

Usługi elastyczności wynikające z rozwiązań technicznych i technologii stosowanych przez operatorów sieci elektroenergetycznych

Prof. Zbigniew Krzemiński
Dr hab. inż. Marek Adamowicz



MMB Drives sp. z o.o.





Elastyczność operacyjna systemu dystrybucyjnego - usługi elastyczności i elastyczność techniczna

Elastyczność sieci energetycznej (*ang. power system flexibility*)

to zdolność systemu elektroenergetycznego do szybkiego i efektywnego reagowania na zmiany w zapotrzebowaniu i produkcji energii, zwłaszcza te nieprzewidywalne.

ELASTYCZNOŚĆ OPERACYJNA – O CO NAPRAWDĘ TOCZY SIĘ GRA?

Rynek energii gwałtownie przyspiesza.

Operatorzy potrzebują **reaktywnej, sterowalnej i odpornej sieci**, która w czasie rzeczywistym łączy pracę OZE, odbiorów i magazynów.

To właśnie nazywamy **elastycznością operacyjną**.

Ale jest jeden fakt, o którym rzadko mówi się głośno:

Elastyczność operacyjna nie wydarzy się bez technologii, które zapewniają elastyczność techniczną.

I właśnie tutaj otwiera się przestrzeń dla rozwiązań, które mogą radykalnie zmienić sposób działania sieci dystrybucyjnych.



Elastyczność operacyjna systemu dystrybucyjnego

ELASTYCZNOŚĆ OPERACYJNA TO DROGA DO NOWEJ JAKOŚCI ENERGETYKI

Wyobraźmy sobie system energetyczny, który:
reaguje płynnie jak organizm żywy,
sam stabilizuje napięcie,
inteligentnie bilansuje OZE i odbiory,
pozwała przyłączyć **jeszcze więcej zielonej energii**,
a jednocześnie redukuje koszty i podnosi jakość usług.
To właśnie jest **elastyczność operacyjna**
→ i jej potencjał jest ogromny.

A najlepsze w tym wszystkim jest to, że **mamy dziś technologie,**
które mogą ją urzeczywistnić szybciej, niż sądzimy.



NADCHODZI EPOKA SIECI AKTYWNYCH

Zamiast kosztownych, długotrwałych modernizacji infrastruktury możemy zastosować technologię, która:

- działa od razu,
- jest skalowalna,
- wzmacnia sieć tam, gdzie jest to naprawdę potrzebne,
- zmienia ograniczenia w przewagę.

Nie musimy czekać na przyszłość — możemy ją wdrażać już teraz.

Nowoczesne **regulatory napięcia** to technologie, które:

- ☀️ pozwalają rozwijać sieć bez jej “rozbudowy w betonie i metalu”,
- ☀️ wspierają zieloną transformację,
- ☀️ dają operatorowi pełną kontrolę i poczucie sprawczości,
- ☀️ poprawiają jakość energii u odbiorców,
- ☀️ przyspieszają przyłączanie OZE,
- ☀️ budują wizerunek lidera, który *robi rzeczy niemożliwe*.

To technologie, które sprawiają, że **ambitne cele stają się wykonalne**, a nawet — ekscytujące.

IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPiREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
D R I V E S



WYMAGANIA OPERACYJNE → WYMAGANIA TECHNICZNE

Operacyjne wymaganie 1: Dynamiczne bilansowanie OZE i odbiorów

→ **Techniczny warunek: Zdolność infrastruktury do przyjmowania zmiennej generacji to:**

zwiększona obciążalność torów SN i nn,
praca w trybie **reverse power flow**,
stabilność napięciowa przy lokalnych szczytach generacji,
regulacja napięcia i kompensacja mocy biernej.

Operacyjne wymaganie 2: Stabilne napięcie w każdych warunkach

→ **Techniczny warunek: Zaawansowana, aktywna regulacja napięcia**

wymusza instalację:

falowników z funkcjami regulacyjnymi,
inteligentnych regulatorów,
systemów do aktywnej kompensacji i symetryzacji,
lokalnych urządzeń sterujących przepływami P/Q.

Bez tego **nie ma sterowania OZE na poziomie operacyjnym.**



WYMAGANIA OPERACYJNE → WYMAGANIA TECHNICZNE

Operacyjne wymaganie 3: Szybka reakcja na zmienność

→ **Techniczny warunek: Automatyka szybkiego działania**

FLISR (lokalizacja/izolacja zwarć),

FFR (Fast Frequency Response),

szybkie magazyny energii,

energoelektroniczne ograniczniki, regulatory i kompensatory.

Operacyjne wymaganie 4: Pełna widoczność i sterowalność sieci

→ **Techniczny warunek: Telemetria + pomiary + ADMS/SCADA**

pomiary napięcia i prądów,

AMI,

zdalny odczyt i sterowanie źródłami rozproszonymi.

Bez informacji nie ma sterowania. Bez sterowania nie ma elastyczności.

ANALIZA LINII DWUKIERUNKOWEJ – DLACZEGO REGULATORY SĄ NIEZBĘDNE

W sieci z OZE przepływy energii **w każdej fazie mogą mieć inny kierunek**, co powoduje:

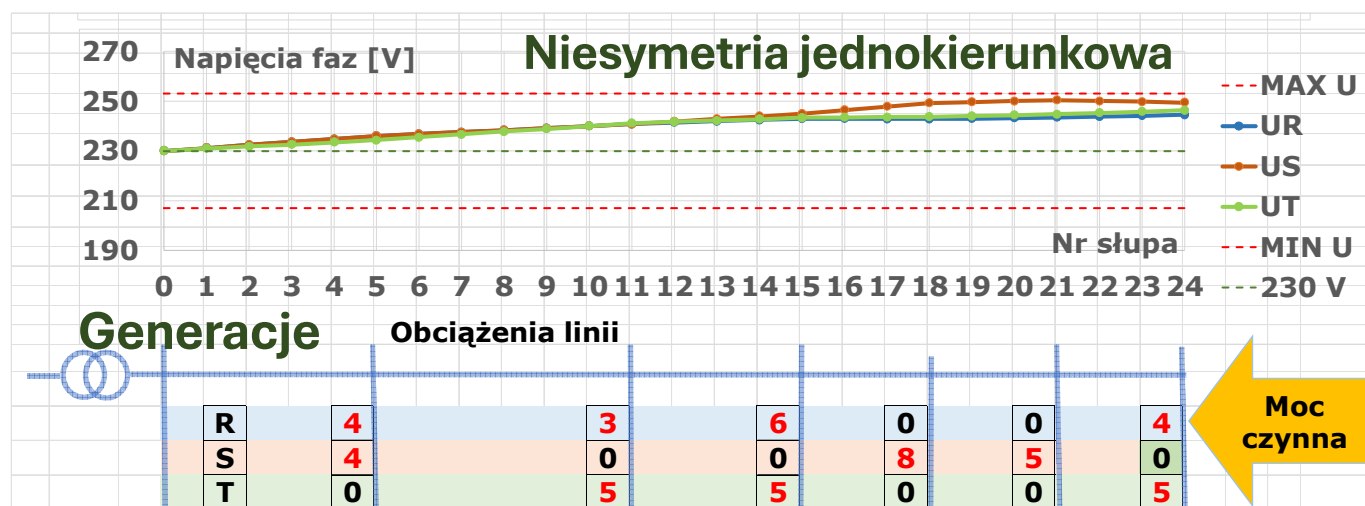
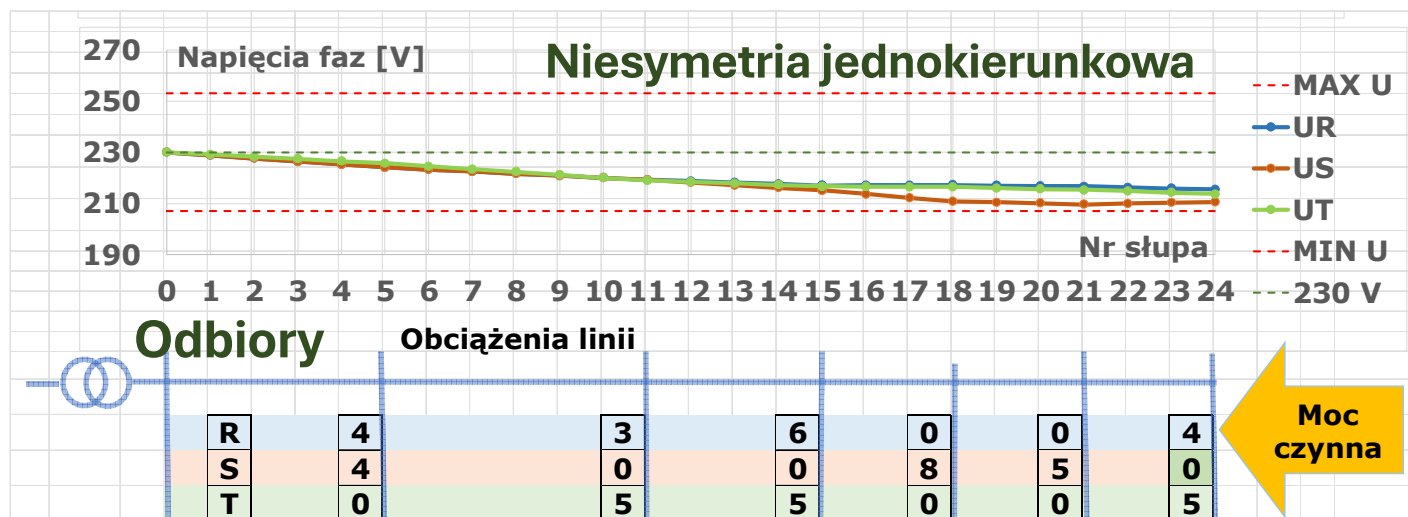
- niekontrolowane wzrosty napięcia,
- asymetrię napięć,
- niestabilność przy zmieniającej się generacji solarnej.

Sytuacji tych **nie da się usunąć klasyczną infrastrukturą**.

Dlatego energoelektronika jest fundamentem:

- tłumienia zmian,
- stabilizacji napięcia,
- kontroli przepływu mocy w każdej fazie,
- poprawy jakości energii.

Analiza działania linii z dwukierunkowym przepływem energii



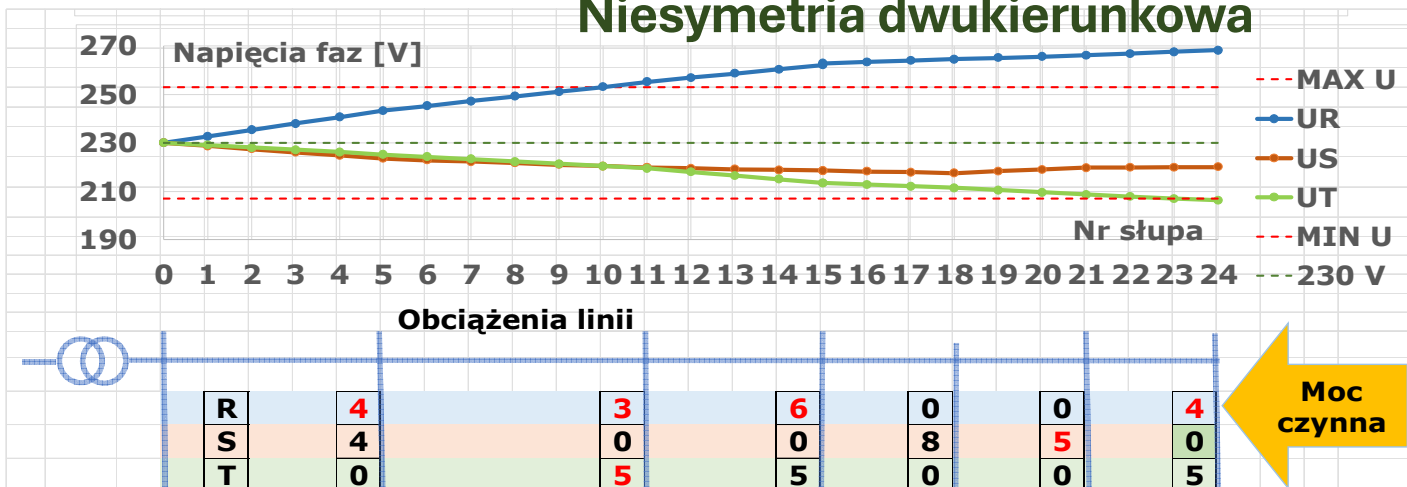
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPIREE
2025

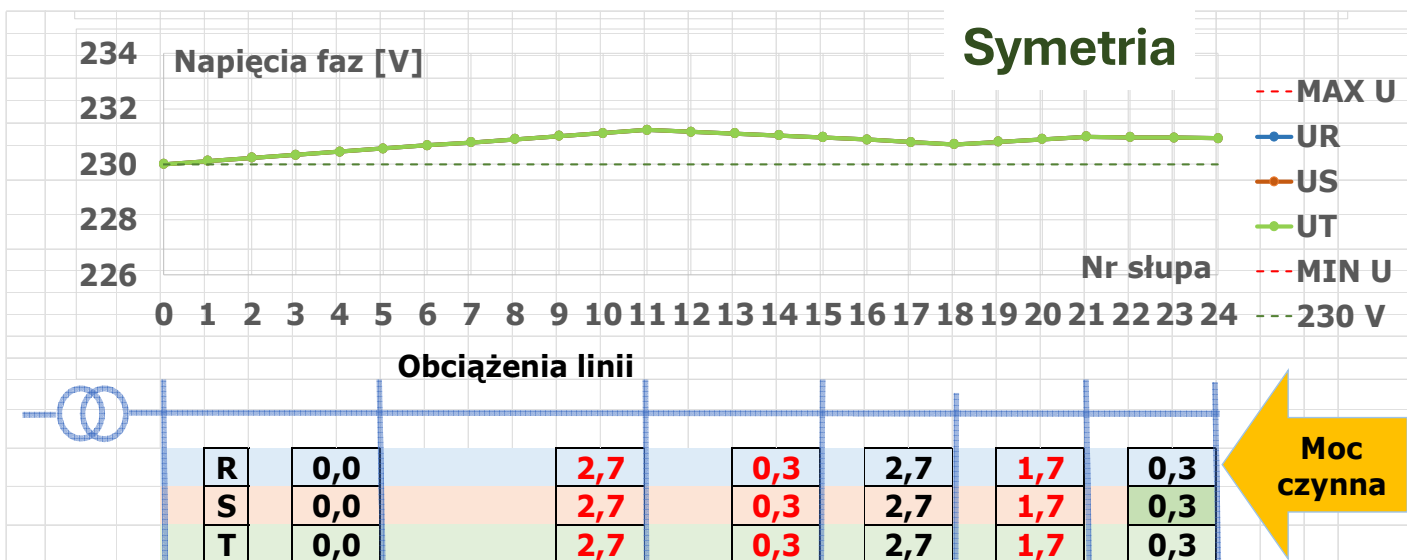
MMB
Driver
multiscalar model based
DRIVES

Analiza działania linii z dwukierunkowym przepływem energii

Niesymetria dwukierunkowa



Symetria



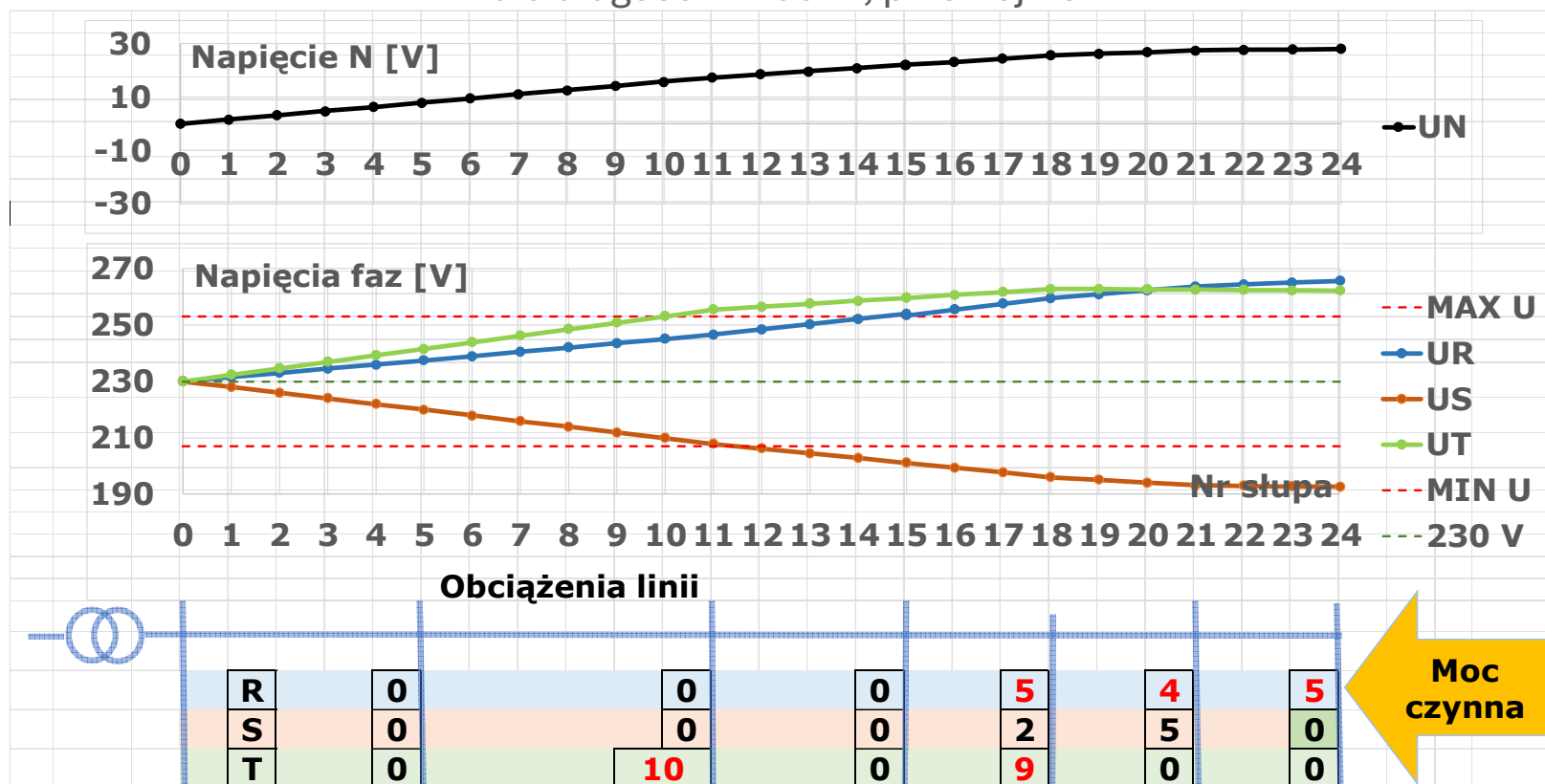
Taka sama
moc po
bilansowaniu
fazowym

Techniczne sposoby oddziaływania na parametry napięciowe linii nn

PTPIREE
2025

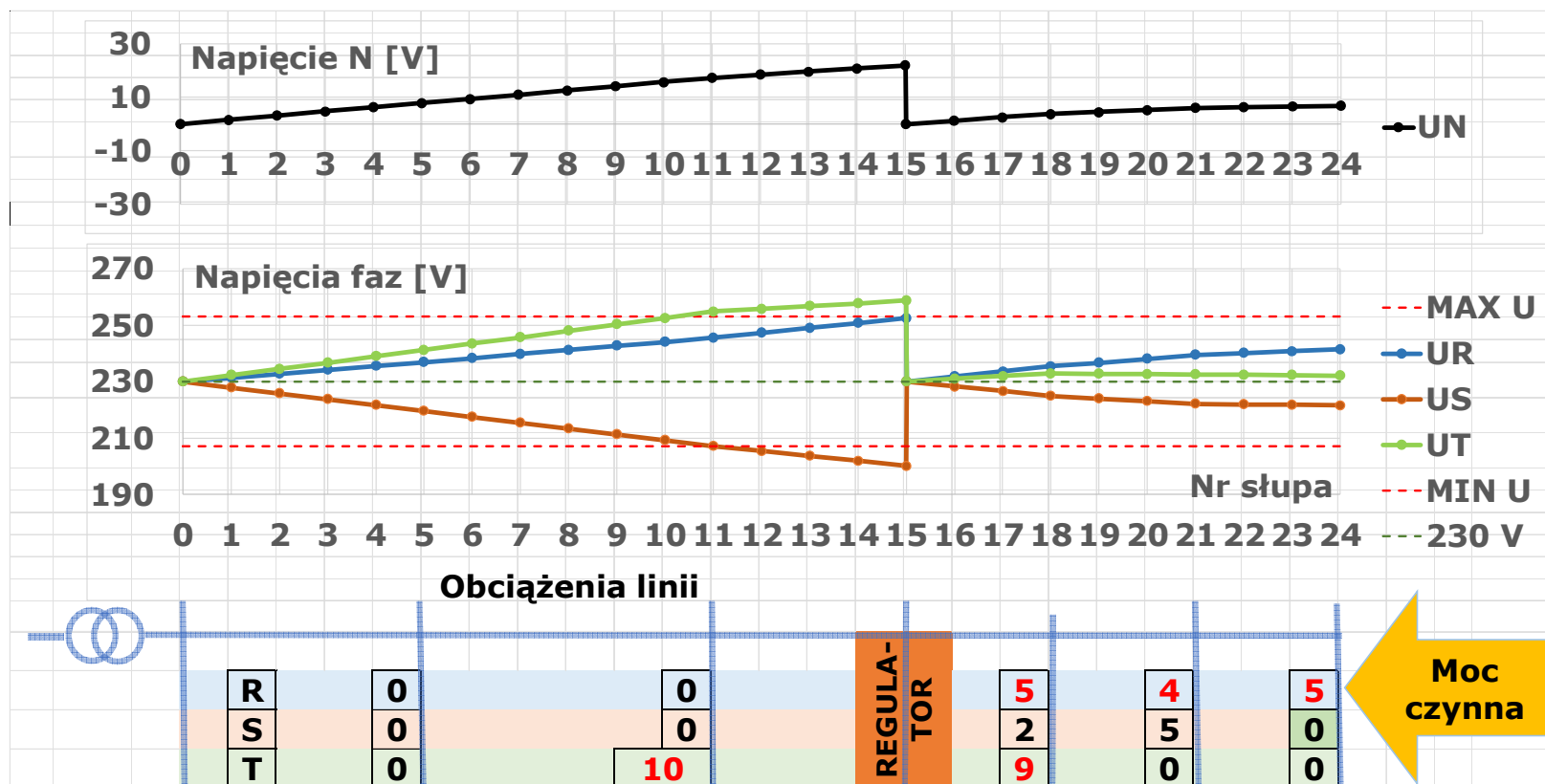
I. Napięcia wzdłuż linii z niesymetrią obciążenia bez regulacji

Linia o długości: 1200 m, przekrój 70 mm²



Techniczne sposoby oddziaływania na parametry napięciowe linii nn

II. Napięcia wzdłuż linii z niesymetrią obciążenia i stabilizacją napięć po stronie odbiorów



Oznaczenia na rysunkach (obciążenia linii w kratkach):

☒ – wprowadzanie energii w fazie

☒ – pobór energii w fazie

Linia 1200 m, 70 mm²

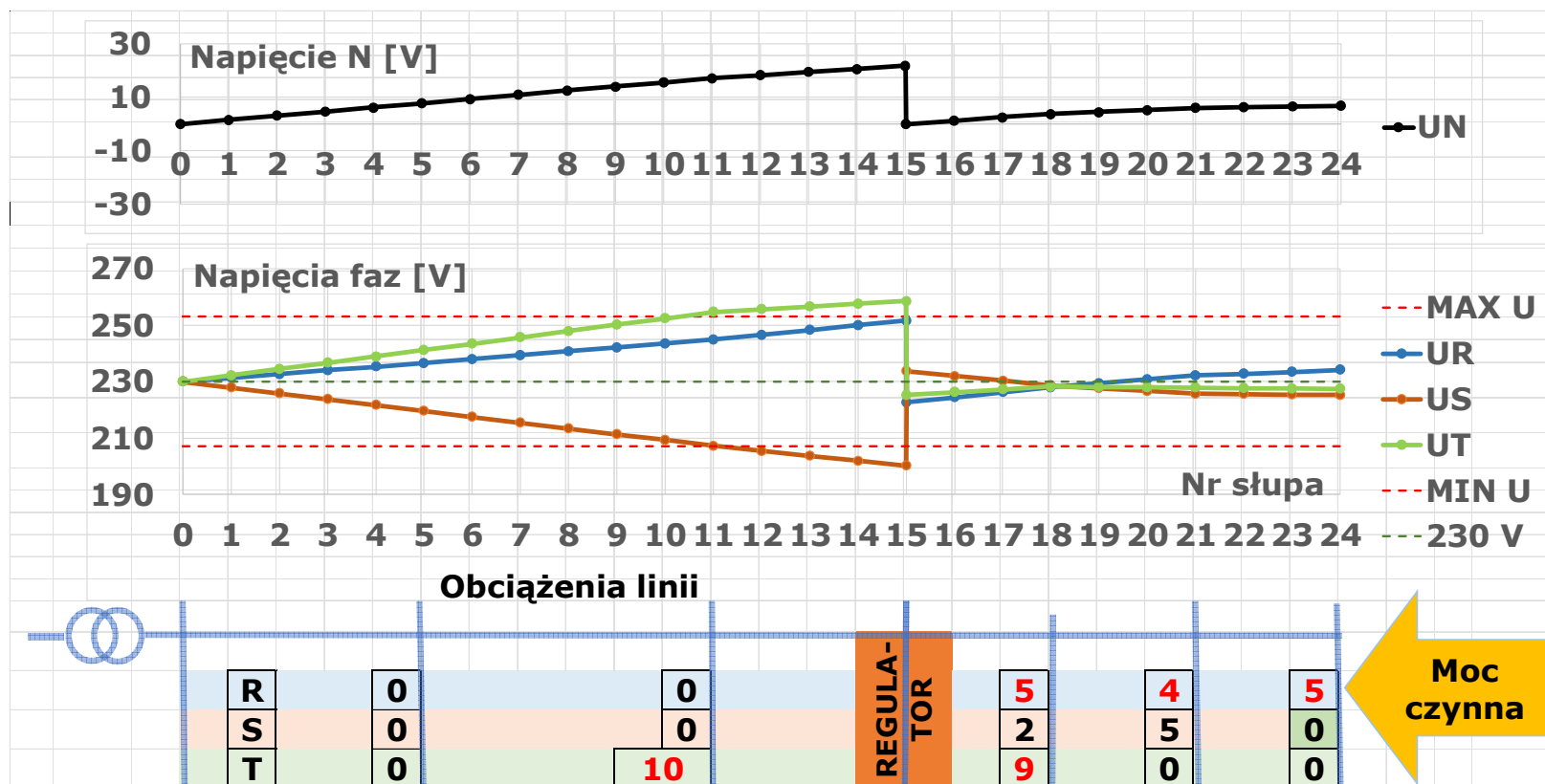
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPIREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

Techniczne sposoby oddziaływania na parametry napięciowe linii nn

III. Napięcia wzdłuż linii z niesymetrią obciążenia i regulacją napięć w funkcji prądów fazowych



Oznaczenia na rysunkach (obciążenia linii w kratkach):

☒ – wprowadzanie energii w fazie

☒ – pobór energii w fazie

Linia 1200 m, 70 mm²

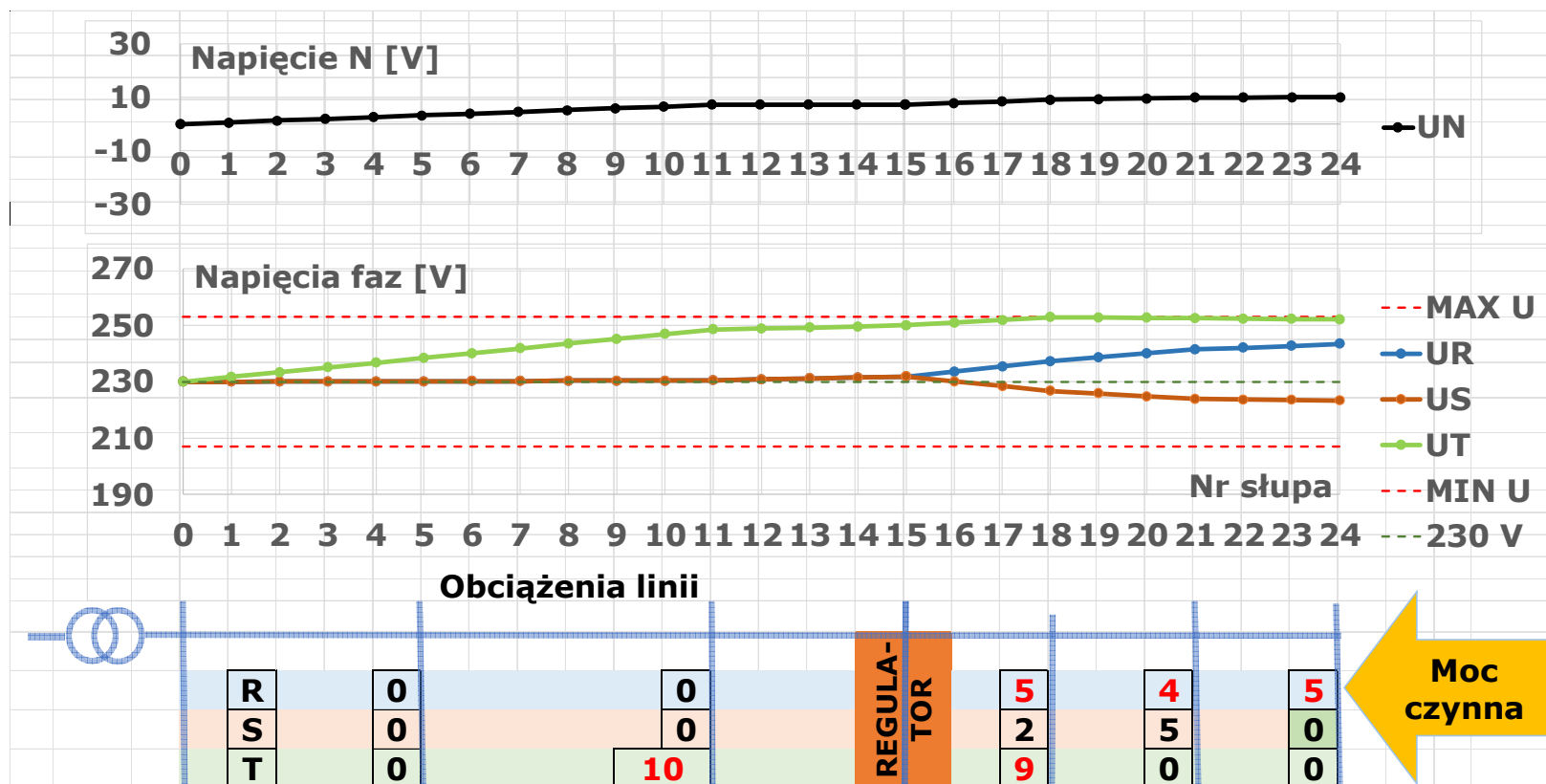
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPIREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

Techniczne sposoby oddziaływania na parametry napięciowe linii nn

IV. Napięcia wzdłuż linii z niesymetrią obciążenia i symetryzacją prądów



Oznaczenia na rysunkach (obciążenia linii w kratkach):

☒ – wprowadzanie energii w fazie

☒ – pobór energii w fazie

Linia 1200 m, 70 mm²

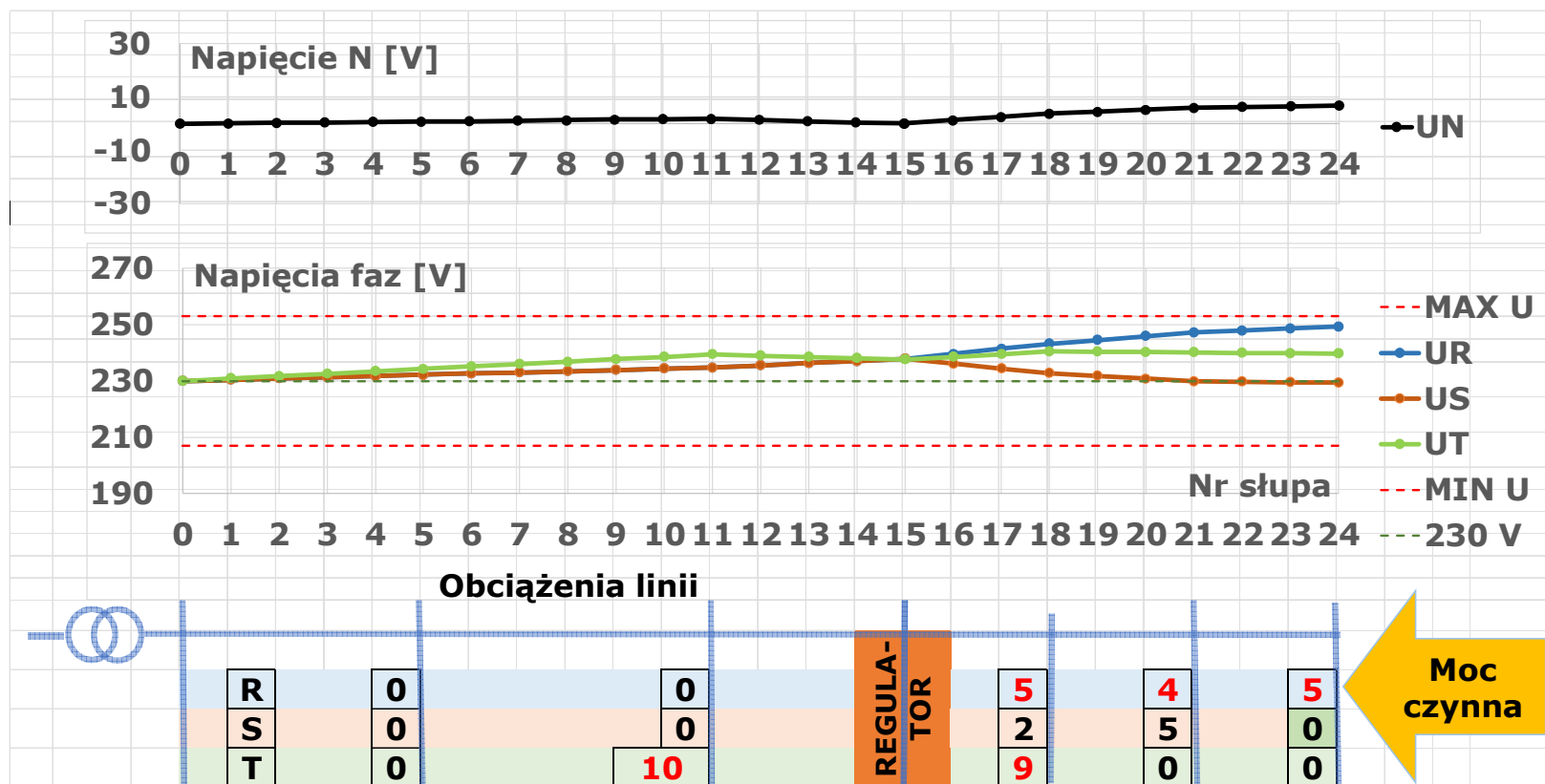
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPIREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

Techniczne sposoby oddziaływania na parametry napięciowe linii nn

V. Napięcia wzdłuż linii z niesymetrią obciążenia i symetryzacją napięć



Oznaczenia na rysunkach (obciążenia linii w kratkach):

☒ – wprowadzanie energii w fazie

☒ – pobór energii w fazie

Linia 1200 m, 70 mm²

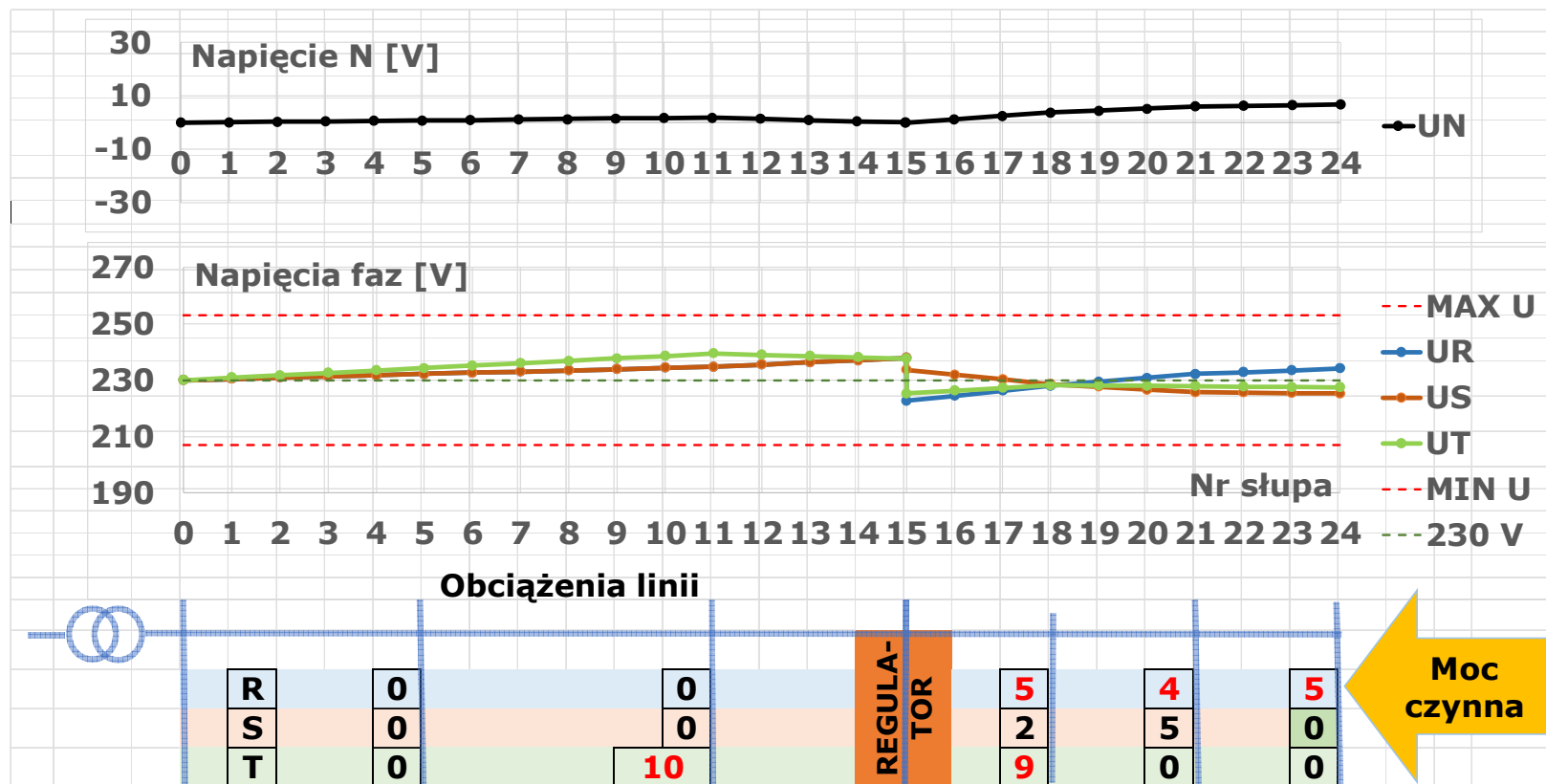
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPIREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

Techniczne sposoby oddziaływania na parametry napięciowe linii nn

VI. Napięcia wzdłuż linii z niesymetrią obciążenia z regulacją napięć i symetryzacją napięć



Oznaczenia na rysunkach (obciążenia linii w kratkach):

☒ – wprowadzanie energii w fazie

☒ – pobór energii w fazie

Linia 1200 m, 70 mm²

IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

PTPIREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

Pasywna modernizacja linii dystrybucyjnej nn

Zwiększanie przekrojów przewodów

- Efektywne przy symetrycznych prądach
- **!!!** Nieekonomiczne przy niesymetrii prądów **!!!**

Pasywna modernizacja linii dystrybucyjnej nn

Dopuszczalne moce przesyłane linią przy symetrycznych prądach
i zachowanym dopuszczalnym spadku napięcia w linii $\Delta U = 23V$

Długość linii	Dopuszczalna moc przesyłana linią trójfazową przy 23 V spadku napięcia [kVA]									
	Przekrój [mm ²]									
m	16	25	35	50	70	95	120	150	185,00	240,0
100	76,0	100,0	124,0	155,0	193,0	233,0	267,0	311,0	356,0	422,0
200	44,6	69,2	96,9	138,3	193,0	233,0	267,0	311,0	356,0	422,0
300	29,8	46,2	64,6	92,2	129,3	174,4	215,3	272,3	338,5	422,0
400	22,3	34,6	48,5	69,2	97,0	130,8	161,5	204,2	253,8	331,7
500	17,9	27,7	38,8	55,3	77,6	104,6	129,2	163,4	203,1	265,4
600	14,9	23,1	32,3	46,1	64,7	87,2	107,7	136,1	169,2	221,2
700	12,8	19,8	27,7	39,5	55,4	74,7	92,3	116,7	145,1	189,6
800	11,2	17,3	24,2	34,6	48,5	65,4	80,7	102,1	126,9	165,9
900	9,9	15,4	21,5	30,7	43,1	58,1	71,8	90,8	112,8	147,4
1000	8,9	13,8	19,4	27,7	38,8	52,3	64,6	81,7	101,5	132,7
1100	8,1	12,6	17,6	25,1	35,3	47,6	58,7	74,3	92,3	120,6
1200	7,4	11,5	16,2	23,1	32,3	43,6	53,8	68,1	84,6	110,6

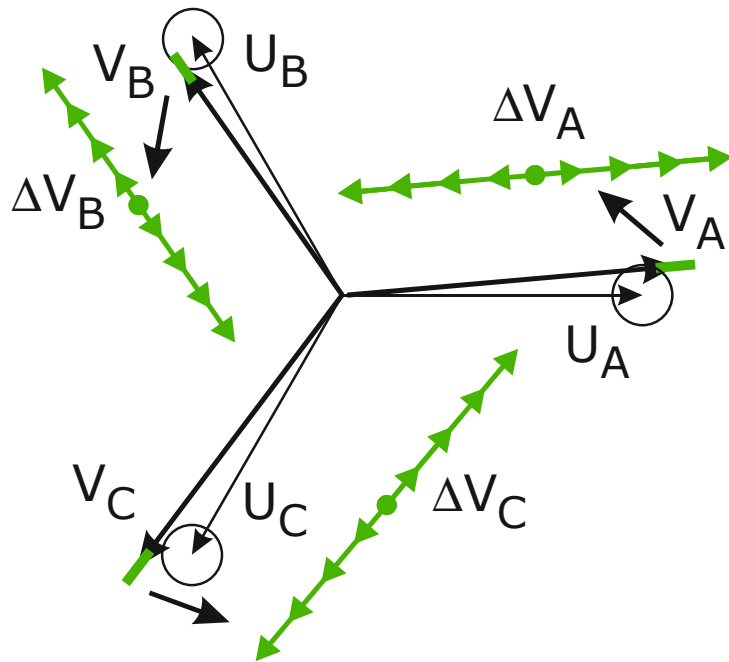
Pasywna modernizacja linii dystrybucyjnej nn

Dopuszczalne moce przesyłane linią przy przy niesymetrii dwukierunkowej
i zachowanym dopuszczalnym spadku napięcia w linii $\Delta U = 23V$

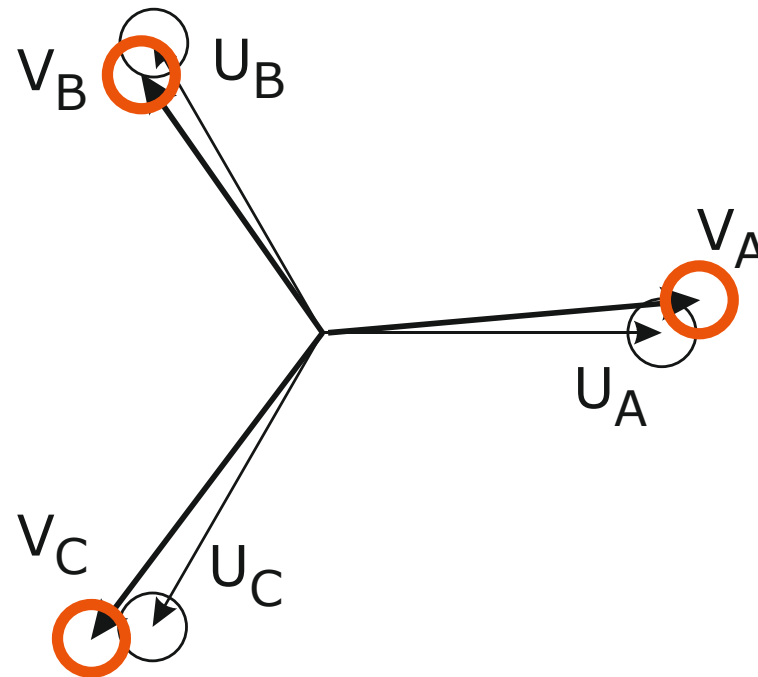
Długość linii	Dopuszczalna moc przesyłana linią trójfazową przy 23 V spadku napięcia [kVA]									
	Przekrój [mm ²]									
m	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
100	9,9	15	21	26	32	39	45	52	59	70
200	5,0	7,7	10,8	15,4	21,6	29,1	35,9	45,4	56,4	70
300	3,3	5,1	7,2	10,2	14,4	19,4	23,9	30,3	37,6	49,1
400	2,5	3,8	5,4	7,7	10,8	14,5	17,9	22,7	28,2	36,9
500	2,0	3,1	4,3	6,1	8,6	11,6	14,4	18,2	22,6	29,5
600	1,7	2,6	3,6	5,1	7,2	9,7	12,0	15,1	18,8	24,6
700	1,4	2,2	3,1	4,4	6,2	8,3	10,3	13,0	16,1	21,1
800	1,2	1,9	2,7	3,8	5,4	7,3	9,0	11,3	14,1	18,4
900	1,1	1,7	2,4	3,4	4,8	6,5	8,0	10,1	12,5	16,4
1000	1,0	1,5	2,2	3,1	4,3	5,8	7,2	9,1	11,3	14,7
1100	0,9	1,4	2,0	2,8	3,9	5,3	6,5	8,3	10,3	13,4
1200	0,8	1,3	1,8	2,6	3,6	4,8	6,0	7,6	9,4	12,3

Pasywna modernizacja linii dystrybucyjnej

Dodawanie napięć za pomocą transformatorów dodawczych typu LVR (przełączane) oraz ALVR (**aktywne**)



Przełączane

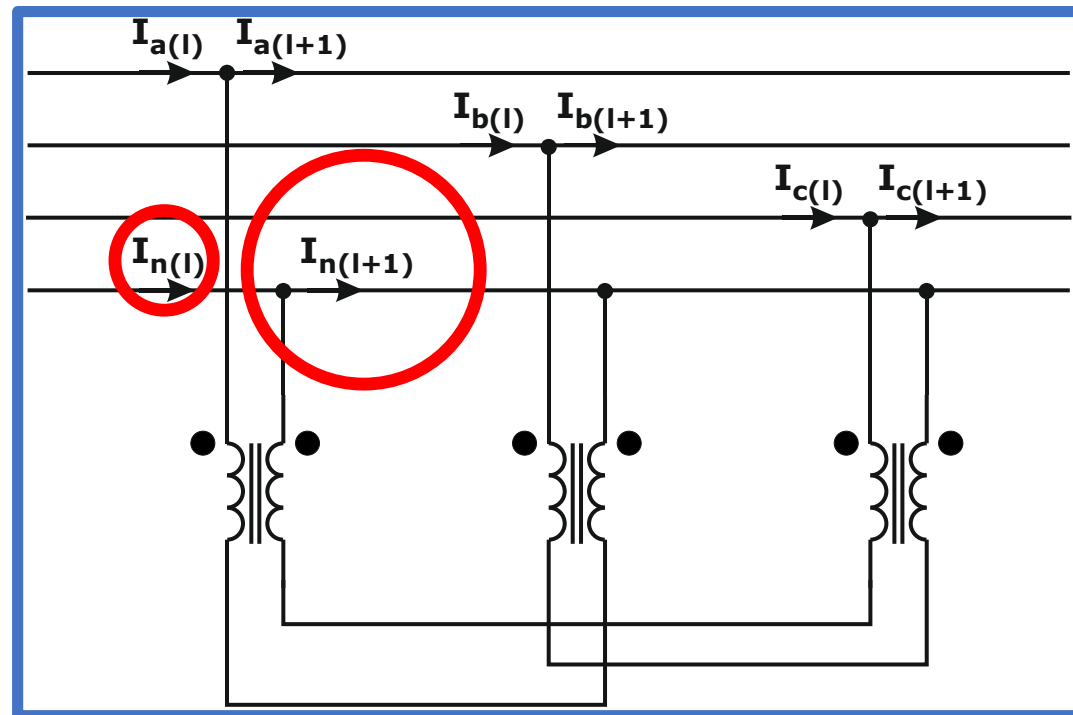


Regulowane - aktywne

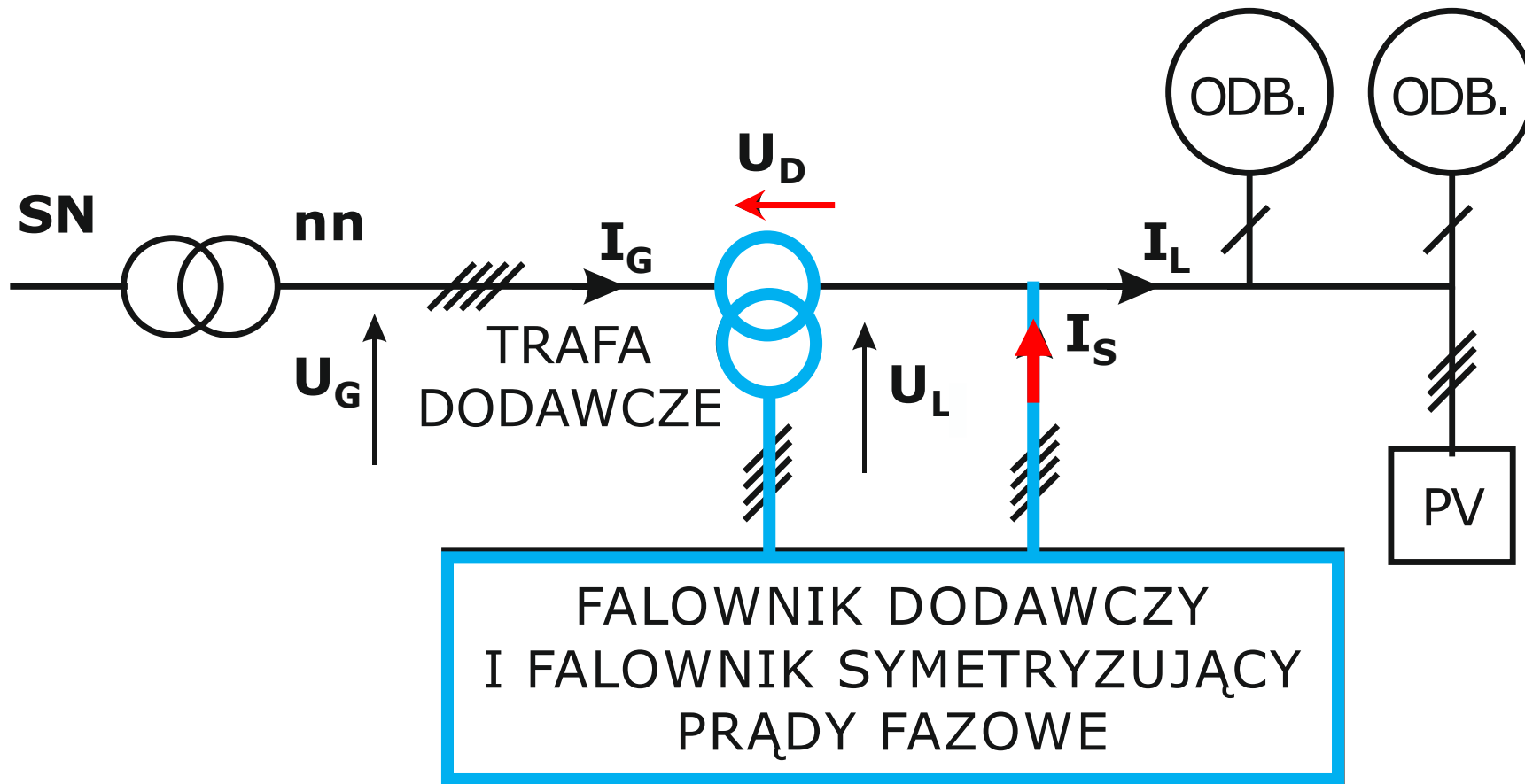
Pasywna modernizacja linii dystrybucyjnej nn

Symetryzacja prądów w sieciach nn za pomocą transformatora połączanego w zygzak.

!!!
Częściowa redukcja prądu
składowej zerowej
w przewodzie neutralnym
!!!



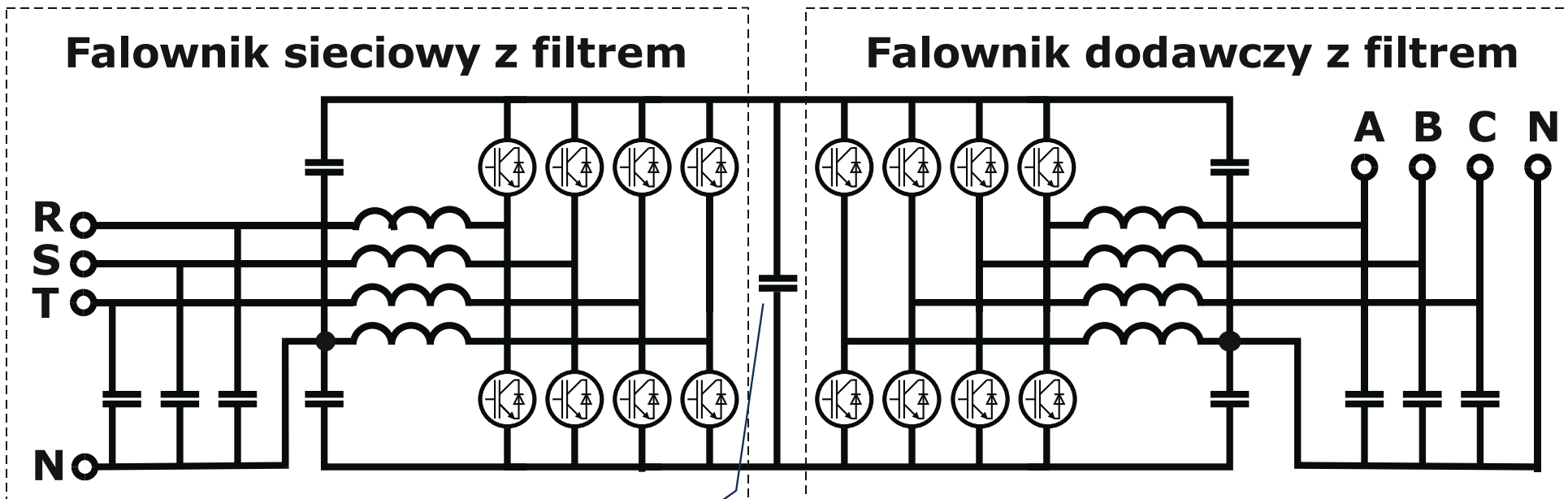
Regulator napięcia i symetryzator prądów ALVR - SmartGridEnabler® w trójfazowej sieci nn



ALVR – Active Line Voltage Regulator

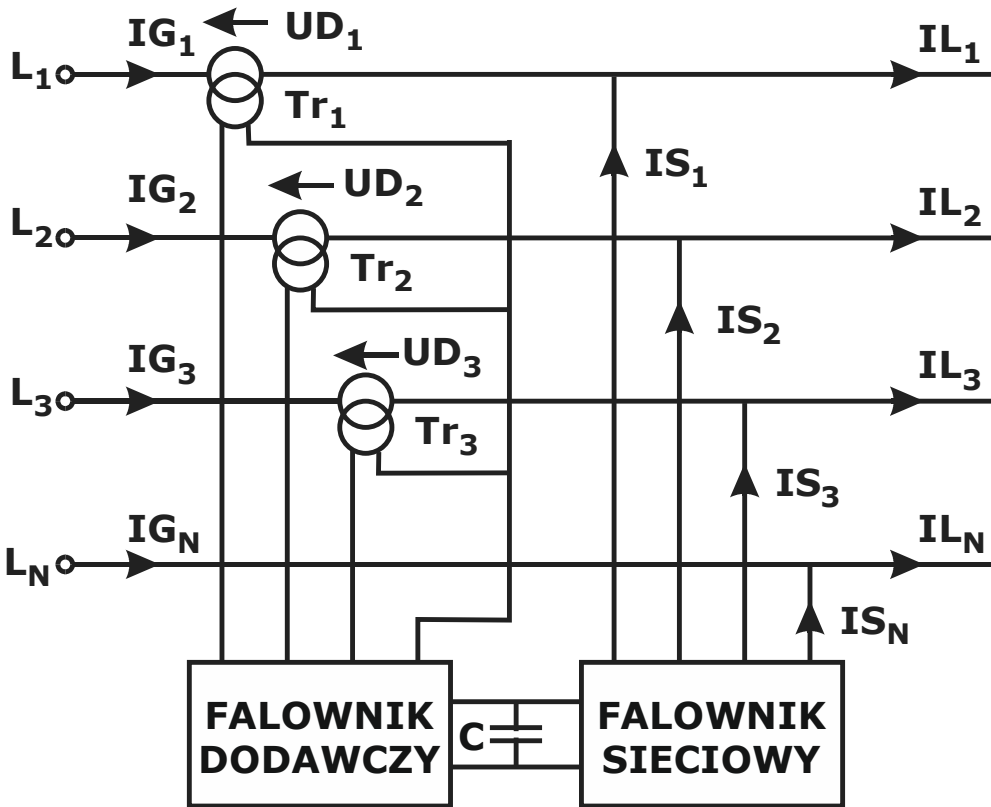
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

Schemat falowników aktywnego regulatora ALVR – działanie przy niesymetrii obciążenia



**Magazynowanie
i oddawanie energii
w czasie $\frac{1}{2}$ okresu sieci**

Konstrukcja aktywnego regulatora napięcia z wbudowanym energoelektronicznym symetryzátorem prądów



Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD z zainstalowanymi aktywnymi regulatorami napięcia ALVR



IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

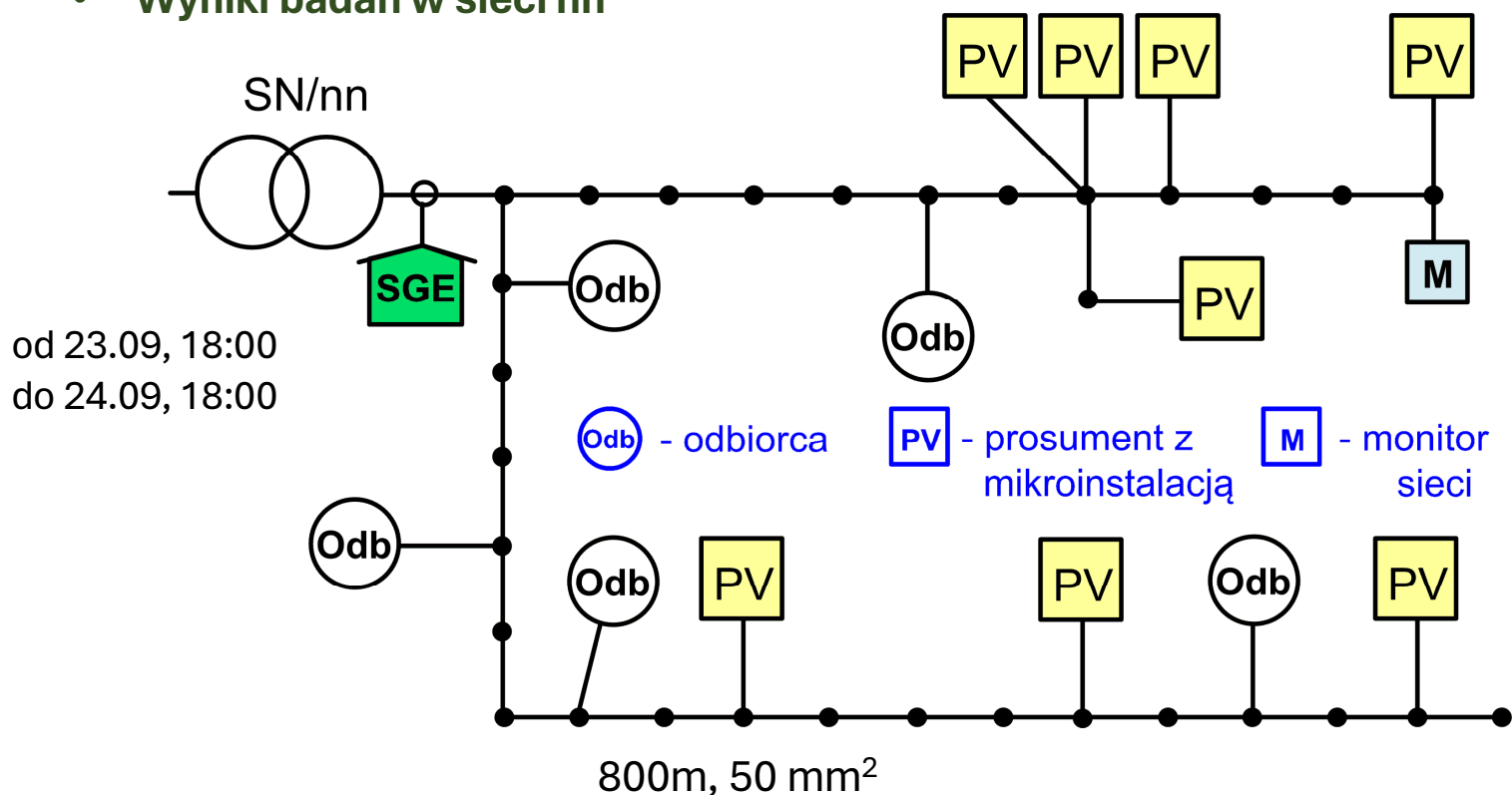
PTPiREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD

- ALVR SmartGridEnabler® blisko transformatora SN/nn

- Wyniki badań w sieci nn



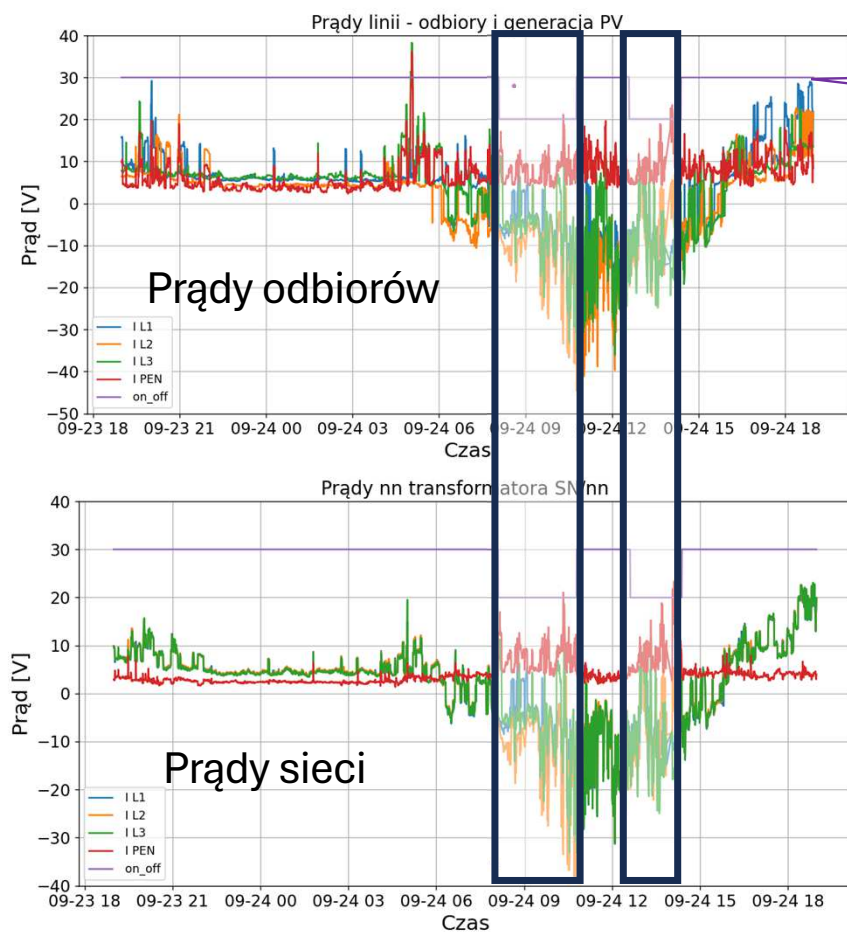
Szczegółowy opis konfiguracji w referacie Adamowicz, Krzemiński

IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

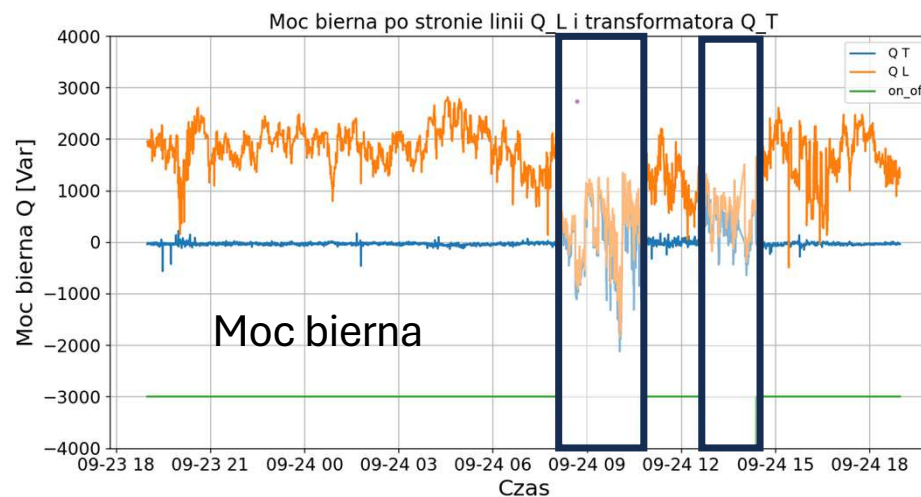
Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD

- ALVR SmartGridEnabler[®] blisko transformatora SN/nn

- symetryzacja prądów transformatora SN/nn – wyniki pomiarów przy stacji SN/nn



1 - zał. regul. 0 - wył. regul.



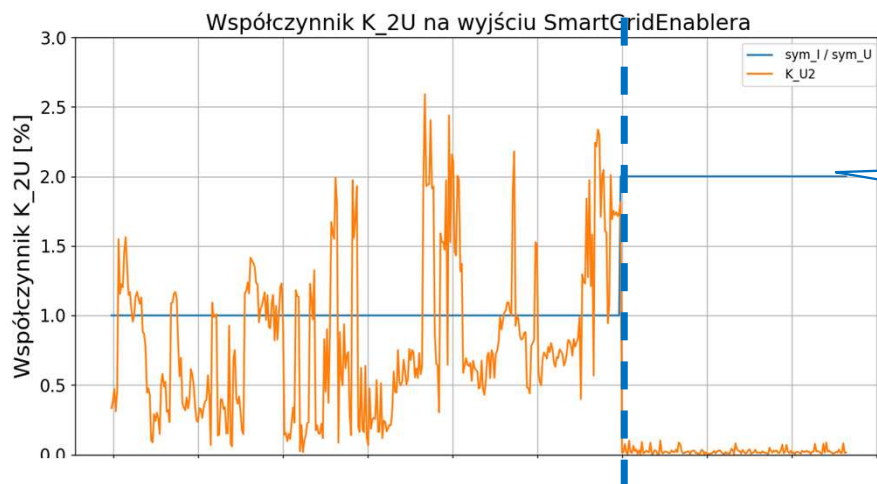
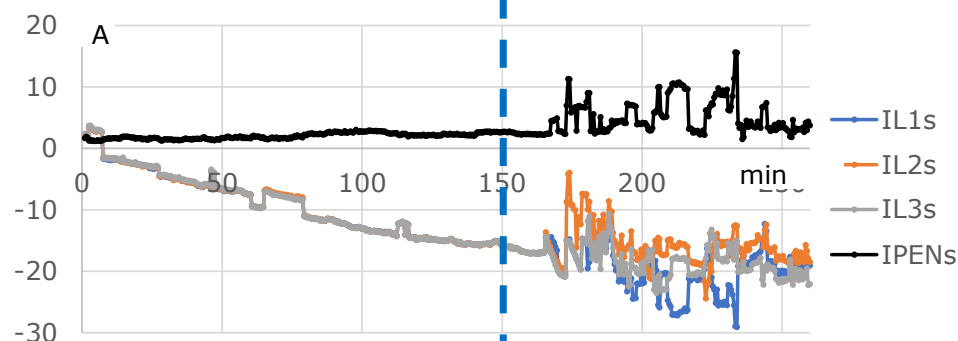
Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD

- ALVR SmartGridEnabler[®] blisko transformatora SN/nn

- Symetryzacja prądów / symetryzacja napięć – wyniki pomiarów w linii

Symetryzator prądów

Symetryzator napięć



K_{2U} – współczynnik asymetrii napięcia

0 – symetryzacja prądów

1 – symetryzacja napięć

Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD

Wybór miejsca zainstalowania regulatora napięcia i/lub symetryzatora prądów:

- Obliczenie prądów w kolejnych odcinkach.
- Wyznaczenie spadków napięcia na kolejnych odcinkach linii.
- Wyznaczenie napięć w punktach linii.
- Sprawdzenie działania symetryzatora bez regulacji napięcia.
- Ustalenie miejsca zainstalowania regulatora dla zapewnienia dopuszczalnego poziomu napięcia.

Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD

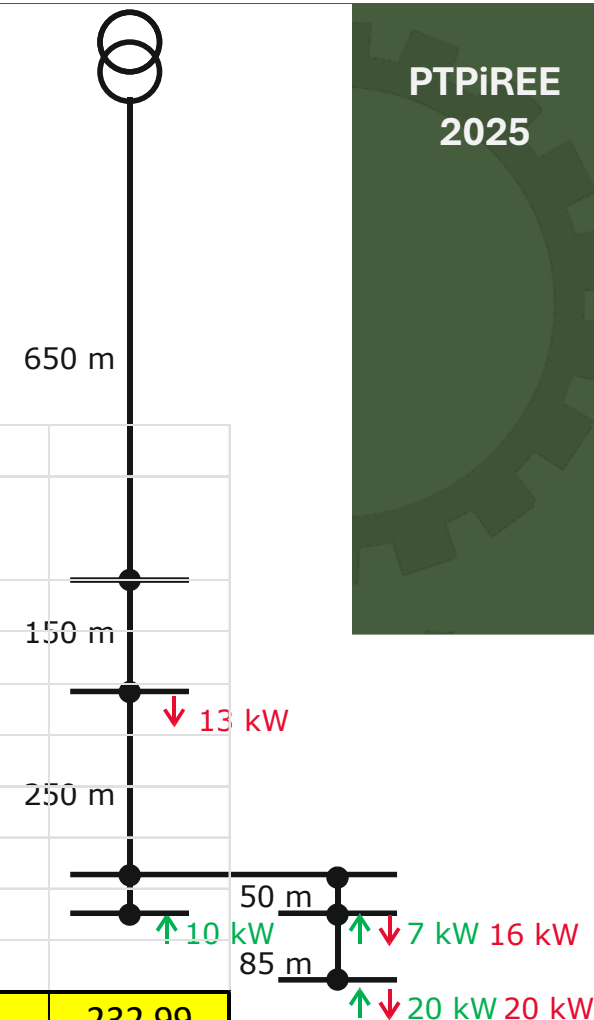
Instalacja regulatora na linii z długim odcinkiem

– napięcia po symetryzacji i regulacji

Uproszczenie: tylko generacja

	Moc	Prąd sym.	Suma prądów	Napięcie				
	Przekrój	Długość	Rezystancja	Spadek napięcia				
	Transformator			230,00				
	4X50	650	0,5737	12,43				
	Regulator			-20,00				
	4x50	150	0,5737	2,87				
Słup	13	19	33	225,30				
	4x50	250	0,5737	7,69				
			53,6232	232,99			232,99	
	4x50	50	0,5737	0,42		4x50	50	0,5737
Słup	10	14	14	233,41		7	10	39
						4x25	85	1,1459
						20	29	29
								236,94

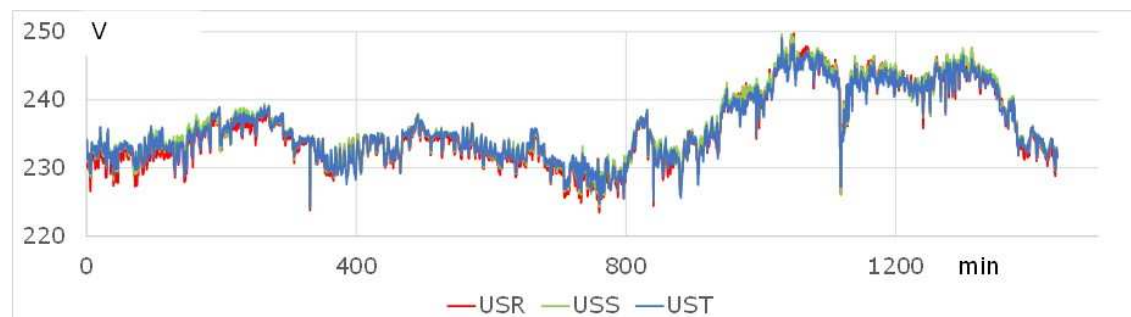
IV Konferencja Usługi elastyczne



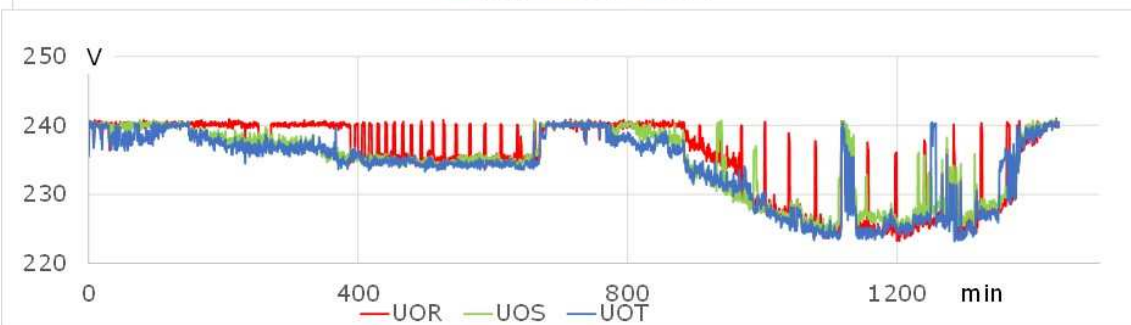
PTPiREE
2025

MMB
Driven
multiscalar model based
DRIVES

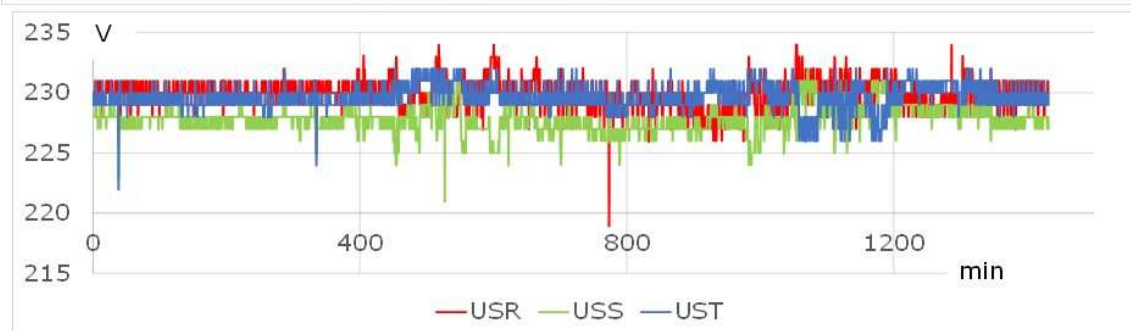
Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD - działanie aktywnego regulatora ALVR w linii nn



Napięcia fazowe przed
regulatorem



Napięcia fazowe
za regulatorem
(w funkcji prądu)

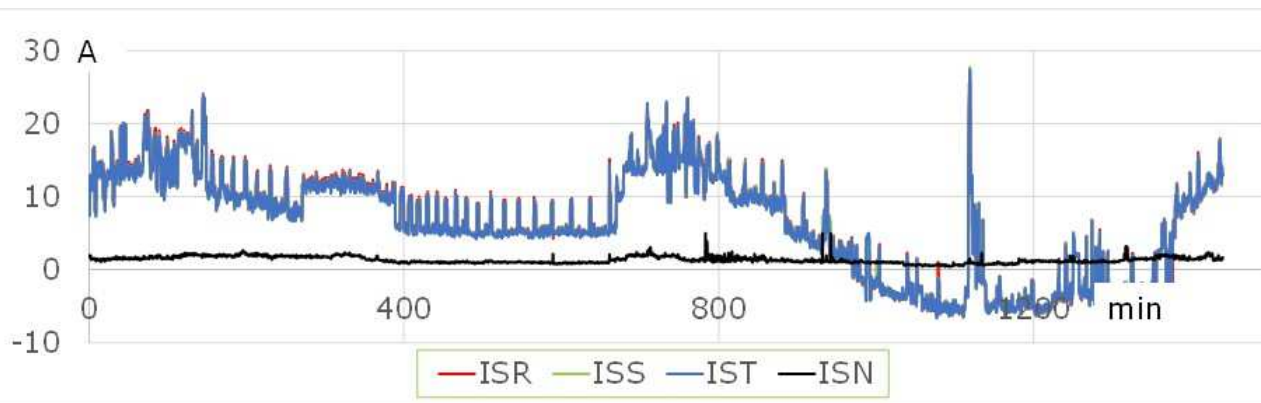


Napięcia fazowe
na końcu linii

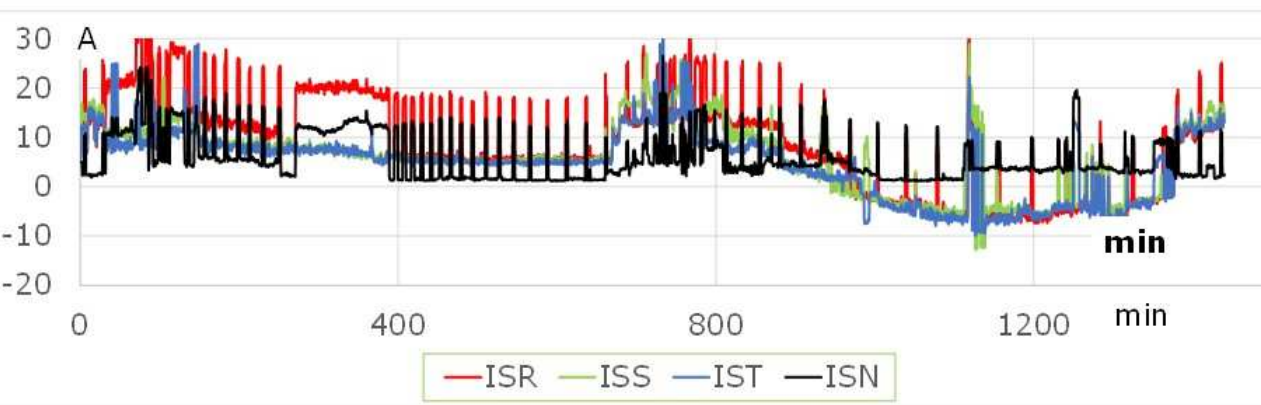
IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

Zwiększenie elastyczności infrastruktury OSD - działanie SYMETRYZATORA PRĄDÓW w linii nn

PTPIREE
2025



Prądy fazowe
po stronie sieci



Prądy fazowe
po stronie odbiorów

ALVR SmartGridEnabler® — Najprostsza droga do stabilnej, oszczędnej i nowoczesnej sieci

Natychmiastowa poprawa jakości napięcia

ALVR stabilizuje napięcia fazowe tam, gdzie dziś tracisz jakość dostaw — bez ingerencji w infrastrukturę odbiorców.

Maksymalne wykorzystanie istniejącej sieci

Urządzenie zmniejsza asymetrię i odciąża transformatory, dzięki czemu możesz przesyłać więcej energii *bez kosztownych modernizacji*.

Bezpieczna integracja OZE i magazynów energii

Wygładzanie napięć i prądów niezrównoważenia pozwala przyłączać więcej PV i BESS — szybciej, pewniej i bez ryzyka przekroczeń parametrów.

Realna redukcja strat i kosztów operacyjnych

Ograniczenie strat I^2R w liniach i transformatorach to niższe koszty eksploatacji i wyższa efektywność sieci.

Rozwiązanie, które pracuje za Ciebie

Automatyczna regulacja, pełna telemetria i praca w czasie rzeczywistym — ALVR nie wymaga czuwania, ale zmienia sposób, w jaki działa sieć.

Gotowość na przyszłość sieci dystrybucyjnych

To nie jest kolejny regulator. To element Smart Grid, który otwiera drogę do elastyczności, usług systemowych i nowego modelu OSD.

Napięcia przed i za regulatorem ALVR oraz na końcu linii dla stabilizacji 230V

Przed reg.

Za reg. 230 V

Na końcu

210 V – 250 V



224 V – 239 V

229 V – 244 V



220 V – 235 V

232 V – 257 V



214 V – 238 V

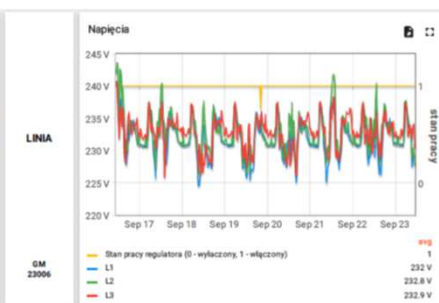
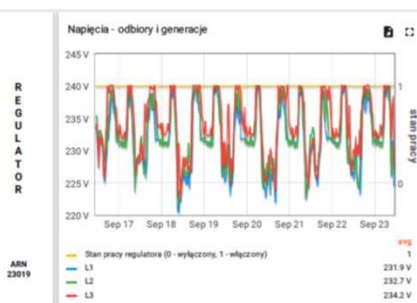
Napięcia przed i za regulatorem ALVR oraz na końcu linii z korekcją w funkcji prądu

Przed reg.

Za reg. z korekcją

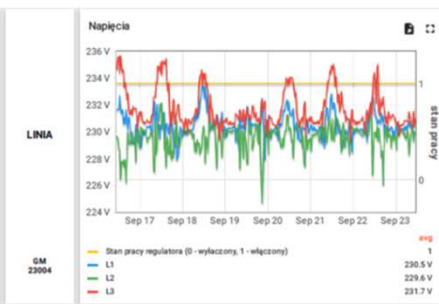
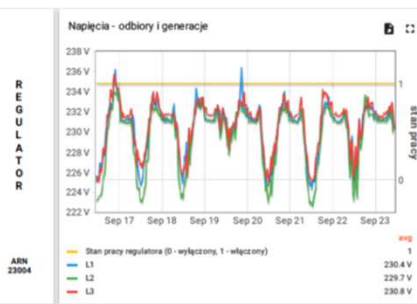
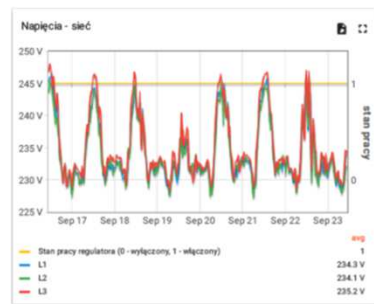
Na końcu

226 V – 255 V



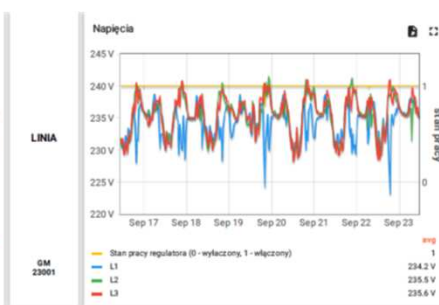
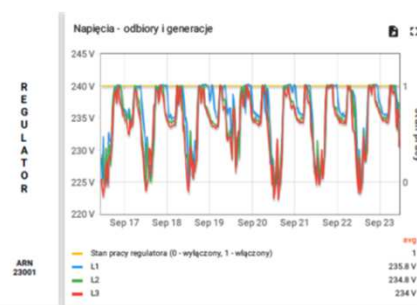
225 V – 243 V

227 V – 248 V



224 V – 236 V

222 V – 247 V



223 V – 241 V

PTPiREE
2025

MMB
Drivers
multiscalar model based
DRIVES

Efekty dla OSD wynikające z instalacji regulatorów ALVR – zysk natychmiastowy i długoterminowy

ALVR usuwa problemy, zanim staną się kosztowne:

Eliminacja zgłoszeń o przekroczeniach napięcia – mniej interwencji, mniej reklamacji.

Większa produkcja z mikroinstalacji – wzrost wolumenów energii oddawanej do sieci bez konieczności inwestycji w modernizację.

Przesunięcie w czasie modernizacji linii – OSD zyskuje oddech finansowy i możliwość planowania inwestycji wtedy, gdy dostępne są środki.

Uniknięcie kosztownych przebudów – ALVR pozwala wykorzystać istniejącą infrastrukturę w sposób znacznie bardziej efektywny.

Brak sporów administracyjnych z wymagającymi prosumentami – problemy techniczne są gaszone u źródła, zanim przerodzą się w procedury.

ALVR = realna poprawa jakości pracy sieci przy minimalnych nakładach.

IV Konferencja Usługi elastyczności – nowa rola OSD na rynku energii

ALVR jako fundament usług elastyczności sieci nn

Aktywne regulatory napięcia i energoelektroniczne symetryzatory ALVR:

Tworzą „**inteligentną warstwę sterowania**” na poziomie niskiego napięcia.

Zwiększają **odporność sieci** na dynamiczne wahania generacji i obciążeń.

Wzmacniają **elastyczność operacyjną**, która jest jednym z filarów nowej roli OSD w systemie energetycznym.

Wspierają stabilizację **całego KSE**, kompensując lokalne zaburzenia – tam, gdzie powstają.

Bez aktywnych urządzeń energoelektronicznych usługi elastyczności pozostają tylko deklaracją – z ALVR staje się realnym narzędziem.

Dlaczego techniczna elastyczność jest warunkiem działania współczesnego OSD?

Jeśli infrastruktura nie jest elastyczna technicznie – OSD traci kontrolę nad siecią:

Stabilizacja napięcia staje się niemożliwa.

Nadwyżki z PV nie mogą być przyjęte, co blokuje rozwój rynku prosumenckiego.

Przełączanie przepływów energii jest ograniczone lub ryzykowne.

Operator otrzymuje niepełne informacje o stanie sieci.

Reakcje na zakłócenia są **opóźnione lub niewykonalne**.

ALVR daje OSD narzędzia, dzięki którym sieć staje się przewidywalna, sterowalna i odporna — dokładnie tego wymaga rynek energii 2025+.

Wnioski: sieci nn są gotowe na przyszłość tylko wtedy, gdy potrafią pracować dwukierunkowo

Kluczowe obserwacje:

Tradycyjne sieci nn działają poprawnie tylko przy **jednokierunkowym przepływie energii**.

Główny problem współczesnych OSD to **niesymetria obciążeń i różne kierunki przepływu energii** na poszczególnych fazach.

Stabilność w takich warunkach zapewniają jedynie **układy, które potrafią aktywnie korygować prądy i napięcia fazowe**.

Pasywne metody korekcji w obecnych warunkach rynkowych „PV + prosumenci” stają się **niewystarczające i nieskuteczne**.

Energoelektroniczne regulatory tworzą niezależne, regulowane źródła napięcia i prądu w każdej fazie — to umożliwia pełną kontrolę sieci.

Regulator ALVR **zamienia sieć jednokierunkową w nowoczesną sieć o dwukierunkowym przepływie energii**, bez budowy nowych linii.

ALVR to brakujący element układanki technicznej współczesnych OSD.

Dziękuję za uwagę!