



ZAKŁAD POMIAROWO - BADAWCZY ENERGETYKI
„ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA” Sp. z o.o



**Prezentacja rozwiązań technicznych
ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o.**

**Konwersatorium Inteligentna Energetyka
Gliwice 25 maj 2021 roku**

**Systemy on/off grid z inteligentnymi transformatorami
SN/nN realizującymi funkcję terminala STD w
systemie (WSE).**

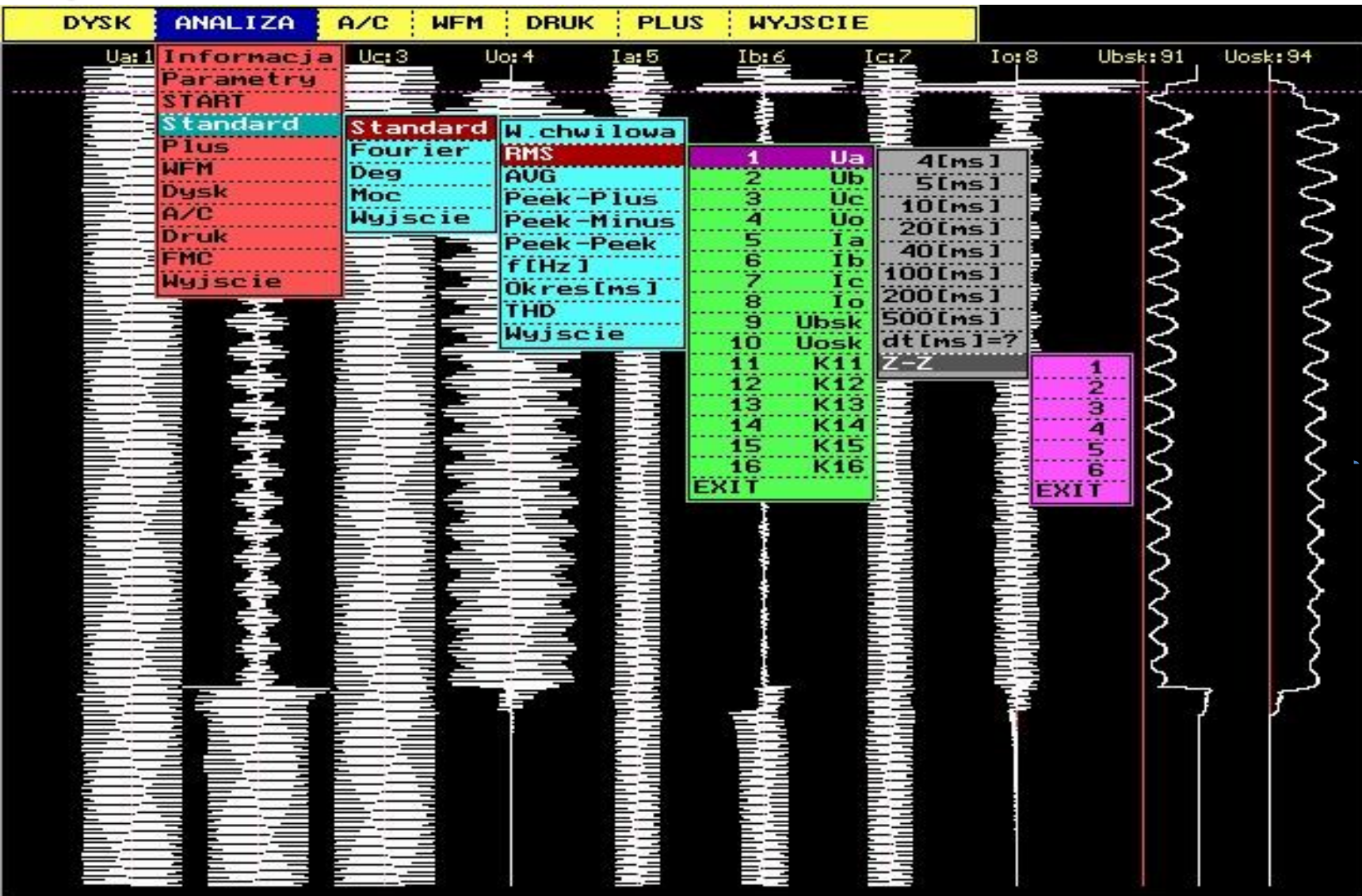
**Grzegorz Grzegorzycza
Jerzy Wrzosek
ZPBE Energopomiar-Elektryka**



Poniższa prezentacja jest kolejnym etapem prac rozpoczętych przez dr. inż. Jerzego Wojciechowskiego z ZPBE Energopomiar-Elektryka Gliwice, które zostały podjęte na zlecenie PSE S.A. po nieprecyzyjnym połączeniu linią 750kV Widełka-Chmielnicka systemów CENTREL i SEE krajów byłego ZSRR.

Zdarzenie miało miejsce w 1993 roku po przywracaniu układu do warunków pracy normalnej po pomyślnym zakończeniu prób realizowanych w ramach prac przygotowawczych do zbliżającego się **ogromnego przedsięwzięcia techniczno-organizacyjnego łączenia systemów CENTREL i UCPTE.**

Zwarcie jednofazowe na linii 750 kV (1991 rok). System SAS (1986 rok).



Perturbacje systemowe 750 kV (1993 rok)



Wstępna analiza zakłócenia wykazała i uświadomiła, że wykonane załączanie linii 750kV Widełka-Chmielnicka EA było klasycznym łączeniem asynchronicznie pracujących bardzo dużych systemów elektroenergetycznych. Linia 750kV Widełka-Chmielnicka EA w przeszłości była już wprawdzie wielokrotnie łączona przez dyżurnych SE Widełka ale wyłącznie w trybie domykania pierścienia synchronicznie pracujących systemów (przy załączonej linii 750kV Zapadoukrajńska-Albertirsa na Węgrzech zapewniającej synchroniczne połączenie obydwu systemów elektroenergetycznych).

W omawianym dniu linia węgierska 750kV wyjątkowo nie pracowała i łączenie w SE Widełka było synchronizacją dwóch systemów pracujących z różnymi częstotliwościami. Operacja taka wymaga szczególnych zabiegów technicznych ponieważ skutki nieudanego lub nieprecyzyjnego łączenia mogą być katastrofalne. Dotyczy to zwłaszcza łączenia bardzo dużych asynchronicznie pracujących systemów. Omawianego dnia w momencie zamknięcia w SE Widełka wyłącznika liniowego 750kV, pomiędzy systemami wystąpiły bardzo duże i niebezpieczne dla stabilności pracy oscylacje mocy wynikające z nieprecyzyjnie wykonanej operacji łączeniowej.

Przykłady wybranych awarii w SEE

- dla zobrazowania skali możliwych zagrożeń w pracy SEE, których detekcja oraz likwidacja jest aktualnie możliwa za pomocą rozwiązań Smart Grids, przedstawiono przykłady awarii, które miały miejsce w systemach elektroenergetycznych UCTE i USA,
- przedstawione w dalszych fragmentach prezentacji propozycje rozwiązań Smart Grids umożliwiają zapewnienie realizowanych w sposób skoordynowany działań prewencyjnych oraz minimalizujących skutki szeroko rozumianych perturbacji w systemie elektroenergetycznym.

BLACKOUT w Stanach Zjednoczonych w dniu 14/08/2003 roku

- nie zauważono faktu, że po informatycznych pracach serwisowych, estymator stanu oraz analizator ubytków nie współpracują prawidłowo,
- przerwa w pracy spowodowała, że status wyłączenia jednej z linii, które miało miejsce o godzinie 14:02 nie został zapamiętany powodując rozbieżności pomiędzy wartościami aktualnie mierzonymi, a modelem,
- podanej niesprawności współpracy bardzo ważnych systemów informatycznych nie zauważono do 14:40,
- **przedstawione zakłócenie uświadamia jak ważne zadania mają aktualnie do spełnienia estymatory stanu SEE oraz inne współpracujące ze sobą systemy informatyczne.**

Awaria zakończona BLACKOUTEM SEE Włoch w dniu 28/09/2003 roku

- z powodu braku zgody EAZ (synchrocheck w zabezpieczeniu odległościowym) na ponowne załączenie po zwarciu w cyklu SPZ linii na przekroju Szwajcaria-Włochy, ze względu na zbyt dużą wartość przesunięcia kąтового α pomiędzy łączonymi napięciami (42 deg przy nastawionej w automatyce łączeniowej wartości 30 deg), nastąpiło przeciążenie pozostałych linii oraz szybkie kaskadowe wyłączenia, które zakończyły się blackoutem SEE Włoch,
- **przedstawione zakłócenie uświadamia jak ważne zadania ma aktualnie do spełnienia odpowiednio nastawiona i pracująca adaptacyjnie automatyka systemowa, EAZ oraz specjalizowane systemy nadzoru.**

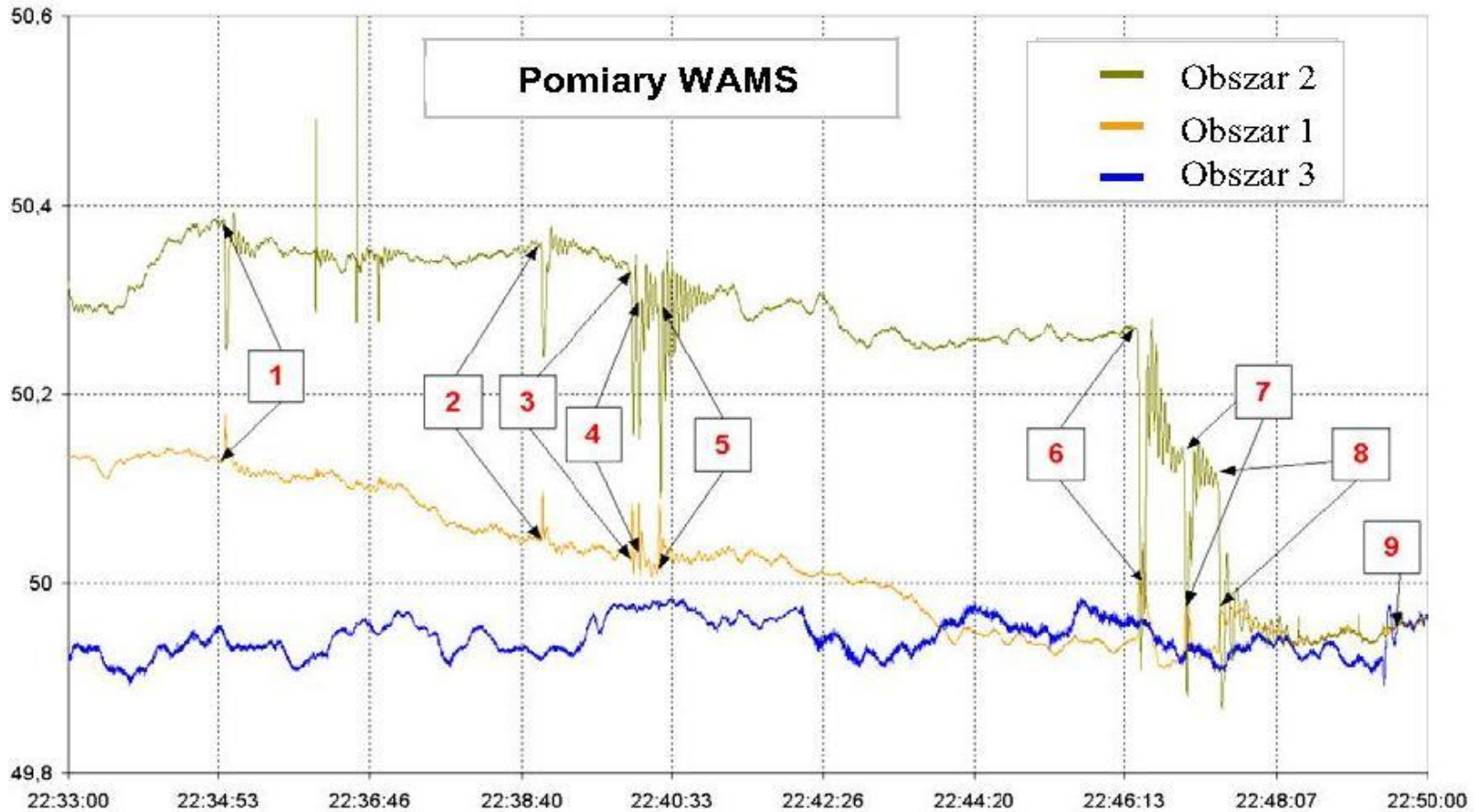
Zakłócenie systemowe UCTE w dniu 04/11/2006 r.

- w dniu 4/11/2006 roku o 22:09 nastąpiło zakłócenie systemowe, będące skutkiem błędnej analizy N-1 przed wykonaniem rutynowej operacji łączeniowej na obszarze Niemiec, które doprowadziło do wydzielenia trzech obszarów wyspowych w ramach UCTE,
- operację połączenia rozpoczęto po 22:10 ale różnice częstotliwości były bardzo duże. Wymagane było zastosowanie nadzwyczajnych środków takich jak wyłączenie w obszarze zachodnim kilku GW odbiorów przez automatykę SCO,
- wyłączenia były konieczne ze względu na obronę SEE przed znacznym spadkiem częstotliwości oraz dla stworzenia warunków umożliwiających przyszłą synchronizację wydzielonych obszarów.

Układy wyspowe po zakłóceniu systemowym w UCTE w dniu 4 listopada 2006 r.

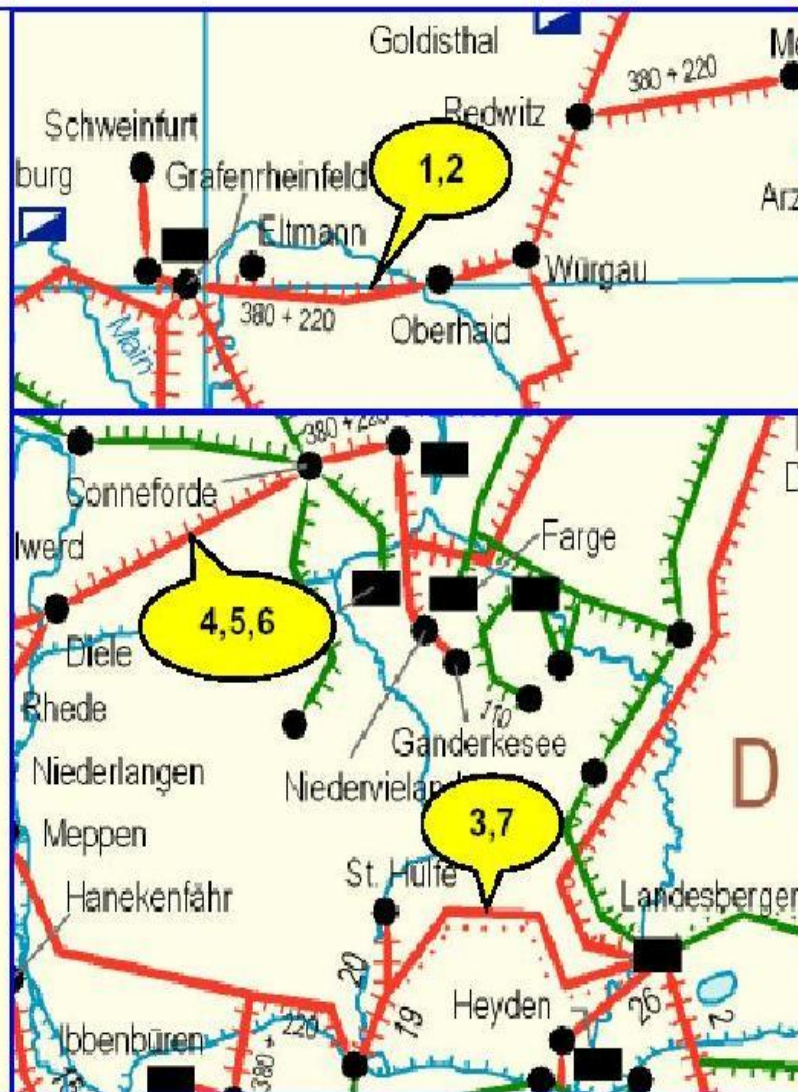


Rejestracje częstotliwości w wydzielonych układach w obrębie momentów synchronizacji



Nieudane synchronizacje obszarów Zachodniego i Północno-wschodniego

1. 22:34:57; próba załączenia linii 380 kV Oberhaid - Gafenrheinfeld
2. 22:38:54; próba załączenia linii 380 kV Oberhaid - Gafenrheinfeld
3. 22:40:04 (czas E.ON: 22:40:03, RWE: 22:40:09) próba załączenia linii 380 kV Landesbergen - Wehrendorf Dümmersee - Süd 1; wyłączenie z powodu oscylacji
4. 22:40:09 (czas E.ON: 22:40:08) próba załączenia linii 380 kV Conneforde - Diele czerwona; wyłączenie z powodu oscylacji
5. 22:40:25 (czas E.ON: 22:40:24); próba załączenia linii 380 kV Conneforde - Diele biała; wyłączenie z powodu oscylacji
6. 22:46:23 – 22:46:27 (E.ON time: 22:40:24 – 22:46:29); załączenie linii 380 kV Conneforde - Diele, które znów spowodowało oscylacje zakończone po 4 s wyłączeniem obu transformatorów 380/220 kV w stacji Conneforde, linii 380 kV Unterweser-Conneforde i otwarciem sprzęgła w stacji 220 kV Conneforde
7. 22:46:57 – 22:47:00 (E.ON time: 22:46:57 – 22:47:05, RWE: 22:47:03 – 22:47:09); załączenie linii 380 kV Landesbergen - Wehrendorf Dümmersee - Süd 1; wyłączenie z powodu oscylacji po 3 s.



Charakterystyka łączonych układów elektroenergetycznych

- samotnie pracujący generator oraz duży SEE charakteryzują się stabilnymi w funkcji czasu wartościami częstotliwości oraz napięć,
- układy wyspowe (zwłaszcza zasilane pojedynczymi źródłami wytwórczymi) charakteryzują się zazwyczaj znaczną zmiennością oraz dużą dynamiką zmian częstotliwości oraz napięć,
- możliwości regulacyjne układów wyspowych są ograniczone.

Rodzaje operacji łączeniowych UEE

Wyróżniamy dwa rodzaje operacji łączeniowych:

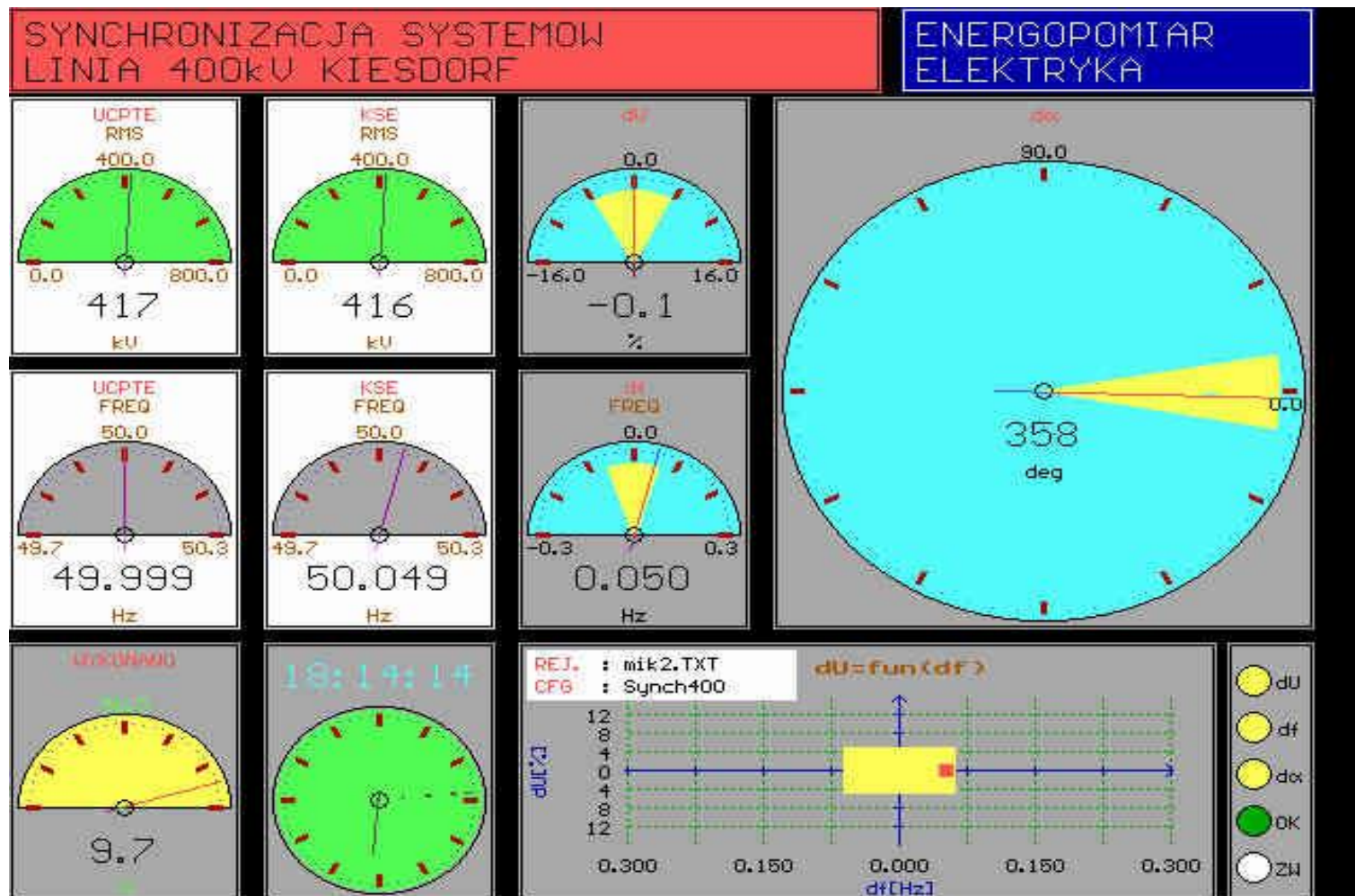
- synchronizację niezależnych wydzielonych systemów elektroenergetycznych (np. dużych SEE lub układów wyspowych), które nie pracują synchronicznie,
- łączenie układów będących już w synchronizmie (łączenie zamykanie do pierścienia).

Jeden z łączonych układów nazywa się zazwyczaj niezależnym (układem odniesienia) natomiast drugi zależnym (którego parametry będą dostosowywane do systemu niezależnego).

Łączenia wielkich SEE

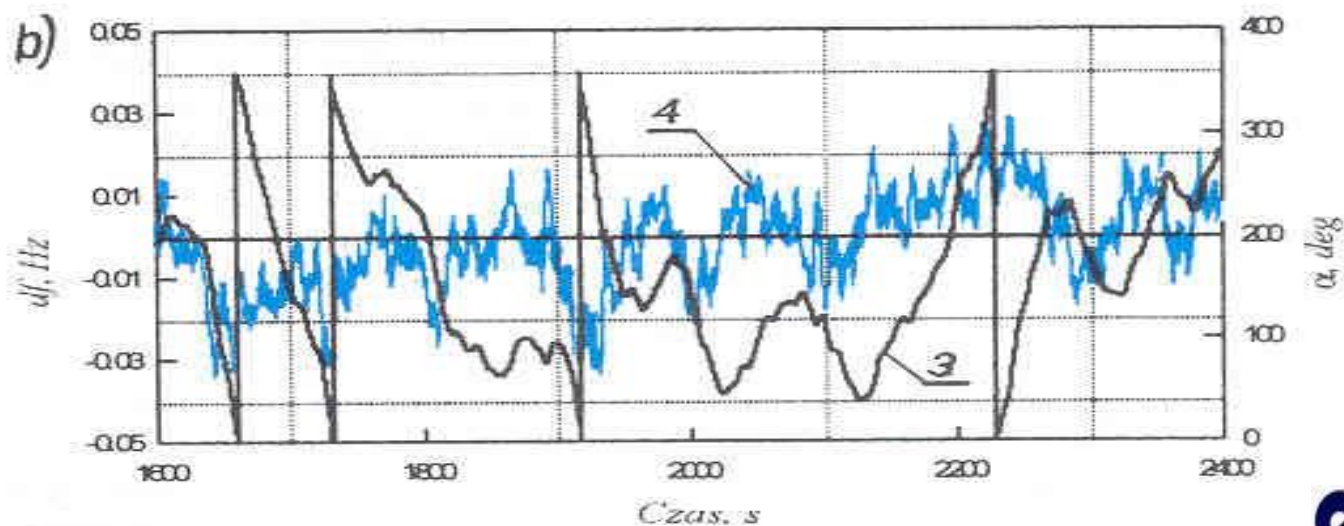
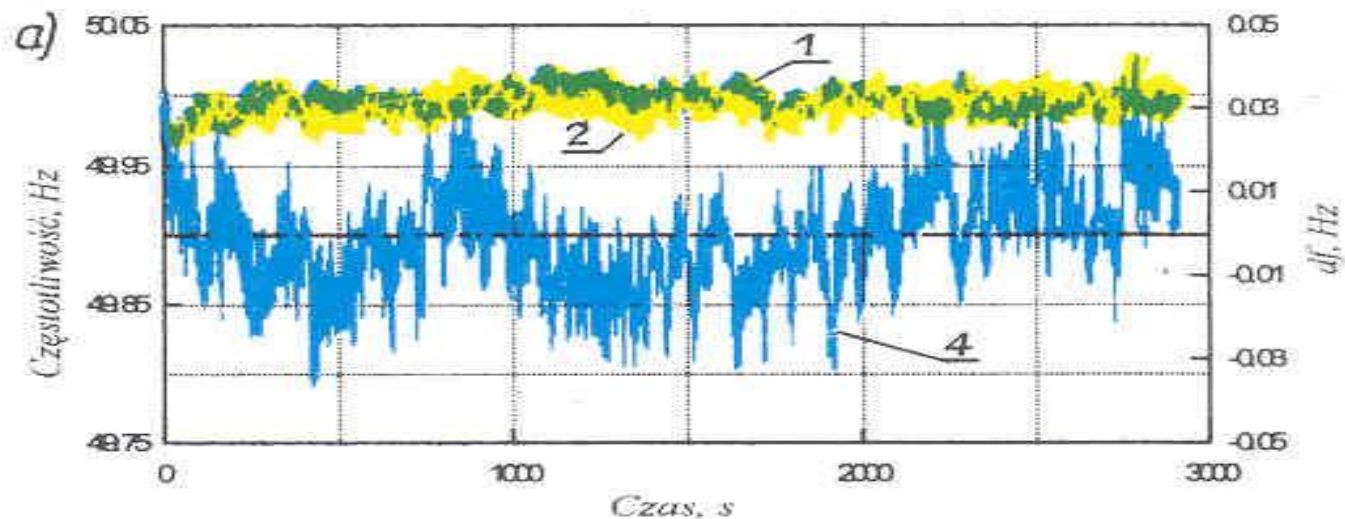
- łączenia wielkich SEE posiadają swoją specyfikę,
- bezpośrednio przed połączeniem UCPTE z CENTREL w dniu 18 października 1995 roku, ZPBE Energopomiar-Elektryka zarejestrował za pomocą systemów MUW zabudowanych w SE Mikułowa i Krajnik na przekroju Polska-Niemcy przebiegi parametrów kryterialnych procesów łączeniowych,
- wartości częstotliwości obydwu systemów były do siebie bardzo zbliżone. Wartość df zawierała się w granicach $\pm 35\text{mHz}$, a jej znak ciągle się zmieniał, osiągnięcie zgodności kątowej napięć może zatem trwać bardzo długo (bardzo mała bliska zera wartość df i związane z tym zmiany kierunku wirowania wektora przesunięcia fazowego).

Wizualizacja procesów łączeniowych układów elektroenergetycznych (SE Mikułowa 1995 rok)



Synchronizacja wielkich SEE.

Rejestracje MUW (SE Mikułowa, październik 1995)



Łączenia porównywalnych SEE

- łączenie dwóch dobrze „wyregulowanych” SEE może sprawiać poważne problemy,
- osiągnięcie warunków zgodności fazowej może trwać bardzo długo co znacząco wpływa na efektywność realizacji procesu łączeniowego,
- konieczne są takie oddziaływanie regulacyjne, które prowadzą do wystąpienia bezpiecznego i świadomie kontrolowanego poślizgu, o stałej wartości znaku oraz bezpiecznej fluktuacji zmian modułu.

Ewolucja techniczna układów



- na przestrzeni lat rozwiązania przemysłowych systemów pomiarowych, automatyki systemowej oraz EAZ opracowywanych w ZPBE Energopomiar-Elektryka ulegały ewolucji technicznej,
- aktualne możliwości techniczne pozwalają obecnie na budowanie aplikacji klasy Smart Grids posiadających nowe własności funkcjonalne niemożliwe lub bardzo trudne do osiągnięcia za pomocą starszych technologii,
- budowanie struktury Smart Grids bez wykorzystania wiedzy teoretycznej dotyczącej statycznych oraz dynamicznych zjawisk elektrycznych w SEE, gruntownej znajomości pracy nadzorowanych układów oraz rzeczywistych doświadczeń technicznych i pomiarowych Specjalistów jest z założenia ułomne.

Tradycyjny system elektroenergetyczny



- aktualnie sieci elektroenergetyczne eksploatowane w Polsce oraz w innych krajach są przestarzałe i mało wydajne,
- w przeszłości SEE był projektowany i budowany przy założeniu, że generacja energii elektrycznej będzie odbywała się w dużych elektrowniach systemowych, a sieć będzie pełniła rolę jednokierunkowej dostawy energii do jej użytkowników.

Definicje sieci inteligentnej

- sieci inteligentne rozpatrywane są z różnych perspektyw poszczególnych aktorów rynku takich jak OSP, OSD, odbiorców energii i trudno jest mówić o jednej uniwersalnej definicji,
- przykładowo sieć inteligentną można zdefiniować jako układ elektroenergetyczny lub układ kogeneracyjny powiązany z technologiami informatycznymi, rozwiązaniami telekomunikacyjnymi, inteligentnymi transformatorami, magazynami energii, oraz urządzeniami energoelektronicznymi, które zapewniają uczestnikom procesów wytwarzania, przesyłu, dystrybucji i użytkowania optymalne mechanizmy działania w celu poprawy niezawodności i efektywności dostaw energii.

Koncepcja sieciowego terminala dostępowego STD

- STD jest fundamentalnym elementem infrastruktury elektroenergetycznej prosumenta zbiorowego oraz indywidualnego i będzie zabudowany w PPE (punktach poboru energii),
- niezależnie od skali autonomiczny obszar elektroenergetyczny dla prawidłowej i efektywnej współpracy z OSD wymaga zastosowania w STD specjalizowanych rozwiązań automatyki i pomiarów, wyrafinowanych technologii informatycznych i telekomunikacyjnych, **transformatorów z automatyką regulacyjną**, magazynów energii oraz nowego typu urządzeń energoelektronicznych,

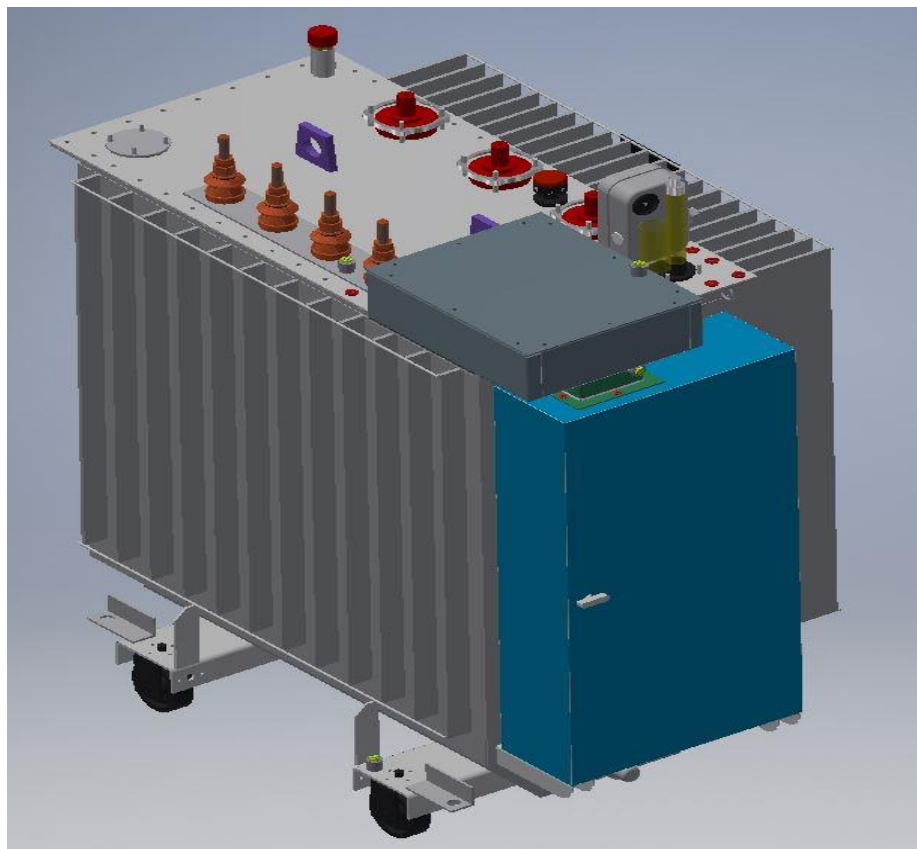
Koncepcja sieciowego terminala dostępowego STD

- STD zapewni możliwość pracy autonomicznej prosumenta zbiorowego oraz prosumentów indywidualnym poprzez stworzenie warunków technicznych do bezpiecznego wydzielenia obszaru oraz resynchronizacji,
- możliwość wydzielenia układu do pracy autonomicznej będzie precyzyjnie analizowana w powiązanych ze sobą dla danego obszaru sieciowych terminalach dostępowych STD w oparciu o bilans energetyczny wykonywany online oraz aktywną i deterministyczną współpracę z układami automatyki i regulacji w celu osiągnięcia stanu zbilansowania,
- bezpieczeństwo i efektywność pracy układów oraz realizacja celów ekonomicznych są w czasie rzeczywistym realizowane w STD przez układy dedykowanej automatyki,

Podobciążeniowy układ regulacji napięcia w transformatorach rozdzielczych III i IV grupy



<https://www.elektryka.com.pl/pl/366>



1. Regulacja napięcia bez potrzeby wyłączania jednostki transformatora.
2. Dwustronny regulacyjny układ przekształtnikowy.
3. Układ będzie umożliwiał zwrot energii z sieci nn do Sn oraz kompensację asymetrii fazowej i międzyfazowej napięć po stronie nn.
4. Możliwość zadawania wartości napięcia zdalnie oraz w trybie pracy autonomicznej.

Podsumowanie:

Układ znajdzie zastosowanie w sieciach Sn/nn z dużym nasyceniem źródeł odnawialnych oraz asymetriami napięcia po stronie nn. Będzie umożliwiał także zwrot wytworzonej przez OZE energii do sieci Sn.

Inteligentne transformatory SN/nN w ramach STD

Inteligentne transformatory SN/nN wraz z automatyką regulacyjną są ważnym elementem sieciowych terminali dostępowych STD znajdujących się w punktach poboru energii PPE na styku z OSD. Dzięki przyjętym rozwiązaniom technicznym, bezstopniowej regulacji napięcia w rozszerzonym zakresie, transformatory zapewniają w powiązaniu z magazynami energii zabudowanymi w STD warunki do nieprzerwanej i dobrej jakościowo pracy nadzorowanego obszaru w warunkach dużej produkcji instalacji OZE np. PV oraz możliwość skutecznego przejścia do pracy wyspowej.

Działalność normalizacyjna



- prace związane ze Smart-Grids są prowadzone w Polsce w ramach działalności KT 304 do spraw „Aspektów systemowych dostawy energii elektrycznej” Polskiego Komitetu Normalizacyjnego,
- obecnie opracowywane projekty norm lub normy, to w istocie początek prac normalizacyjnych w tej bardzo złożonej dziedzinie,
- prace normalizacyjne dla różnych obszarów tematycznych (przykładowo dotyczących architektury Smart-Grids, magazynowania energii elektrycznej itd.) są prowadzone w kilku Komitetach Technicznych CENELEC oraz IEC.

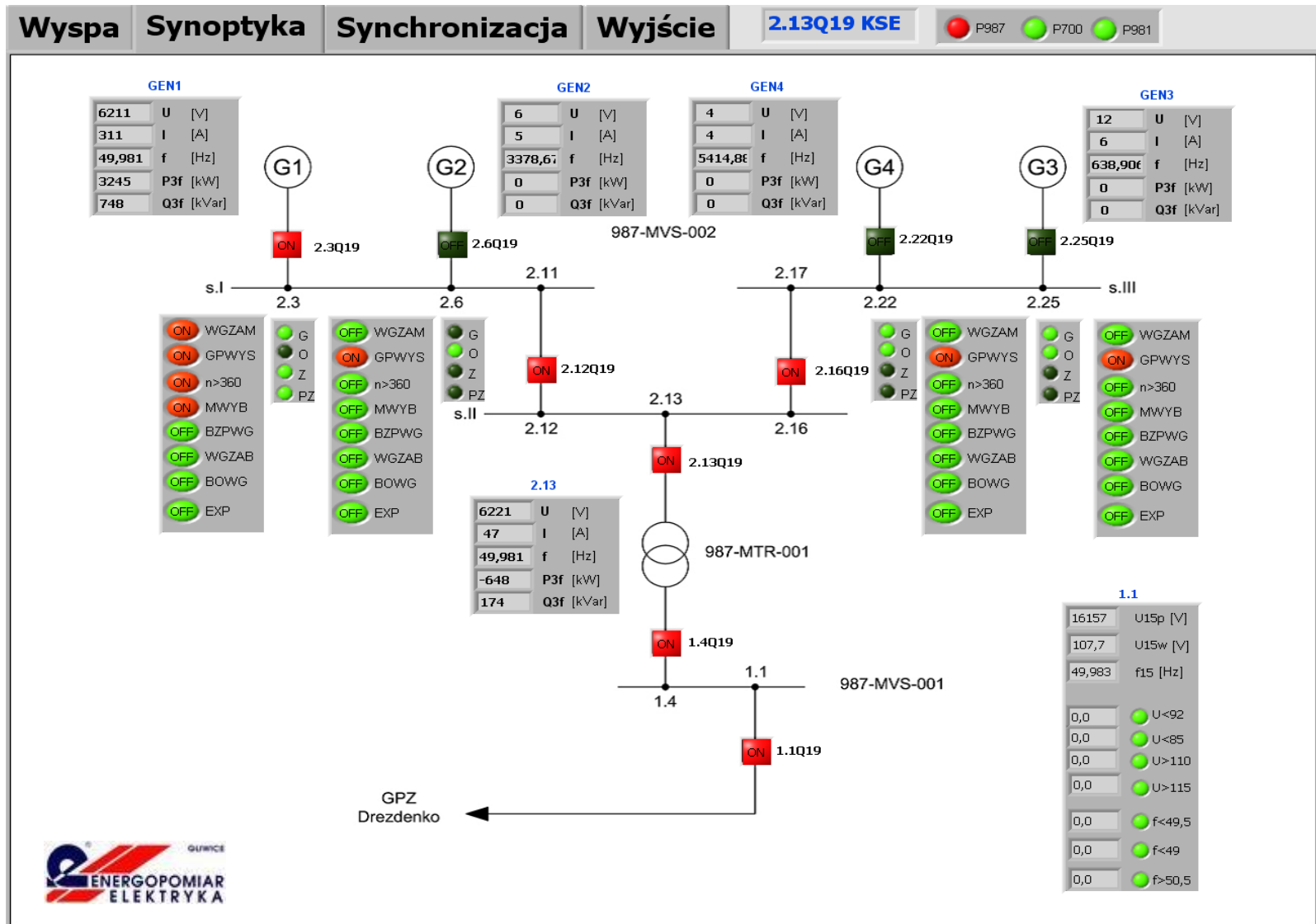
System MUW-Plus.

Automatyka dedykowana do STD.



ZPBE Energopomiar-Elektryka od wielu lat zajmował się problemami pewności zasilania określonych elementów pracujących w układzie elektroenergetycznym. W związku z tym jest m.in. producentem systemu MUW-Plus do wydzielania i nadzoru pracy układów wyspowych oraz realizacji operacji łączeniowych UEE. System MUW-Plus posiadający rozszerzoną funkcjonalność PMU realizuje kompleksowo zadania wspomagania pracy UEE np. zakładu przemysłowego lub prosumenta nieprzemysłowego i może być istotnym elementem **sieciowego terminala dostępowego STD.**

Automatyka pracy wyspowej i synchronizacji



Automatyka wydzielania układu wyspowego

Wyspa
Synoptyka
2.13
Synchronizacja
Wyjście
2.13Q19 KSE
● P987 ● P700 ● P981

U1[V]	105,0
U2[V]	103,4
f1[Hz]	49,992
f2[Hz]	49,748
dU[%]	1,6
df[Hz]	0,244
a[deg]	311

2.3Q19 G1

103,4	U1 [V]	●
0,1	U2 [V]	●
49,747	f1 [Hz]	●
47,492	f2 [Hz]	●
103,3	dUOK	●
2,255	dfOK	●
340,1	alfaOK	●

BRAK SYNCHRONIZMU

2.6Q19 G2

103,4	U1 [V]	●
0,1	U2 [V]	●
49,747	f1 [Hz]	●
51,638	f2 [Hz]	●
103,3	dUOK	●
-1,891	dfOK	●
302,2	alfaOK	●

BRAK SYNCHRONIZMU

2.22Q19 G4

103,5	U1 [V]	●
103,2	U2 [V]	●
49,748	f1 [Hz]	●
49,747	f2 [Hz]	●
0,2	dUOK	●
0,001	dfOK	●
359,6	alfaOK	●

SYNCHRONIZM

2.25Q19 G3

103,5	U1 [V]	●
103,2	U2 [V]	●
49,748	f1 [Hz]	●
49,748	f2 [Hz]	●
0,3	dUOK	●
0,000	dfOK	●
359,5	alfaOK	●

SYNCHRONIZM

2.12Q19

103,4	U1 [V]	●
103,4	U2 [V]	●
49,748	f1 [Hz]	●
49,747	f2 [Hz]	●
-0,0	dUOK	●
0,001	dfOK	●
359,6	alfaOK	●

SYNCHRONIZM

2.13Q19

105,0	U1 [V]	●
103,4	U2 [V]	●
49,992	f1 [Hz]	●
49,748	f2 [Hz]	●
1,6	dUOK	●
0,244	dfOK	●
310,8	alfaOK	●

BRAK SYNCHRONIZMU

2.16Q19

103,4	U1 [V]	●
103,5	U2 [V]	●
49,748	f1 [Hz]	●
49,748	f2 [Hz]	●
-0,1	dUOK	●
-0,000	dfOK	●
359,6	alfaOK	●

SYNCHRONIZM

2.13Q19

START SYNCHRO

2.13Q19

START ZAMYK.

2.6Q19 G2 OFF | 2.12Q19 SP1 OFF | 2.13Q19 KSE ON | 2.16Q19 SP2 OFF | 2.22Q19 G4 OFF | 2.25Q19 G3 OFF

SG1 SG2 SG3 SG4

Synchronizacja układu wyspowego



Wyspa

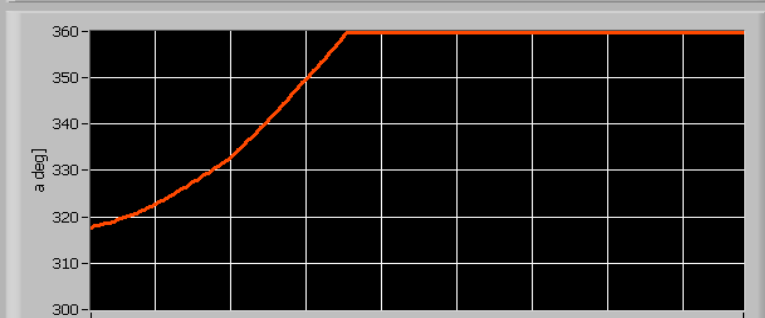
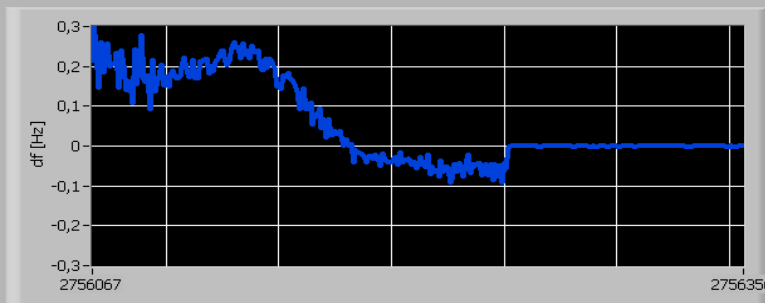
Synoptyka

Synchronizacja

Wyjście

2.13Q19 KSE

● P987 ● P700 ● P981



U1[V]	102,8
U2[V]	103,2
f1[Hz]	49,977
f2[Hz]	49,976
dU[%]	-0,4
df[Hz]	0,001
a[deg]	360



2.3Q19 G1	2.6Q19 G2	2.22Q19 G4	2.25Q19 G3
103,2 U1[V] ●	103,2 U1[V] ●	103,3 U1[V] ●	103,3 U1[V] ●
0,1 U2[V] ●	0,1 U2[V] ●	103,0 U2[V] ●	103,0 U2[V] ●
49,977 f1 [Hz]	49,977 f1 [Hz]	49,976 f1 [Hz]	49,976 f1 [Hz]
50,600 f2 [Hz]	50,993 f2 [Hz]	49,977 f2 [Hz]	49,977 f2 [Hz]
103,1 ● dUOK	103,1 ● dUOK	0,3 ● dUOK	0,2 ● dUOK
-0,623 ● dfOK	-1,017 ● dfOK	-0,002 ● dfOK	-0,001 ● dfOK
326,1 ● alfaOK	306,5 ● alfaOK	359,6 ● alfaOK	359,4 ● alfaOK
BRAK SYNCHRONIZMU	BRAK SYNCHRONIZMU	SYNCHRONIZM	SYNCHRONIZM
2.12Q19	2.13Q19	2.16Q19	2.13Q19
103,2 U1[V] ●	102,8 U1[V] ●	103,2 U1[V] ●	
103,2 U2[V] ●	103,2 U2[V] ●	103,3 U2[V] ●	START SYNCHRO
49,976 f1 [Hz]	49,977 f1 [Hz]	49,976 f1 [Hz]	2.13Q19
49,977 f2 [Hz]	49,976 f2 [Hz]	49,976 f2 [Hz]	START ZAMYK.
0,0 ● dUOK	-0,4 ● dUOK	-0,1 ● dUOK	
-0,001 ● dfOK	0,001 ● dfOK	0,000 ● dfOK	
359,6 ● alfaOK	359,8 ● alfaOK	359,7 ● alfaOK	
SYNCHRONIZM	SYNCHRONIZM	SYNCHRONIZM	

2.3Q19 G1 OFF 2.6Q19 G2 OFF 2.12Q19 SP1 OFF 2.13Q19 KSE ON 2.16Q19 SP2 OFF 2.22Q19 G4 OFF 2.25Q19 G3 OFF

○ SG1 ○ SG2 ○ SG3 ○ SG4

Skutki energetyczne łączeń

Wyspa

Synoptyka

2.13

Synchronizacja

Wyjście

2.13Q19 KSE



P987

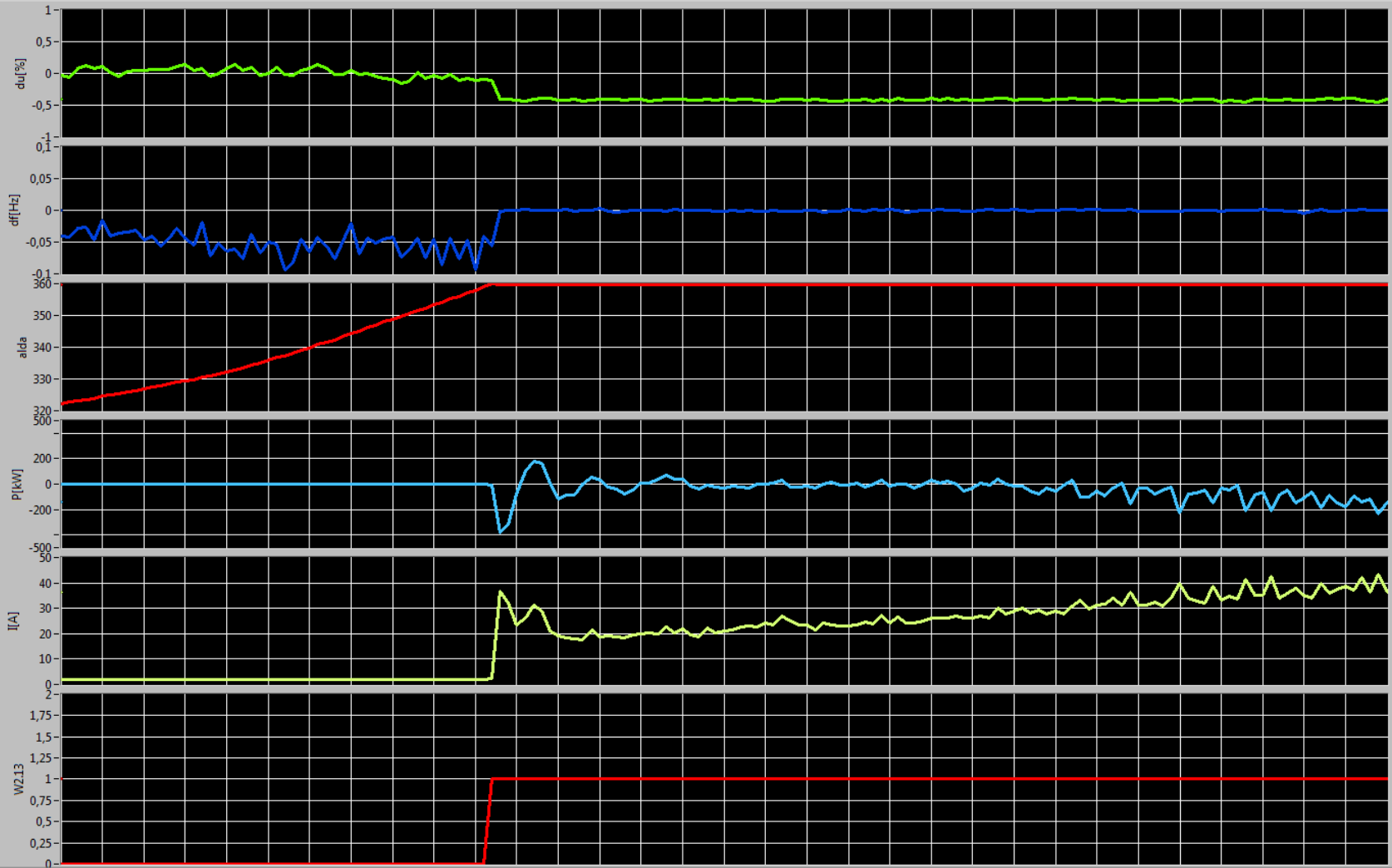


P700



P981

Plot 0



Podsumowanie



- budowanie struktury Smart Grids bez wykorzystania wiedzy teoretycznej dotyczącej statycznych oraz dynamicznych zjawisk elektrycznych w SEE, gruntownej znajomości pracy nadzorowanych układów oraz rzeczywistych doświadczeń technicznych i pomiarowych Specjalistów jest z założenia ułomne,
- konsekwentna i precyzyjna realizacja proponowanych rozwiązań pozwoli uruchomić sieciowe terminale dostępowe zarówno w punktach poboru energii PPE znajdujących się na styku z OSD oraz wewnątrz obszaru w PPE prosumentów indywidualnych,

Podsumowanie

- nastawienia urządzeń automatyki, pomiarów oraz regulacji zabudowanych w STD powinny być w możliwym zakresie adaptacyjne, skorelowane ze sobą i dostosowane do możliwych sytuacji ruchowych i zakłóceńowych,
- sieciowy terminal dostępowy STD prosumetów wyposażonych w magazyny energii zapewni możliwość pracy autonomicznej poprzez stworzenie warunków do bezpiecznego i trwałego wydzielenia obszaru oraz resynchronizacji w oczekiwanym momencie pracy,

Podsumowanie

- inteligentne transformatory SN/nN wraz z automatyką regulacyjną są ważnym elementem sieciowych terminali dostępowych STD znajdujących się w punktach poboru energii PPE na styku z OSD. Dzięki przyjętym rozwiązaniom technicznym, bezstopniowej regulacji napięcia w rozszerzonym zakresie, transformatory zapewniają w powiązaniu z magazynami energii zabudowanymi w STD warunki do nieprzerwanej i dobrej jakościowo pracy nadzorowanego obszaru w warunkach dużej produkcji instalacji OZE np. PV oraz możliwość skutecznego przejścia do pracy wyspowej,

Podsumowanie

- sieciowe terminale dostępne STD zabudowane w punktach poboru energii PPE znajdujących się na styku z OSD oraz w PPE prosumentów wyposażonych w magazyny energii i rozlokowanych wewnątrz nadzorowanego obszaru będą pracowały w trybie automatycznym zapewniając bezpieczną, efektywną, ekonomicznie optymalną oraz dobrą jakościowo pracę przy równoczesnym uzyskaniu **funkcjonalności pełnej autonomii działania.**

Dziękujemy za uwagę