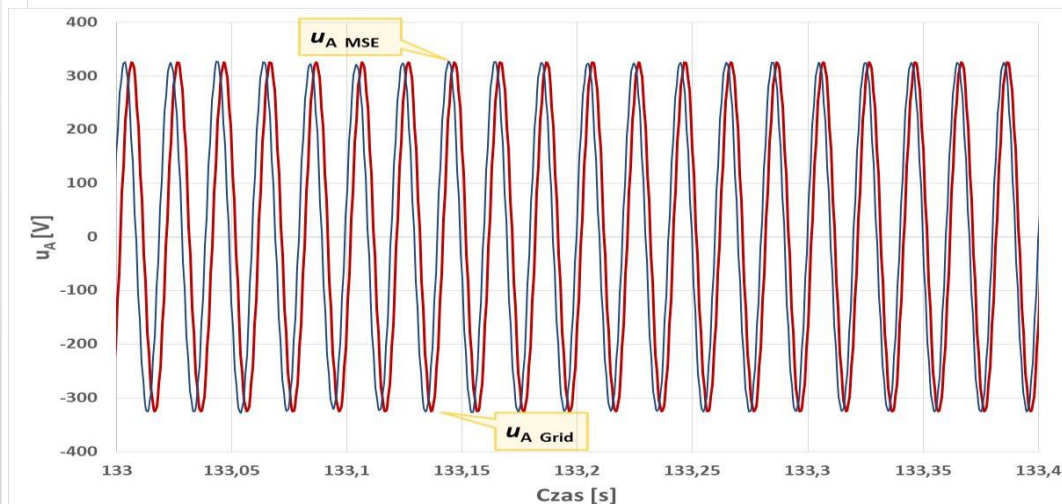


Badania symulacyjne

*praca w połączeniu z siecią zasilającą – przejście do pracy
wyspowej – praca wyspowa – resynchronizacja*



Przebieg mocy biernej Q w MSE



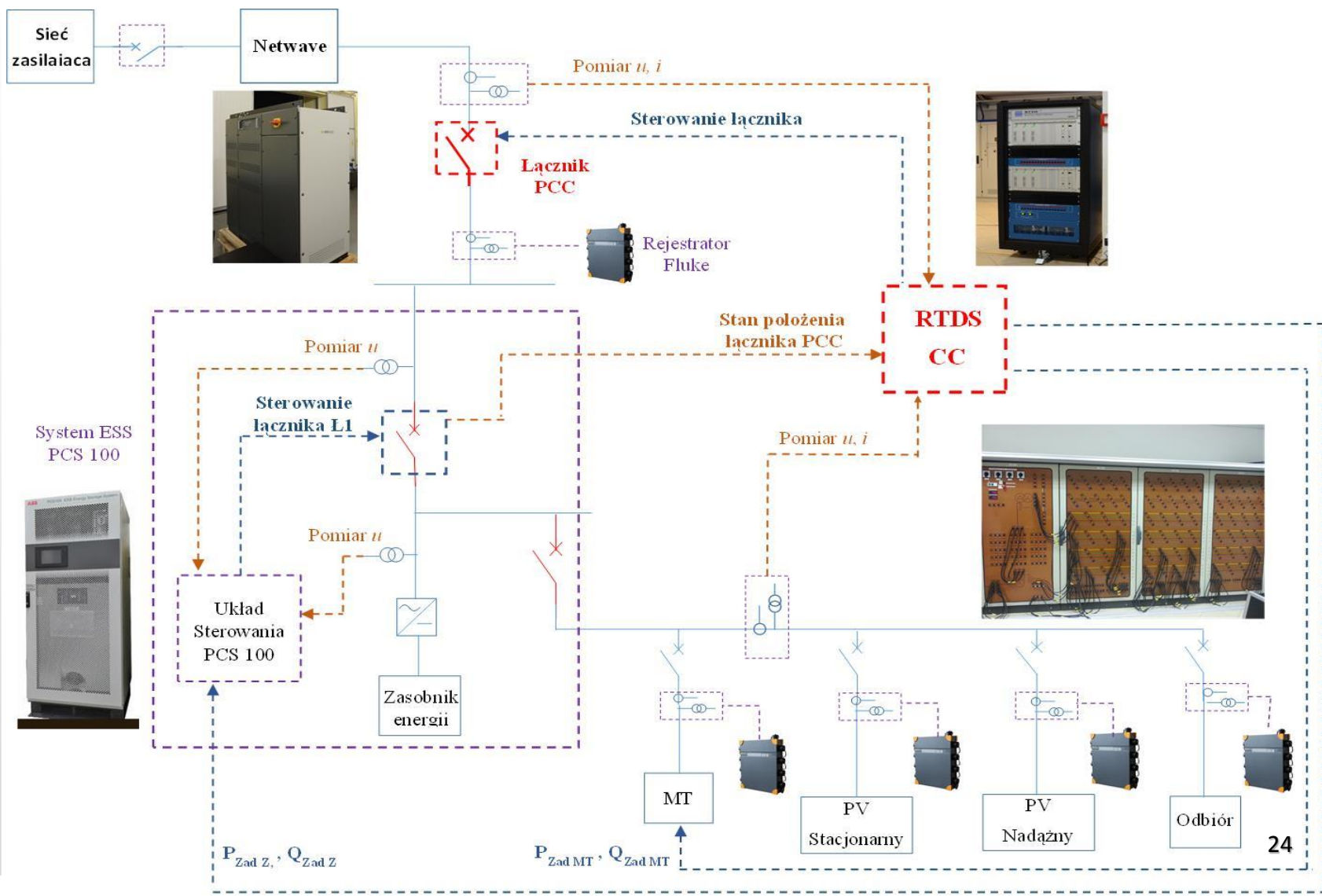
*Przebieg wartości chwilowej
napięcia w fazie A w punkcie PCC
w trakcie resynchronizacji*





Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki

Badania eksperymentalne – MSE utworzony w Laboratorium Generacji Rozproszonej PŁ





Badania eksperymentalne - struktura CR

Ze względu na brak możliwości ingerencji w wewnętrzne algorytmy sterowania poszczególnych urządzeń w rzeczywistym MSE struktura CR została zmodyfikowana. Poniżej przedstawiono dokonane modyfikacje:

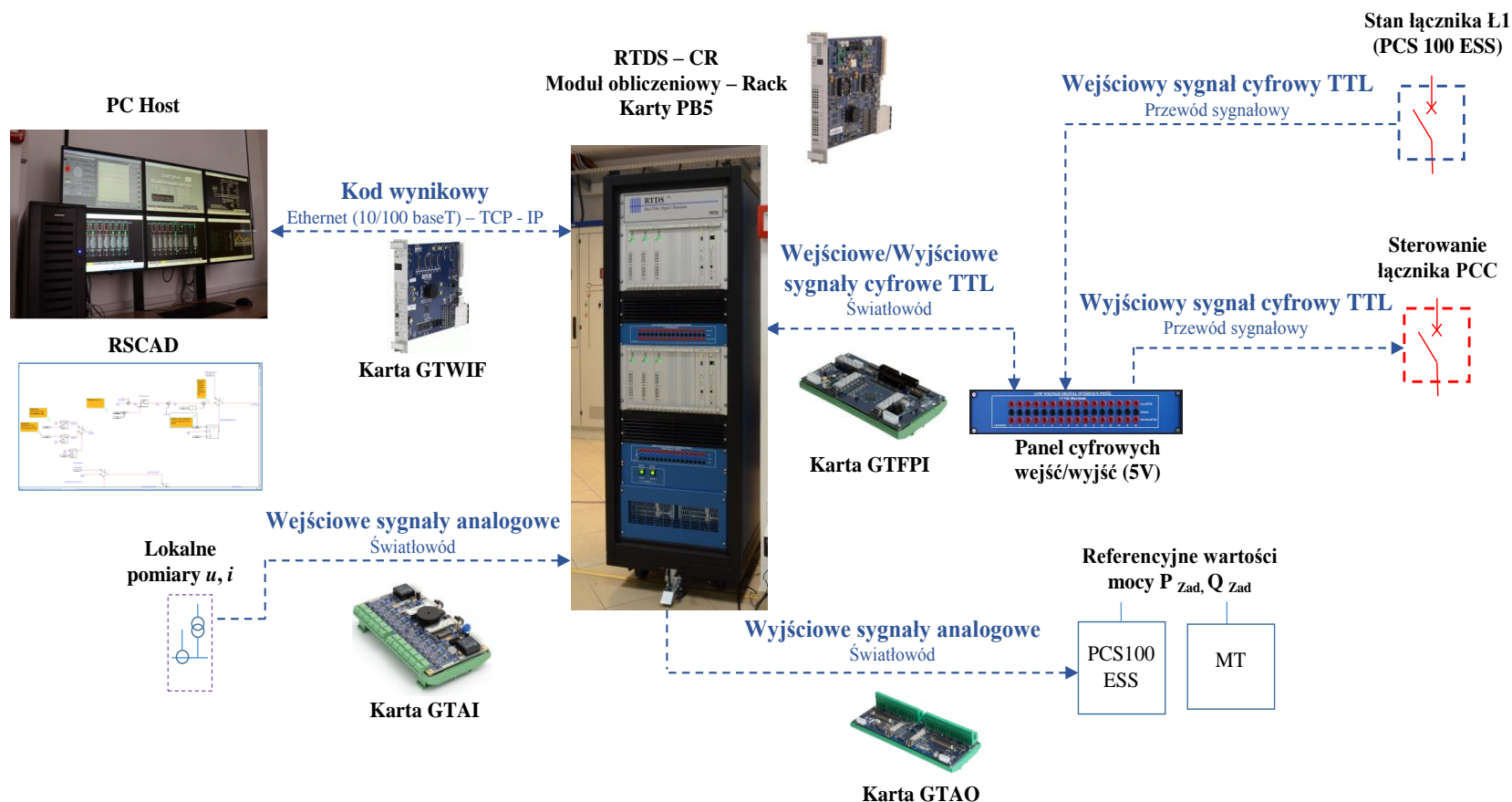
- zmiana trybu pracy przekształtnika zasobnika energii realizowana jest niezależnie od centralnego regulatora, przez wewnętrzny układ kontroli PCS 100 ESS, w oparciu o pomiar napięcia sprzed łącznika Ł1,
- proces resynchronizacji dokonywany jest automatycznie, niezależnie od CR, przez wewnętrzny układ kontroli PCS 100 ESS, po wykryciu powrotu napięcia zasilającego,
- centralny regulator dokonuje zmiany strategii sterowania MSE w oparciu o sygnał stanu łącznika Ł1.

Pozostałe mechanizmy oraz funkcjonalności CR, tj. kontrola mocy wymiany z siecią zasilającą, kontrola SOC zasobnika, detekcja warunków do pracy wyspowej i algorytm pracy wyspowej MSE realizowane są zgodnie z wcześniejszymi założeniami.



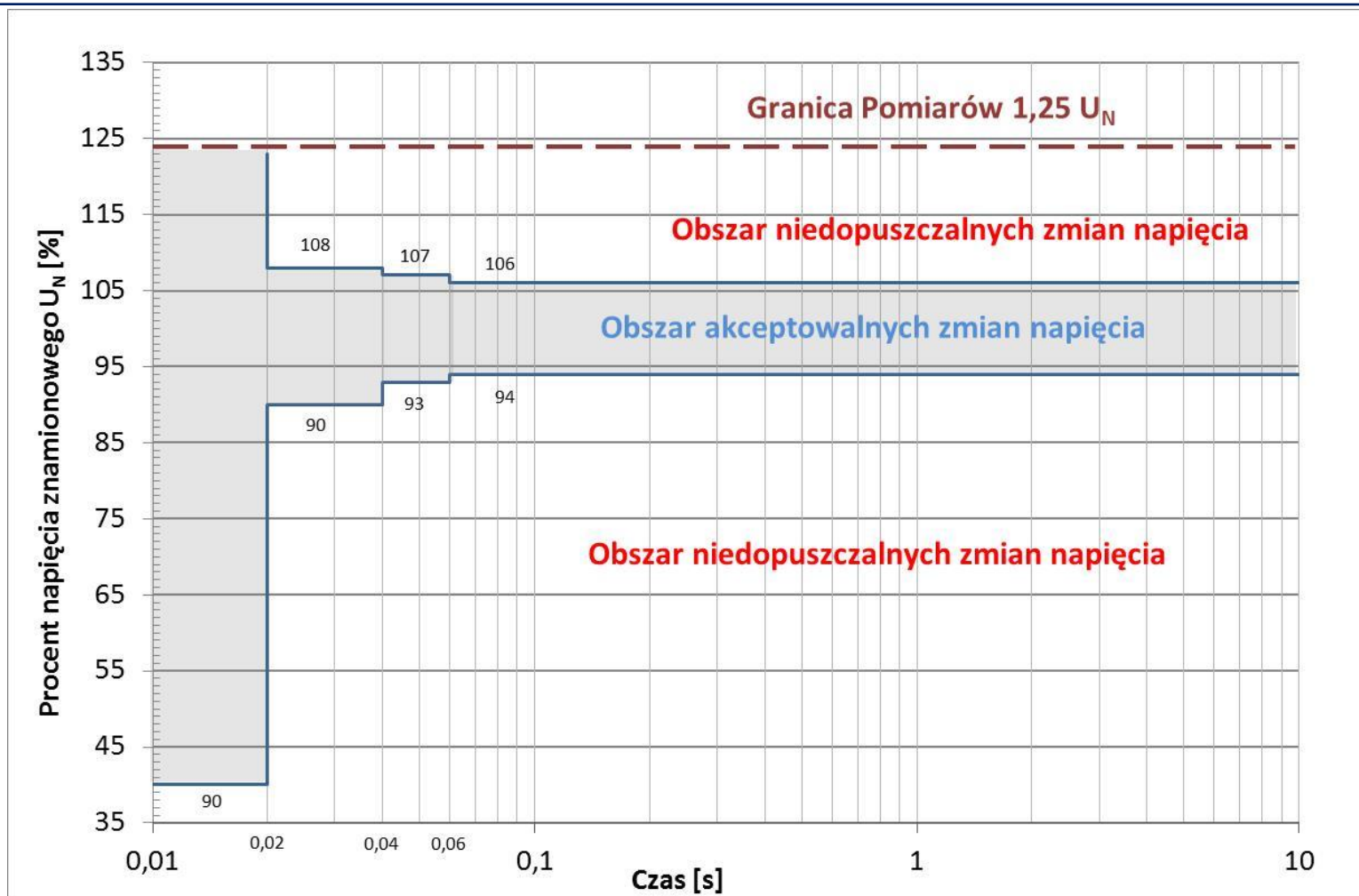
Badania eksperymentalne – Software in the Loop (SIL)

Software in the loop



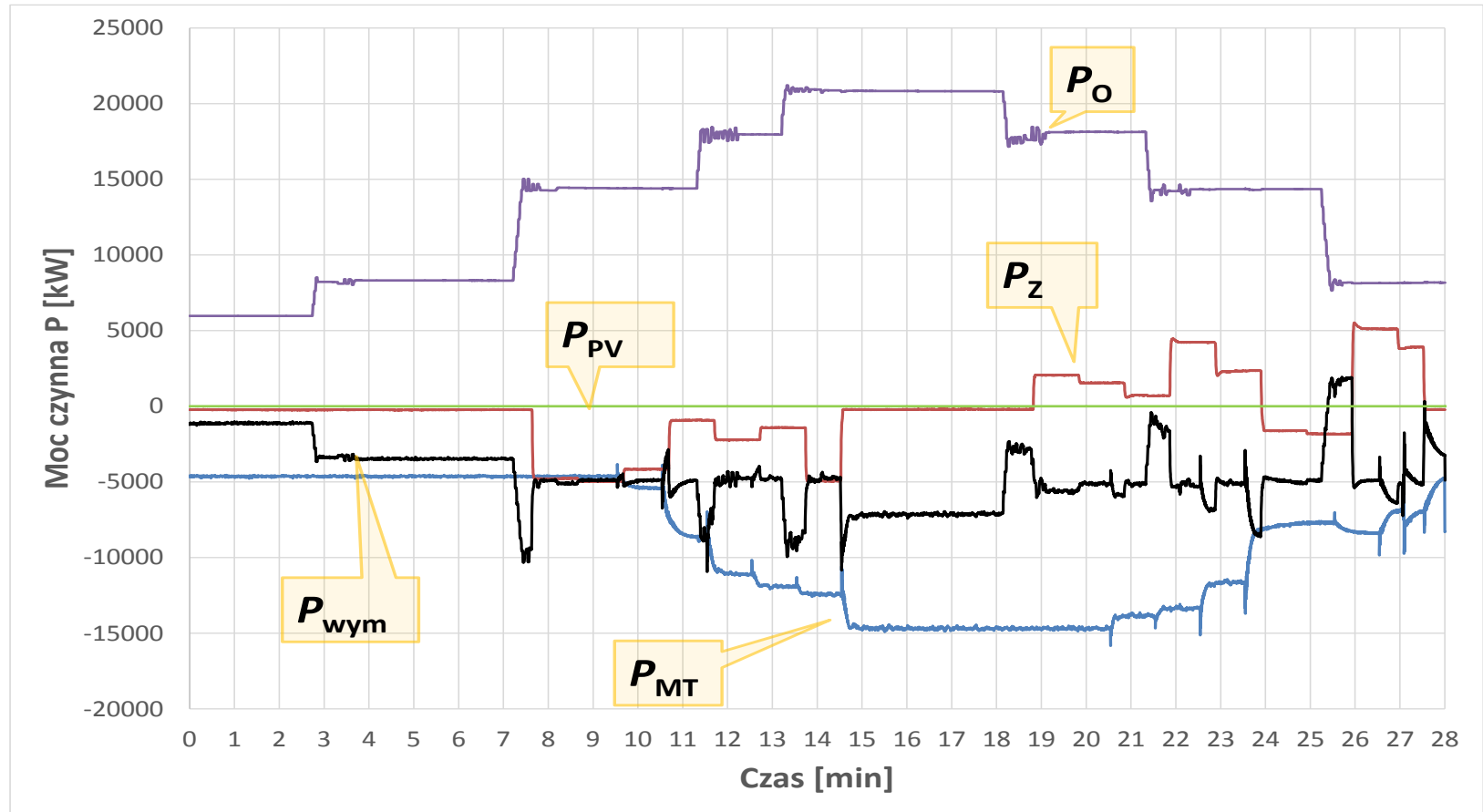


Charakterystyka odporności MSE na zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego





Badania eksperymentalne – praca w połączeniu z siecią zasilającą



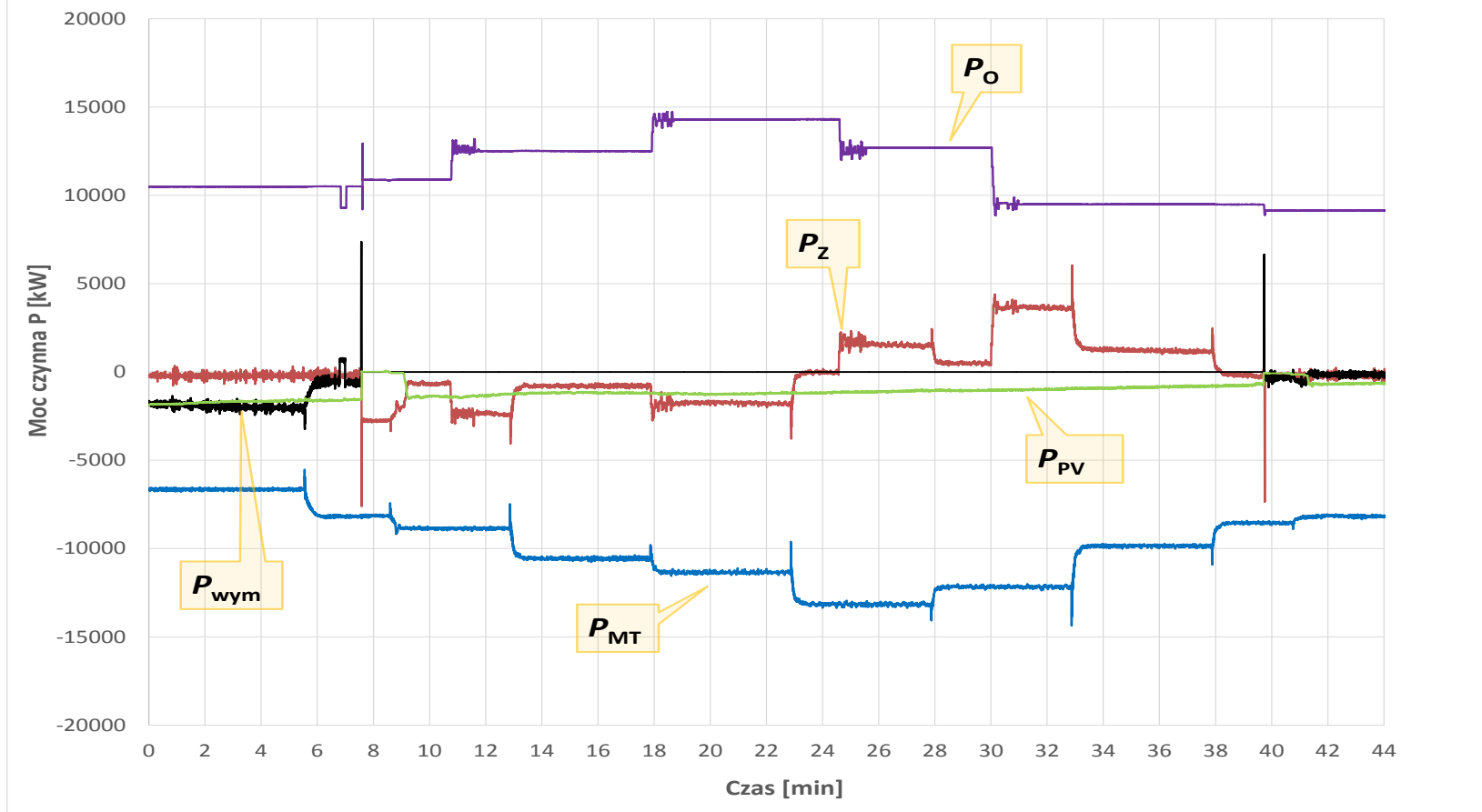
Przebieg mocy czynnej P MSE





Badania eksperymentalne

*praca w połączeniu z siecią zasilającą – przejście do pracy
wyspowej – praca wyspowa – resynchronizacja*



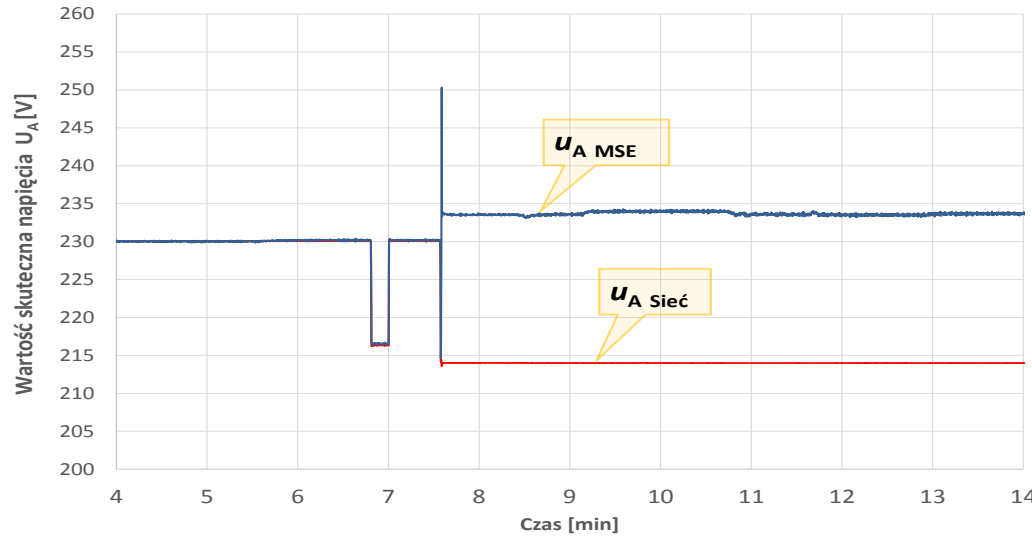
Przebieg mocy czynnej P w MSE



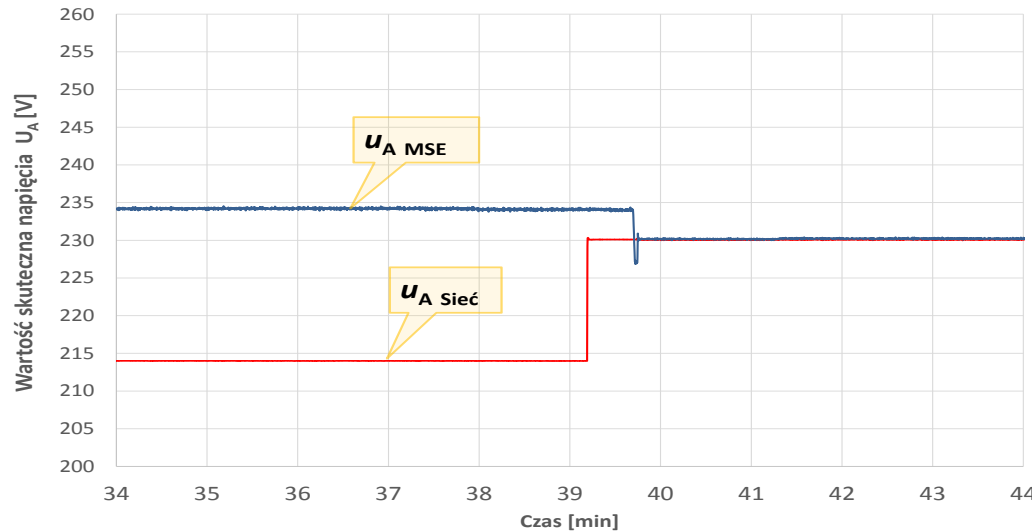


Badania eksperymentalne

praca w połączeniu z siecią zasilającą – przejście do pracy wypowej – praca wypowa – resynchronizacja



Przebieg wartości skutecznej napięcia w fazie A w punkcie PCC – przejście MSE do pracy wypowej



Przebieg wartości skutecznej napięcia w fazie A w punkcie PCC – powrót MSE do pracy w połączeniu z siecią zasilającą





Wnioski końcowe

- W pracy zaproponowano alternatywny sposób poprawy jakości zasilania odbiorców końcowych polegający na umożliwieniu intencjonalnej pracy wyspowej wydzielonego mikrosystemu, w sytuacji występowania zakłóceń w nadrzędnej sieci zasilającej.
- Opracowano strategię sterowania, która zapewnia bezprzerwową i elastyczną pracę mikrosystemu, zarówno w trybie pracy w połączeniu z siecią zasilającą, jak i w trybie pracy wyspowej.
- Założenia, jakie przyjęto przy opracowaniu strategii uwzględniają ograniczenia występujące w rzeczywistych sieciach aktywnych, tj. brak możliwości zmiany sterowania źródeł energii.
- Istotą proponowanej strategii jest zastosowanie dualnego sterowania zasobnikiem w mikrosystemie, z jednoczesnym wprowadzeniem mechanizmów wspomagających utrzymanie odpowiedniego poziomu rezerwy mocy i energii zasobnika.





Wnioski końcowe cd.

- Wprowadzenie centralnego regulatora umożliwia nadzór i koordynację sterowań poszczególnych urządzeń w zależności od warunków pracy mikrosystemu.
- W pracy przyjęto kryterium wartości skutecznej napięcia zasilającego na podstawie charakterystyki odporności, wyznaczonej dla analizowanego mikrosystemu. Należy podkreślić, że idea przejścia na pracę wyspową ma charakter ogólny i może odnosić się do dowolnego rodzaju zaburzenia napięcia zasilającego, które powinno być złagodzone lub całkowicie usunięte.
- Wyniki badań symulacyjnych oraz testów eksperymentalnych świadczą o prawidłowości proponowanej strategii sterowania oraz opracowanych algorytmów i mechanizmów regulacyjnych i potwierdzają postawioną tezę pracy.





Wnioski końcowe cd.

- Rezultaty otrzymane z obu etapów badań weryfikacyjnych są do siebie bardzo zbliżone, co świadczy o prawidłowości opracowanego modelu symulacyjnego i jego przydatności pod względem wykorzystania do analizy i oceny funkcjonowania mikrosystemów elektroenergetycznych niskiego napięcia w różnych trybach pracy.
- W oparciu o uzyskane wyniki można uznać, że zaproponowany układ sterowania mógłby zostać zaimplementowany w mikrosystemach elektroenergetycznych niskiego napięcia mieszczących się w klasie układów, dla których zdefiniowana została zaproponowana strategia sterowania.
- Zaprezentowane w niniejszej pracy doktorskiej działania, których celem była poprawa jakości i niezawodności zasilania odbiorców końcowych są zgodne z kierunkiem rozwoju współczesnych sieci dystrybucyjnych zmierzającym do realizacji koncepcji inteligentnych mikrosystemów elektroenergetycznych, tj. *Smart Grids*.





Plan dalszych prac

Badania przeprowadzone w niniejszej pracy mogą być kontynuowane w następujących kierunkach:

- sprawdzenie skuteczności opracowanej strategii sterowania w warunkach niesymetrii obciążenia w układzie,
- rozszerzenie funkcjonalności układu sterowania o mechanizm zrzutu obciążenia (ang. *load shedding*) aktywowany w trakcie pracy wyspowej w sytuacji braku możliwości zapewnienia bilansu mocy i energii w układzie,
- rozszerzenie strategii sterowania na mikrosystemy większej skali,
- rozszerzenie algorytmu detekcji pracy wyspowej mikrosystemu o kontrolę pozostałych parametrów napięcia zasilającego.





- M. Małaczek, I. Wasiak, R. Mienski, „**Improving quality of supply in small-scale low voltage active networks by providing islanded operation capability**”, IET Renewable Power Generation, artykuł przyjęty do druku, publikacja on-line: 02.08.2019r.
- M. Małaczek, I. Wasiak, „**Praca wyspowa jako środek poprawy jakości zasilania w sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną**”, zaprezentowano na Międzynarodowej Konferencji Power quality in distribution networks with distributed generation, Kijów (Ukraina) 4-5. 07. 2019r.
- M. Małaczek, I. Wasiak, R. Mienski, M. Szykowski, P. Kelm, P. Urbanek, „**Zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z uwzględnieniem aktywnej roli prosumenta**”, zaprezentowano na Międzynarodowej Konferencji Power quality in distribution networks with distributed generation, Kijów (Ukraina) 4-5. 07. 2019r
- M. Małaczek, I. Wasiak, „**Strategia sterowania mikrosystemem elektroenergetycznym niskiego napięcia zapewniająca jego elastyczną pracę w trybie połączenia z siecią zasilającą i w trybie wyspowym z wykorzystaniem zasobnika energii**”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 63, 2019r.
- M. Małaczek, I. Wasiak, „**Forming a microgrid to islanded operation as a mean to improve quality of supply in low voltage networks with distributed generation**”, ICHQP 2018, Lublana (Słowenia), Materiały konferencji dostępne w elektronicznej bazie IEEE Xplore Digital Library.
- M. Małaczek, I. Wasiak, „**Modeling of Energy Sources and Energy Storage devices for the Purpose of Analysis the Low voltage Microgrid Operation**”, Acta Energetica, Nr. 3 (32), 2017, ss. 162-169.
- M. Małaczek, I. Wasiak, „**Control strategy for flexible operation of small-scale LV microgrid based on energy storage utilization**”, zaprezentowano na Międzynarodowej konferencji YEEES Young ENergy Economists & Engineers Seminar, Łódź (Polska), 27/10/2017.
- M. Małaczek, I. Wasiak, „**Control of Low Voltage Microgrid in Autonomous Operation Mode**”, zaprezentowano na Międzynarodowej Konferencji EPNNet 2016, Szklarska Poręba, 2016. Materiały konferencji dostępne w elektronicznej bazie IEEE Xplore Digital Library.

