

WPLYW WPROWADZENIA SPECJALNYCH UKŁADÓW PRACY W KSE ORAZ INNYCH OBSZARACH NA OBRAZ KOŁYSAŃ MIĘDZYOBZAROWYCH W SYSTEMIE SYNCHRONICZNYM KONTYNTENTALNEJ EUROPY

Robert JANKOWSKI¹, Bogdan SOBCZAK², Robert TRĘBSKI³

1. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
tel.: 58 3498125 e-mail: r.jankowski@ien.gda.pl
2. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
tel.: 58 3498126 e-mail: b.sobczak@ien.gda.pl
3. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.
tel.: 22 242 26 00 e-mail: robert.trebski@pse.pl

Streszczenie: Jednym ze zjawisk występujących w europejskim systemie elektroenergetycznym (ENTSO-E CE) są nieplanowane przepływy mocy. Powodują one realne zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy systemu oraz ograniczają zdolności wymiany handlowej. Jednym z narzędzi służących ograniczeniu tego zjawiska są coraz powszechniej stosowane w ENTSO-E przesuwniki fazowe. W szczególnie trudnych warunkach dla obrony systemu przed nadmiernymi przepływami mocy, dla zachowania integralności własnego systemu, operatorzy sieci przesyłowej mogą podjąć decyzje o wprowadzeniu zmian topologicznych skutkujących osłabieniem połączeń międzysystemowych. Szczególnym przypadkiem działań operatorskich może być podział nie na pojedynczej granicy, ale na całym ciągu granic, prowadzący w efekcie do podziału kontynentalnej części ENTSO-E na dwie części wschodnią i zachodnią. Działania takie prowadzą do ograniczenia niepożądanych przepływów, ale mogą również oddziaływać na częstotliwość i tłumienie kołysań międzyobszarowych obserwowanych w systemie. Przedstawione w artykule wyniki stanowią ocenę jakościową (pokazują trendy zmian) wpływu wyłączeń linii granicznych w KSE na wielkość tłumienia i częstotliwości kołysań międzyobszarowych ENTSO-E CE angażujących generatory KSE.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo systemu, przepływy kołowe, kołysania międzyobszarowe, stabilność małosygnałowa.

1. WSTĘP

Poniższy artykuł bazuje na wynikach pracy wykonanej przez Instytut Energetyki Oddział Gdańsk na zlecenie PSE S.A., której celem było określenie skutków jakie dla bezpieczeństwa KSE oraz całego systemu europejskiego mogłoby mieć wprowadzenie specjalnych układów pracy zapobiegających przepływowi kołowemu obserwowanym w centralnej części ENTSO-E, a w szczególności na zachodniej i południowej granicy KSE.

1.1. Modele obliczeniowe

Analizy wykonano na modelach kontynentalnej części europejskiego systemu elektroenergetycznego (ENTSO-E CE). Wykorzystano, zaktualizowany na potrzeby pracy i dostosowany do wymagań analiz dynamicznych, model rozpyłowy opracowany w ramach TYNDP [1]. Z uwagi na ograniczoną dostępność danych dynamicznych umożliwiających modelowanie obszaru ENTSO-E, model

dynamiczny opracowano samodzielnie bazując na założeniach i podejściu zaproponowanym przez działającą w ramach ENTSO-E grupę roboczą „System Protections and Dynamics”. Metoda ta opisana w [2, 3, 4, 5] polega na podziale badanego obszaru na regiony, a następnie wygenerowaniu modelu dynamicznego wykorzystującego typowe proste modele generatora, regulatora napięcia, stabilizatora systemowego oraz turbiny wraz z jej regulatorem i dostrojeniu tych urządzeń (parametry jednolite dla wszystkich generacji należących do danego regionu) tak by uzyskać odpowiedzi zbieżne z rejestracjami działania rzeczywistych urządzeń po zakłóceniach obserwowanych w systemie ENTSO-E CE. Opis sposobu opracowania oraz weryfikacji modelu przedstawiono w [6, 7]. W tabeli 1 zestawiono wartości częstotliwości oraz tłumienia modów międzyobszarowych identyfikowanych w ENTSO-E oraz odwzorowanych w opracowanym modelu. Przypisane poszczególnym modom oznaczenia i nazwy pochodzą od obszarów mających dominujący udział w danym modzie (TR – mod turecki, SP – mod hiszpański, BK – mod bałkański, IT – mod włoski, CB – mod centralna Europa –Bałkany) i są szerzej omówione w [7].

Tablica 1. Mody międzyobszarowe identyfikowane w ENTSO-E [8, 9] oraz występujące w opracowanym modelu

Mody międzyobszarowe				
na podstawie [8, 9]		w modelu obliczeniowym		
Częstotliwość [Hz]	Tłumienie [%]	Częstotliwość [Hz]	Tłumienie [%]	Opis w pracy
0,16	2,8 ÷ -0,2	0,14	11,1	TR
0,22	4,8 ÷ 0,2	0,24	7,3	SP
0,32	6,0	0,34	4,3	BK
0,41	4,0	0,38	4,4	IT
b.d	b.d	0,42	4,7	CB

Struktury geograficzne poszczególnych modów w opracowanym modelu wykazują dużą zgodność ze strukturami pokazanymi w dostępnych publikacjach [8, 9, 10].

Dwa mody o najniższych częstotliwościach mają tłumienie wyraźnie większe niż podane w [8], jednak tę różnicę można wytłumaczyć przyjętymi w modelu ENTSO-E CE uproszczeniami, z których najważniejsze to wyposażenie wszystkich generatorów w dobrze dostrójone dwuwejściowe stabilizatory systemowe typu PSS2A oraz regulatory turbin typu TGOV1 (bez strefy nieczułości, z aktywną regulacją pierwotną) mające wyraźny pozytywny wpływ na tłumienie kołysań niskich częstotliwości.

Analizując zatem pokazywane w dalszym ciągu artykułu mody międzyobszarowe należy przede wszystkim zwracać uwagę na kierunki zmian tłumienia i częstotliwości wynikające ze zmian konfiguracji pracy systemu.

1.2. Analizowane scenariusze podziałów na granicach KSE

Na potrzeby realizowanej pracy przeprowadzono analizy następujących układów pracy:

1. wprowadzenie częściowego podziału na południowej granicy KSE, wydzielone bloki pracowały na sieć czeską i słowacką (na rysunku 1, oznaczenie kolorem brązowym linią przerywaną).
2. wprowadzenie podziału na granicy KSE z systemami Czech i Słowacji (podział na liniach granicznych z SEPS i CEPS, oznaczenie kolorem zielonym).
3. wprowadzenie podziału na liniach granicznych z 50 Hertz, KSE pracujący bez połączenia z systemem niemieckim (oznaczenie kolorem niebieskim).

Trzeba zaznaczyć, że w powyższych układach nie brano pod uwagę wpływu działania przesuwników fazowych między systemem polskim i niemieckim oraz czeskim i niemieckim.

Dla każdego z trzech powyższych podziałów w KSE zbadano wpływ wprowadzenia układu specjalnego w sieci czeskiej, w którym wydzielono kilka stacji do współpracy z systemem niemieckim, co fizycznie oznaczało odcięcie systemu czeskiego od systemu niemieckiego (oznaczenie kolorem czarnym).



Rys. 1. Analizowane podziały w strukturze sieci KSE

1.3. Scenariusz podziału ENTSO-E na część wschodnią i zachodnią

Jednym z badanych wariantów pracy europejskiego systemu elektroenergetycznego był podział na część wschodnią i zachodnią. Założono, że część wschodnia, w której znalazłaby się KSE została wydzielona wzdłuż granicy systemów polskiego, czeskiego, słowackiego, węgierskiego oraz słoweńskiego, co pokazano na rysunku 2.

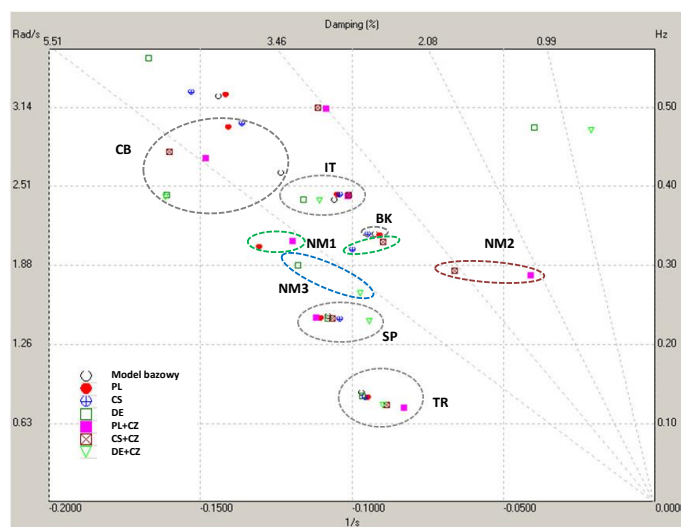


Rys. 2. Badany podział ENTSO-E na część wschodnią i zachodnią

2. WPLYW PODZIAŁÓW NA ZMIANĘ MODÓW MIĘDZYOBSZAROWYCH

2.1. Oddziaływanie podziałów na granicach KSE

Poniżej, na rysunku 3, zamieszczono zbiorcze zestawienie modów o częstotliwościach poniżej 0,5 Hz obserwowanych w analizowanych specjalnych układach pracy KSE częściowo oddzielanego od systemu europejskiego.



Rys. 3. Rozkład modów na płaszczyźnie zespolonej w modelu wyjściowym oraz analizowanych układach pracy KSE częściowo oddzielanego od systemu europejskiego. Oprócz części rzeczywistej i urojonej modu dodatkowo do opisu osi wprowadzono tłumienie oraz częstotliwość.

Można zaobserwować, że częstotliwość i tłumienie trzech modów 0,14 Hz (TR), 0,24 Hz (SP) i 0,38 Hz (IT) podlegają niewielkim zmianom i możliwa jest ich jednoznaczna identyfikacja, natomiast identyfikacja dwóch pozostałych modów 0,34 Hz (BK) oraz 0,42 Hz (CB) nie jest już tak jednoznaczna, ponieważ ewoluują zarówno wartości identyfikujących mod częstotliwości, jak również jego struktura (udział jednostek generacyjnych z poszczególnych obszarów systemu).

1. W modzie TR (tureckim), zaobserwowano zmniejszenie częstotliwości do z 0,14 Hz do 0,12 Hz w każdym ze scenariuszy uwzględniających dodatkowy podział w Czechach. Mimo, że nie jest duża wartość to każde

zmniejszenie tłumienia lub częstotliwości tego modu, w stosunku do wartości wyznaczonych dla modelu bazowego należy traktować jako potencjalne zagrożenie dla bezpiecznej pracy systemu.

2. W modzie SP (hiszpańskim), wprowadzenie zmian w strukturze sieci nie powoduje wyraźnego zmniejszenia tłumienia, jednak zaobserwowano zwiększone zaangażowanie polskich generatorów (równorzędne z najbardziej istotnymi obecnie urządzeniami w Hiszpanii i Portugalii), co oznacza zwiększenie znaczenia struktur i nastaw stabilizatorów KSE w tłumieniu tego modu.
3. Zaobserwowano, że mod BK (bałkański) zanika gdy wprowadzany jest podział wewnątrz systemu czeskiego lub na granicy polsko-niemieckiej.
4. W przypadku modu CB (centralna Europa-Bałkany) zaobserwowano duże zmiany w częstotliwości (od 0,39 Hz do 0,48 Hz) oraz rozkładzie geograficznym generatorów o największym zaangażowaniu, jednak tłumienie tego modu jest zbliżone do tłumienia w stanie wyjściowym.
5. Wprowadzenie podziału na południu KSE lub granicy polsko-czeskiej i polsko-słowackiej powoduje powstanie nowego modu o częstotliwości 0,32-0,33 Hz i tłumieniu 4-6% (na rysunku 3 są to punkty zakreślone na zielono i oznaczone NM1), w którym generatory w Polsce oscylują względem generatorów we Włoszech oraz w krajach bałkańskich. Wprowadzenie dodatkowego podziału wewnątrz systemu czeskiego powoduje zmniejszenie tłumienia tego modu.
6. Równoczesny podział na południu KSE lub granicy polsko-czeskiej i polsko-słowackiej połączony ze specjalnym układem w sieci czeskiej powoduje pobudzenie kolejnego nowego modu 0,29 Hz o słabym tłumieniu 2,3-3,6% (na rysunku 3 są to punkty zakreślone na brązowo i oznaczone NM2), w którym generatory w Polsce, Turcji i Niemczech oscylują względem generacji w Czechach, Słowacji, Węgier oraz krajów bałkańskich.
7. Podział na granicy polsko-niemieckiej powoduje pobudzenie modu o częstotliwości 0,30 Hz (na rysunku 3 są to punkty zakreślone na niebiesko i oznaczone NM3), w którym dominujący udział mają generatory w Polsce oscylujące względem generacji w Turcji, Włoszech, Niemczech i Holandii.

2.2. Oddziaływanie podziału na część wschodnią i zachodnią

Wykonując analizy stabilności małosygnałowej koncentrowano się na wschodniej części systemu obejmującej system polski. W tabeli 2 przedstawiono częstotliwości i tłumienie 5 modów o najniższej częstotliwości zaobserwowanych w tak pracującym układzie.

W pierwszym modzie o częstotliwości 0,20 Hz generatory w Turcji oscylują przeciwko generacji w Polsce, Czechach, Słowacji i na Węgrzech. W drugim modzie o częstotliwości 0,37 Hz generatory w Turcji, Polsce i Czechach oscylują przeciwko generacji w Grecji i pozostałych krajach bałkańskich. W trzecim modzie o częstotliwości 0,54 Hz generatory w Polsce oscylują przeciwko generacji w Czechach.

Tablica 2. Mody międzyobszarowe identyfikowane w modelu odpowiadającemu wschodniej części podzielonego systemu ENTSO-E CE

Częstotliwość [Hz]	Tłumienie [%]
0,20	7,2
0,37	6,7
0,54	9,2
0,59	7,6
0,60	8,1

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Analizę wpływu podziałów w KSE i zmian topologii w Czechach na stabilność międzyobszarową przeprowadzono na specjalnie do tego celu opracowanym modelu ENTSO-E CE. Stwierdzono, że opracowany model mimo dużych uproszczeń dobrze odwzorowuje obraz kołysań niskiej częstotliwości w systemie kontynentalnej Europy jednak charakter wykorzystanego modelu (sposób budowy modelu rozpliwowego, zastosowanie typowych prostych modeli) wyklucza możliwość dokładnego obliczenia modów międzyobszarowych. Wiarygodne pozostają natomiast obserwowane trendy zmian tłumienia i częstotliwości.

Stwierdzono, że badane podziały mają znaczący wpływ na obraz kołysań niskiej częstotliwości w ENTSO-E CE. Obserwowane jest to szczególnie wyraźnie w sytuacji, gdy podział w KSE jest kojarzony z układem specjalnym w Czechach. Ponieważ w ENTSO-E CE występują problemy z tłumieniem kołysań niskich częstotliwości to każde zmniejszenie tłumienia lub częstotliwości w stosunku do wartości wyznaczonych dla modelu bazowego należy traktować jako potencjalne zagrożenie dla bezpiecznej pracy ENTSO-E CE. Negatywny wpływ zmniejszonego tłumienia jest oczywisty, natomiast negatywny wpływ zmniejszenia częstotliwości wynika ze zmniejszania się skuteczności stabilizatorów systemowych, aż do braku ich pozytywnego oddziaływania na tłumienie kołysań.

Dla modu o najniższej częstotliwości we wszystkich scenariuszach (mod TR) obserwuje się wyraźne obniżenie częstotliwości aż do wartości 0,12 Hz. Widoczne jest również zmniejszenie tłumienia. Wynika to ze zwiększenia zastępczej impedancji między oscylującymi obszarami czyli Turcją i Bałkanami, a półwyspem Iberyjskim. To zwiększenie jest oczywiście wynikiem wprowadzanych podziałów w KSE i Czechach.

Częstotliwość i tłumienie drugiego modu o najniższej częstotliwości (SP) nie ulega tak widocznym zmianom jednak wprowadzenie specjalnego układu w Czechach prowadzi do znacznego zwiększenia udziału generatorów KSE, co oznacza, że generatory w KSE będą w znacznie większym stopniu odpowiadać za tłumienie oscylacji (obecnie, ta funkcja jest spełniana głównie przez generatory w Hiszpanii i Portugalii). Efektywność stabilizatorów zainstalowanych na polskich jednostkach generacyjnych w tłumieniu kołysań o częstotliwości rzędu 0,20÷0,25 Hz nie była dotąd przedmiotem analiz.

Wspólną cechą analizowanych scenariuszy jest pojawienie się dwóch zupełnie nowych modów. Przy podziale na południowej granicy ich częstotliwość wynosi ~0,32 Hz i ~0,27÷0,29 Hz, przy tym ten drugi zaczyna występować dopiero po wprowadzeniu układu specjalnego

w Czechach. W tych modach zawsze duży udział mają generatory KSE a ich tłumienie jest znacząco mniejsze niż modów, które są obecne w modelu bazowym. Przy pełnym podziale na południowej granicy KSE i układzie specjalnym w Czechach tłumienie to wynosi jedynie 2%, a więc jest bardzo małe. Nie można wykluczyć, że analiza małosygnałowa wykonana na odpowiednio dokładnym modelu pokaże jeszcze mniejsze tłumienie tych oscylacji.

W scenariuszu podziału ENTSO-E CE na część wschodnią i zachodnią, najniższy mod ma częstotliwość rzędu 0,2 Hz i zgodnie z oczekiwaniami generatory z Turcji i Polski są dla tej oscylacji w przeciwfazie a ich udział w modzie jest największy. Mimo, że tłumienie wyliczonych modów jest dobre, należy pamiętać o ograniczonej wiarygodności obliczonego tłumienia wynikającej z przyjętej metody opracowania modelu. Duży udział generatorów KSE w modzie bardzo niskiej częstotliwości stwarza specjalne wymagania dla ich stabilizatorów systemowych. Wprawdzie dla tak niskiej częstotliwości jak 0,2 Hz efektywność stabilizatorów dla poprawy tłumienia jest niewielka, to jednak niepoprawne nastawy mogą znacząco pogorszyć tłumienie.

Wydaje się być celowe przeprowadzenie dalszych badań określających środki zaradcze dla zidentyfikowanych zagrożeń w szczególności badanie efektywności tłumienia kołysań niskich częstotliwości przez duże generatory KSE oraz wypracowanie propozycji odpowiednich zmian nastaw (lub struktur) układów odpowiedzialnych za tłumienie kołysań niskich częstotliwości.

4. BIBLIOGRAFIA

1. "ENTSO-E Ten-Year Network Development Plan 2012", publikacja ENTSO-E 2012,

2. "Documentation on controller tests in test grid configurations"; ENTSO-E SG SPD Report 2013
3. "Dynamic Study Model Range of Applications and Modelling Basis"; ENTSO-E SG SPD Report 2015
4. A. Semerow, W. Sattinger, M. Luther i inni; "Dynamic Study Model for the Interconnected Power System of Continental Europe in Different Simulation Tools", PowerTech 2015, Amsterdam
5. A. Semerow, S. Hohn, B. Bauer, M. Luther: "An Innovative Method to Develop Power System Equivalents with Focus on Inter-Area Oscillations and Primary Control Representation", IEEE PowerTech, Eindhoven, 2015
6. B. Sobczak, R. Trębski M. Wilk „Wykorzystanie modeli generycznych w analizach dynamicznych synchronicznego systemu kontynentalnej Europy” APE 2017
7. R. Jankowski, B. Sobczak, R. Trębski „Wpływ wyłączeń linii granicznych KSE na obraz oscylacji międzyobszarowych w systemie synchronicznym kontynentalnej Europy” APE 2017
8. E. Grebe, W. Sattinger, W. Winter i inni; "Low Frequency Oscillations in the Interconnected System of Continental Europe", PES 2010, Minneapolis, USA
9. "Analysis of CE Inter-Area Oscillations of 19 and 24 February 2011"; ENTSO-E SG SPD Report 21.08.2011
10. European Wind Integration Study (EWIS) Final Report 2010.

INFLUENCE OF SPECIAL EHV GRID CONFIGURATION ON INTER AREA OSCILLATIONS IN POWER SYSTEM OF CONTINENTAL EUROPE

Loop flows observed on continental European power system (ENTSO-E CE) impose limitations on possible market power exchange but above all cause real threat to safe power system operation. To limit this phenomena, transmission system operators (TSOs) install phase shifting transformers on tie-lines. In case this countermeasure is not available or control range of installed devices is not sufficient to limit undesired power flow to safe level, TSOs may decide to change system topology (switch off tie-lines, splitting internal system) aiming to protect internal system integrity but weakening international connections. On one hand this action leads to reduction or elimination of unscheduled power flows but also influences on frequencies and damping of inter-area oscillations. Presented in the paper results discuss qualitative changes in inter-area oscillations pattern (frequency, damping, Polish generators contribution) caused by topology changes introduced to Polish EHV grid. Due to problems with low frequency inter-area oscillations damping either deterioration of damping or lowering the frequency may be treated as potential threat to European system safety. Additional scenario analyzing deeper changes in ENTSO-E CE system: split into western and eastern part was also investigated.

Keywords: power system security, loop flows, inter-area oscillations, small signal stability.