



**System
Elektroenergetyczny:
Bezpieczeństwo
Operacyjne i Rynkowe**

BADANIA MODELOWE WIELKICH SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH W TRYBIE KOSYMULACJI W WYBRANYCH ŚRODOWISKACH SYMULACYJNYCH

Andrzej Kąkol, Michał Kosmecki



**Instytut
Energetyki**
Oddział Gdańsk

Kazimierz Dolny, 17–19 marca 2026 r.

Plan prezentacji



- Informacje wstępne
- Parametryzacja kosymulacji
- Prezentacja wyników
- Wnioski

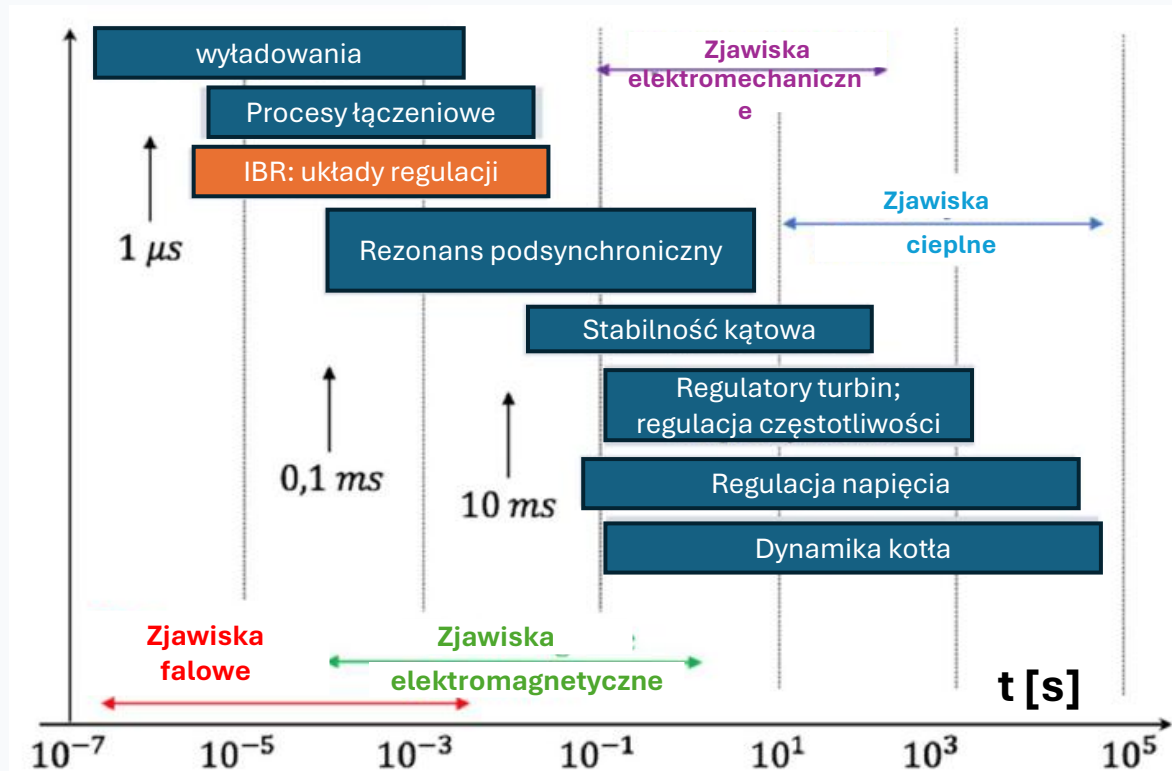
Definicja



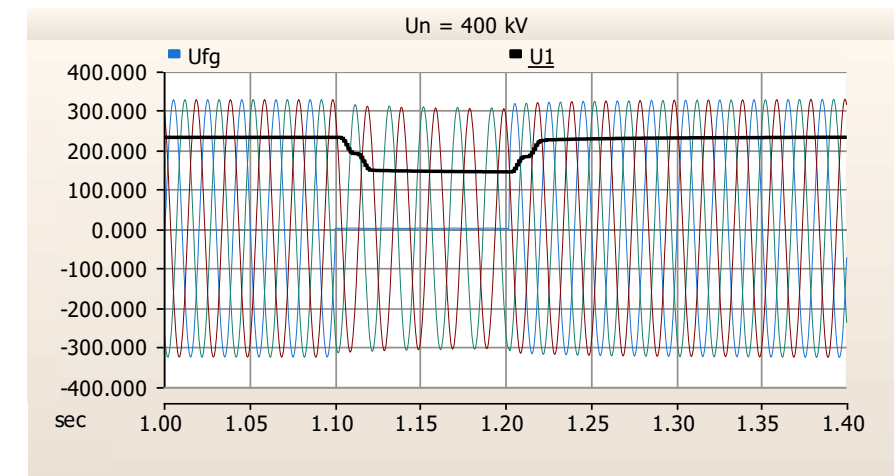
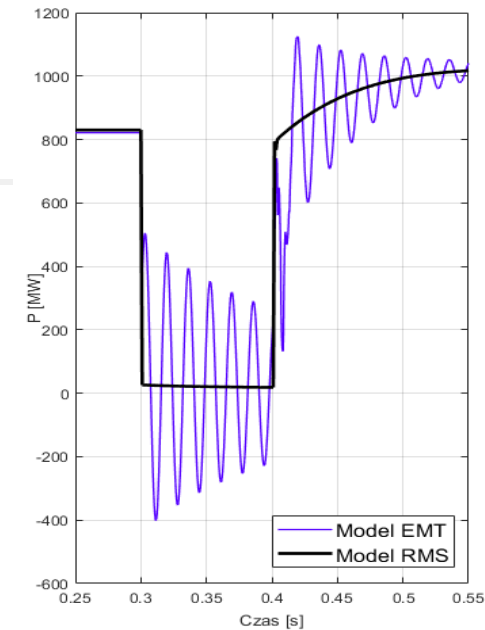
Kosymulacja^(*):

- technologia umożliwiająca jednoczesną **symulację wielu zjawisk w różnych podsystemach** dzięki wykorzystaniu specjalistycznych pakietów oprogramowania.
- stosowana w wielod dziedzinowych, wielkoskalowych symulacjach, w których **łączy się różnego rodzaju domeny** (np.: mechaniczną, hydrauliczną, termiczną czy elektryczną).
- używana w roli narzędzia w badaniach naukowych w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i medycznym, a więc **w branżach o największym potencjale rozwoju**.

Zjawiska SEE



(*) IEEE Technical Report Stability definitions and characterization of dynamic behaviour in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies, PES-TR77



elektromechaniczne a elektromagnetyczne



- reprezentacja fazorowa (1-2-0), wartości skuteczne
- parametry wyznaczone dla 50 Hz
- równania ruchu - wymiana energii pomiędzy maszynami wirującymi w systemie

$$\omega \cdot J \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_{mech} - P_{obc}$$

- odwzorowanie układów sterowania (AVR + PSS + GOV)
- struktura sieci elektroenergetycznej w postaci stałej (statycznej) macierzy admitancji: $[Y] \cdot [U] = [I]$

- reprezentacja fazowa
- wymiana energii pomiędzy indukcyjnościami i pojemnościami w obwodach elektrycznych

$$[U] = [I] \cdot [R] + [L] \cdot \frac{d}{dt} [I]$$

$$v = L \cdot \frac{di}{dt}; \quad i = C \cdot \frac{dv}{dt}$$

- parametry zależne od częstotliwości
- linia długa (model o parametrach rozproszonych)
- `nasycenia

Przyczyny



Potrzeba zastosowania modeli EMT wynika m.in. z:

- rosnącego udziału źródeł przekształtnikowych w SEE
- obniżeniu sztywności i inercji systemu na skutek odstawienia źródeł konwencjonalnych,
- wzrostu liczby i mocy układów HVDC co prowadzi do zwiększonego wzajemnego oddziaływania układów energoelektronicznych dużych mocy łączących odległe obszary sieci również w obszarach pracujących synchronicznie
- układów HVDC w głębi obszaru synchronicznego
- Obiekty typu DataCenter

Nowe kategorie stabilności (IEEE, 2020)

- Stabilność rezonansowa
- Stabilność konwerterowa



20.01.26: Estonia's 100 MW Kiisa BESS:
EstLink 1 and EstLink 2 tripped(*)

Potrzeby korzystania z kosymulacji



Modele i symulacje RMS

- 01** Model obejmuje cały obszar systemu (tysiące węzłów, linii, jednostek wytwórczych i odbiorów) 
- 02** Narzędzie odpowiednie do analiz pracy systemu pod warunkiem przyjęcia *odpowiednich założeń* 
- 03** Modele nie uwzględniają elementów i zjawisk istotnych przy niskiej sztywności systemu i inercji 
- 04** Modele posiadają uproszczenia wynikające z wielkości kroku symulacji 

Modele i symulacje EMT

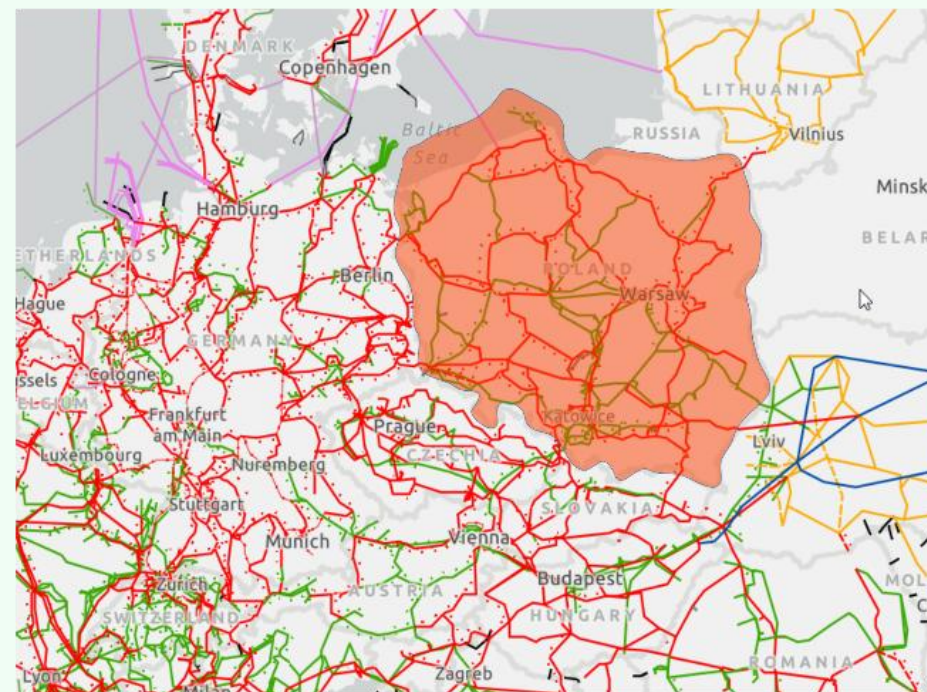
- 01** Wielkość modelu ograniczona zasobami obliczeniowymi 
- 02** Proces tworzenia i walidacji modelu ekstremalnie pracochłonny i skomplikowany 
- 03** Modele obejmują szerokie spektrum zjawisk 
- 04** Model obejmuje wszystkie elementy konieczne do pełnego odwzorowania działania systemu 

Kosymulacja EMT i RMS

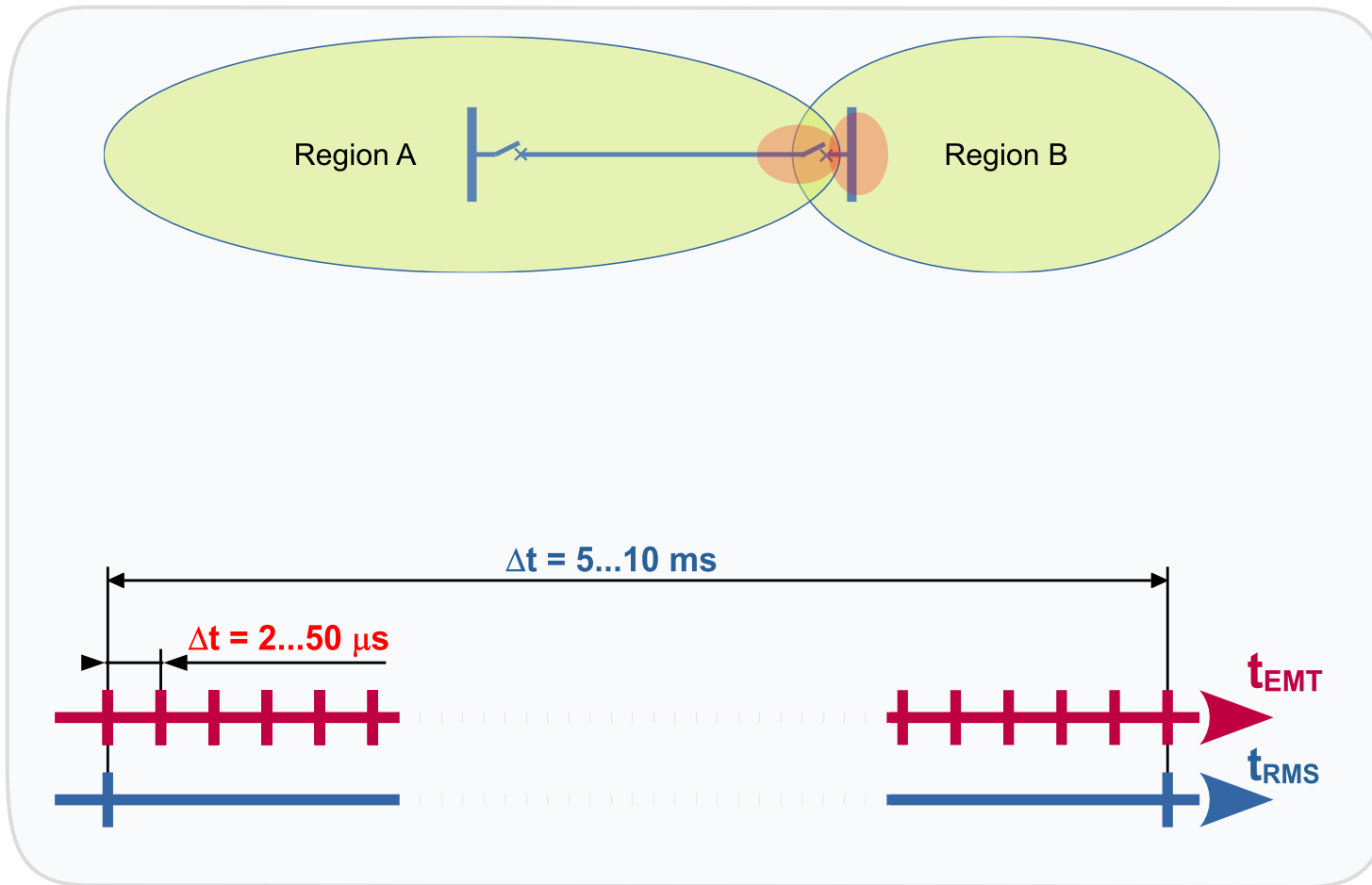


Wykorzystanie **kosymulacji**:

- Istotne elementy (obszary) → EMT.
 - Strefa *buforowa*: → EMT.
 - Strefa *odległa*: → RMS.
 - zredukowany sposób reprezentacji sieci elektroenergetycznej
 - ekwiwalenty– na krańcach systemu
 - dostęp do elementów systemu elektroenergetycznego również poza obszarami istotnymi (zmiana zapotrzebowania, profilu wytwarzania)
- ➔ marginalizacja ekwiwalentów



Parametryzacja modelu



- Granice obszarów
- Krok obliczeniowy
 - mechanizm synchronizacji
 - mechanizm predykcji

Wykorzystanie kosymulacji w badaniach systemowych (studium przypadku)



Cele studium

- »»» Demonstracja działania kosymulacji
- »»» Ocena zgodności symulacji **EMT** a kosymulacji **EMT - RMS**

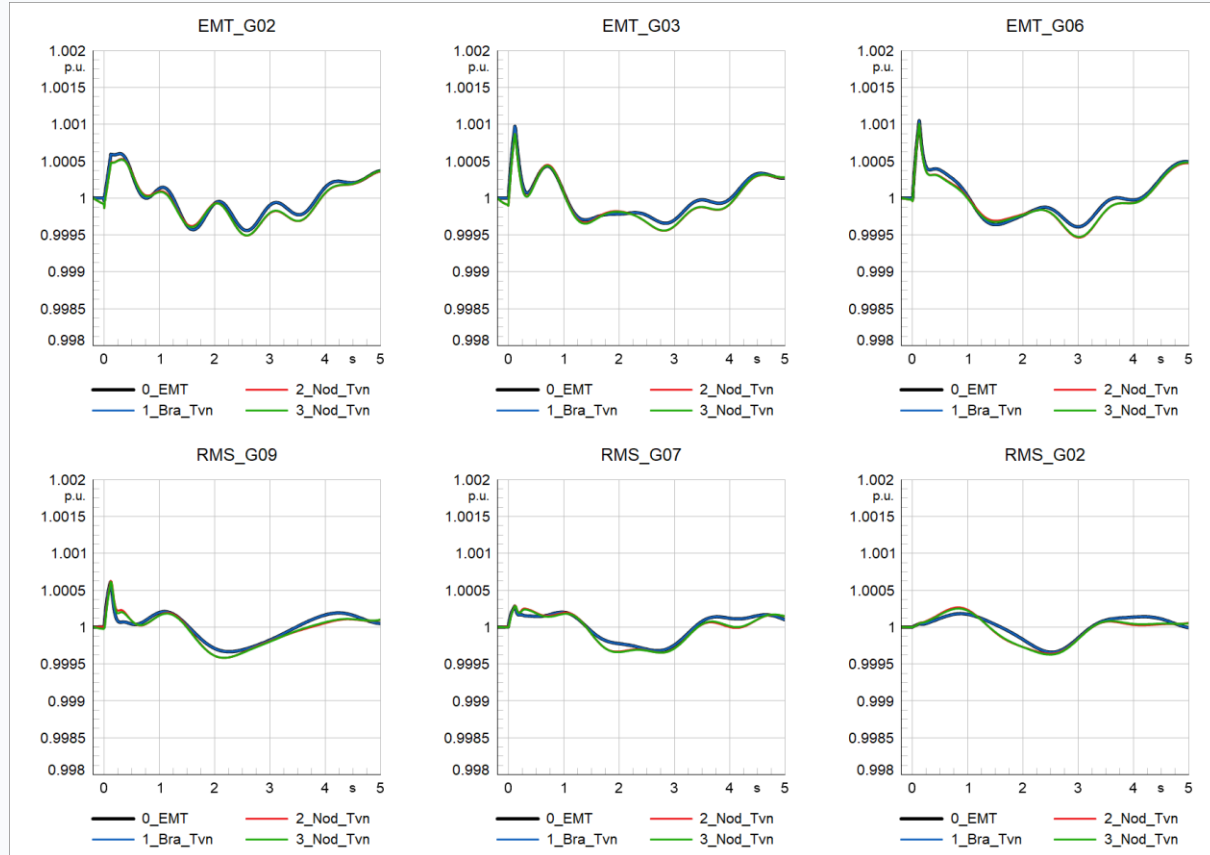
Istota eksperymentu 1

- »»» Model dostatecznie mały, by całość odwzorować w **EMT**
- »»» Część RMS odwzorowana w pełni fazorowo (komplet składowych)
- »»» Brak energoelektroniki

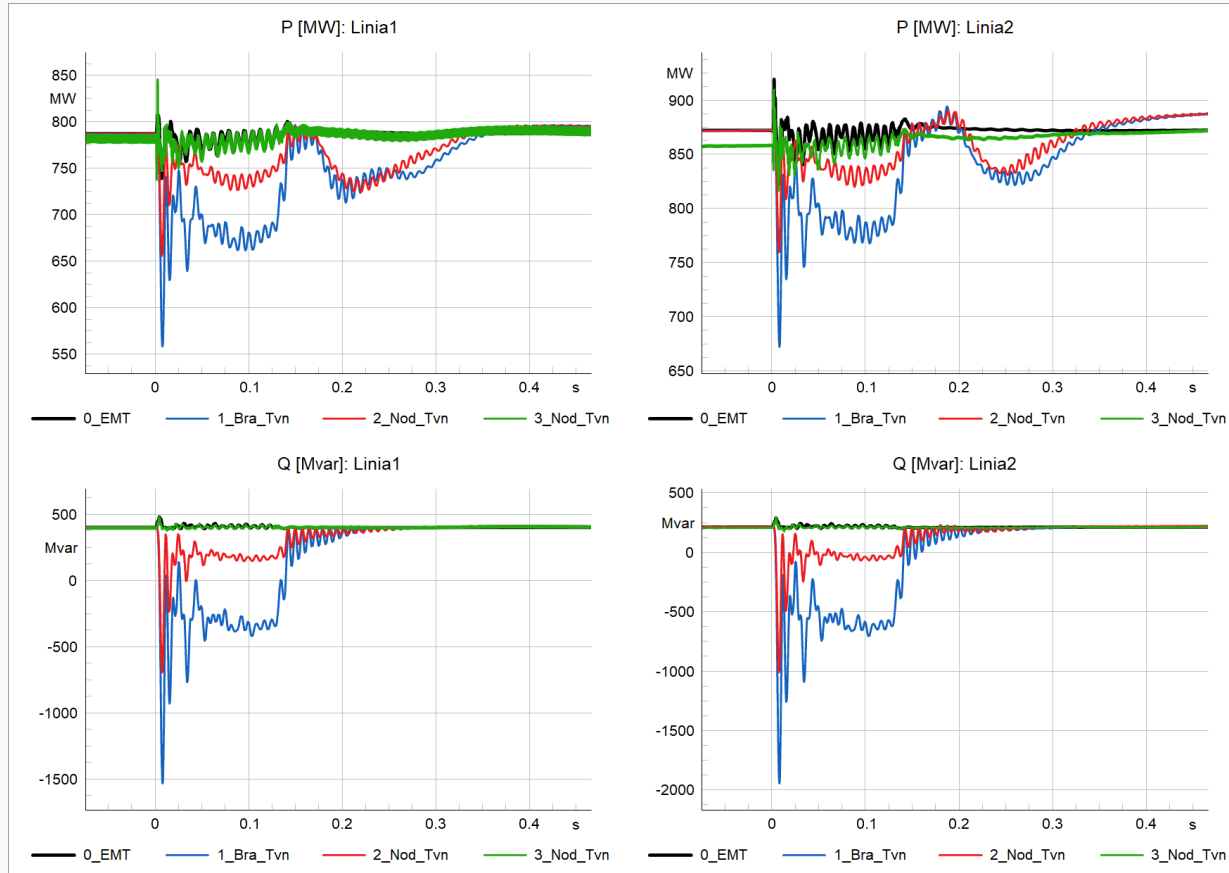
Środowisko 1



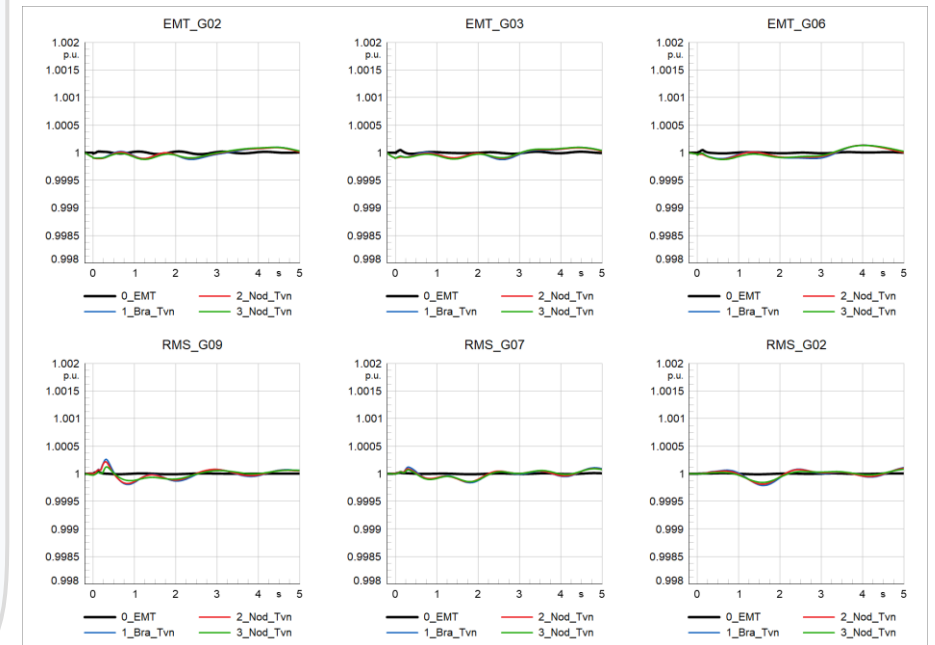
Stan zwarcia 3-fazowego



Środowisko 1



Stan zwarcia 1-fazowego



Wykorzystanie kosymulacji w badaniach systemowych (studium przypadku)



Cele studium

- »»» Demonstracja działania kosymulacji
- »»» Pokazanie różnic i wpływu sposobu modelowania urządzeń energoelektronicznych na wyniki

Istota eksperymentu 2

- »»» Aby porównanie było miarodajne, w obu modelach (**EMT** i **RMS**) zachowano tę samą strukturę układu regulacji łącza HVDC.
- »»» Jednak model EMT zawiera dodatkowe elementy niezbędne do implementacji takiego układu w dziedzinie EMT, w tym:
 - Modele przekształtników tyrystorowych wraz z układami wyzwalań
 - Model pętli fazowej (PLL)

RTDS - TSAT



RTDS

1. Posiada **10 rdzeni** procesorowych IBM pracujących częstotliwością **3,5 GHz**
2. Umożliwia symulację dużego fragmentu systemu elektroenergetycznego (**do ~100 węzłów NN**)
3. Zapewnia krok obliczeniowy odpowiedni do modelowania przekształtników energoelektronicznych (**2-50 μ s**)



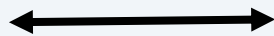
28 Gbps



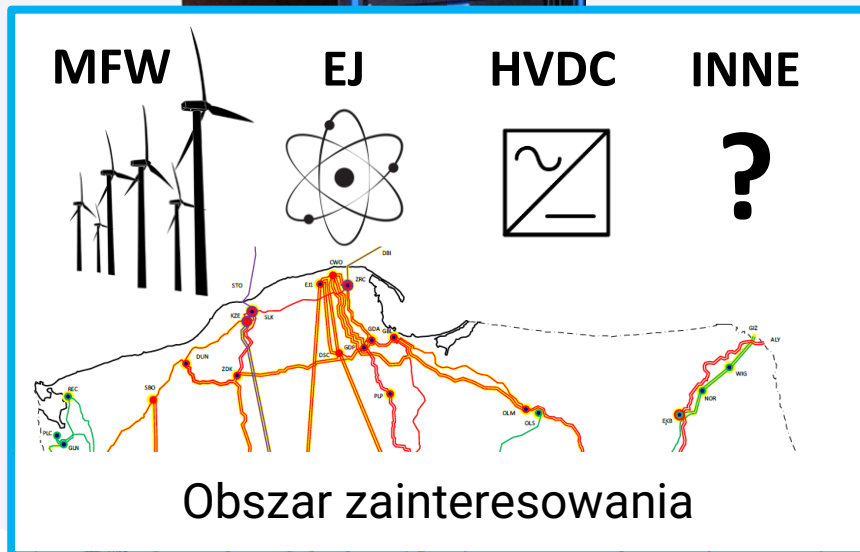
TSAT

1. Umożliwia symulację bardzo dużego fragmentu systemu (**kilka – kilkanaście tysięcy węzłów**), **zsynchronizowanego z RTDS**
2. Zapewnia **krok obliczeniowy 2-5 ms**
3. Pozwala wykorzystać **wszystkie standardowe modele** oraz modele użytkownika dla nietypowych elementów systemu

RTDS - TSAT



28 Gbps



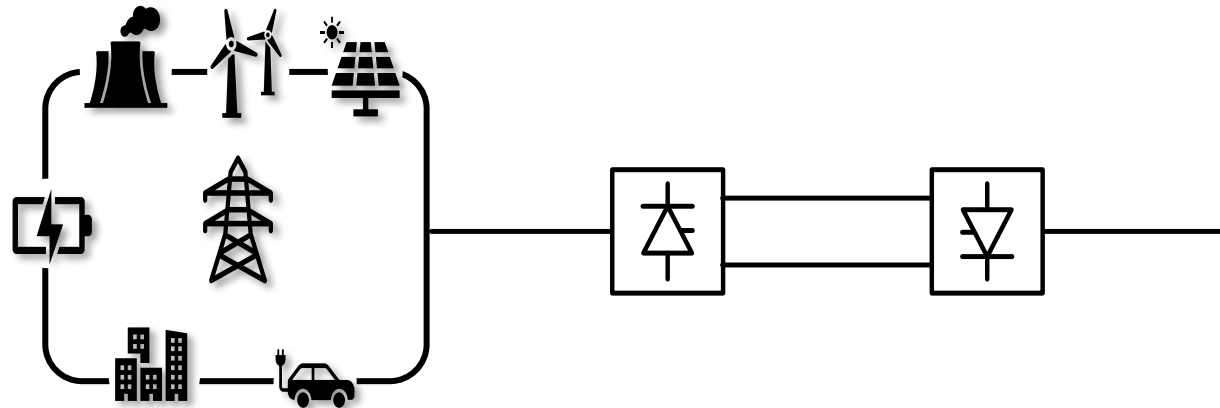
Studium przypadku

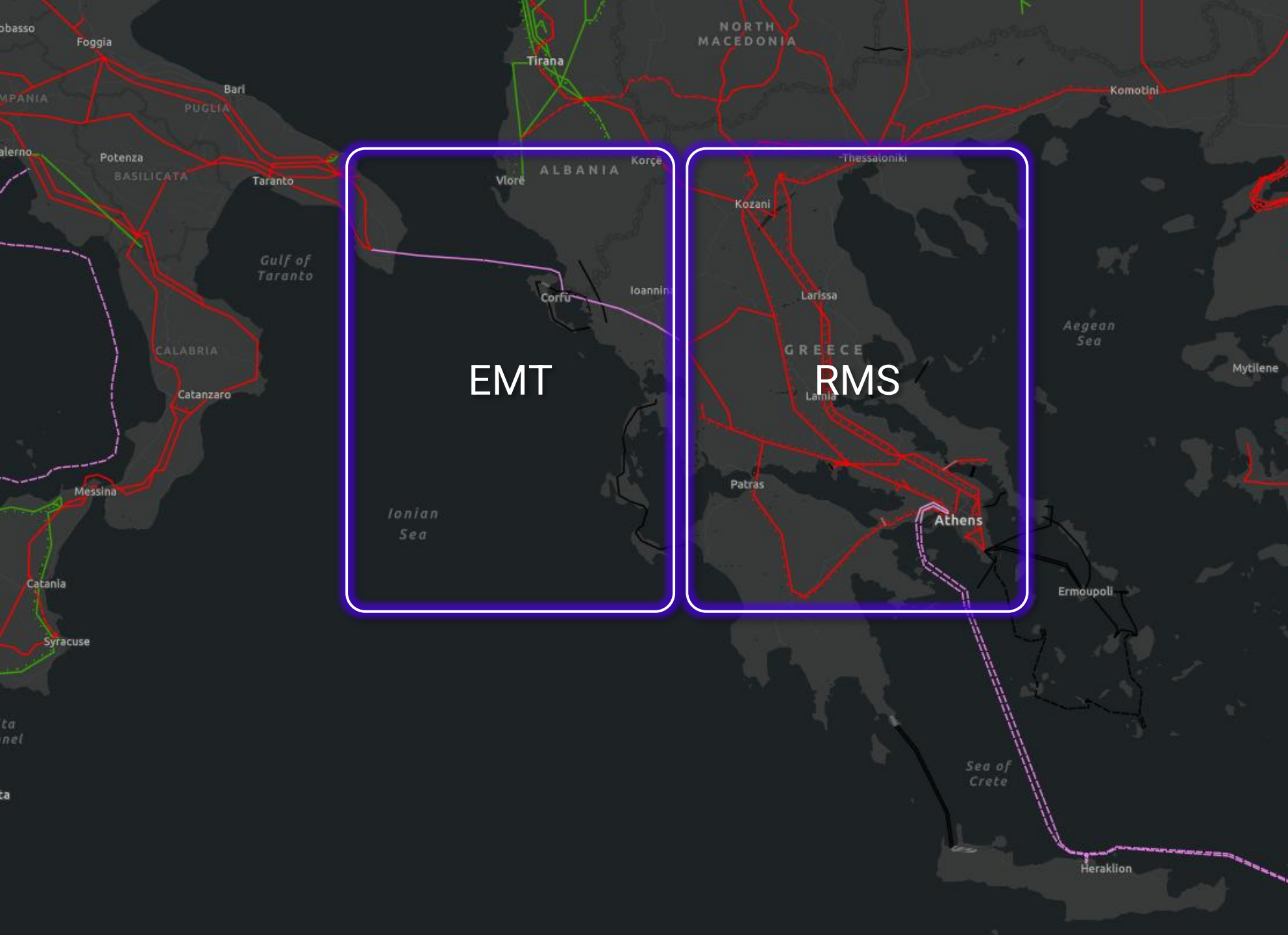


Duży system
elektroenergetyczny



Układ przesyłowy prądu
stałego (HVDC)





Model RMS

>1500 węzłów
>1500 linii
~100 synchr. MWE

Model EMT

Układ HVDC 500 MW
Grecja – Włochy
(GRITA)



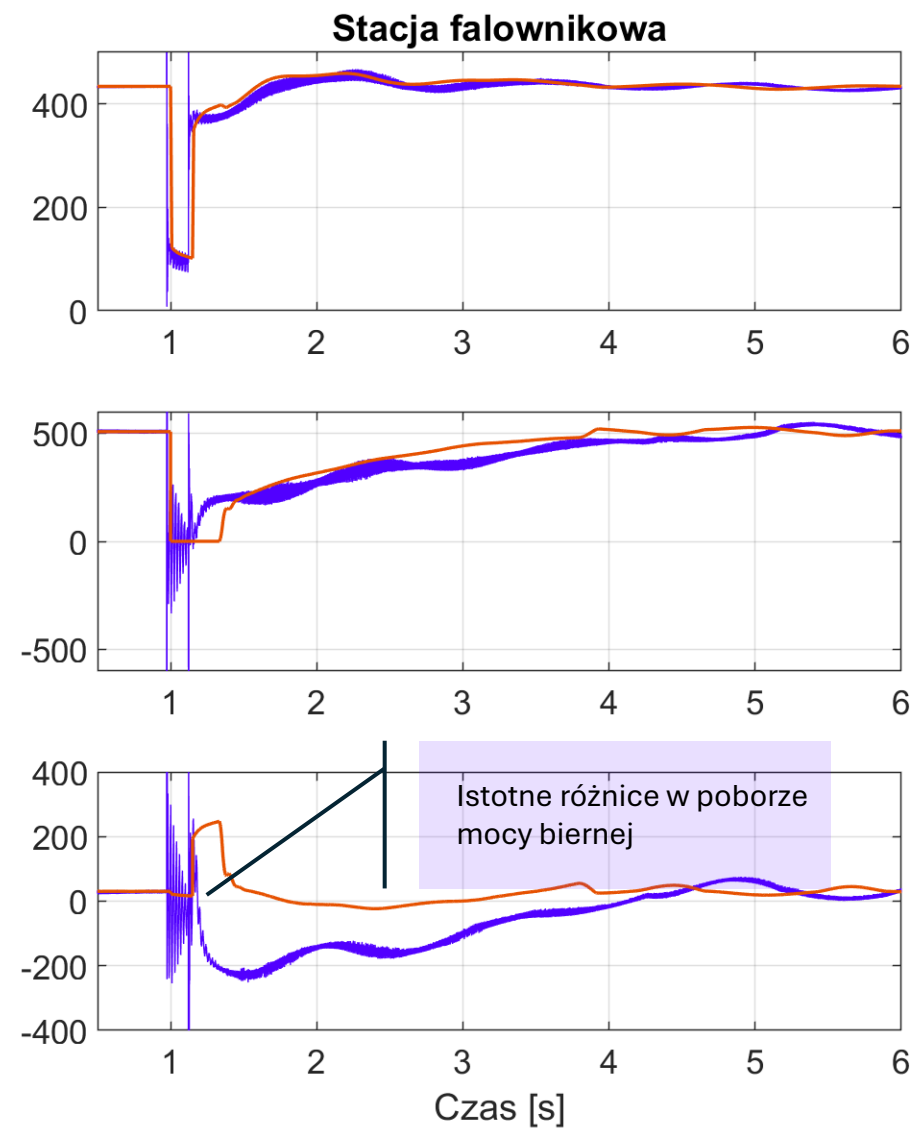
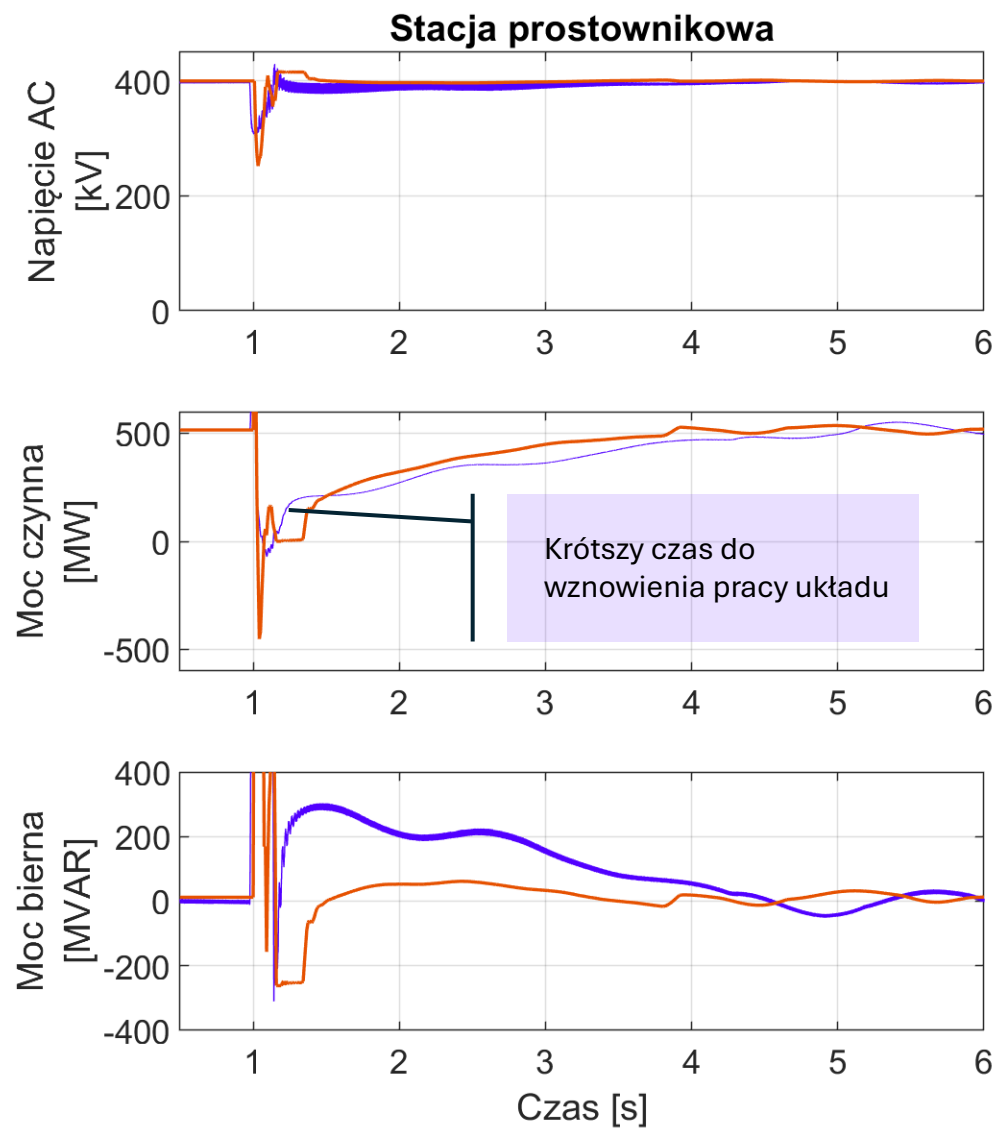
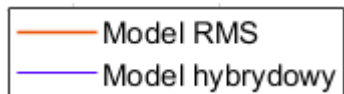
Dane do opracowania modelu
pozyskano od IPTO (OSP w Grecji) na
potrzebie realizacji projektu InterSCADA

Studium przypadku – porównywane warianty

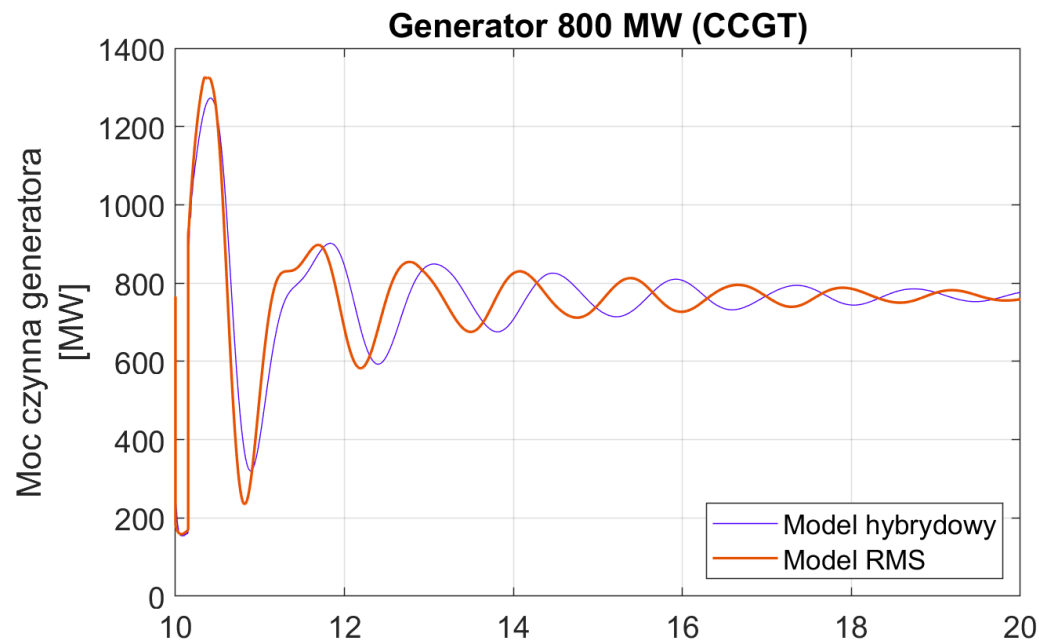


	Reprezentacja	Model systemu	Model układu HVDC
»»»	Całość w RMS	▪ 1566 węzłów NN, WN i SN ▪ 1584 linii ▪ 643 jednostek wytwórczych ▪ 453 odbiory mocy	▪ układ LCC HVDC reprezentowany modelem generycznym CHVDC2
	Całość w EMT	▪ fragment systemu obejmujący ok. 100 węzłów NN	▪ układ LCC HVDC reprezentowany dokładnym modelem obwodów pierwotnych i układu sterowania
»»»	Hybrydowa	▪ 1566 węzłów NN, WN i SN ▪ 1584 linii ▪ 643 jednostek wytwórczych ▪ 453 odbiory mocy	▪ układ LCC HVDC reprezentowany dokładnym modelem obwodów pierwotnych i układu sterowania

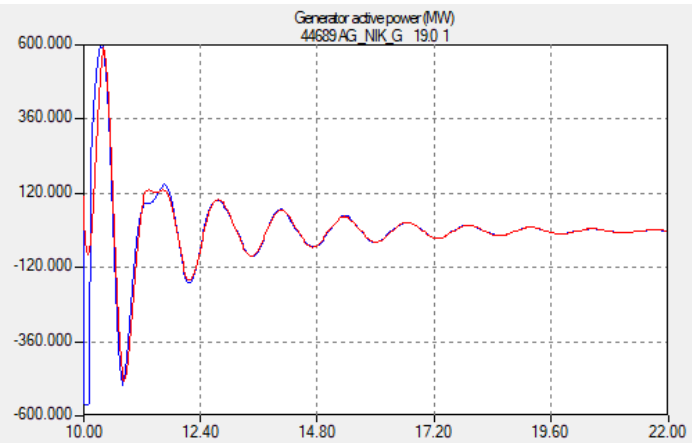
Zwarcie w systemie przesyłowym (wyniki DC)



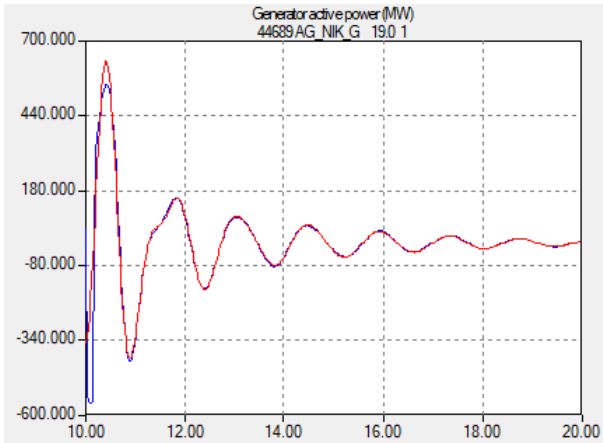
Wpływ na system AC



Mody dominujące (RMS)

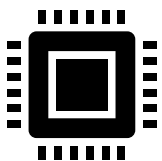


Mody dominujące (kosymulacja)



Mod		Częstotliwość		Tłumienie	
Lp.		RMS	Kosymulacja	RMS	Kosymulacja
1		1,44 Hz	1,23 Hz	16,1 %	14,2 % 
2		0,79 Hz	0,7 Hz	5,8 %	7,4 % 

Podsumowanie



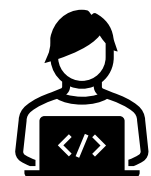
Dokładniejsze modele

Wykorzystanie modeli EMT pozwala na uwzględnienie tych cech i parametrów urządzeń energoelektronicznych, które w symulacjach RMS nie mogą być reprezentowane (np. **szybkie pętle regulacji, działanie pętli fazowej, zjawiska nieobecne w domenie RMS**).



Wpływ na wyniki

Zwiększenie dokładności modelowania urządzeń energoelektronicznych wpływa na wyniki uzyskiwane w obu częściach (EMT i RMS) **również w zakresie częstotliwości istotnych dla domeny RMS**.



Zwiększony koszt

Kosymulacja wnosi większą dokładność do analiz systemowych, jednak wymaga większych nakładów pracy niż analizy wyłącznie w dziedzinie RMS



Dziękuję za uwagę

- dr inż. Andrzej Kąkol a.kakol@ien.gda.pl