

BADANIA UKŁADU UPFC W OPARCIU O MODEL LABORATORYJNY I SYMULACYJNY

Michał KOSMECKI¹⁾, Robert MAŁKOWSKI²⁾

1. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk
e-mail: m.kosmecki@ien.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: robert.malkowski@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono koncepcję oraz sposób realizacji laboratoryjnego modelu układu UPFC. Układ zrealizowano według nowej metodyki oferującej elastyczność w szerokim zakresie testowania nowych algorytmów sterowania. W referacie zaprezentowano też przykładowe wyniki prób eksperymentalnych potwierdzające słuszność przyjętej koncepcji sterowania. Dane pomiarowe zostały również wykorzystane do celów walidacji opracowanego modelu UPFC.

Słowa kluczowe: UPFC, Unified Power Flow Controller, szybkie prototypowanie, Simulink Real Time, symulacje w czasie rzeczywistym, FACTS, laboratorium systemów elektroenergetycznych.

1. WPROWADZENIE

Zespolony regulator przepływu mocy (ang. Unified Power Flow Controller – UPFC) jest jednym z najbardziej wszechstronnych przedstawicieli układów typu FACTS (ang. Flexible AC Transmission Systems). W układzie UPFC możemy wyróżnić dwa zasadnicze obwody: równoległy i szeregowy. Obwód równoległy może być wykorzystywany do regulacji napięcia lub kompensacji mocy biernej w miejscu przyłączenia. Obwód szeregowy umożliwia regulację amplitudy i fazy napięcia dodatkowego U_{pq} (rys.1). Odpowiada to regulacji skośnej napięcia i umożliwia regulowanie przepływu zarówno mocy czynnej jak i mocy biernej w układzie przesyłowym [1].

Pomimo swojej wszechstronności, liczba instalacji UPFC całym świecie jest bardzo mała, podobnie jak liczba jednostek laboratoryjnych lub demonstracyjnych. Pierwszy i jak dotąd największy układ UPFC składający się z dwóch konwerterów ± 160 MVA został uruchomiony w 1999 roku w podstacji Inez w Kentucky. Projekt ten wykazał zdolność do regulacji przepływu mocy czynnej i biernej w linii, jak również napięcia w stacji [2]. Trzy lata później w rejonie Nowego Jorku oddano do użytku kolejną instalację. Wspomniany układ UPFC był częścią szerszego systemu i posiadał bardziej elastyczną strukturę nazywaną Convertible Static Compensator (SCS - odwracalny kompensator statyczny), na którą składają się dwa przekształtniki 100 MVA [3], [4]. Ostatnim dużym projektem był układ UPFC, oddany do użytku w 2003 roku w Korei. Składa się on z dwóch falowników równoległych

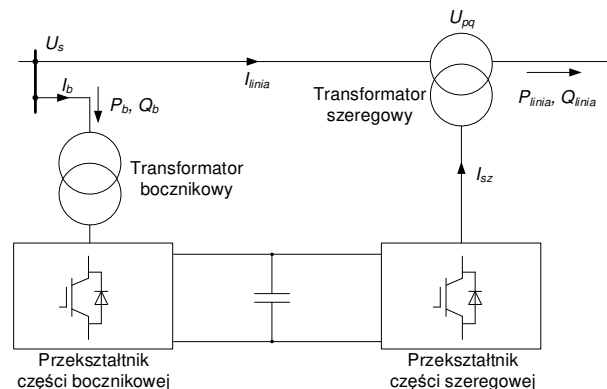
i dwóch modułów szeregowych każdy o mocy 40 MVA [5]. Laboratoryjne układy UPFC zostały opracowane głównie z myślą o demonstracji i testowaniu algorytmów sterowania przekształtników energoelektronicznych. Całościowe podsumowanie tego zakresu wraz z odpowiednimi odniesieniami można znaleźć w [6].

Celem niniejszej pracy jest analiza działania urządzenia UPFC poprzez porównywanie wyników symulacji z wynikami badań uzyskanymi z jednostki doświadczalnej laboratorium LINTE² zarówno w stanie ustalonym jak i podczas elektromechanicznych stanów przejściowych. Przedstawione wyniki pokazują jedynie podstawowy potencjał badawczy zbudowanego układu UPFC. Możliwość poszerzenia doświadczenia praktycznego związanego z pracą fizycznych jednostek typu UPFC w połączeniu z otwartą strukturą układów regulacji omawianego urządzenia stwarza dużo szersze możliwości badawcze [10].

2. MODELOWANIE I SYMULACJE

2.1. Model fazorowy układu UPFC

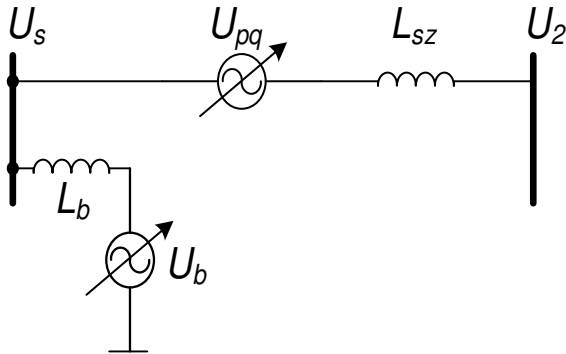
Schemat funkcjonalny UPFC pokazano na rys.1. Uproszczony schemat zastępczy UPFC dla stanów ustalonych pokazano na rys.2.



Rys.1 Schemat zastępczy urządzenia UPFC

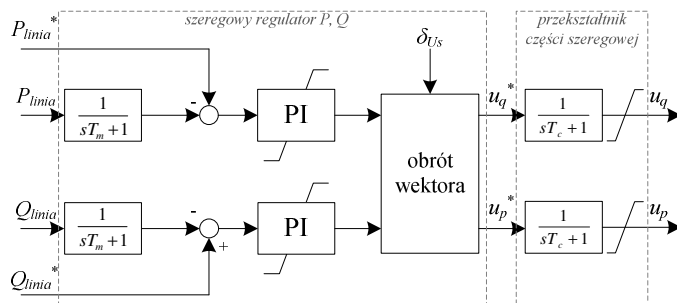
Model urządzenia dla stanów ustalonych składa się z indukcyjności szeregowej L_{sz} odwzorowującej impedancję transformatora dodatkowego, regulowanego źródła napięcia U_{pq} , indukcyjności L_b reprezentującej impedancję

transformatora równoległego i regulowanego źródła napięcia U_b . Taka reprezentacja wynika z faktu, iż dynamika regulacji przekształtników jest dużo większa niż zmiany prądów i napięć w stanach ustalonych oraz elektromechanicznych stanach przejściowych w SEE [7]. Z tego samego powodu pominięto model obwodu DC. Część szeregową konwertera opisano za pomocą stałej czasowej T_c , natomiast w części równoległej uwzględniono dynamikę regulacji prądu w przekształtniku napięciowym VSC (ang. Voltage Source Converter).



Rys.2. Schemat zastępczy UPFC dla stanów ustalonych

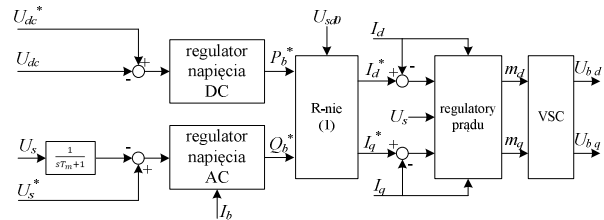
Układ regulacji części szeregowej został zamodelowany w sposób jaki przedstawiono na rys.3. Wartości zadane mocy czynnej i biernej są porównywane z pomiarami, a sygnały uchybu są przekazywane do regulatorów PI. W celu utrzymania wartości zadanych regulator wypracowuje dwie składowe ortogonalne u_p^* , u_q^* . Zmienne te są sygnałami wejściowymi do modelu przetwornicy reprezentowanego przez stałą T_c . Sygnał wyjściowy jest ograniczony do wartości znamionowych przetworników.



Rys.3. Schemat blokowy układu regulacji części szeregowej układu UPFC wraz modelem przekształtnika reprezentowanym stałą T_c

Cechą szczególną tego modelu jest sposób zorientowania wektora napięcia dodatkowego u_{pq} , którego składowa p jest zgodna ze składową w osi d napięcia w punkcie przyłączenia U_s , a nie prądu w linii I_b , jak jest to praktykowane w przypadku układów kompensacji szeregowej, np. SSSC [8]. W konsekwencji regulacja mocy czynnej i biernej nie jest wzajemnie odsprężona, co jednak w stanach ustalonych kompensowane jest przez regulatory PI. Pozytywną cechą takiego rozwiązania jest fakt, że układ jest mniej podatny na zniekształcenie prądu w linii I_l .

Część równoległa układu UPFC odpowiada funkcjonalnie układowi STATCOM (Static Synchronous Compensator), stąd zamodelowano ją w oparciu o [9]. Schemat blokowy układu regulacji przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Schemat blokowy układu regulacji części równoległej UPFC

Regulator napięcia AC jest typowym regulatorem PI z charakterystyką statyczną wykorzystującą prąd części równoległej I_b jako sygnał sprzężenia zwrotnego. Za regulację napięcia DC w obwodzie pośredniczącym odpowiada regulator całkujący z członem przyspieszającym fazę sparametryzowanym w taki sposób, aby uzyskać właściwy zapas fazy i szybkość odpowiedzi. Regulatory te wyznaczają zadane wartości mocy czynnej i mocy biernej dla przekształtnika i służą do wyznaczenia zadanych wartości prądu w osi d i q przy uwzględnieniu napięcia obwodu pośredniczącego wg zależności (1).

$$\begin{aligned} I_d^* &= \frac{2}{3U_{sdo}} P_b^* \\ I_q^* &= -\frac{2}{3U_{sdo}} Q_b^* \end{aligned} \quad (1)$$

Pętla regulacji prądu wyrażona zależnością (2), gdzie u_d i u_q są sygnałami wyjściowymi z regulatorów PI wyrażonymi w postaci (3) umożliwia wyznaczenie współczynników modulacji dla dwupoziomowego przekształtnika napięcia (VSC) opisanego równaniem (4).

$$\begin{aligned} m_d &= \frac{2}{U_{DC}} (U_d - L_b \omega_0 I_q + U_{bd}) \\ m_q &= \frac{2}{U_{DC}} (U_q + L_b \omega_0 I_d + U_{bq}) \end{aligned} \quad (2)$$

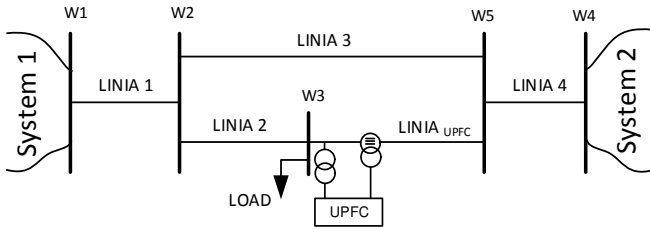
$$\begin{aligned} U_d(s) &= \frac{k_p s + k_i}{s} (I_d^*(s) - I_d(s)) \\ U_q(s) &= \frac{k_p s + k_i}{s} (I_q^*(s) - I_q(s)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} U_{bd} &= \frac{U_{dc}}{2} m_d \\ U_{bq} &= \frac{U_{dc}}{2} m_q \end{aligned} \quad (4)$$

Wyliczone wg zależności (4) składowe napięcia reprezentują napięcie wprowadzone przez bocznikową część układu UPFC.

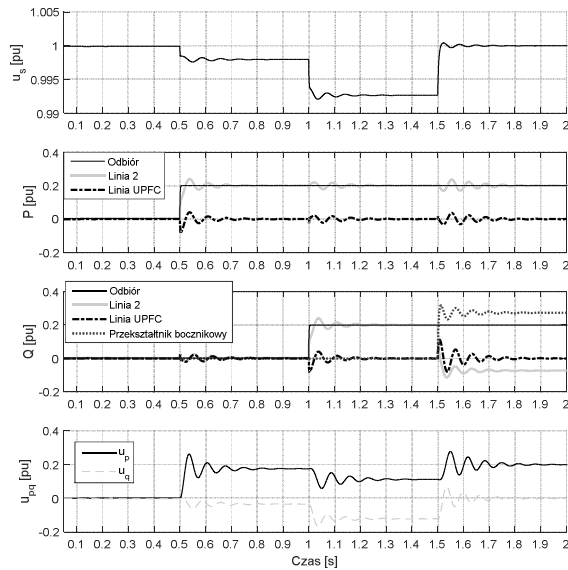
2.2. Weryfikacja modelu UPFC – symulacje

Opracowany model układu UPFC został wstępnie zweryfikowany poprzez symulację odpowiedzi na skok jednostkowy dla zadanych wartości. Sprawdzono możliwość utrzymania mocy czynnej i biernej w linii, jak również napięcia w punkcie przyłączenia. W celu porównania wyników symulacji z wynikami testów laboratoryjnych parametry systemu AC przyjętego w modelu dobrano w taki sposób, aby możliwie dokładnie odzwierciedlały parametry sieci laboratoryjnej (rys. 5). Zmiany przepływu mocy oraz poziomu napięcia wywoływano poprzez zmianę obciążenia mocą czynną i bierną odbiornika przyłączonego do tych samych szyn co układ UPFC.



Rys.5. Schemat zastępczy modelowanej sieci

W początkowej fazie symulacji przepływ mocy P i Q linią kontrolowaną przez układ UPFC jest równy zero (rys.6), układ UPFC jest nieaktywny.

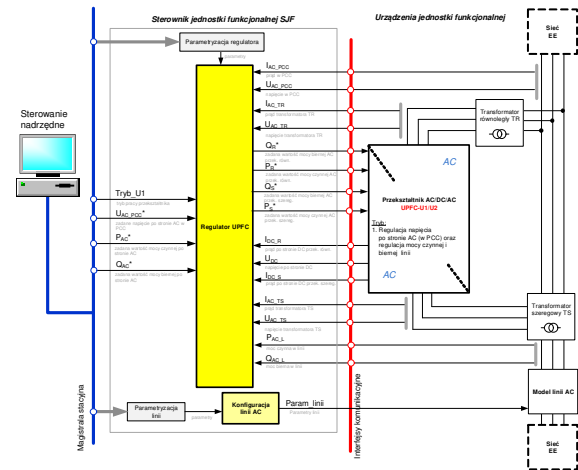


Rys.6. Przebieg napięcia w węźle przyłączenia oraz mocy czynnej i biernej w liniach zasilających odbiór

W czasie $t_1 = 0,1$ s zostaje aktywowany układ regulacji części szeregowej UPFC. Kryterium działania tego układu jest utrzymanie zerowego przepływu mocy P i Q linią UPFC. Następnie w czasie $t_2 = 0,5$ s następuje skokowy wzrost poboru mocy czynnej odbioru o 10 kW (0,2 pu w odniesieniu do mocy znamionowej urządzenia UPFC). Powyższe powoduje obniżenie napięcia w węźle 3 i zmianę przepływu mocy czynnej w liniach. Podobne zjawiska obserwuje się w czasie $t_3 = 1,0$ s, kiedy zapotrzebowanie mocy biernej obciążenia wzrasta o 10 kvar. W obu przypadkach moc dostarczana jest do odbioru jedynie linią 2, ponieważ część szeregową układu UPFC utrzymuje zerową wartość przepływu mocy P i Q w linii UPFC. W czasie $t_4 = 1,5$ s załączono regulację części równoległej układu UPFC – kryterium działania było utrzymanie znamionowej wartości napięcia w węźle przyłączenia. Również i w tym przypadku obserwuje się prawidłowe działanie układu – napięcie wzrosło do wartości zadanej.

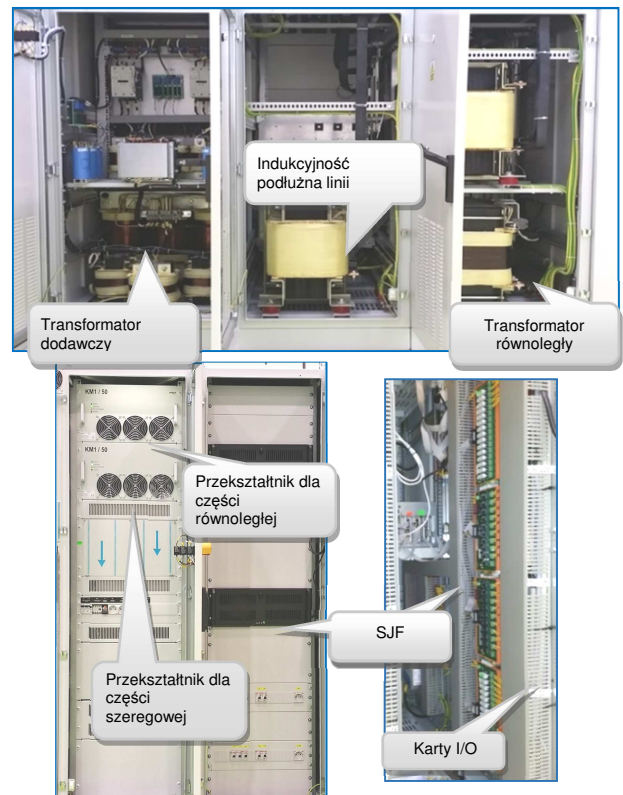
3. FIZYCZNA REALIZACJA LABORATORYJNEGO MODELU UKŁADU UPFC

Na rys. 7. przedstawiono podział funkcji sterowniczych w jednostce UPFC, zgodnie z którym można wyróżnić trzy poziomy: system nadrzędny SCADA realizujący sterowanie w pętli otwartej, sterownik jednostki funkcjonalnej (SJF) oraz układ sterowania przekształtnika AC/DC/AC.



Rys.7. Koncepcja rozdziału funkcji sterowniczych w jednostce UPFC

Praca układu laboratoryjnego jest następująca. Polecenia przekazywane są za pośrednictwem systemu SCADA do SJF, który odpowiada za ich realizację. Algorytm sterowania zaimplementowany aktualnie w SJF pozwala na regulację przepływu mocy biernej i czynnej w linii oraz regulację napięcia lub mocy biernej w punkcie przyłączenia (PCC) układu UPFC. SJF na podstawie lokalnych pomiarów napięć i prądów wypracowuje sygnały sterujące (u_p^* , u_q^* – dla części szeregowej oraz Q_b^* – dla części równoległej zgodnie z rys. 3 i 4) dla przekształtnika AC/DC/AC. Zadaniem przekształtników jest odpowiednio, dla układu szeregowego utrzymanie na zadanym przez SJF poziomie ortogonalnych napięć u_p i u_q , pozwalających regulować przepływ mocy w linii oraz dla części równoległej utrzymanie żądanej wartości mocy biernej w punkcie przyłączenia.



Rys.8. Widok szaf z elementami układu UPFC

Rysunek 8 przedstawia fizyczną realizację głównych elementów UPFC.

Model fizyczny układu UPFC został zainstalowany w pięciu szafach. W jednej z szaf umieszczono SJF wraz z kartami we/wy. Cztery kolejne szafy przeznaczono na pozostałe urządzenia: przekształtniki, transformatory bocznikowy i szeregowy oraz elementy modelujące linię AC.

Unikatową cechą opisywanego stanowiska jest możliwość szybkiego prototypowania układów regulacji z wykorzystaniem SJF. Środowiskiem programistycznym wykorzystanym do tego celu jest oprogramowanie Simulink Real-Time. Oprogramowanie to służy do tworzenia aplikacji bezpośrednio z modeli Simulink i uruchamiania ich w czasie rzeczywistym. Takie rozwiązanie umożliwia między innymi prowadzenie wielowariantowych badań symulacyjnych złożonych algorytmów sterowania, w tym optymalizację struktur sterowania oraz ich parametrów przed testami z wykorzystaniem urządzeń fizycznych w laboratorium. Przykłady wykorzystania opisanych funkcjonalności opisano w dalszej części artykułu.

4. TESTY UKŁADU UPFC

Podsumowanie wybranych testów wykonywanych podczas uruchamiania urządzenia laboratoryjnego przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Opis założeń dotyczących przebiegu opisanych testów

Etap 1 – stan ustalony	Cel – walidacja modelu matematycznego	
	Obiekt	Opis
	LOAD1 ^{a)}	Odbiornik wykorzystywano w celu wymuszenia płynnych zmian przepływu mocy czynnej i biernej w systemie testowym poprzez sinusoidalną zmianę poboru moc. Parametry wymuszenia: $S_{ref}=0,7$; $\cos(\varphi_{ref})=0,7$; $f_{ref}=75$ mHz
	UPFC	Testowano pracę w trzech trybach: <ul style="list-style-type: none"> • brak regulacji, • regulacja przepływu mocy: $P_{ref} = 0$; $Q_{ref} = 0$, • jednoczesna regulacja przepływu mocy (wartości zadane jw.) i napięcia ($U_{ref} = 1,0$).
Etap 2 – stany nieustalone	Cel – weryfikacja parametrów modelu	
	Obiekt	Opis
	LOAD4 ^{b)}	W odstępach ok. 5 s załączano a następnie wyłączano poszczególne elementy bierne odbioru w kolejności: <ul style="list-style-type: none"> • zał./wył. rezystancji R (ok. 50 kW) • zał./wył. reaktancji X (ok. 50 kvar) • zał./wył. impedancji $R+j \cdot X$ (ok. 50 +j·50) kVA
UPFC	Zmianę mocy odbioru przeprowadzono dla trzech trybów pracy: <ul style="list-style-type: none"> • regulacja napięcia: $U_{ref} = 1,05$, • regulacja przepływu mocy: $P_{ref} = -0,03$; $Q_{ref} = -0,04$, • załączone oba tryby regulacji (parametry bez zmian). 	

^{a)} *Energoelektroniczny odbiór regulowany o mocy znamionowej 150 kVA. Umożliwia między innymi niezależną zmianę mocy czynnej i biernej. W badaniach wykorzystano możliwość aktywacji sinusoidalnej zmiany mocy odbioru gdzie $S=S_{ref}[\cos(2\cdot\pi f_{ref})+i\cdot\sin(2\cdot\pi f_{ref})]$.*

^{b)} *Odbiornik bierny o elementach R,L o sumarycznej mocy 100 kW oraz 100 kvar.*

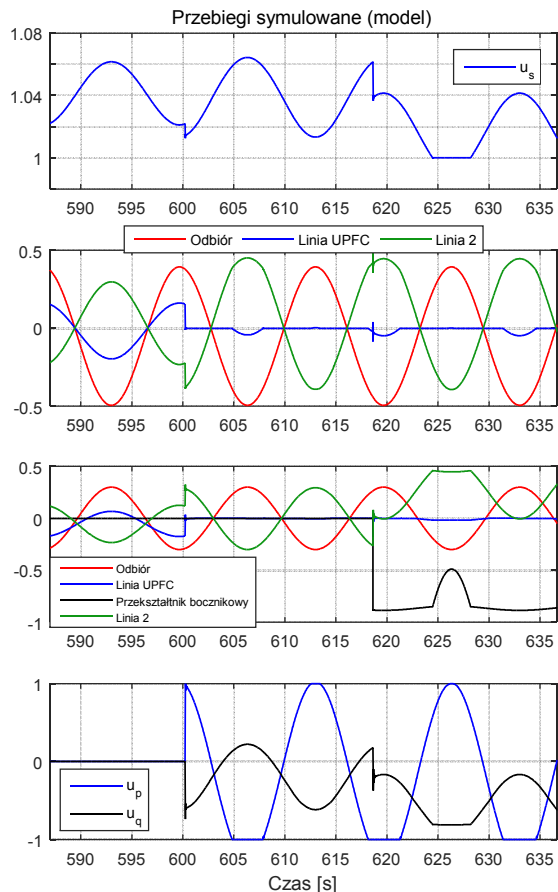
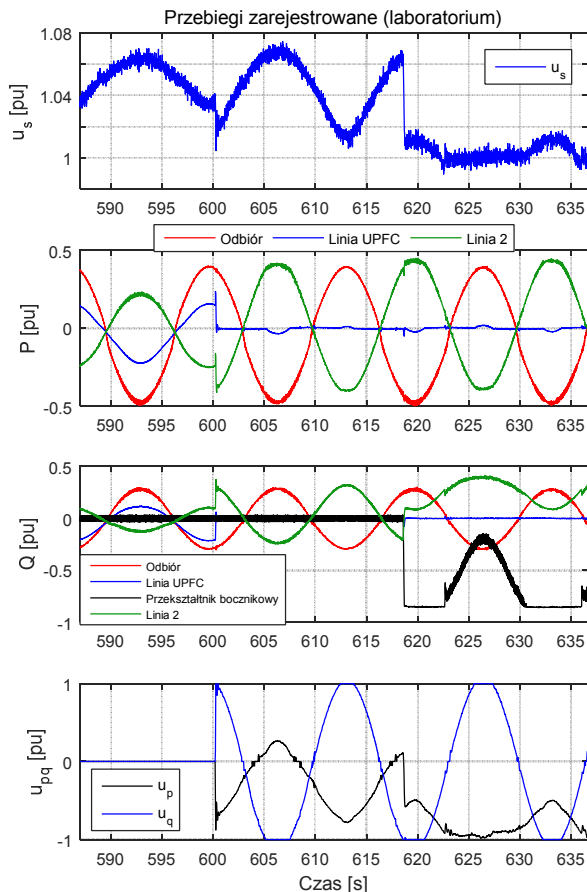
Testy zostały podzielone na dwie grupy w zależności od celu. W etapie 1 analizowano zachowanie urządzenia w stanie ustalonym, natomiast stany nieustalone były przedmiotem badań w etapie 2. Oba badania zrealizowano w układzie sieciowym pokazanym na rys. 5.

4.1. Praca w stanie ustalonym

Najważniejsze wyniki zaprezentowano na rysunku rys. 9, na którym z lewej strony pokazano przebiegi uzyskane dla obiektu rzeczywistego, po prawej zaś przebiegi uzyskane za pomocą badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu opracowanego w programie Simulink. Jakość regulacji dla wymuszeń wolnozmiennych (etap 1) sprawdzano w następujący sposób. Sterowany odbiór mocy pozornej $LOAD1$ wymuszał zmianę obciążenia w sposób sinusoidalny (parametry podano w tablica 1) powodując tym samym kołysania mocy czynnej i biernej w liniach go zasilających. W pierwszej fazie eksperymentu zaden z regulatorów układu UPFC nie był aktywny. W czasie $t = 600$ s aktywowano tryb regulacji przepływu mocy P i Q (patrz. tablica 1). Aktywacja tego trybu powoduje redukcję przepływu mocy linią UPFC do zera. W konsekwencji wzrasta przepływ mocy czynnej i biernej w liniach 2 i 3. Niewielkie odchyłki mocy czynnej w linii UPFC są efektem przekroczenia możliwości regulacyjnych układu UPFC, o czym świadczy przebieg napięcia dodatkowego u_q sięgający wartości szczytowej.

W czasie $t = 618$ s uruchomiono regulację napięcia w części równoległej UPFC, przy jednoczesnej pracy regulatora przepływu mocy. Zadaniem układu było utrzymanie zadanej ($U_{ref} = 1,0$) wartości napięcia w punkcie połączenia (U_{PCC} – szyny 3 z rys. 5). Aktywacja trybu regulacji napięcia spowodowała zmianę wartości oraz znaczne ograniczenie wahań napięcia w regulowanym węźle. W chwili gdy UPFC osiągnął graniczny zakres regulacji mocy biernej (w trakcie testów nastawiono sztywną granicę dla części równoległej na poziomie 85% prądu znamionowego), niemożliwa jest dalsza regulacja napięcia, co objawia się odchyłką od wartości zadanej.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że model w wysokim stopniu odwzorowywał rzeczywiste wyniki pomiarów. Niewielkie różnice obserwuje się podczas pracy urządzenia w trybie regulacji napięcia. Jednym z głównych powodów była trudność w dokładnym odwzorowaniu sieci przedstawionej na rys. 5 z powodu trudności w dokładnym wyznaczeniu impedancji długich wewnętrznych połączeń kablowych pomiędzy poszczególnymi urządzeniami w laboratorium.



Rys.9. Porównanie wyników pomiarów uzyskanych podczas wybranych testów (lewa kolumna) i wyników uzyskanych na podstawie badań symulacyjnych (prawa kolumna)

4.2. Praca w stanach nieustalonych

Skokowe zmiany mocy odbioru (szczegóły opisano w tablica 1) posłużyły do zweryfikowania zachowania UPFC w stanach przejściowych. Wszystkie próby przeprowadzono dla trzech zestawów parametrów regulatorów zestawionych w tablica 2.

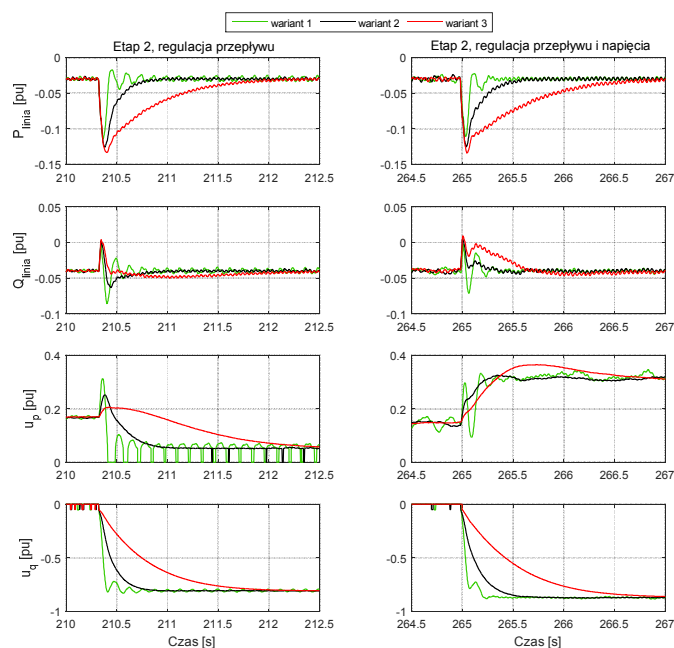
Tablica 2. Parametry regulatora przepływu mocy P i Q dla UPFC i podsumowanie wyników symulacji

	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Parametry	$k_p = 150$ $k_i = 1,6$	$k_p = 15$ $k_i = 0,16$	$k_p = 50$ $k_i = 0,5$
Czas regulacji	0,25 s	0,5 s	1 – 1,5 s
Charakter odpowiedzi	oscylacyjny	aperiodyczny	aperiodyczny

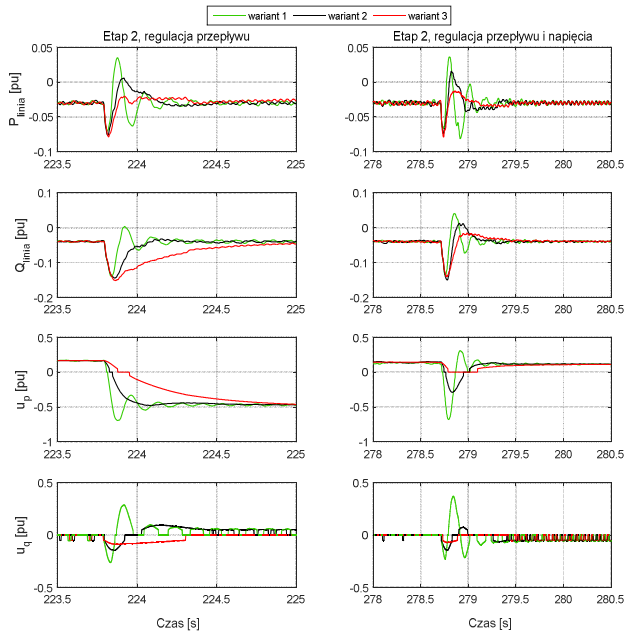
Na rys. 10 i rys.11 przedstawiono wyniki uzyskane dla skokowych zmian odpowiednio mocy czynnej i mocy biernej odbioru. Przebiegi pokazane w lewej kolumnie obrazują pracę urządzenia wyłącznie w trybie regulacji mocy czynnej i biernej ($P_{ref} = 0$, $Q_{ref} = 0$), natomiast w prawej kolumnie również z aktywną regulacją napięcia. Porównanie obu kolumn uwidacznia podstawową różnicę w jakości regulacji, tj. niwelację oscylacji po zaburzeniu poprzez stabilizujące działanie regulatora napięcia części bocznikowej urządzenia.

Oprócz demonstracji skuteczności regulacji przez urządzenie UPFC omawiane przebiegi ilustrują również wpływ zmiany parametrów regulatorów (zgodnie z tablica 2) na charakter odpowiedzi układu. Przedstawiono trzy różne

zestawy nastaw pozwalające uzyskać przebiegi o odmiennym czasie regulacji i oscylacyjności. Jest to przykład badań w technice szybkiego prototypowania (ang. Rapid Control Prototyping), które można prowadzić na omawianym stanowisku.



Rys.10. Efekt działania UPFC przy skokowej zmianie mocy czynnej odbioru. Praca w układzie jak na rys.5.



Rys.11. Efekt działania UPFC przy skokowej zmianie mocy biernej odbioru. Praca w układzie jak na rys.5.

Przebiegi pokazane na rysunkach rys. 10 i rys. 11 uwidaczniają pewną wadę przyjętego sposobu przekazywania sygnału między SJF a przekształtnikiem, polegającą na wykorzystaniu kanału analogowego do przesyłania amplitudy sygnału, podczas gdy znak był przesyłany przez przekątnik¹. Ponieważ przekątnik jest urządzeniem elektromechanicznym, aby zapobiec jego intensywnemu przełączaniu wprowadzono strefę niezułości. Powyższe, w sytuacji pojawienia się wartości bliskich zeru, skutkowało powstaniem zjawiska histerezy. W efekcie wystąpiło niepożądane zjawisko oscylacji w stanie ustalonym.

5. PODSUMOWANIE

Podstawowe właściwości UPFC zostały przedstawione i zweryfikowane za pomocą wyników pomiarów. W szczególności pokazano zdolność do regulacji przepływu mocy czynnej i biernej w linii prądu przemiennego, jak również do regulacji napięcia w punkcie przyłączenia. Ponieważ wektor napięcia dodatkowego zorientowany jest względem wektora napięcia w PCC, regulacja P i Q w linii nie jest całkowicie odsprężona. Przedstawiono także jaki wpływ na jakość regulacji UPFC mają wybrane parametry regulatora, ograniczenia wielkości U_P i U_Q oraz właściwy dobór stałej czasowej T_c .

TESTING OF A LABORATORY AND SIMULATION MODEL OF UPFC

This paper presents a laboratory unit of Unified Power Flow Controller (UPFC), whose operational performance is assessed based on the results of tests carried out in commissioning phase of the project during which steady state and transient performance were mainly investigated. Measurement data were also used for validation purposes of the elaborated transient model of UPFC.

Keywords: UPFC, Unified Power Flow Controller, Rapid Control Prototyping, Real Time Digital Simulation, FACTS, Power System Laboratory.

Przedstawione wyniki potwierdziły, iż przyjęto właściwą koncepcję realizacji projektu. Wdrożone rozwiązania dają szereg możliwości badawczych począwszy od projektowania nowatorskich algorytmów sterowania, w szczególności tych, które są odpowiedzialne za funkcje regulacyjne wysokiego poziomu, ale także testowania przyjętych rozwiązań w różnych konfiguracjach sieciowych w czasie rzeczywistym.

6. BIBLIOGRAFIA

1. L. Gyugyi, C. D. Schauder, S. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, and others, "The unified power flow controller: a new approach to power transmission control," *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 10, no. 2, pp. 1085–1097, 1995.
2. B. A. Renz, A. Keri, A. S. Mehraban, C. Schauder, E. Stacey, L. Kovalsky, L. Gyugyi, and A. Edris, "AEP unified power flow controller performance," *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 14, no. 4, pp. 1374–1381, 1999.
3. B. Fardanesh, M. Henderson, B. Shperling, S. Zelingher, L. Gyugyi, C. Schauder, B. Lam, J. Mounford, R. Adapa, and A. Edris, "Convertible static compensator: application to the New York transmission system," *CIGRE Pap.*, pp. 14–103, 1998.
4. B. Fardanesh, A. Edris, B. Shperling, E. Uzunovic, S. Zelingher, L. Gyugyi, L. Kovalsky, S. Macdonald, and C. Schauder, "NYPA Convertible Static Compensator Validation of Controls and Steady State Characteristics," *CIGRE 14-103 Fr.*, 2002.
5. Y. S. Han, I. Y. Suh, J. M. Kim, H. S. Lee, J. B. Choo, and B. H. Chang, "Commissioning and Testing of the KangJin UPFC in Korea," *CIGRE*, 2004.
6. P. Zhu, L. Liu, X. Liu, Y. Kang, and J. Chen, "Analysis and Comparison of two Control Strategies for UPFC," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, 2005*, pp. 1–7.
7. J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, *Power system dynamics: stability and control*. John Wiley & Sons, 2011.
8. N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. Wiley-IEEE press, 2000.
9. A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
10. J. Nieznański, "Laboratorium LINTE² ukończone". *Pismo PG nr 1, Politechnika Gdańska* 2016, str. 11-12.

¹ W efekcie opisanych w niniejszym artykule badań, zmieniono sposób przekazywania znaku. Aktualnie znak przekazywany jest w sposób cyfrowy.