



**System
Elektroenergetyczny:
Bezpieczeństwo
Operacyjne i Rynkowe**

Wpływ układów sterowania wielkoskalowej generacji przekształtnikowej na stabilność systemu elektroenergetycznego Europy Kontynentalnej

Jan Smoter



**Instytut
Energetyki**
Oddział Gdańsk

Kazimierz Dolny, 17–19 marca 2026 r.

Plan prezentacji

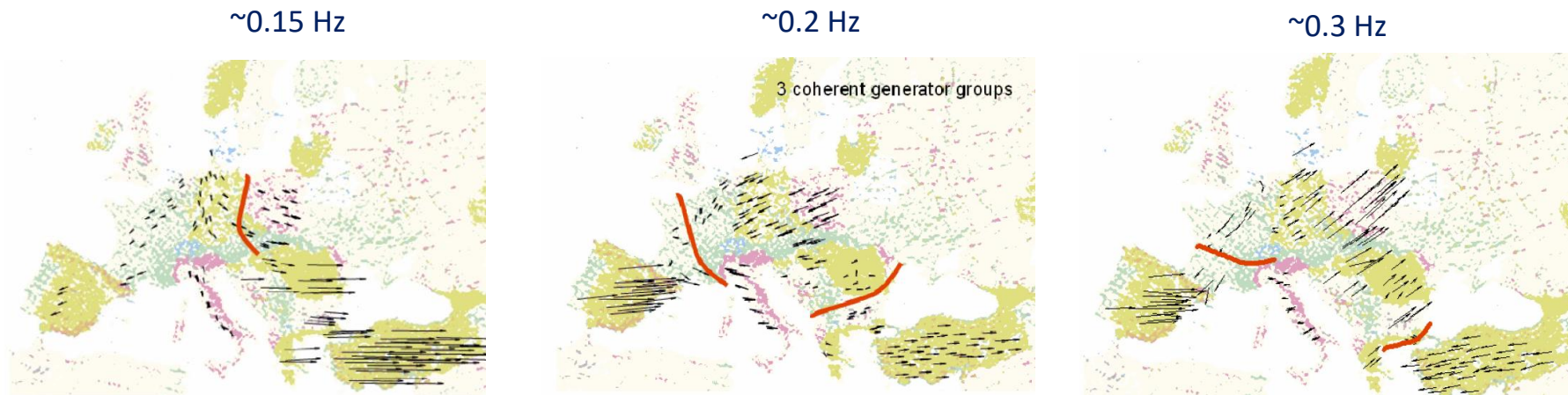


1. Zdefiniowanie problemu
2. Model obszaru synchronicznego ENTSO-E CE
3. Oscylacje międzyobszarowe w modelu CESA
4. Wpływ trybu i nastaw regulacji U/Q w źródłach przekształtnikowych na tłumienie oscylacji międzyobszarowych
5. Podsumowanie

Zdefiniowanie problemu



- Stabilność kątowna małych zakłóceń jest kluczowym aspektem analizy stabilności systemu elektroenergetycznego.
- W dużym systemie synchronicznym niedostatecznie tłumione **oscylacje międzyobszarowe** niskiej częstotliwości mogą stanowić ograniczenia dla przesyłów mocy – dotyczy eksportu mocy z obszarów skrajnych systemu w kierunku jego centrum.

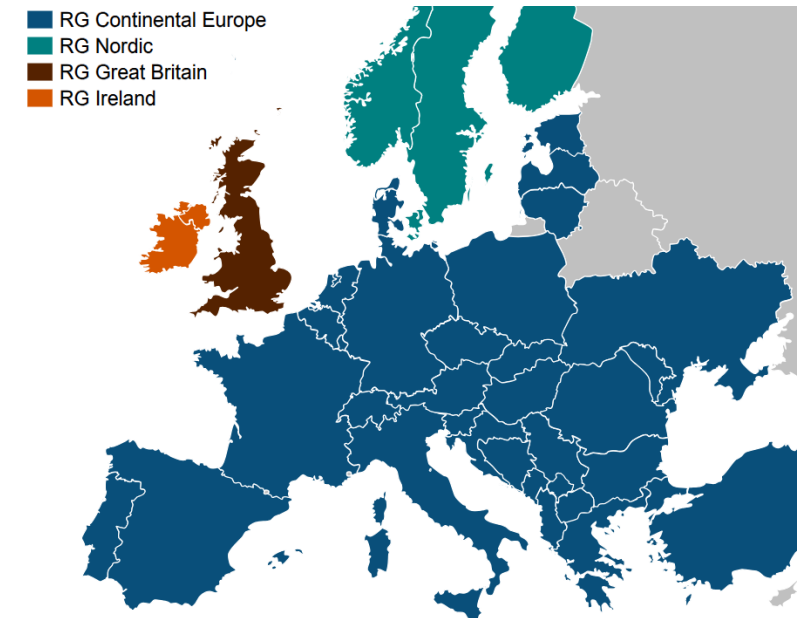


Źródło: ENTSO-E SG SPD Report: Analysis of CE inter-area oscillations of 1st December 2016

Zdefiniowanie problemu



- Stabilność kątowna małych zakłóceń jest kluczowym aspektem analizy stabilności systemu elektroenergetycznego.
- W dużym systemie synchronicznym niedostatecznie tłumione **oscylacje międzyobszarowe** niskiej częstotliwości mogą stanowić ograniczenia dla przesyłów mocy – dotyczy eksportu mocy z obszarów skrajnych systemu w kierunku jego centrum.
- Globalny charakter zjawiska oscylacji międzyobszarowych – konieczny model całego systemu CESA.
- Analiza wpływu strategii regulacji napięć/mocy biernej dla źródeł przekształtnikowych na częstotliwość i tłumienie oscylacji międzyobszarowych.

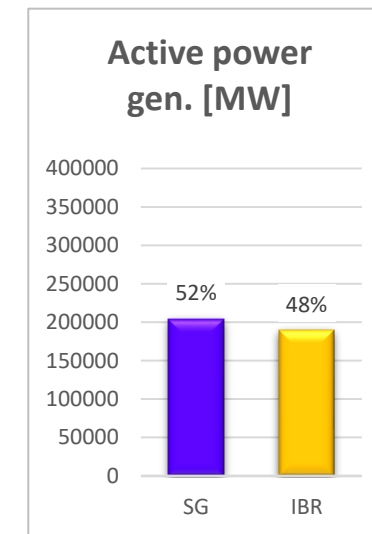
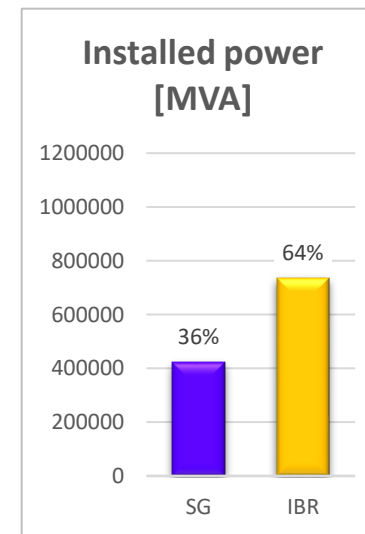


Źródło: <https://en.wikipedia.org/>

Model obszaru synchronicznego ENTSO-E CE



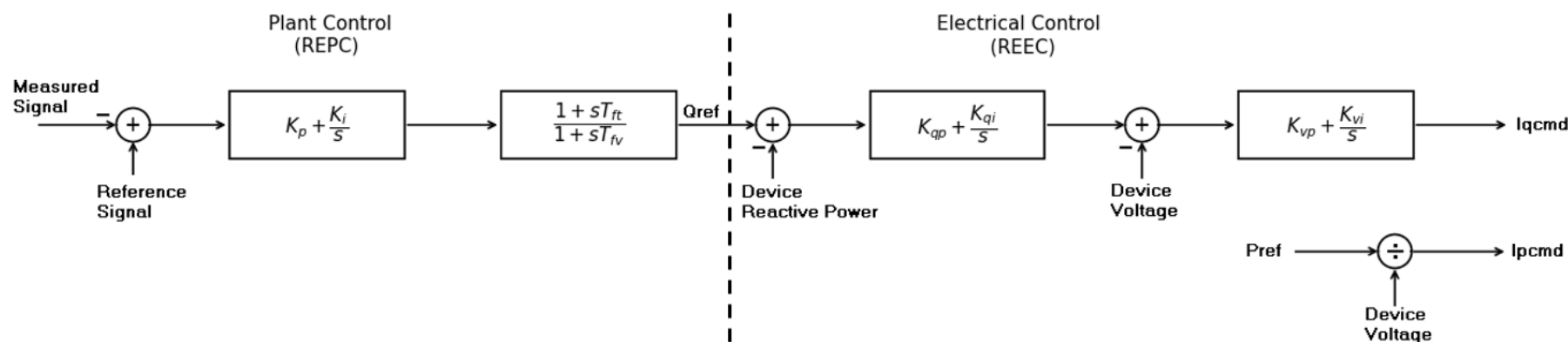
- Pod auspicjami grupy System Protection and Dynamics w ramach ENTSO-E opracowywany jest model dynamiczny CESA na rok 2030, bazujący na modelu TYNDP
- Model TYNDP dostosowany do postaci umożliwiającej analizy dynamiczne:
 - redukcja liczby węzłów o 20% do ~39 tys.
 - redukcja liczby generatorów o 78% do ~5.7 tys. (2 tys. synchr. oraz 3.7 tys. OZE)
 - zidentyfikowano 68 łącz HVDC (20 w techn. LCC oraz 48 w techn. VSC)
- Całkowita moc zainstalowana: ~1200 GVA
- Zapotrzebowanie w modelu: ~400 GW



Model dynamiczny



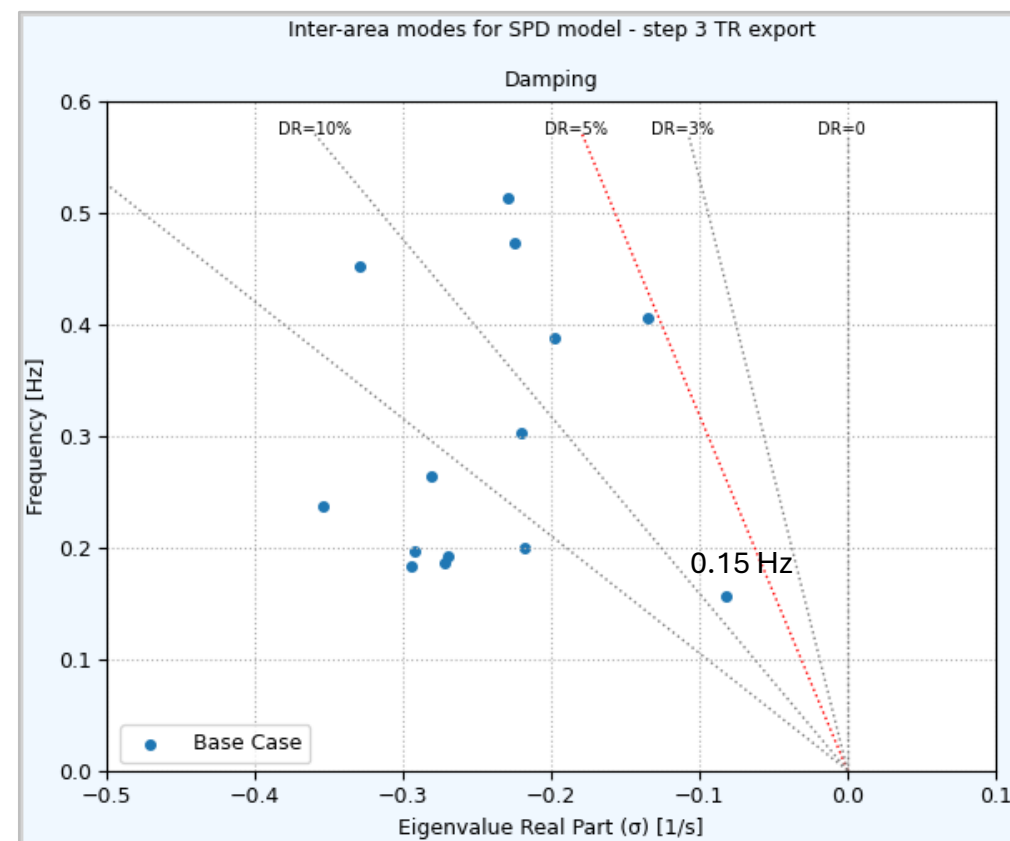
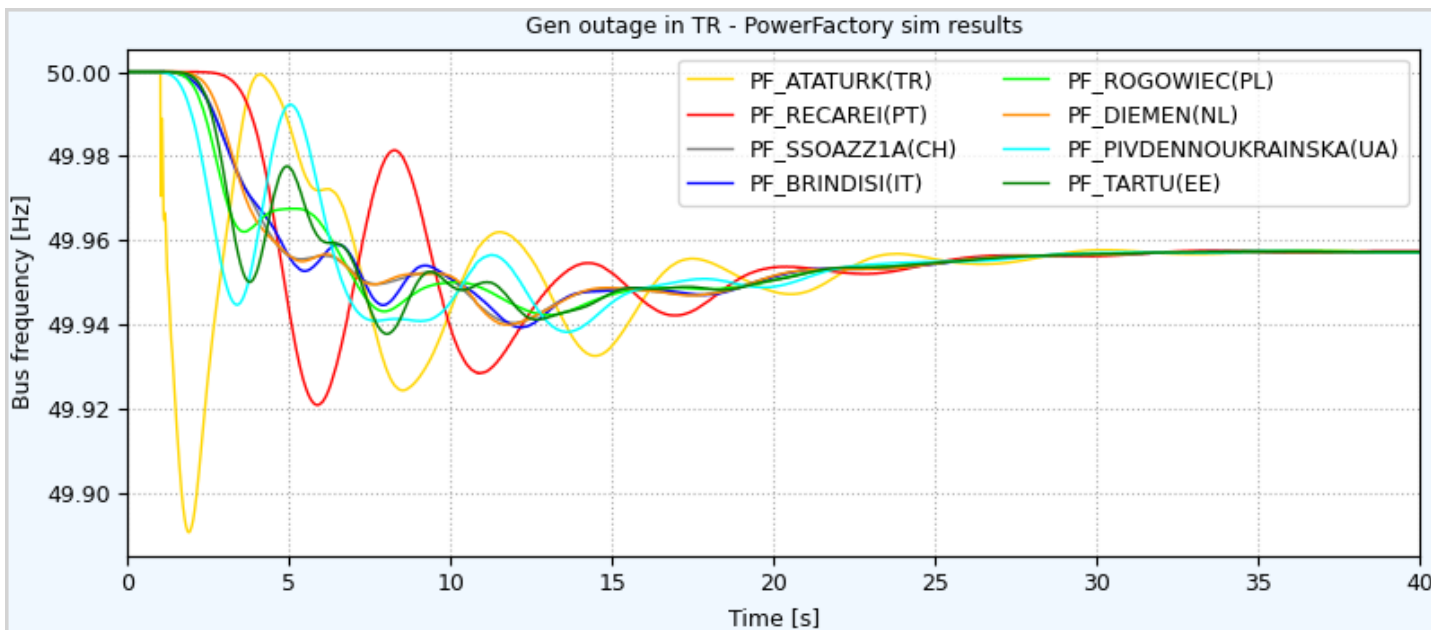
- Opracowane modele dynamiczne indywidualnych obiektów przypisywane automatycznie do każdego źródła synchronicznego i przekształtnikowego, w zależności od typu źródła.
- Modele sparametryzowane w taki sposób, aby odzwierciedlały typowe zachowanie dynamiczne danego typu źródła, przy jednoczesnym zapewnieniu realistycznej i stabilnej odpowiedzi systemu.
- Dla generatorów synchronicznych z kategorii „węglowe” (183 jednostki), „gazowe” (362 jednostki), „wodne” (661 jednostek) oraz „jądrowe” (110 jednostek) zastosowano modele dynamiczne dostarczone przez grupę SPD.
- Modele dynamiczne źródeł przekształtnikowych bazują na drugiej generacji modeli dla odnawialnych źródeł energii: REGC, REEC, REPC – uproszczona struktura, adekwatna do analizy modalnej.



Oscylacje międzyobszarowe w modelu CESA



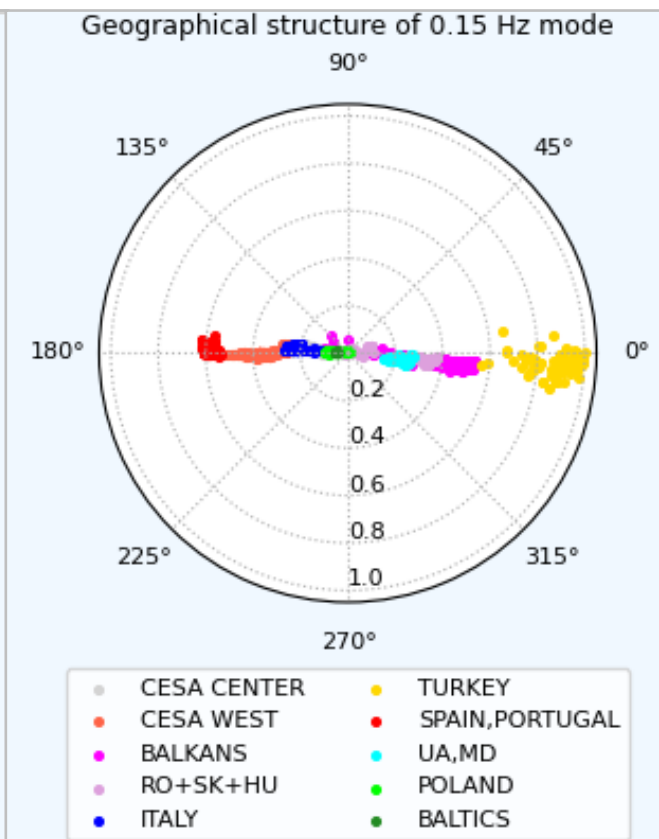
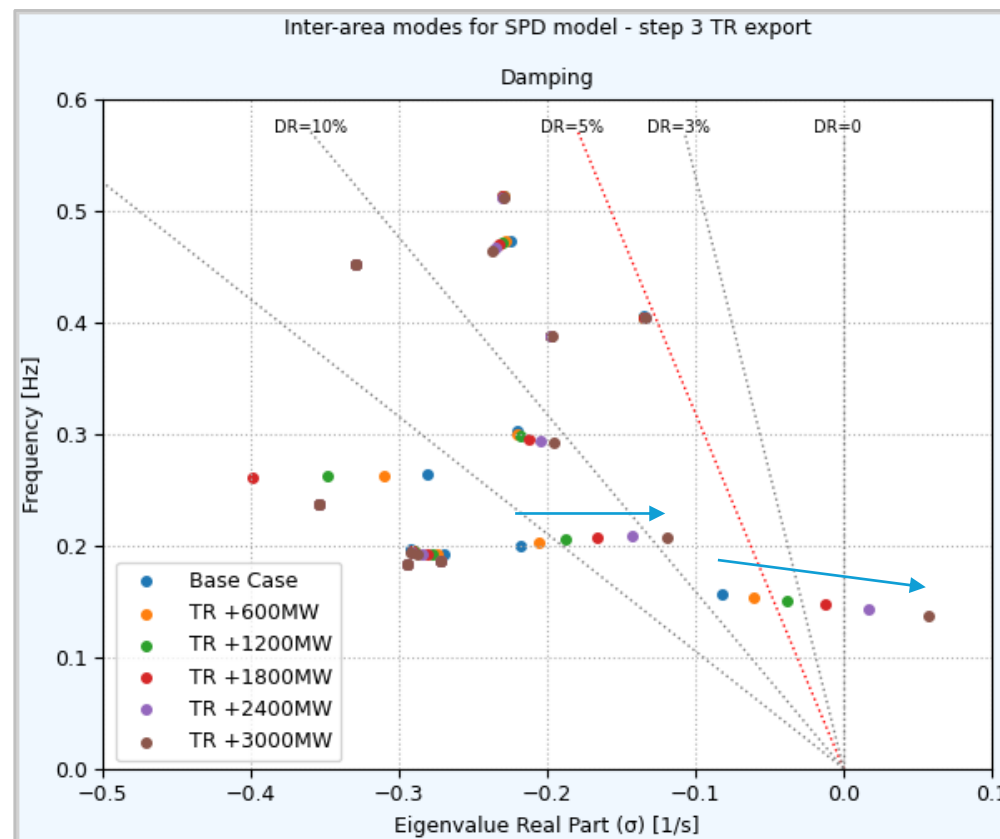
- Uzyskany rozkład modów na płaszczyźnie zespolonej (tłumienie i częstotliwość), a także struktura geograficzna analizowanych modów są zbliżone do uzyskanych w studiach przyłączeniowych Ukrainy, Mołdawii oraz państw bałtyckich.



Oscylacje międzyobszarowe w modelu CESA



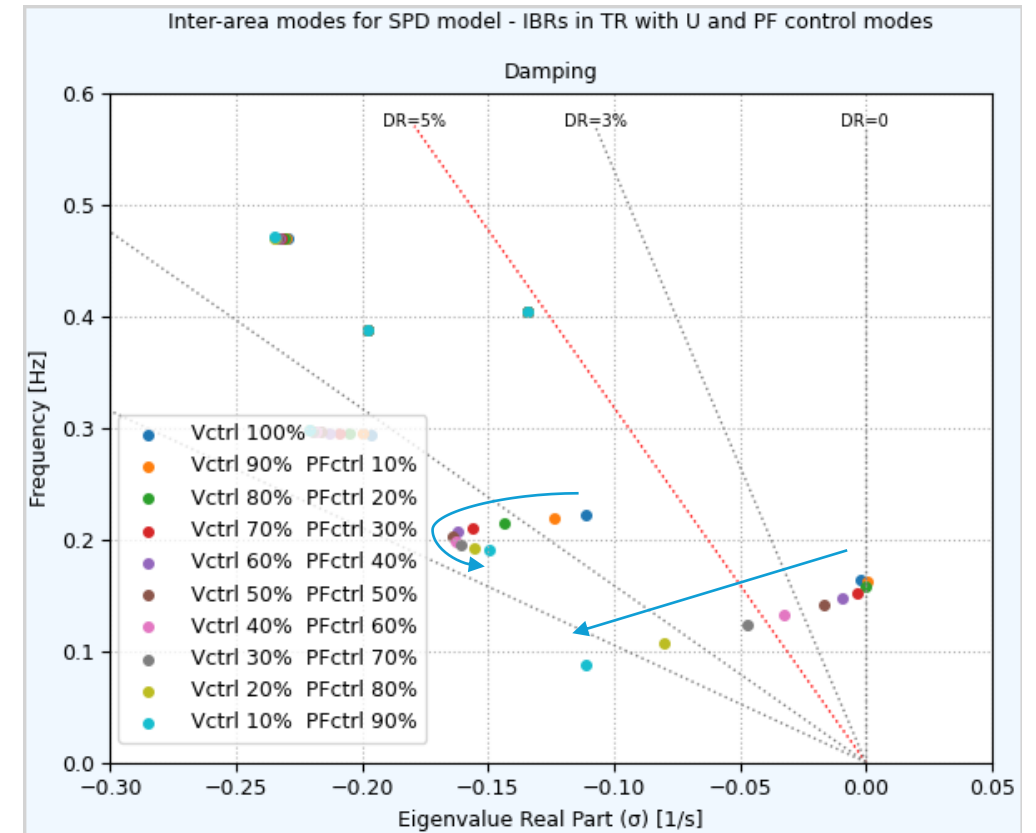
- Uzyskany rozkład modów na płaszczyźnie zespolonej (tłumienie i częstotliwość), a także struktura geograficzna analizowanych modów są zbliżone do uzyskanych w studiach przyłączeniowych Ukrainy, Mołdawii oraz państw bałtyckich.
- Wzrost eksportu z obszarów granicznych, w których generatory mają wysokie współczynniki uczestnictwa w danym modzie, zmniejsza tłumienie oscylacji



Wpływ trybu regulacji U/Q źródeł OZE



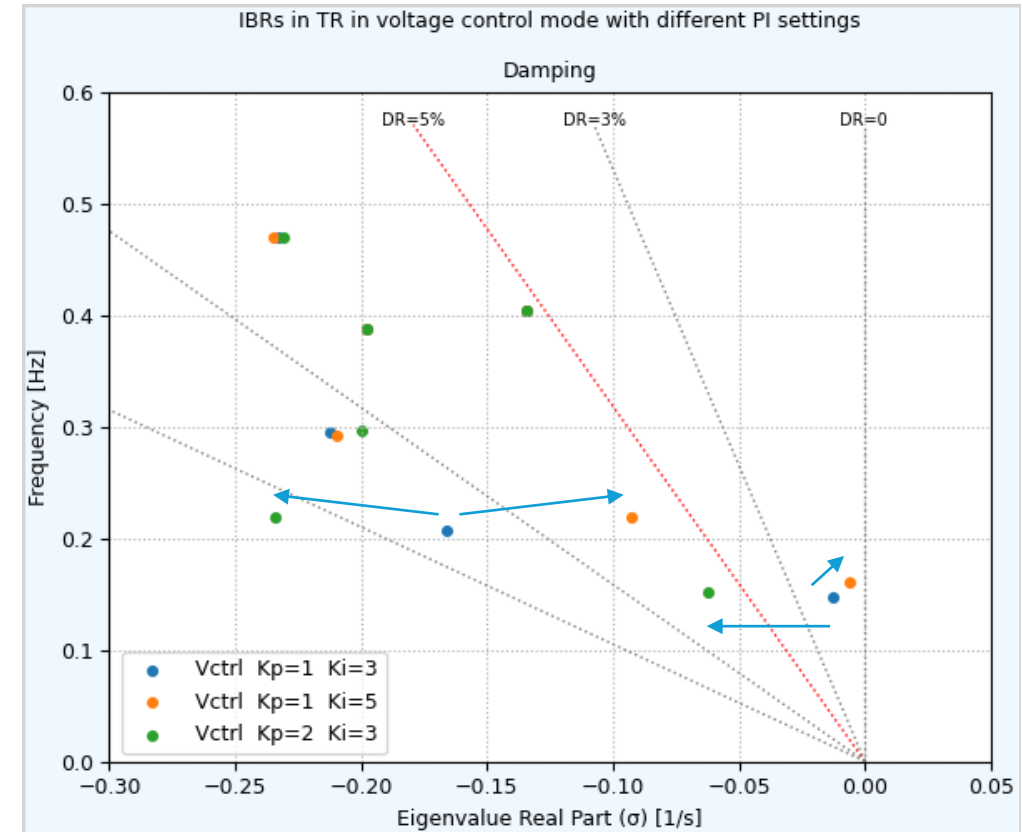
- Analizowano zmianę udziału źródeł pracujących w trybach reg. napięcia oraz współczynnika mocy w systemie elektroenergetycznym Turcji.
- Zwiększenie liczby źródeł OZE pracujących z regulacją współczynnika mocy poprawia tłumienie modów międzyobszarowych o najniższych częstotliwościach.
- Zmianie ulega częstotliwość oscylacji najniższego modu.
- Zastosowanie regulacji mocy biernej zamiast regulacji współczynnika mocy (przy tych samych nastawach regulatorów) nie wpływa istotnie na otrzymane wyniki.



Wpływ nastaw regulatora farmy



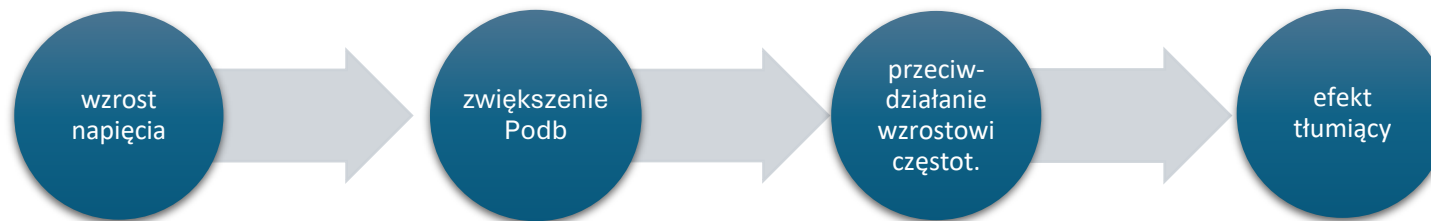
- Tryb regulacji napięcia:
 - zwiększenie wzmocnienia całkującego pogarsza tłumienie dwóch najniższych modów międzyobszarowych,
 - zwiększenie wzmocnienia proporcjonalnego poprawia tłumienie tych modów.
- Tryb regulacji współczynnika mocy – efekt mniej zauważalny.



Regulacja napięcia a tłumienie oscylacji



- Oscylacje międzyobszarowe o najniższych częstotliwościach są często określane mianem „load-oriented”, co oznacza, że ich tłumienie oraz częstotliwość zależą od podatności napięciowej odbiorów.
- Im większa jest zależność napięciowa odbiorów, tym lepsze jest tłumienie danego modu.
- Mechanizm tłumienia:



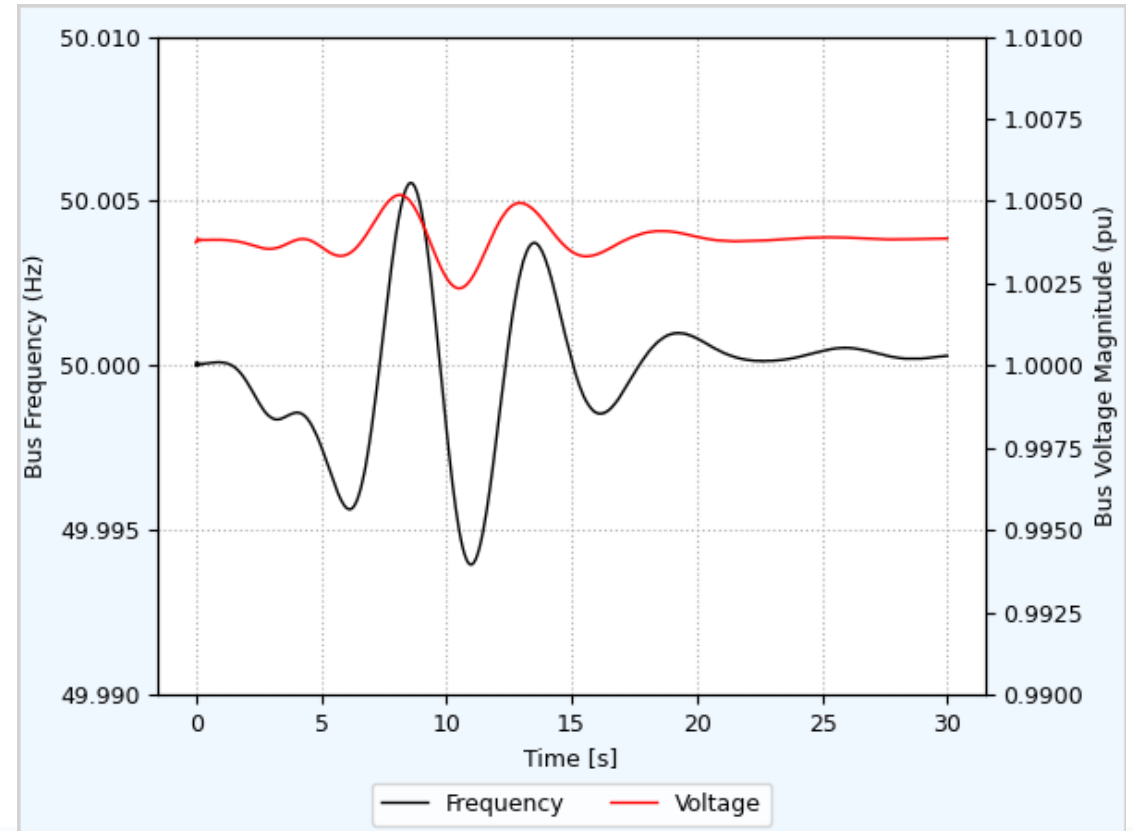
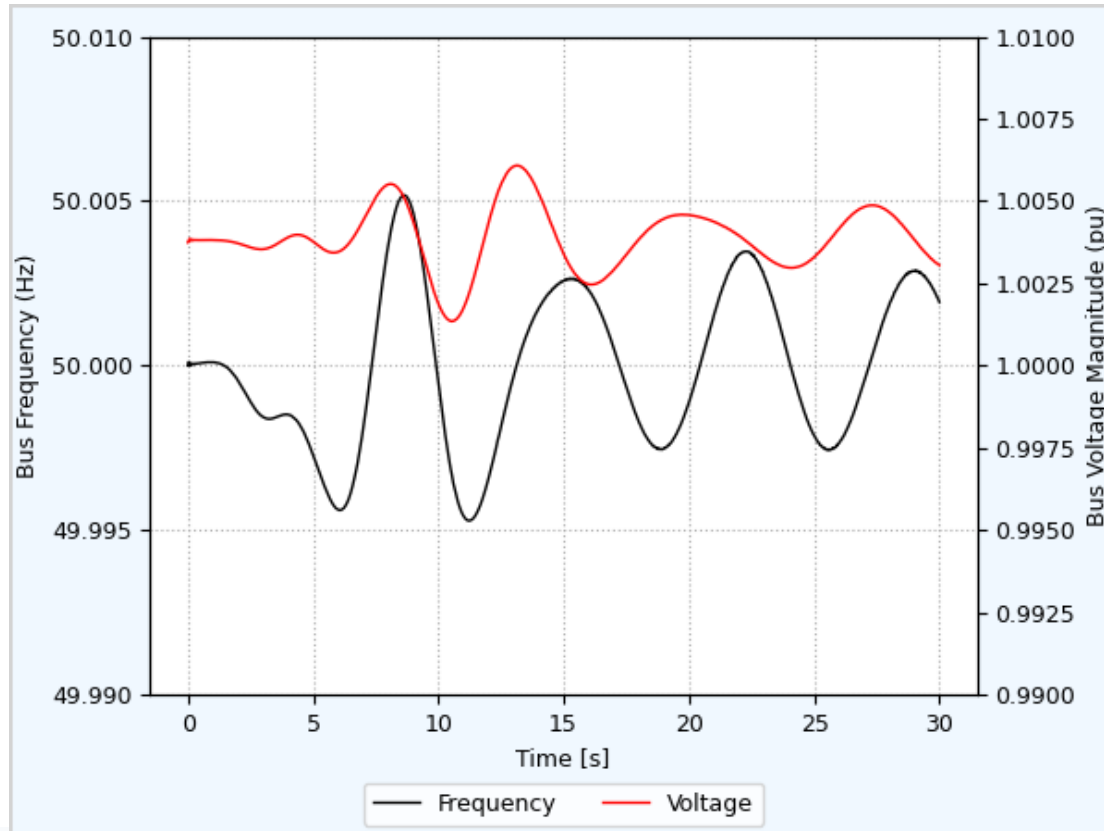
- Najlepszy efekt tłumienia występuje wówczas, gdy oscylacje częstotliwości i napięcia są w fazie.
- Pogorszenie tłumienia ma miejsce, gdy oscylacje napięcia i częstotliwości pozostają w przeciwfazie.
- Obecność dużych źródeł regulujących napięcie w systemie wpływa na fazę napięć w sieci, a zatem pośrednio na tłumienie oscylacji międzyobszarowych.

Regulacja napięcia a tłumienie oscylacji

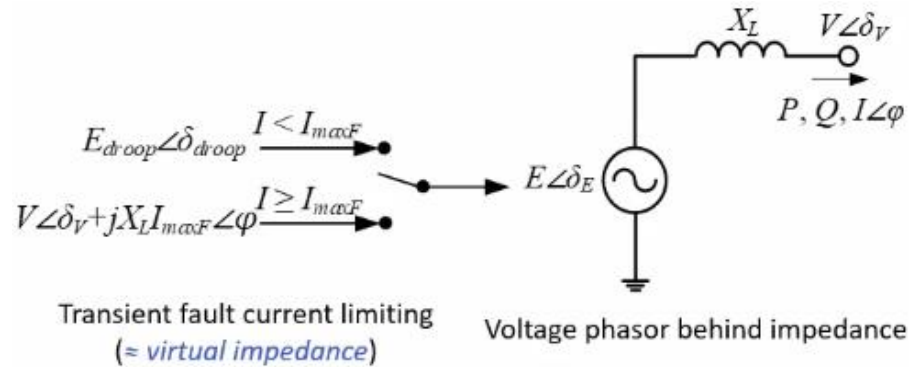


- Nastawy w regulatorze farmy $K_p=1$, $K_i=3$
- Różnica fazowa pomiędzy U i f : $\sim 83^\circ$

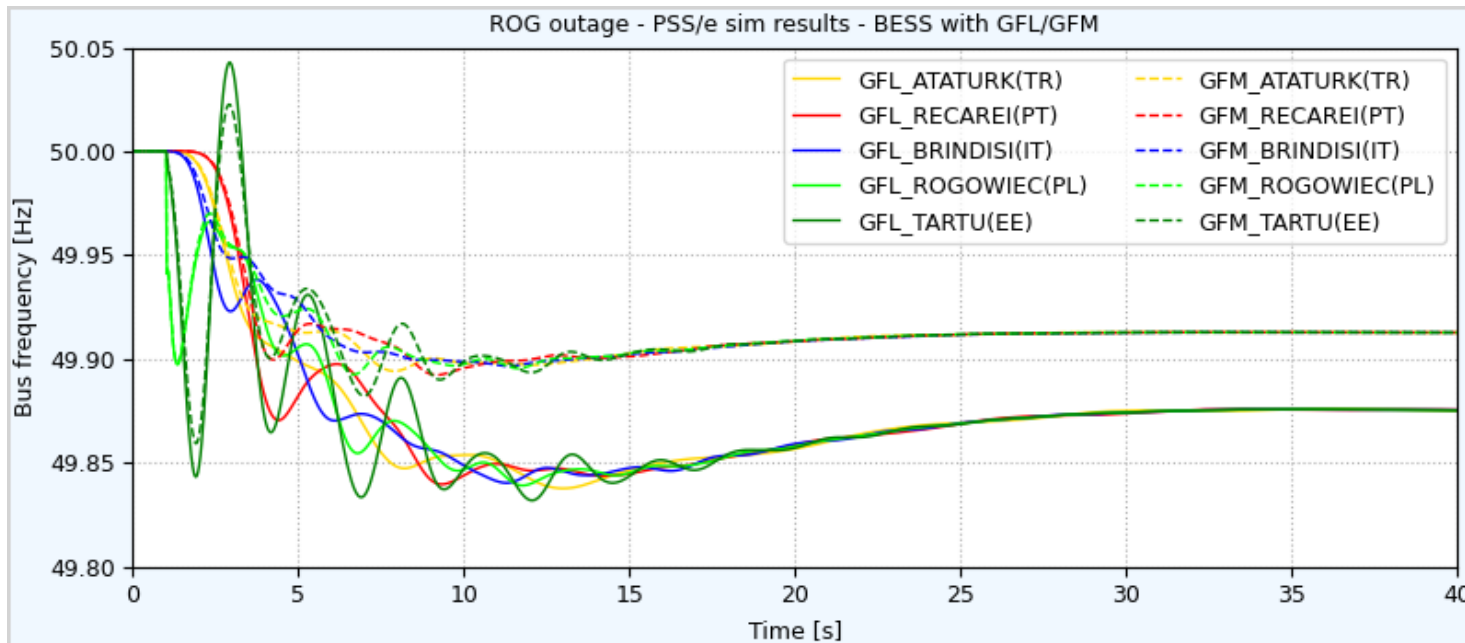
- Nastawy w regulatorze farmy $K_p=3$, $K_i=1$
- Różnica fazowa pomiędzy U i f : $\sim 21^\circ$



Wpływ sterowania typu Grid-Forming



- Zastosowano sterowanie Grid-Forming (droop control) na systemowych magazynach energii zlokalizowanych w CESA.
- Uzyskano poprawę stabilności SEE:
 - wyższy nadir, mniejsza odchyłka f ,
 - zwiększenie tłumienia oscylacji międzyobszarowych



Measured signal	GFL		GFM		DR improvement [p.p.]
	f [Hz]	DR [%]	f [Hz]	DR [%]	
f_ATATURK (TR)	0.15	8.7	0.16	14.5	5.8
f_RECAREI (PT)	0.15	8.6	0.15	15.3	6.7
f_TARTU (EE)	0.39	9.9	0.40	13.9	4.0

Podsumowanie



- Wpływ dużej liczby źródeł przekształtnikowych na oscylacje międzyobszarowe o niskiej częstotliwości zależy od zastosowanej metody regulacji napięć/mocy biernej elektrowni oraz od związanych z nią nastaw regulatora:
 - szybka regulacja napięcia w regulatorach nadrzędnych farm wiatrowych/PV zlokalizowanych w obszarach uczestniczących w oscylacjach międzyobszarowych może istotnie obniżyć tłumienie tych oscylacji,
 - poprawę tłumienia można uzyskać poprzez zastosowanie regulacji współczynnika mocy lub mocy biernej, a w przypadku reg. napięcia poprzez ograniczenie jej szybkości.
- Wiarygodność modelu można zwiększyć poprzez pozyskanie informacji od OSP z obszarów uczestniczących w niskoczęstotliwościowych oscylacjach międzyobszarowych.
- Nawet podstawowe dane dotyczące strategii sterowania elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych istotnie podnoszą jakość wyników.



Dziękuję za uwagę

Jan Smoter

j.smoter@ien.gda.pl