### Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Paweł Albrechtowicz

# Zastosowanie przesuwników fazowych do regulacji rozpływów mocy w systemach elektroenergetycznych

Rozprawa doktorska

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Szczepanik, prof. PK

Promotor pomocniczy:

dr inż. Bartosz Rozegnał

Kraków, 2022

### Spis treści

1	Wprowadzenie								
	1.1	1.1 Opis zagadnienia							
	1.2	Cel i zakres pracy							
2	Kontrola rozpływu mocy w liniach przesyłowych								
	2.1	.1 Przepływ mocy w linii							
	2.2	Niepla	nowane przepływy mocy	15					
3	Kontrola rozpływu mocy z wykorzystaniem regulacji napięć								
	3.1	l Urządzenia należące do grupy FACTS							
	3.2	Urząd	zenia UPFC	23					
		3.2.1	Przykłady zastosowania UPFC na świecie	26					
	3.3	3.3 Transformatory dodawcze							
		3.3.1	Regulacja wzdłużna	29					
		3.3.2	Regulacja poprzeczna	30					
		3.3.3	Regulacja wzdłużno-poprzeczna	31					
		3.3.4	Przesuwniki fazowe	31					
		3.3.5	Regulacja mocy z wykorzystaniem przesuwników fazowych	39					
		3.3.6	Przykłady instalacji przesuwników fazowych na świecie	39					
		3.3.7	Transformator Sena	40					
4	Lab	oratory	jny układ przesuwnika fazowego z regulowanym napięciem wzdłuż-						
	nym	i popr	zecznym	43					
	4.1 Konstrukcja przesuwnika fazowego								
	4.2 Opis matematyczny proponowanego przesuwnika fazowego								
	wości sterowania przesuwnikiem fazowym	60							

5	Stanowisko pomiarowe i układ symulacyjny					
	5.1	Stanowisko pomiarowe	65			
	5.2	Model symulacyjny	70			
	5.3	Metoda obliczania rozpływów mocy w SEE	71			
6	Badania laboratoryjne proponowanego przesuwnika fazowego					
	6.1	Jałowy stan pracy	73			
	6.2	2 Pojedyncza linia wymiany mocy				
	6.3	3 Równoległe linie wymiany mocy o tej samej długości				
	6.4	Równoległe linie wymiany pomiędzy systemem $S_1$ a wewnętrznym systemem				
		generatorowym	92			
		6.4.1 Linie równoległe o długościach 10 sekcji każda	93			
		6.4.2 Linie równoległe o długościach 4 sekcje z PF oraz 10 sekcji	95			
	6.5	Moc bierna w wybranych przypadkach pracy PF	99			
7	Obliczenia symulacyjne oraz numeryczne					
	7.1	Pojedyncza linia wymiany	101			
	7.2	Linie równoległe o długościach 10 sekcji każda	104			
	7.3	Linie równoległe o długościach 4 sekcje z PF i 10 sekcji	110			
	7.4	Obliczenia rozpływów mocy w 5-węzłowym systemie elektroenergetycznym .	116			
8	Podsumowanie					
A	Para	metry 5-węzłowego systemu do obliczeń rozpływów mocy	139			
B	Parametry elementów układu pomiarowego					

#### Wykaz oznaczeń i symboli:

 $B_b$  – susceptancja bocznikowa układu UPFC

HVAC – (ang. High Voltage Alternating Current)

HVDC – (ang. High Voltage Direct Current)

KSE – krajowy system elektroenergetyczny

PF – przesuwnik fazowy

pu - jednostka względna (ang. per unit)

 $R_{PF}$  – rezystancja przesuwnika fazowego

SEE – system elektroenergetyczny

TD - transformator szeregowy regulujący napięcie dodawcze

TW - transformator wejściowy regulujący napięcie wzdłużne

 $U_d$  – napięcie dodawcze wprowadzane przez przesuwnik fazowy

 $U_G$  – napięcie generatora synchronicznego

 $U_L$  – napięcie wyjściowe przesuwnika fazowego

 $u_{pf}$  – napięcie chwilowe wyjściowe z przesuwnika fazowego

UPFC – zespolony regulator przepływu mocy (ang. Unified Power Flow Controller)

 $U_R$  – napięcie węzła odbiorczego

 $u'_{\rm S}$  – napięcie chwilowe węzła wysyłającego

 $u_S$  – napięcie chwilowe wyjściowe z transformatora wejściowego przesuwnika fazowego

 $U'_{\rm S}$  – napięcie węzła wysyłającego

 $U_S$  – napięcie wyjściowe z transformatora wejściowego przesuwnika fazowego

X<sub>D</sub> – reaktancja indukcyjna wzdłużna układu UPFC

 $X_L$  – reaktancja wzdłużna linii

 $X_{PF}$  – reaktancja przesuwnika fazowego

Z<sub>PF</sub> – impedancja zastępcza przesuwnika fazowego

 $\alpha$  – kąt fazowy napięcia wprowadzany przez przesuwnik fazowy

 $\Delta U$  – spadek napięcia na linii

 $\eta$  – przekładnia transformatora

 $\bar{\eta}$  – zespolona przekładnia transformatora

 $\vartheta$  – kąt fazowy pomiędzy wskazami napięć  $U_S$  a  $U_R$ 

 $\psi$  – kąt wewnętrzny przesuwnika fazowego

#### Rozdział 1

#### Wprowadzenie

#### 1.1 Opis zagadnienia

Rozwój nowych źródeł wytwórczych, w tym odnawialnych źródeł energii zarówno małej, jak i dużej mocy oraz ich możliwe różne lokalizacje, skutkujące rozproszonym charakterem generacji energii elektrycznej, wymuszają potrzebę kontroli rozpływów mocy w systemie elektroenergetycznym. Ponadto współpraca synchroniczna systemów różnych państw, np. w ramach UCTE (ang. *Union for the Coordination of the Transmission of Electricity*), do którego należy również polski krajowy system elektroenergetyczny (KSE) wymusza stosowanie urządzeń umożliwiających kontrolę rozpływów mocy. Wspomniana kontrola rozpływów mocy dotyczy także minimalizowania lub całkowitej eliminacji występowania przepływów nieplanowanych pomiędzy połączonymi systemami elektroenergetycznymi (przepływy kołowe).

Wśród stosowanych obecnie układów, pozwalających na sterowanie przesyłaną mocą w danej linii elektroenergetycznej, wyróżnić można przesuwniki fazowe (PF) o klasycznych konstrukcjach opartych o transformator/uzwojenie wzbudzające i szeregowe, z wykorzystaniem elementów energoelektronicznych instalowanych w obwodzie pośredniczącym pomiędzy transformatorem wzbudzającym a szeregowym, czy też urządzenia należące do grupy określanej jako elastyczne systemy przesyłowe prądu przemiennego (ang. *Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS*). Zarówno w sieci przesyłowej, której operatorem są Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA (PSE), jak i w sieci dystrybucyjnej, w związku z rozwojem generacji rozproszonej, należy uwzględnić możliwość wydatnej regulacji rozpływów mocy z zachowaniem norm i wymagań dotyczących parametrów jakości energii elektrycznej, określonych przez poszczególnych operatorów systemów. Z tego powodu należy zweryfikować możliwość użytkowania znanych układów PF, jak np. symetryczne przesuwniki fazowe zainstalowane w stacji Mikułowa na linii wymiany transgranicznej z Niemcami (Mikułowa – Hagenwerder) [1], [2], zaawansowane technologicznie układy UPFC [3] (ang. *Unified Power Flow Controler* - zespolony regulator przepływu mocy) wykorzystywane w USA od kilkudziesięciu, czy też w Chinach od kilku lat, z innymi znanymi konstrukcjami. Należy zauważyć, że w Europie planowane są do zaprojektowania lub w trakcie produkcji przesuwniki fazowe, o których informacje zawarte są publikacjach ENTSO-E (ang. *European Network of Transmission System Operators for Electricity* - Europejskiej Sieci Operatorów Elektroenergetycznych Systemów Przesyłowych) [4], [5], [6]. Potwierdzeniem wykorzystania przesuwników fazowych jest fakt, iż w Europie na początku tysiąclecia moc zainstalowana przesuwników fazowych wynosiła ok. 5 GW, natomiast w 2030 wielkość ta powinna zwiększyć się do 50 GW [7].

Wśród znanych układów przesuwników fazowych wyróżnić można układ pracujący jako asymetryczny, ale pozwalający na regulowanie, oprócz napięcia dodawczego (poprzecznego) wprowadzanego do linii poprzez szeregowe uzwojenie transformatora szeregowego (dodawczego), również napięcia wzdłużnego linii. Możliwość regulacji obu napięć stwarza szerokie pole sterowania przesuwnikiem fazowym, wykonanym w takiej technologii, a tym samym na uzyskanie wymaganych przez operatora sieci przesyłowej lub dystrybucyjnej parametrów przesyłanej energii elektrycznej, łącznie z kontrolą rozpływów mocy. Zastosowanie przesuwników fazowych do kontroli rozpływów mocy jest powszechne, jednak najpopularniejszymi są jednostki bez możliwości bezpośredniej regulacji napięcia wzdłużnego (klasyczny asymetryczny przesuwnik fazowy wpływa na zmianę napięcia wzdłużnego poprzez napięcie poprzeczne, jednak nie ma możliwości regulacji tej wartości, jest ona jedynie konsekwencją typu urządzenia). Z tego powodu w literaturze naukowej większość prac poświęcona jest analizom dotyczącym wpływom na regulację mocy w systemie przesuwników symetrycznych i asymetrycznych. Natomiast publikacje opisujące działanie przesuwników fazowych z możliwą regulacją obu napięć są w zasadzie ograniczone do układu transformatora Sena, który jednak ze względu na konstrukcję jest układem badziej złożonym od analizowanego w tej pracy asymetrycznego przesuwnika fazowego lub też skupiają się na regulacji wzdłużno-poprzecznej zastosowanej w węzłach łączących różne poziomy napięcia systemu elektroenegetycznego [8], [9]. Jednak w niektórych publikacjach badane są wpływy układów "zespołów transformatorowych z regulacją przekładni poprzecznej" [10], [11], które, co do zasady, mogą spełniać takie same funkcje, jak asymetryczny przesuwnik fazowy o regulacji wzdłużno-poprzecznej. Znane są również urządzenia do kontroli rozpływów mocy z wykorzystaniem elementów energoelektronicznych, jak w np. w pozycji [12], które mogą pracować na zadaną regulację napięcia: wzdłużną, poprzeczną lub

wzdłużno-poprzeczną.

#### **1.2** Cel i zakres pracy

Ze względu na stosunkowo szerokie zastosowanie przesuwników fazowych w systemach elektroenergetycznych na całym świecie, dobrze znane klasyczne konstrukcje, wydatnie analizowane przez wielu naukowców oraz producentów przesuwników fazowych, zdecydowano się na rozważenie pracy asymetrycznego przesuwnika fazowego, w połączeniu z możliwością zmiany przekładni napięciowej, a tym samym funkcjonowania układu z regulacją zarówno napięcia wzdłużnego, jak i poprzecznego. Celem niniejszej pracy jest:

- zaprojektowanie i skonstruowanie laboratoryjnego przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym,
- modyfikacja układu laboratoryjnego modelującego system elektroenergetyczny na potrzeby badań przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym,
- badania laboratoryjne oraz symulacyjne proponowanego przesuwnika fazowego w ustalonych stanach pracy,
- obliczenia analityczne rozpływów mocy dla wybranych przypadków testowych.

Realizacja wymienionego celu pracy jest związana z wykazaniem słuszności tezy:

Asymetryczny przesuwnik fazowy o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym może być skutecznym urządzeniem kontrolującym rozpływy mocy w liniach elektroenergetycznych, a jego konstrukcja może pozwolić na szeroki wariant zastosowań w stanach ustalonych.

W celu udowodnienia przedstawionej tezy, wykonano analizę potrzeb i wymaganych parametrów badanego przesuwnika fazowego. Dzięki temu, możliwym było wykonanie projektu testowego przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym, o konstrukcji dwutransformatorowej oraz jego realizację przez jednego z wiodących na polskim rynku producentów transformatorów. W kolejnym etapie, jednostki tworzące układ badanego przesuwnika zostały odpowiednio skonfigurowane, aby uzyskać przesunięcie kątowe napięcia dodawczego równe 90°, wraz z wykonaniem układu sterowania transformatorem dodawczym (szeregowym; regulacja napięcia dodawczego/poprzecznego) oraz transformatorem wejściowym (regulacja napięcia wzdłużnego). Gotowy układ przesuwnika fazowego zainstalowano w laboratoryjnym systemie elektroenergetycznym, w którym dokonano również weryfikacji stanu modelowych linii przesyłowych oraz dokonano niezbędnych konfiguracji w układach generatorów synchronicznych. Wymienione działania w laboratoryjnym systemie pozwoliły na przygotowanie modelu symulacyjnego odpowiadającego rzeczywistym warunkom pomiarowym, a następnie weryfikację pomiarów laboratoryjnych z uzyskanymi na drodze symulacji. Oprócz symulacji pracy przesuwnika fazowego w wybranych przypadkach, wykonano obliczenia analityczne rozpływów mocy w układzie z przesuwnikiem fazowym.

W związku z opisanymi działaniami, praca składa się z 8 rozdziałów. W pierwszym rozdziale zdefiniowano cel oraz tezę pracy wraz z ogólnym opisem wprowadzającym do problematyki poruszanej w pracy. W kolejnej części opisano zależności dotyczące przesyłanej mocy w systemie elektroenergetycznym wraz z możliwościami sterowania mocą poprzez regulację wybranych parametrów. Kontrola rozpływu mocy poprzez wykorzystanie regulacji napięcia została szczegółowo przedstawiona w trzecim rozdziale. Opisano urządzenia typu FACTS, ze szczególnym uwzględnieniem urządzenia UPFC, a także realizację idei napięć dodawczych poprzez odpowiednie układy oparte o transformatory - regulacja wzdłużna, poprzeczna i wzdłużno-poprzeczna. W tym rozdziale opisano także typowe układy przesuwników fazowych, czyli jednostki asymetryczne i symetryczne. W rozdziale czwartym skupiono się na układzie testowego przesuwnika fazowego. Opisano jego konstrukcje, parametry jednostek, z których jest zbudowany, układ sterowania, możliwe stany pracy. Ponadto zaprezentowano teoretyczne charakterystyki przesuwnika fazowego na podstawie modyfikacji opisu matematycznego, dotyczącego klasycznego asymetrycznego przesuwnika fazowego. W kolejnej części dokonano opisu laboratoryjnego układu doświadczalnego. Pokazano możliwości systemu elektroenergetycznego, jego elementy składowe. Wymieniono aparaturę pomiarową wykorzystaną do przeprowadzenia pomiarów. Rozdział szósty przedstawia wyniki badań laboratoryjnych dla wybranych przypadków pracy przesuwnika fazowego. Wykonane pomiary dotyczyły pracy przesuwnika w:

- pojedynczej linii wymiany mocy łączącej dwa systemy elektroenergetyczne (Rysunek 1.1a),
- jednej z równoległych linii łączących dwa systemy elektroenergetyczne (Rysunek 1.1b),
- jednej z linii równoległych łączących zewnętrzny system elektroenergetyczny z wewnętrznym systemem zasilanym z generatorów synchronicznych (Rysunek 1.1c).





W rozdziale siódmym dokonano analizy otrzymanych wyników symulacyjnych i analitycznych, a także porównano je z rezultatami pomiarów laboratoryjnych. Wykonano obliczenia rozpływów mocy w testowym 5-węzłowym systemie elektroenergetycznym dla przesuwnika asymetrycznego, przesuwnika asymetrycznego pracującego jako quasi-symetryczny oraz przy obniżonym napięciu wzdłużnym. Wnioski z przeprowadzonych działań oraz podsumowanie niniejszej pracy zebrano w ósmym rozdziale. Wyznaczono następne działania badawcze. Następnie przedstawiono spis literatury. Ostatnimi częściami są dwa dodatki opisujące parametry testowego systemu do obliczeń rozpływów mocy oraz elementy układu pomiarowego.

#### **Rozdział 2**

#### Kontrola rozpływu mocy w liniach przesyłowych

#### 2.1 Przepływ mocy w linii

Kontrola rozpływu mocy w liniach przesyłowych możliwa jest do realizacji poprzez kilka metod zależnych od przyjętej zmiennej regulowanej. Jednak, aby móc przyjąć, co jest zmienną dla danego sposobu regulacji, należy przeprowadzić analizę, od których parametrów i w jaki sposób zależy moc przesyłana przez linię elektroenergetyczną. W przypadku linii łączącej dwa systemy modelowanej jako linia II-rodzaju (Rysunek 2.1), a zatem wyłącznie o parametrach wzdłużnych (rezystancja i reaktancja indukcyjna wzdłużne), przesyłana moc pozorna S jest wyrażona zgodnie ze wzorem (2.1) [13], [14]:

$$S = U_R I \tag{2.1}$$



Rysunek 2.1: Uproszczony schemat linii przesyłowej łączącej dwa systemy.

Wskutek przepływu prądu przez elementy wzdłużne (rezystancję  $R_L$  oraz reaktancję induk-

cyjną  $X_L$ ) występuje na tych elementach strata napięcia  $\Delta U$  zgodnie ze wzorem (2.2):

$$\Delta U = (R_L + jX_L)I \tag{2.2}$$

Stratę napięcia na elementach wzdłużnych linii przesyłowej można przedstawić na podstawie Rysunku 2.2 jako:

$$\Delta U = U'_S \cos \vartheta - U_R + j U'_S \sin \vartheta \tag{2.3}$$

gdzie:  $U'_{S}$  - wartość skuteczna napięcia na początku linii przesyłowej, [V];  $\vartheta$  - kąt przesunięcia pomiędzy wskazami napięć na początku i na końcu linii przesyłowej, [°]. Podstawiając równanie (2.3) do (2.2) można wyznaczyć prąd *I* płynący linią:

$$I = \frac{U'_S \cos \vartheta - U_R + jU'_S \sin \vartheta}{R_L + jX_L}$$
(2.4)

A następnie przez usunięcie jednostki urojonej j z mianownika i podstawienie do równania na moc pozorną przesyłaną linią (2.1) wyrażenia (2.4) otrzymuje się:

$$S = U_R \frac{R_L(U'_S \cos \vartheta - U_R) + X_L U'_S \sin \vartheta + j(R_L U'_S \sin \vartheta + X_L U'_S \cos \vartheta - U_R)}{R_L^2 + X_L^2}$$
(2.5)



Rysunek 2.2: Wykres wskazowy dla linii przesyłowej drugiego rodzaju z Rysunku 2.1.

Przedstawiona zależność (2.5) wyraża wartość mocy pozornej przesyłanej linią o parametrach  $R_L$  oraz  $X_L$  przy napięciu na początku linii równym  $U'_S$  i na końcu równym  $U_R$  oraz kącie pomiędzy napięciami wynoszącym  $\vartheta$ . Na podstawie wymienionych parametrów możliwe jest sterowanie przesyłaną mocą pozorną pomiędzy dwoma punktami danego systemu połączonego linią przesyłową. Uwzględniając stosunek reaktancji indukcyjnej  $X_L$  linii do rezystancji  $R_L$  linii, który dla linii przesyłowych wysokich napięć (WN) jest większy lub równy od 6, można uprościć równanie (2.5) o parametr  $R_L$  do następującej postaci:

$$S = \frac{U'_S U_R}{X_L} \sin \vartheta + j \frac{U'_S U_R}{X_L} (\cos \vartheta - \frac{U_R}{U'_S})$$
(2.6)

Część rzeczywista równania (2.6) opisuje moc czynną, natomiast część urojona moc bierną przesyłaną linią elektroenergetyczną. Równanie (2.6) można przedstawić w postaci dwóch składowych: na moc czynną (2.7) oraz bierną (2.8):

$$P = \frac{U_S' U_R}{X_L} \sin \vartheta \tag{2.7}$$

$$Q = \frac{U_S' U_R}{X_L} (\cos \vartheta - \frac{U_R}{U_S'})$$
(2.8)

Z równania (2.7) można wnioskować, że wzrost przesyłanej mocy czynnej przez linie można osiągnąć przez:

- zwiększenie kąta przesunięcia pomiędzy wskazami napięcia na początku i na końcu linii (Rysunek 2.3),
- podwyższenie napięcia w poszczególnych liniach,
- kompensację parametrów wzdłużnych linii przesyłowych (Rysunek 2.4).



### Rysunek 2.3: Schemat ideowy układu z wprowadzonym napięciem dodawczym w celu zmiany kąta mocy i/lub zmiany wartości napięcia.

Przykład zmian przesyłanych mocy czynnych i biernych w funkcji kąta  $\vartheta$  oraz wartości napięcia został zobrazowany na wykresach trójwymiarowych (Rysunki 2.5 i 2.6).



Rysunek 2.4: Schemat ideowy układu z szeregową kompensacją reaktancji indukcyjnej linii  $X_L$  poprzez zainstalowanie kondensatora  $X_C$ .



Rysunek 2.5: Wykres zmian mocy czynnej w funkcji kąta  $\vartheta$  (- $\pi/2$  -  $\pi/2$ ) oraz napięcia na początku linii (95-105% napięcia znamionowego).

W zależności od kąta  $\vartheta$  widoczna jest zmiana kierunku przesyłanej mocy czynnej. Z kolei wzrost napięcia na początku linii od 95% do 105% wartości znamionowej skutkuje liniowym wzrostem przesyłanej mocy czynnej dla stałego kąta  $\vartheta$ . Moc bierna nie przyjmuje wartości dodatnich dla napięć mniejszych niż znamionowe. W przypadku napięcia większego od znamionowego oraz małych kątów  $\vartheta$ , moc bierna przyjmuje wartości powyżej 0. Zmiana kąta  $\vartheta$  pomiędzy wektorami napięć na początku i na końcu linii możliwa jest poprzez zastosowanie przesuwników fazowych (układy oparty na transformatorach), urządzeń należących do grupy

FACTS, np. układów UPFC. Szczegółowo urządzenia te opisano w Rozdziale 3.

Zmiana napięcia linii na wyższe jest ograniczona przede wszystkim poprzez koszty budowy lub modernizacji istniejących linii, co wynika ze znacznego wzrostu ceny użytkowanych materiałów, konstrukcji słupów elektroenergetycznych, wymaganych własności izolacyjnych. Z kolei zmiana napięcia na poziomie kilku procent napięcia znamionowego poszczególnych linii jest możliwa do realizacji dzięki zastosowaniu transformatorów z przełącznikami zaczepów (OLTC – ang. *On Load Tap Changer* - podobciążeniowe przełączniki zaczepów). Wpływ na wartość napięcia w linii ma również wartość przesyłanej mocy biernej, która może być ograniczona poprzez zastosowanie kompensacji mocy biernej, jednakże to działanie zaradcze nie należy do bezpośrednich sposobów podnoszenia napięcia.

Kompensacja reaktancji  $X_L$  linii przesyłowej jest możliwa do realizacji poprzez instalowanie baterii kondensatorów włączanych szeregowo w linię. Wówczas uzyskuje się zmniejszenie zastępczej reaktancji wzdłużnej linii, co skutkuje wzrostem mocy w linii.



Rysunek 2.6: Wykres zmian mocy biernej w funkcji kąta  $\vartheta$  (- $\pi/2 - \pi/2$ ) oraz napięcia na początku linii (95-105% napięcia znamionowego).



Rysunek 2.7: Przedstawienie graficzne przyjętej konwencji oznaczeń mocy.

Przystępując do analiz rozpływu mocy w układach przesyłowych, należy określić konwencję oznaczeń kierunków i charakterów mocy. Na Rysunku 2.7 określono przyjętą zasadę określania kierunku przepływu i charakteru mocy biernej. Moc bierną indukcyjną oznacza się na równi z mocą czynną, co skutkuje tym, że mają one zawsze te same znaki, jeśli przesyłane są w tym samym kierunku. W przypadku przepływu mocy biernej w kierunku przeciwnym do mocy czynnej, charakter tej mocy jest przyjmowany jako pojemnościowy [15].

Ponadto warto odnotować możliwe konwencje oznaczeń mocy biernej, które są stosowane w literaturze naukowej. W tzw. "metodzie napięć" o charakterze mocy biernej decyduje wpływ mocy na napięcie w rozpatrywanym węźle. Jeżeli napięcie węzła maleje, to moc ma charakter indukcyjny. Z kolei wzrost napięcia w węźle, wskutek przepływu mocy biernej, świadczy o jej pojemnościowym charakterze [16]. W generacyjno-odbiorczej metodzie rozróżnia się dwa przypadki charakteru mocy w zależności od elementu systemu. Dla generatorów, które pracują z mocą bierną indukcyjną przyjmuje się znak "+" i generację mocy biernej. Natomiast pobór mocy biernej i znak "-" jest przyjmowany dla pracy z mocą bierną pojemnościową. W przypadku odbiorów i innych elementów sieci moc bierną indukcyjną przyjmuje się jako pobieraną i ze znakiem "+", a pojemnościową z "-" i oznacza produkcję mocy biernej [16], [17].

#### 2.2 Nieplanowane przepływy mocy

W przypadku występowania braku odpowiedniej kontroli rozpływów mocy w SEE może dojść do sytuacji powstania nieplanowanych przepływów mocy (przepływów kołowych, inaczej karuzelowych oraz nieplanowanego tranzytu). Mianem nieplanowanego tranzytu określa się przepływy, które wskutek planowej wymiany transgranicznej pomiędzy dwoma SEE powodują nieplanowane obciążenie transgranicznych połączeń innych obszarów [18]. Z kolei przepływy kołowe określane są jako przepływ mocy w SEE, którego źródło i odbiór znajduje się w sąsiednim SEE. A zatem moc poprzez połączenia transgraniczne przepływa z jednego SEE do drugiego, a następnie innym połączeniem ponownie wraca do pierwszego. Taka sytuacja jest z punktu widzenia przesyłu mocy elektrycznej negatywną, ponieważ powoduje niepotrzebne obciążenie linii wewnątrz SEE, który nie korzysta z tej mocy, co z kolei wpływa na zmniejszenie zdolności przesyłowej w poszczególnych liniach. Również przez to niekorzystne zjawisko nie jest możliwe prowadzenie wymiany transgranicznej z sąsiednimi dla danego SEE rynkami energetycznymi, co w konsekwencji może się przekładać na wzrost cen za energię elektryczną dla odbiorcy końcowego. Podejmowane działania zaradcze w ramach ograniczania nieplanowanych przepływów mogą być realizowane poprzez [19]:

- wykorzystanie działań w ramach tzw. redispatchingu,
- instalowanie urządzeń umożliwiających kontrolę rozpływów mocy (np. wykorzystanie napięć dodawczych),
- zmianę aktualnej konfiguracji SEE,
- wykorzystanie pętli stałoprądowej (ang. DC loop).

Wg [20] redispatching to "środek uruchamiany przez jednego lub kilku operatorów systemów poprzez zmianę schematu wytwarzania lub obciążenia w celu zmiany fizycznych przepływów w ramach systemu przesyłowego i zmniejszenia ograniczeń". W ramach redispatchingu można wyróżnić redispatching wewnętrzny (ang. *internal redispatching*) polegający na zmianie grafików pracy źródeł wytwórczych wewnątrz danego SEE oraz międzynarodowy redispatching (ang. *cross-border redispatching*), który polega na zmianie grafików pracy źródeł wytwórczych w różnych SEE. Należy jednak podkreślić, że redispatching nie stanowi efektywnego narzędzia w kontekście poprawy możliwości przesyłowych przede wszystkim ze względu na koszty ekonomiczne, które również w rozliczeniu końcowym skutkują wzrostem cen za energię elektryczną. Potwierdzeniem tej tezy jest informacja o kosztach redispatchingu na połączeniu polsko – niemieckim przekraczających 100 mln euro w roku 2015 [20].

Z kolei na podstawie sprawozdania Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki (URE), w 2019 wartość mocy w ramach redispatchingu dwustronnego na przekroju polsko - niemieckim wzrosła o blisko 200% w porównaniu do roku 2018. Wykorzystanie napięć dodawczych do kształtowania przepływów jest stosowane z wykorzystaniem przesuwników fazowych (PF) lub układów UPFC (szczegółowo opisane w rozdziałach 3 i 4). Wykorzystanie możliwości zmian konfiguracji wewnątrz danego SEE jest działaniem tanim, ponieważ wykorzystywana jest już istniejąca infrastruktura, jednakże ze względu na efekty tych działań nie jest zaliczana do efektywnych metod kształtowania przepływów transgranicznych [19].

Kolejny wymieniony środek zapobiegawczy przeciw przepływom nieplanowanym to wykorzystanie pętli stałoprądowej [19], [21], [22], [23]. Energia elektryczna jest przesyłana z wykorzystaniem połączeń HVDC poprzez inne systemy i wprowadzana do SEE, do którego występują przepływy nieplanowane. Przykładem tego typu układu może być połączenie Niemcy  $\rightarrow$ Dania  $\rightarrow$  Szwecja  $\rightarrow$  Polska oparte na połączeniach HVDC. Przesyłanie energii elektrycznej pętlą stałoprądową powoduje zmniejszenie przepływów mocy na północnym połączeniu Niemiec i Polski (Vierraden – Krajnik). Warto nadmienić, że koszty budowy i eksploatacji linii HVDC są wyższe niż dla linii napowietrznych HVAC, a za graniczną wartość przewagi linii AC uznaje się długość linii 600 - 800 km [22].

Przepływy kołowe stanowią istotny problem, zwłaszcza w przypadku przepływów pomiędzy połączonymi SEE. W przypadku Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) problem ten występuje na połączeniu z Niemcami oraz Czechami i Słowacją. Północna część Niemiec oraz Dania są dużymi producentami energii elektrycznej (elektrownie zawodowe, siłownie wiatrowe). Z kolei w południowej części kraju u naszych zachodnich sąsiadów jest zlokalizowany przemysł, który jest dużym odbiorcą energii elektrycznej. Również Austria jest znaczącym odbiorcą energii elektrycznej. Natomiast w Polsce blisko przekroju z Niemcami zlokalizowane są dwie elektrownie (Turów, Dolna Odra), które produkują energię elektryczną praktycznie w całości zapotrzebowaną lokalnie. W konsekwencji energia elektryczna jest przesyłana z Niemiec przez polski SEE, a następnie do czeskiego SEE, co wynika z faktu znacznej liczby elektrowni na południu Polski wobec braku elektrowni w Czechach blisko połączenia z Polską (a zatem sytuacja analogiczna, jak w przypadku Niemiec i Polski). Oprócz nieplanowanych przepływów do Czech występują nieplanowane przepływy na połączeniu ze Słowacją. Przygotowany raport przez operatorów sieci przesyłowych (OSP) (polski – PSE, czeski – CEPS, słowacki – SEPS, węgierski – MAVIR) [25] wskazał na przyczyny powstawania przepływów kołowych w zależności od mocy wymiany pomiędzy Niemcami a Austrią. Na podstawie tego raportu widoczne jest właśnie kluczowa rola wartości mocy przesyłanej pomiędzy tymi dwoma krajami. Jej wielkość wpływa na przepływy:

- Niemcy  $\rightarrow$  Polska  $\rightarrow$  Czechy  $\rightarrow$  Austria  $\rightarrow$  Niemcy,
- Niemcy  $\rightarrow$  Czechy  $\rightarrow$  Niemcy,
- Niemcy  $\rightarrow$  Holandia  $\rightarrow$  Belgia  $\rightarrow$  Francja  $\rightarrow$  Niemcy.

W przywołanym raporcie określono, że im wyższe są przepływy handlowe pomiędzy Niemcami i Austrią, tym większe są nieplanowane przepływy w systemach sąsiednich, przy czym warto podkreślić, że ponad 50% realizowanych przepływów wynikających z harmonogramów wymiany handlowej przepływa sąsiednimi systemami.

Różnica pomiędzy handlowymi przepływami a rzeczywistymi w 2019r. przedstawiono na Rysunku 2.5 [24]. Widoczne jest przede wszystkim znaczące zwiększenie energii importowanej z Niemiec (10085,7 GWh) w stosunku do przepływów handlowych (2565,7 GWh), a także eksport energii do Republiki Czeskiej, przy czym różnica rzeczywistej i handlowej wymiany wynosi 3234,1 GWh. Podobna sytuacja ma miejsce w połączeniu między systemami elektroenergetycznymi Polski i Słowacji, gdzie przepływ handlowy do Słowacji wyniósł 407 GWh, a rzeczywisty był blisko 8 razy większy. Sytuacja ta jest konsekwencją występowania właśnie przepływów kołowych i mimo upływu kilku lat od raportu [25] problem pozostaje wciąż aktualny. Warto zwrócić uwagę, że na przekrojach handlowych ze Szwecją, Litwą i Ukrainą wartości przepływów rzeczywistych oraz handlowych zarówno w kierunku importu, jak i eksportu energii elektrycznej są do siebie zbliżone.

Prezentowane wykresy (Rysunki 2.8 - 2.11) zostały zaczerpnięte ze sprawozdania Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki za rok 2019 [24]. Wybrane zostały przebiegi obrazujące przepływy mocy na połączeniach z Niemcami, Czechami i Słowacją. Z porównania tych trzech przebiegów dla lat 2015 – 2019 widoczne są znaczące przepływy mocy do Polski z Niemiec oraz z Polski do obydwu południowych sąsiadów. Wartości rzeczywistych przepływów zdecydowanie są większe od przepływów handlowych (w przypadku połączeń z Niemcami: import i rzeczywiste wpływy, a w przypadku Polski i Czech oraz Słowacji: eksport i rzeczywiste wypływy mocy).

17



Rysunek 2.8: Bilans energii elektrycznej na połączeniach transgranicznych w 2019 [GWh]: a) handlowe przepływy, b) rzeczywiste przepływy. Źródło: [24]



Źródło: URE na podstawie danych PSE S.A.

Rysunek 2.9: Porównanie przepływów handlowych i rzeczywistych energii elektrycznej [GWh] na połączeniu polsko - niemieckim w okresie 2015 - 2019. Źródło: [24]



Źródło: URE na podstawie danych PSE S.A.

## Rysunek 2.10: Porównanie przepływów handlowych i rzeczywistych energii elektrycznej [GWh] na połączeniu polsko - czeskim w okresie 2015 - 2019. Źródło: [24]



#### Rysunek 2.11: Porównanie przepływów handlowych i rzeczywistych energii elektrycznej [GWh] na połączeniu polsko - słowackim w okresie 2015 - 2019. Źródło: [24]

Dzięki danym udostępnianym przez PSE dotyczącym polskiego SEE można zaobserwować funkcjonowanie rodzimego oraz sąsiednich SEE, pracujących w ramach wymiany równoległej i nierównoległej.



Rysunek 2.12: Planowe i chwilowe przepływy mocy na liniach międzysystemowych w dniu 29.03.2020r. WNR - wymiana nierównoległa, WR - wymiana równoległa. Źródło: strona internetowa PSE SA.



Rysunek 2.13: Planowe i chwilowe przepływy mocy na liniach międzysystemowych w dniu 28.03.2022r. WNR - wymiana nierównoległa, WR - wymiana równoległa. Źródło: strona internetowa PSE SA.

Prezentowane dane na rysunkach 2.12 i 2.13 pokazują różnice pomiędzy planowaną wymianą mocy na danym przekroju, a rzeczywistą. Na podstawie przedstawionych wartości można zauważyć istotny problem z realizacją przesyłu mocy zgodnie z zaplanowanymi grafikami.

#### **Rozdział 3**

#### Kontrola rozpływu mocy z wykorzystaniem regulacji napięć

#### 3.1 Urządzenia należące do grupy FACTS

Rozwój energoelektroniki umożliwił budowę urządzeń opartych o elementy półprzewodnikowe pełniące różne role w systemach elektroenergetycznych. Urządzenia należące do grupy FACTS umożliwiają sterowanie przepływami mocy czynnej i biernej, tłumienie kołysań mocy, magazynowanie energii czy kompensację mocy biernej. Wszystkie te funkcje mogą być realizowane szybko, ze względu na dynamikę regulatorów oraz elementów energoelektronicznych, wykorzystanych w tych urządzeniach, dzięki czemu urządzenia te mają nadążnie dobierane parametry. Ze względu na sposób instalacji urządzeń FACTS można wyróżnić następujące typy [17], [26], [27], [28]:

#### - Szeregowe:

- TCSC (ang. *ang. thyristor controlled series capacitor*) układ kondensatora szeregowego załączanego przez tyrystor z możliwością regulacji pojemności,
- TSSC (ang. *ang. thyristor switched series capacitor*) układ kondensatora szeregowego załączanego przez tyrystor,
- TCPAR (ang. *ang. thyristor controlled phase angle regulator*) tyrystorowo sterowany przesuwnik fazowy,

#### - Bocznikowe:

- SVC (ang. static var compensator) statyczny kompensator mocy biernej,
- STATCOM (ang. *static compensator*) statyczny kompensator, w literaturze nazywany może być jako SVG (ang. *static var compensator*), czyli statyczny generator mocy biernej,

- SMES (ang. *superconducting magnetic energy storage*) nadprzewodnikowy zasobnik energii elektrycznej,
- BESS (ang. *battery energy storage system*) akumulatorowy zasobnik energii elektrycznej,

#### - Szeregowo-bocznikowe:

- UPFC (ang. unified power flow controller) zespolony regulator przesyłu mocy,
- IPFC (ang. *interline power flow controller*) międzysystemowy regulator przesyłu mocy,
- Transformator Sena.

#### 3.2 Urządzenia UPFC

Szeregowo-bocznikowe urządzenie UPFC pod względem funkcjonalności w SEE posiada największą zdolność regulacyjną [26], [29], [30], [31]. Wynika to z możliwości wpływania zarówno na wartość napięcia w linii, jak i na jego fazę oraz na wartość prądu biernego w części bocznikowej. Dzięki temu możliwa jest regulacja: mocy czynnej i mocy biernej przesyłanej przez linię elektroenergetyczną [33] oraz napięcia węzłowego. Ponadto układ ten jest w stanie pełnić rolę kompensatora szeregowego (SSSC) lub bocznikowego (STATCOM) w linii elektroenergetycznej [32], a także odpowiadać za tłumienie oscylacji w stanach pozakłóceniowych i poprawie stabilności systemu [34], [35]. Schemat blokowy układu UPFC oraz jego model obwodowy przedstawiono na Rysunku 3.1, a możliwe funkcje na wykresach wskazowych na Rysunku 3.2.

W skład UPFC wchodzą [26], [27], [30]:

- transformator wzbudzający TW,
- przetwornica bocznikowa CONV 1,
- przetwornica szeregowa CONV 2,
- transformator dodawczy TD,
- regulator R.



Rysunek 3.1: Schemat blokowy oraz model obwodowy układu UPFC.

Przez transformator wzbudzający TW zasilana jest przetwornica bocznikowa CONV 1, która pracuje w trybie prostownikowym i zasila obwód DC wraz baterią kondensatorów. Druga przetwornica (CONV 2) zasilana z obwodu DC pracuje w trybie falownikowym i jej zadaniem jest dostarczenie napięcia przemiennego AC do transformatora dodawczego TD, którego uzwojenia są włączone szeregowo w linię przesyłową. Przetwornica CONV 2 umożliwia wpływanie na wartość amplitudy napięcia oraz na jego fazę, przez co napięcie dodawcze może osiągać każdą wybraną wartość wewnątrz okręgu (Rysunek 3.2) [26]. Sterowanie mocą czynną następuje poprzez zmianę wartości składowej poprzecznej (względem wskazu napięcia przed UPFC). Moc bierna jest regulowana wskutek zmian składowej wzdłużnej, a napięcie węzłowe może być zmienione poprzez regulację prądu biernego części bocznikowej [26].

Zdecydowaną zaletą urządzenia UPFC jest jego zdolność do kontroli rozpływów mocy czynnej i biernej w układzie przesyłowym oraz napięcia w węźle, do którego jest dołączone niezależnie od siebie i w tym samym czasie. Z tego względu UPFC jest wyjątkowym układem pod względem funkcjonalności wsród urządzeń FACTS.

Dla stanów ustalonych schemat zastępczy przedstawiono na Rysunku 3.3. Schemat urządzenia UPFC składa się z reaktancji szeregowej  $X_D$  modelującej uzwojenia transformatora dodawczego, zmiennej przekładni zespolonej  $\bar{\eta}$  oraz zmiennej susceptancji  $B_{sh}$ , która zastępuję elementy bocznikowe UPFC. Przekładnia zespolona  $\bar{\eta}$  jest definiowana jako:

$$\bar{\eta} = \frac{U'_S}{U_L} = |\bar{\eta}| e^{j\vartheta}$$
(3.1)

Zgodnie z Rysunkiem 3.2d napięcie dodawcze można rozłożyć na składową wzdłużną  $U_d$ 



Rysunek 3.2: Możliwe stany pracy urządzenia UPFC [30].



Rysunek 3.3: Schemat UPFC (opracowano na podstawie [27]).

oraz składową poprzeczną  $U_q$ , które można opisać z wykorzystaniem napięcia zasilającego UPFC:

$$U_d = \gamma U_L \tag{3.2}$$

$$U_q = \beta U_L \tag{3.3}$$

gdzie w  $\gamma$  - współczynnik krotności napięcia poprzecznego,  $\beta$  - współczynnik krotności napięcia wzdłużnego.

Na drodze przekształceń wynikających z zależności trygonometrycznych otrzymuje się relację pomiędzy modułem przekładni zespolonej  $\bar{\eta}$  a współczynnikami krotności:

$$|\bar{\eta}| = \sqrt{\gamma^2 + (1+\beta^2)} \tag{3.4}$$

#### 3.2.1 Przykłady zastosowania UPFC na świecie

Historia układów UPFC sięga lat 90 XX wieku w Stanach Zjednoczonych, gdzie zostały złożone do tamtejszego urzędu patentowego zgłoszenia [38], [39]. Od tego czasu powstało wiele modyfikacji tych układów, jednakże główne możliwości regulacyjne w SEE są niezmienne. W Tabeli 3.1 zebrano wybrane parametry elementów składowych instalowanych w różnych miejscach świata na podstawie publikacji [31].

Pierwszy układ UPFC został zainstalowany w Inez (USA) w 1998r. (Rysunek 3.4). Kolejne powstały w Kangjin (Korea Południowa) w 2003 oraz w Marcy (USA) w 2004r. Następne realizacje w latach 2015-2017 wykonano w Chinach [31]. Na podstawie Tabeli 3.1 widać, że budowane w ostatnich latach urządzenia UPFC w Chinach wykonano w oparciu o tranzystory IGBT, które dzięki rozwojowi technologii zastąpiły tranzystory GTO w tego typu instalacjach. UPFC o największej mocy na świecie jest układ w Suzhou, którego przekształtniki mają sumaryczną moc 750 MVA. Szczegółowo praca i oddziaływanie na system elektroenergetyczny użytkowanych układów UPFC przedstawiono w publikacjach [40], [41], [42], [43], [44].

Miejsce ir	Inez,	Kangjin,	Marcy,	Nanjing,	Suzhou,	Szanghaj,	
Element	Parametr	USA	Korea Pd.	USA	Chiny	Chiny	Chiny
Transformator	Gr. połączeń	D	Yd	Yd	Dyn1	Yn0Yn	Yn0/Yn/D11
wzbudzający						D11	
TW	Moc [MVA]	160	40	2x100	60	300/300/100	100
1 ***	Napięcia [kV]	138/37	154/25,7	345/21,4	35/20,8	505/94/36	230/19,2/10
Transformator	Gr. połączeń	III	Y/d	D(Y)III	IIIYnd11	IIIYNd11	III/Yn0/D11
dodawczy	Moc [MVA]	160	40	11/21,4	70/70/25	300/300/100	50
TD	Napięcia [kV]	22-37	18,2	100	26,5/20,8/10	43,5/105/10	6,5/83,2/6
Drzokształtniki	Napięcie DC [kV]	24	4,8	12	20	90	20,8
	Moc [MVA]	160 każdy	2x20	2x100	3x60	3x250	50
Flomonty	Тур	GTO	GTO	GTO	IGBT	IGBT	IGBT
enengeoloktroniorno	Napięcie [V]	4500	4500	4500	3300	3300	3300
energoeiektromczne	Prąd [A]	4000	4000	4000	1500	1500	1500

Tablica 3.1: Wybrane parametry użytkowanych na świecie urządzeń UPFC (źródło: [31].



Rysunek 3.4: Stacja z układem UPFC w Inez w USA (opracowano na podstawie [31].

#### **3.3** Transformatory dodawcze

Realizacja idei napięć dodawczych jako środka do regulacji rozpływów mocy w systemach elektroenergetycznych możliwa jest z wykorzystaniem transformatorów dodawczych TD włączanych szeregowo w linię przesyłową. Możliwych jest kilka typów układów zasilających transformator dodawczy, przez co uzyskuje się różne efekty napięć dodawczych na napięcie linii przesyłowej. Jednakże w każdym przypadku układ składa się z jednostki włączanej szeregowo w linie przesyłową oraz z jednostki bocznikowej (wzbudzającą). Możliwa jest regulacja wzdłużna napięcia, regulacja poprzeczna oraz regulacja wzdłużno-poprzeczna. Przykłady rozwiązań przedstawiono na Rysunku 3.5 [26], [27], [36],. W przypadku układu z Rysunku 3.5a rolę transformatora wzbudzenia pełni trzecie uzwojenie transformatora wejściowego TW.



Rysunek 3.5: Przykłady zasilania transformatora dodawczego z możliwymi regulacjami napięcia wzdłużnego, TW - transformator wejściowy, TD - transformator dodawczy,  $T_{reg}$  - transformator regulacyjny (opracowano na podstawie [27], [36], [37]).

#### 3.3.1 Regulacja wzdłużna

W przypadku regulacji wzdłużnej osiągany efekt (pod względem wartości napięcia) jest taki sam jak dla zastosowania regulacji napięcia poprzez zmianę przekładni w transformatorze w danej stacji elektroenergetycznej. Pod względem konstrukcyjnym jednak, układ znacząco się różni, ponieważ składa się on z transformatora wzbudzenia TW oraz transformatora dodawczego TD. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość wpływania na parametry napięcia (wartość skuteczna, kąt fazowy) w wybranej linii, zamiast zmian wartości napięcia we wszystkich liniach zasilanych np. z tych samych szyn zbiorczych w stacji elektroenergetycznej.

W zależności od wyboru kierunku napięcia dodawczego (względem napięcia linii) możliwe jest podnoszenie lub obniżanie napięcia w linii przesyłowej, co przedstawiono na Rysunku 3.6. Obniżając napięcie, przekładnia zespolona  $\bar{\eta} = \beta e^{(-j\vartheta)}$  przyjmuje wartość ujemną, co wynika



Rysunek 3.6: Wykresy wskazowe dla przypadku regulacji wzdłużnej,  $U'_{Lx}$  - napięcie wejściowe do transformatora,  $U_{Lx}$  - napięcie wyjściowe z transformatora,  $U_{dLx}$  - napięcie dodawcze: a) zwiększenie wartości napięcia wyjściowego, b) zmniejszenie wartości napięcia wyjściowego (opracowano na podstawie: [27], [36], [37]).

z przesunięcia napięcia dodawczego o  $\pi$  względem wskazu napięcia wejściowego danej fazy. Warto zaznaczyć, że w takim układzie przekładnia zespolona  $\bar{\eta}$  jest wypadkową przekładnią transformatorów wzbudzenia TW oraz dodawczego TD.

#### 3.3.2 Regulacja poprzeczna

Regulacja poprzeczna polega na dodaniu do napięcia linii prostopadłego napięcia (przesuniętego o  $\pi/2$ ) przez transformator dodawczy TD. Wówczas uzyskuje się efekt zmiany kąta przesyłu  $\vartheta$ , przy czym kąt ten jest zależny od modułu napięcia dodawczego i napięcia wejściowego linii przesyłowej.



Rysunek 3.7: Wykresy wskazowe dla przypadku regulacji poprzecznej,  $U'_{Lx}$  - napięcie wejściowe do transformatora,  $U_{Lx}$  - napięcie wyjściowe z transformatora,  $U_{dLx}$  - napięcie dodawcze,  $\alpha$  - wprowadzone do układu przesunięcie fazowe (opracowano na podstawie [27], [36], [37]).

Podobnie jak w przypadku napięć wzdłużnych, możliwe jest dodanie napięć poprzecznych przesuniętych o  $\pi/2$  lub  $-\pi/2$ . Wówczas zastępcza przekładnia zespolona układu transformatorów będzie wynosić  $\bar{\eta} = \gamma e^{(-j\pi/2)}$  lub  $\bar{\eta} = \gamma e^{(j\pi/2)}$ , przy czym  $\gamma$  jest przekładnią poprzeczną.

#### 3.3.3 Regulacja wzdłużno-poprzeczna

Ten rodzaj regulacji łączy regulację wzdłużną i poprzeczną, dzięki czemu można wpływać zarówno na moduł napięcia linii (część wzdłużna) oraz na kąt (część poprzeczna). W ramach regulacji wzdłużno-poprzecznej można wyróżnić regulację niezależną oraz zależną. W pierwszym typie wartości składowych wzdłużnej i poprzecznej napięcia dodawczego są niezależnie nastawiane. Z kolei w drugim rozwiązaniu poprzez zmianę jednego składnika napięcia następuje zmiana drugiego. Ten typ regulacji był analizowany w publikacjach [8], [9]. [10]. [11], przy czym głównym kontekstem zastosowania były zespoły transformatorowe sprzęgające linie elektroenergetyczne o różnych poziomach napięć. Badania prowadzone w niniejszej pracy nie zostały przedstawione w wyżej przytoczonych publikacjach naukowych.

Realizacje wszystkich typów regulacji z przyporządkowanymi im urządzeniami wykonawczymi przedstawiono w pracy [36].

#### 3.3.4 Przesuwniki fazowe

W niniejszej rozprawie podjęto szczegółową analizę pracy przesuwników fazowych (PF) instalowanych w liniach elektroenergetycznych. PF jako urządzenie elektroenergetyczne do regulacji przepływów mocy za pomocą zmiany kąta  $\vartheta$  znane jest od wielu lat. Schemat zastępczy PF przedstawiono na Rysunku 14.



Rysunek 3.8: Schemat poglądowy przesuwnika fazowego [27], [36], [37].

Napięcie wejściowe  $U'_S$  jest napięciem linii wchodzącym do uzwojeń dodawczych transformatora dodawczego TD. Impedancja  $Z_{PF}$  modeluje wpływ szeregowo włączonych w linię przesyłową uzwojeń dodawczych.  $U_L$  jest napięciem wyjściowym z PF.



Rysunek 3.9: Wykresy wskazowe dla napięcia dodawczego a) kąt wyprzedzający b) kąt opóźniający [27], [36], [37]).

Realizacja regulacji przepływów mocy w systemie jest dokonywana poprzez zmianę kąta  $\vartheta$  o wartość wprowadzonego przesunięcia fazowego (kąta  $\alpha$ ) wynikającą z dodanego napięcia  $U_d$ . W zależności od kąta napięcia dodawczego  $U_d$ , tj. czy napięcie dodawcze wyprzedza o  $\pi/2$  napięcie wejściowe  $U'_S$ , czy opóźnia się o  $\pi/2$  uzyskiwany jest efekt w postaci napięcia wyjściowego  $U_L$ , wyprzedzającego lub opóźniającego się względem napięcia wejściowego  $U'_S$ . Przykład napięć dodawczych opóźniających i wyprzedzających kąt  $\vartheta$  przedstawiono na Rysunku 3.9.

Zgodnie z [45] w opisie PF można rozróżnić pojęcie mocy własnej oraz mocy przechodniej PF. Moc własna jest wielkością wyznaczoną na podstawie wartości napięcia dodawczego  $U_d$  oraz prądu *I* płynącego przez uzwojenie dodawczego transformatora TD. Z kolei moc przechodnia PF to wielkość wynikająca z możliwości przepływu mocy przez szeregowe uzwojenie transformatora TD (a więc obliczona na podstawie napięcia, na które zaprojektowano PF oraz wartości prądu płynącego przez uzwojenie szeregowe). Literatura podaje następującą relację pomiędzy mocą własną a mocą przechodnią symetrycznego PF [36], [45], [46]:

$$S_{TD} = 2S_n sin \frac{\alpha}{2} \tag{3.5}$$

gdzie:  $S_{TD}$  – moc własna PF, [VA],  $S_n$  – moc przechodnia PF, [VA],  $\alpha$  – kąt regulacji, [°].

W przypadku PF znajdujących się pod obciążeniem należy zwrócić uwagę, iż rzeczywista zmiana kąta  $\vartheta$  powinna uwzględniac wpływ spadku napięcia na impedancji wewnętrznej PF. Wówczas wprowadza się pojęcie kąta wewnętrznego  $\psi$ , którego wartość można wyznaczyć na podstawie równania:

$$\psi \approx \arctan \frac{Z_{PF} \cos \varphi}{100 + Z_{PF} \sin \varphi} \tag{3.6}$$

Uwzględniając kąt wewnętrzny  $\psi$  można narysować wykres fazorowy dla przesuwnika fazowego będącego pod obciążeniem (Rys. 16)



Rysunek 3.10: Przykładowy wykres wskazowy dla PF z uwzględnieniem spadku napięcia na wewnętrznej impedancji:  $U_{S(a)}$  - napięcie dla kąta dodatniego,  $U_{S(r)}$  - napięcie dla kąta opóźniającego,  $U_L$  - napięcie wyjściowe dla stanu bezobciążeniowego,  $U_{Lobc}$  - napięcie wyjściowe dla stanu obciążenia (opracowano na podstawie: [13], [47]).

Na podstawie wykresu wskazowego z Rysunku 3.10 można określić wartość kąta przesunięcia  $\alpha$  z uwzględnieniem wpływu spadku napięcia na impedancji wewnętrznej TD, czyli kąta wewnętrznego  $\psi$ . Dla kąta wyprzedzającego wartość  $\alpha_Z = \alpha - \psi$ , natomiast dla kąta opóźniającego  $\alpha_Z = -(\alpha + \psi)$  [45]. W związku z powyższym, wartość kąta  $\alpha$  dla obciążonego PF będzie się zmniejszać wraz ze wzrostem obciążenia w stosunku do wartości tego kąta w przypadku nieobciążonego PF.

Ze względów konstrukcyjnych PF można podzielić na [36], [45], [46], [51], [52]:

- asymetryczne jednordzeniowe napięcie wyjściowe  $U_L$  ma zmienioną zarówno fazę, jak i amplitudę względem napięcia wejściowego  $U'_S$ , a układ zbudowany jest na pojedynczej jednostce o uzwojeniach nawiniętych na jeden rdzeń,
- asymetryczne dwurdzeniowe napięcie wyjściowe U<sub>L</sub> ma zmienioną zarówno fazę, jak
  i amplitudę względem napięcia wejściowego U'<sub>S</sub>, a układ zbudowany jest na dwóch jednostkach (transfromator wzbudzenia TW oraz szeregowy TD),
- symetryczne jednordzeniowe napięcie wyjściowe  $U_L$  ma zmienioną fazę, natomiast amplituda pozostaje taka sama względem napięcia wejściowego  $U'_S$  (dla nieobciążonego PF), a układ zbudowany jest na pojedynczej jednostce o uzwojeniach nawiniętych na jeden rdzeń,
- symetryczne dwurdzeniowe napięcie wyjściowe  $U_L$  ma zmienioną fazę, natomiast amplituda pozostaje taka sama względem napięcia wejściowego  $U'_S$  (dla nieobciążonego PF), a układ zbudowany jest na dwóch jednostkach (transformator wzbudzenia TW oraz szeregowy TD).

Pod względem zastosowania danego typu PF można dokonać porównania, które przedstawiono na Rysunku 3.11. Przykładowe schematy połączeń dla wybranych rozwiązań PF przedstawiono na rysunkach 3.12 - 3.15.



Rysunek 3.11: Typowe cechy charakterystyczne wybranych rozwiązań konstrukcyjnych przesuwników fazowych (1C - jeden rdzeń, 2C - dwa rdzenie, As - asymetryczny, S - symetryczny) [48], [49], [50], [54].

Przykłady realizacji PF zobrazowano na rysunkach 3.16 - 3.17 zaczerpniętych z materiałów udostępnianych przez producentów tych jednostek.


Rysunek 3.12: Schemat przesuwnika fazowego asymetrycznego jednordzeniowego [36], [49], [51], [53].



Rysunek 3.13: Schemat przesuwnika fazowego symetrycznego jednordzeniowego [36], [49], [51], [53].



Rysunek 3.14: Schemat przesuwnika fazowego asymetrycznego dwurdzeniowego [36], [51], [53].



Rysunek 3.15: Schemat przesuwnika fazowego symetrycznego dwurdzeniowego [36], [51], [53].



Rysunek 3.16: Przesuwnik fazowy jednordzeniowy i jednokadziowy (zaczerpnięto z [54]).



Rysunek 3.17: Przesuwnik fazowy dwurdzeniowy i dwukadziowy (zaczerpnięto z [54]).

Widoczne na rysunkach 3.16 i 3.17 realizacje PF są jedynie przykładami wskazującymi na gabaryty tych urządzeń oraz zaawansowanie technologiczne.

#### 3.3.5 Regulacja mocy z wykorzystaniem przesuwników fazowych

Klasycznym przykładem obrazującym pracę PF w SEE jest równoległe połączenie dwóch systemów poprzez dwie równoległe linie, przy czym w jednej nich zainstalowany jest PF (Ry-sunek 3.18).



Rysunek 3.18: Schemat układu przesyłowego z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym w jednej z linii równoległych ( $U_S$ ,  $U_L$ ,  $U_R$  - napięcia: węzła wysyłającego, wyjściowe z PF, węzła odbiorczego,  $Z_1$ ,  $Z_2$  - impedancje linii równoległych [36], [45].

W przypadku braku zainstalowanego PF w linii, przesyłana moc powinna obciążyć obydwie linie w takim samym stosunku (przy założeniu, że obydwie linie mają takie same parametry). Natomiast instalacja PF w jednej z linii w istotny sposób wpływa na obciążenie każdej z linii, przy czym w zależności od kierunku włączenia napięcia dodawczego  $U_d$  w linii z PF przesyłana moc zwiększy się lub zmniejszy, co jest równoznaczne odpowiednio ze zmniejszeniem mocy w linii równoległej lub jej zwiększeniem.

## 3.3.6 Przykłady instalacji przesuwników fazowych na świecie

Na całym świecie zainstalowanych jest wiele przesuwników fazowych w różnych wykonaniach i o różnych parametrach. Poniżej przedstawiono przykładowe PF wybranych firm: ABB [55], Siemens [54], [56], Tamini [57], Baoding Tianwei Baobian Electric (BTBE). Tablica 3.2 obejmuje jedynie wybrane jednostki, które zostały wyprodukowane przez wymienione przedsiębiorstwa do konkretnych celów w danym SEE. Więcej przykładów PF można znaleźć w materiałach udostępnianych przez te firmy.

Producent	Miejsce instalacji	Moc przechodnia [MVA]	Napięcie [kV]	Kąt regulacji [°]	Rok produkcji
ABB	Hiszpania	1270	400/400	±25	2010
ABB	Belgia	1400	400/400	±25	2007
ABB	Włochy	1630	400/400	+18	2003
ABB	Kanada	845	240/240	±47	2000
ABB	USA	150	120/120	±53	1996
ABB	USA	885	230/230	±32	1994
ABB	USA	336	345/345	±73	1990
ABB	Niemcy	200	110/110	±20	1976
Siemens	Szwajcaria	267	400/400	b/d	2018
Siemens	USA	575	345/345	B/D	2014
Siemens	Polska	1200	410/410	±20	2015
Siemens	Słowenia	600	400/400	±40	b/d
Siemens	USA	400	230/230	-80/+31	b/d
Tamini	Włochy	1800	400/400	±17,5	2013
BTBE	USA	400	345/345	±74,5	2016

Tablica 3.2: Przykładowe instalacje PF na świecie (opracowano na podstawie: [54], [55], [56], [57]).

## 3.3.7 Transformator Sena

W XXI powstała koncepcja urządzenia opartego na tradycyjnych transformatorach będącego w stanie realizować funkcje regulacji napięcia, kąta oraz regulacji parametrów szeregowych linii (efekt odpowiadający szeregowo włączonej pojemności lub indukcyjności), czyli spełnienia funkcji, jakie oferuje opisany wcześniej szeregowo-bocznikowy układ UPFC (przede wszystkim niezależna regulacja mocy czynnej i biernej). Tym urządzeniem jest rodzina transformatorów Sena (nazwa pochodzi od nazwisk wynalazców) [59], [60]. Zaletą transformatorów Sena jest prostota wykonania, ponieważ urządzenie zbudowane jest na transformatorach z wyprowadzonymi odpowiednio uzwojeniami umożliwiającymi różne funkcje regulacyjne w systemie. W klasycznym wykonaniu regulacja napięcia odbywa się z wykorzystaniem podobciążeniowych przełączników zaczepów, natomiast w jednej z wersji układu, możliwe jest wykorzystanie triaków jako elementów załączających wybrany poziom napięcia.

Transformator Sena pracujący jako regulator napięcia (Rysunek 3.19) działa na takiej samej zasadzie jak transformator energetyczny odpowiedzialny za obniżenie/podwyższenie napięcia w danym węźle. Dla tego przypadku wykres wskazowy może przyjąć postać z Rysunku 3.6 w zależności od tego, czy napięcie dodawcze jest zgodne czy przeciwne do napięcia danej fazy.

Ponadto Transfromator Sena może być wykorzystany jako przesuwnik fazowy, którego wpływ na napięcia każdej z faz jest analogiczny na dla przesuwnika symetrycznego, zatem wykres wskazowy wygląda jak na Rysunku 3.20. Z kolei praca tego układu jako kompensatora parametrów linii opiera się na takim założeniu, aby napięcia dodawcze były złożone z różnych wektorów napięć skojarzonych każdą fazą. W ten sposób otrzymuję się żądaną wielkość i kąt napięcia dodawczego, dzięki czemu można uzyskać efekt pracy analogiczny jak dla UPFC (Rysunek 3.2d).



Rysunek 3.19: Transformator Sena pracujący jako regulator napięcia (opracowano na podstawie: [62]).



Rysunek 3.20: Transformator Sena pracujący jako symetryczny przesuwnik fazowy (opracowano na podstawie: [62]).

W wielu publikacjach transformatory Sena są porównywane do UPFC. Przewagą transformatora Sena nad UPFC jest znacznie niższy koszt, mniejsze gabaryty, większa niezawodność pracy oraz mniejsze straty mocy w trakcie pracy, a także wyższa sprawność. Szacowany stosunek kosztów pomiędzy budową UPFC a transformatora Sena wynosi 5:1, natomiast stosunek kosztów operacyjnych wynosi 10:1, wg danych zawartych w publikacji [62]. W publikacji [63] przedstawiono obrazowo porównanie gabarytów układu UPFC oraz transformatora Sena, które dobitnie wskazuje na przewagę pod względem rozmiarów omawianego w tym podrozdziale układu. Publikacja [64] dowodzi, że transformator Sena w porównaniu z przesuwnikiem fazowym, który wprowadza jedynie kąt przesunięcia  $\alpha$ , umożliwia przesyłanie takiej samej mocy czynnej przy redukcji mocy biernej w linii (mniejszy współczynnik *RPI* (ang. *reactive power index*), będący miarą całkowitej mocy biernej, niezbędnej do przesyłania jednostkowej mocy czynnej), dzięki czemu zmniejszają się straty mocy w linii.

W literaturze znaleźć można badania nad zmodyfikowanymi konstrukcjami transformatora Sena, które wykazują lepsze własności regulacyjne [65]. Transformator Sena wpływa na poprawę stabilności napięciowej systemu w przypadku stanów zakłóceniowych [66], [67].

## **Rozdział 4**

# Laboratoryjny układ przesuwnika fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym i poprzecznym

## 4.1 Konstrukcja przesuwnika fazowego

Na podstawie wiadomości teoretycznych przedstawionych w poprzednich rozdziałach został zaprojektowany przesuwnik fazowy, realizujący regulację zarówno napięcia wzdłużnego, a także napięcia dodawczego poprzecznego. Założenie dotyczące możliwości regulacji napięcia wzdłużnego zostało przyjęte w celu zwiększenia dostępnych kątów fazowych, a także w celu ograniczenia napięcia wyjściowego z przesuwnika fazowego do poziomów akceptowalnych ze względu na wymagania systemowe.



Rysunek 4.1: Jednofazowy schemat ideowy proponowanego przesuwnika fazowego z regulacją napięcia wzdłużnego i poprzecznego dla fazy x. TW – transformator wejściowy, TD – transformator dodawczy.

W testowym układzie projektowanego przesuwnika wykorzystano konstrukcję dwutransformatorową, na który składać się będą transformator wejściowy TW odpowiedzialny za regulację napięcia wzdłużnego oraz transformator dodawczy TD z regulowanym w szerokim zakresie napięciem dodawczym. Transformator wejściowy i transformator dodawczy mają parametry znamionowe deklarowane przez producenta przedstawione w Tabeli 4.1

	Napięcie	Napięcie	Prąd	Prąd	
	pierwotne	wtórne	pierwotny	wtórny	
	[V]	<b>[V]</b>	[A]	[A]	
	3×400	3x128/3x64/3x32	3,23,7	3x30/3x30/3x30	
Transformator	32400	/3x16/3x8/3x4	3833.2	/3x30/3x30/3x30	
dodawczy TD	Moc		<b>C</b>	Napięcie	
	znamionowa	Częstotliwość	Grupa	zwarcia	
	[kVA]	[Hz]	polączen	[%]	
	22,5	50	D/iiiiii	3,88	
	Napięcie	Napięcie	Prąd	Prąd	
	pierwotne	wtórne	pierwotny	wtórny	
Transformator	<b>[V]</b>	<b>[V</b> ]	[A]	[A]	
wejściowy TW	3×400	3x400	2×22	3x27 5	
	58400	+5x1,5% -10x1,5%	3833	5x52,5	
	Moc		<b>C</b>	Napięcie	
	znamionowa	Częstotliwość	Grupa	zwarcia	
	[kVA]	[Hz]	połączen	[%]	
	22,5	50	Yy0	5,10	

Tablica 4.1: Parametry znamionowe transformatorów składających się na układ przesuwnika fazowego.

Jednostka dodawcza ze względu na swoją konstrukcję ma możliwość zmiany połączenia strony pierwotnej z trójkąta ((D), w przypadku którego przesunięcie wynosi 90°) na gwiazdę (Y), a zatem możliwe jest takie dołączanie napięcia dodawczego, które będzie przesunięte względem napięcia wzdłużnego o  $\pm 120^{\circ}$  lub  $\pm 60^{\circ}$  dla połączenia w gwiazdę (Y). Takie wartości kątów wynikają z możliwości sumowania napięć różnych faz dołączonych zgodnie lub przeciwnie względem początku uzwojenia. Możliwe osiągalne konfiguracje laboratoryjnego przesuwnika fazowego przedstawiono na Rysunku 4.1. W pracy przedstawiono analizę przesuwnika fazowego przy napięciu dodawczym przesuniętym o ±90°, czyli dla strony pierwotnej transformatora dodawczego skojarzonej w trójkąt (D).



Rysunek 4.2: Wykresy wskazowe dla wybranych stanów pracy przesuwnika fazowego z zaznaczonymi możliwymi napięciami dodawczymi dla fazy  $U_{L1}$ : a) gwiazda napięć bez napięć dodawczych, b) napięcie dodawcze przesunięte o ±90° (napięcie poprzeczne), c) napięcie dodawcze przesunięte o ±60°, d) napięcie dodawcze przesunięte o ±120°.

Transformator wejściowy, regulujący napięcie wzdłużne, zaprojektowano jako element umożliwiający zarówno podnoszenie, jak i obniżanie napięcia. Przedział możliwych zmian regulacji jest zawarty w zakresie 340 V – 430 V napięć międzyfazowych (196 V – 248 V napięć fazowych) z krokiem zmian co 6 V. Sterowanie załączanymi poziomami napięć z transformatora wejściowego przesuwnika fazowego wykonano na bazie sterownika Arduino Mega z zestawem przekaźników optoizolacyjnych załączających wybrany stycznik danego poziomu napięcia. Schematycznie przedstawiono ten układ w postaci jednofazowej na Rysunku 4.3. Piętnaście odczepów transformatora wejściowego umożliwa dogodny wybór napięcia, do którego następnie będzie dołączane napięcie dodawcze. Jednak ze względów bezpieczeństwa układu oraz obsługi, wprowadzono programowo w sterowniku blokady uniemożliwiające załączenie więcej niż jednego odczepu transformatora. W ten sposób zminimalizowano prawdopodobieństwo przypadkowego załączenia dwóch odczepów strony wtórnej transformatora wejściowego, co skutkowałoby zwarciem po tej stronie. Każdy odczep transformatora jest połączony przez stycznik z szyną zbiorczą, która jednocześnie stanowi wejście do uzwojenia szeregowego transformatora dodawczego. Załączenie wybranego poziomu napięcia wzdłużnego realizowane jest przez podanie odpowiadającego danemu napięciu sygnału załączanego przyciskiem do sterownika. Następnie sterownik ma dwa zadania: załączyć stycznik dla wybranego odczepu transformatora TW oraz zablokować możliwość załączenia wszystkich pozostałych styczników.



Rysunek 4.3: Proponowany układ sterowania transformatorem wejściowym TW, który realizuje funkcję regulacji napięcia wzdłużnego, K1 - K15 - styczniki umożliwiające załączenie wybranego poziomu napięcia wzdłużnego.

Podanie napięcia na cewkę wybranego stycznika następuje z wykorzystaniem przekaźnika z optoizolacją. Takie podejście jest konsekwencją stosowania styczników z napięciem sterowania 230 V (AC), natomiast napięcie sterownika to 5 V (DC). Dodatkowym efektem tego typu połączenia układu sterowania jest możliwość izolacji obydwu składowych sterowania transformatora wejściowego (odizolowania części niskonapięciowej – sterującej od wysokonapięciowej – wykonawczej).

Regulacja napięcia wzdłużnego wpływa na możliwość zwiększenia maksymalnego kąta przesunięcia napięcia w projektowanym przesuwniku fazowym. Zakładając najwyższą wartość napięcia dodawczego ( $U_{dmax}$ =252 V) osiągany kąt przesunięcia jest wyższy w porównaniu do układu bez regulacji napięcia wzdłużnego. Szczegółowo każdy możliwy stan napięcia wyjściowego przesuwnika fazowego przedstawiono na Rysunku 4.4. Punkty przecięcia się linii pionowych i poziomych stanowią punkt przyłożenia wskazu napięcia wyjściowego  $U_L$ . Ponadto w Tabeli 4.2 przedstawiono teoretyczne wartości napięć przesuwnika fazowego oraz kątów fazowych przy zerowych lub maksymalnych wartościach napięcia dodawczego oraz minimialnym, znamionowym i maksymalnym napięciu wzdłużnym.



Rysunek 4.4: Siatka możliwych lokalizacji wektora napięcia wyjściowego z PF.

Z punktu widzenia eksploatacji linii przesyłowych, połączonych z przesuwnikami fazowymi, niezbędne jest utrzymanie poziomów napięć wymaganych przez operatora sieci przesyłowej (OSP). W związku z powyższym, nie jest akceptowalne podnoszenie napięcia wyjściowego ponad wymagane graniczne wartości wyłącznie do celów osiągnięcia większego kąta przesunięcia  $\alpha$ . Zastosowane rozwiązanie pozwala na zwiększenie wartości kąta przesunięcia fazowego  $\alpha$  przy utrzymaniu odpowiednich poziomów napięć, za co odpowiedzialny jest właśnie transformator wejściowy regulujący napięcie wzdłużne w granicach  $U_{Smin} - U_{Smax}$ .

Jako jednostkę wprowadzającą napięcie dodawcze do układu, zaprojektowano transforma-

Napięcie wzdłużne	Napięcie dodawcze	Napięcie wyjściowe	Kąt
$U_S$ , [V]	$U_d$ , [V]	$U_L$ , [V]	α, [°]
U <sub>Smax</sub>	0	248	0
U <sub>Smin</sub>	0	196	0
U <sub>Smax</sub>	U <sub>dmax</sub>	356	±45,9
U <sub>Smin</sub>	U <sub>dmax</sub>	322	±52,6
$U_n$	U <sub>dmax</sub>	344	±48,1

Tablica 4.2: Wybrane możliwe wartości napięć i kąta przesuwnika fazowego.

tor dodawczy, który ma możliwość zmiany grupy połączeń strony pierwotnej (D lub Y). Z kolei uzwojenia strony wtórnej, z racji na specyfikę zastosowania są wykonane jako izolowane (I). Możliwy zakres napięć dodawczych zawiera się w przedziale 0 – 252 V z krokiem 4 V, przy czym nie zastosowano klasycznego układu z odczepami do zmiany wartości napięcia dodawczego, lecz wybrano dla każdej fazy 6 izolowanych uzwojeń o różnej liczbie zwojów umożliwiających ich dowolne sumowanie. W ten sposób uzyskano 6 – bitową rozdzielczość wyboru wartości napięcia dodawczego. Idea transformatora dodawczego została przedstawiona na Rysunku 4.5. Strona pierwotna oznaczona jest jako Y/D ze względu na wspomnianą wcześniej możliwość wyboru połączeń uzwojeń, natomiast po stronie wtórnej znajduje się 6 uzwojeń sze-regowych w każdej z faz (4 V, 8 V, 16 V, 32 V, 64 V i 128 V).



Rysunek 4.5: Jednofazowy schemat ideowy transformatora szeregowego TS.

Poprzez szeregowe połączenie kolejnych uzwojeń strony wtórnej transformatora dodawczego uzyskiwane są żądane wartości napięcia dodawczego wprowadzanego do układu. Przykładowe połączenia ze względu na wybrane wartości napięć dodawczych pokazano na Rysunku 4.6.



Rysunek 4.6: Przykłady budowy napięcia dodawczego na uzwojeniach szeregowych transformatora TS.

Zgodnie z przedstawionymi przykładami sumowania napięcia dodawczego (Rysunek 4.6), umożliwiono realizację każdego poziomu napięcia dodawczego w opisanym powyżej zakresie. Takie rozwiązanie konstrukcyjne laboratoryjnego transformatora dodawczego skutkuje możliwościami szybkiego przełączania wartości napięcia dodawczego. Z kolei przełączanie konkretnych uzwojeń jest wykonywane z wykorzystaniem układu opartego na stycznikach załączanych i wyłączanych za pomocą przycisków monostabilnych. Idea układu sterowania transformatorem dodawczym zobrazowana została na Rysunku 4.7.

Sterowanie napięciem dodawczym umożliwia spełnienie funkcji wyboru kierunku napięcia dodawczego. Ta możliwość jest realizowana z wykorzystaniem styczników K1, K2, K3 oraz K4. Wybór kierunku definiuje załączenie wybranej pary (K1 – K3, K2 – K4) odpowiadającej za doprowadzenie napięcia wejściowego do początków lub końców uzwojeń szeregowych transformatora dodawczego. W ten sposób możliwe jest wprowadzanie kąta wyprzedzającego lub opóźniającego fazę napięcia wyjściowego z przesuwnika fazowego względem napięcia wejściowego.



Rysunek 4.7: Układ sterowania transformatorem dodawczym TD. Styczniki szeregowe S1 - S6 załączają dane uzwojenie, styczniki równoległe R1 - R6 stanowią obejście danego uzwojenia.

Każdy z transformatorów ze względu na swoją konstrukcję (transformator wejściowy – 15 odczepów z regulacją co 6 V od 340 V do 430 V; transformator szeregowy – 6 niezależnych uzwojeń w zakresie od 4 V do 128 V) należy przeanalizować pod względem zmian ich rezystancji oraz reaktancji indukcyjnej przy kolejnych zmianach napięcia wzdłużnego lub napięcia dodawanego poprzecznie. Na rysunkach 3D wykreślono zmiany rezystancji oraz reaktancji PF dla każdej z możliwych kombinacji ustawień obu jednostek transformatorowych.

Rezystancja PF zmienia się w zależności od aktualnej konfiguracji uzwojeń dodawczych. Dla załączonego uzwojenia o napięciu 128 V, wartość rezystancji wynosi 0,0331  $\Omega$ , natomiast dla zadanego napięcia dodawczego równego 120 V, wartość rezystancji uzwojeń szeregowych wynosi 0,0424  $\Omega$ . Taka charakterystyka zmian wynika z szeregowego łączenia uzwojeń. Zadane napięcie dodawcze równe 128 V stanowi jedno uzwojenie, natomiast wprowadzenie napięcia o wartości zadanej 120 V wymaga połączenia szeregowego uzwojeń o wartościach: 8 V, 16 V, 32 V, 64 V. Przez takie składanie napięć dodawczych uzyskuje się charakter zmian rezystancji oraz reaktancji indukcyjnej zgodny z przedstawionym na rysunkach 4.8 i 4.9.



Rysunek 4.8: Zmiana rezystancji PF w funkcji napięcia dodawczego oraz wzdłuznego.



Rysunek 4.9: Zmiana reaktancji PF w funkcji napięcia dodawczego oraz wzdłuznego.

Laboratoryjny układ przesuwnika, w którego skład wchodzą dwa transformatory o parametrach i funkcjach przedstawionych powyżej, można przedstawić schematycznie, tak jak na Rysunku 4.10.



Rysunek 4.10: Schemat ideowy testowego układu przesuwnika fazowego z regulacją napięcia wzdłużnego i poprzecznego.

#### 4.2 Opis matematyczny proponowanego przesuwnika fazowego

Proponowana konstrukcja, umożliwiająca regulację obu składowych napięcia wyjściowego z przesuwnika fazowego, częściowo została przedstawiona w publikacji [68]. W niniejszej pracy opis matematyczny zrealizowano jednak w oparciu o klasyczne rozważania dotyczące modelu asymetrycznego przesuwnika fazowego i wprowadzone odpowiednie modyfikacje, które uwzględniają specyfikę pracy proponowanego układu z uwzględnieniem regulacji wzdłużnej napięcia. Przedstawione założenia dotyczące opisu matematycznego zostaną wykorzystane do obliczeń analitycznych funkcjonowania omawianego typu przesuwnika fazowego.

Zgodnie z równaniem (2.7) zmiana przesyłanej mocy czynnej w linii możliwa jest poprzez zmianę poziomu napięć na początku i końcu linii, kąta fazowego pomiędzy wektorami napięć linii lub zmianę impedancji linii. W ogólnym przypadku dla grupy przesuwników fazowych asymetrycznych można mówić o zmianie kąta fazowego poprzez wprowadzenie do układu napięcia dodawczego, w wyniku którego nominalna wartość kąta  $\vartheta$  zostanie zmieniona o wartość zależną do napięcia dodawczego  $U_d$  zgodnie z równaniem:

$$\alpha = \operatorname{arctg}(\frac{|U_d|}{|U_S|}) \tag{4.1}$$

W klasycznych układach asymetrycznego przesuwnika fazowego, oprócz zmiany kąta ( $\vartheta$  +  $\alpha$ ), dodatkowo zmianie ulega wartość napięcia wyjściowego z przesuwnika fazowego. Idea ta została przedstawiona na Rysunku 4.11. Napięcie wyjściowe z układu przesuwnika fazowego ma zatem zmienioną wartość zarówno amplitudy, jak i kąta zgodnie z równaniami [51]:

$$U_L = \frac{|U_d|}{\sin \alpha} \tag{4.2}$$

$$U_L = \frac{|U_d|}{\sin(\operatorname{arctg}\frac{|U_d|}{|U_s|})} \tag{4.3}$$

Znając zależności dotyczące napięcia dodawczego, napięcia wyjściowego oraz kątów można określić wpływ asymetrycznego przesuwnika fazowego na przesyłaną moc czynną:

$$P = \frac{U_L U_R}{X_L + X_{PF}} \sin(\vartheta + \alpha) \tag{4.4}$$

Uwzględniając równania ((4.1), (4.3)) zależność (4.4) można przedstawić w postaci:

$$P = \frac{U_R}{X_L + X_{PF}} \frac{U_d}{\sin(\operatorname{arctg}\frac{|U_d|}{|U_S|})} \sin(\vartheta + \operatorname{arctg}\frac{|U_d|}{|U_S|})$$
(4.5)

Co po uwzględnieniu zależności trygonometrycznych można uprościć do postaci:

$$P = \frac{U_R}{X_L + X_{PF}} (U_S \sin \vartheta + U_d \cos \vartheta)$$
(4.6)



Rysunek 4.11: Wykres wskazowy asymetrycznego przesuwnika fazowego dla napięcia dodawczego opóźniającego.

W wyniku przedstawionej analizy dotyczącej bezpośredniego asymetrycznego przesuwnika fazowego, można wyznaczyć teoretyczne charakterystyki przesyłanej mocy czynnej oraz zmian kąta  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego (Rysunek 4.12).



Rysunek 4.12: Moc czynna P i kąt  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego  $U_d$  dla asymetrycznego przesuwnika fazowego i kąta  $\vartheta = 10^{\circ}$ .

Zgodnie z Rysunkiem 4.12, moc czynna liniowo zależy od wartości napięcia dodawczego.

Z kolei charakterystyka kąta fazowego dodawczego  $\alpha$  wprowadzanego do układu jest zgodna z przebiegiem funkcji arcus tangens, co wynika wprost ze wzoru (4.1).

Na podstawie powyższych rozważań można zauważyć, że zwiększenie przesyłanej mocy możliwe jest do osiągnięcia poprzez wprowadzenie jak najwyższego napięcia dodawczego. Jednak ze względu na konkstrukcję tego typu układu, konsekwentnie do wzrostu wprowadzanego napięcia dodawczego, oprócz zmian kąta  $\alpha$ , zwiększać będzie się również wartość napięcia wyjściowego z przesuwnika fazowego. W ten sposób uzyskane wartości napięcia mogą okazać się zbyt duże w stosunku do ograniczeń wynikających z norm i przepisów określonych przez operatora danego SEE. Wada ta widoczna jest przede wszystkim w układach, gdzie możliwa jest naturalnie zwiększona wartość napięcia wejściowego  $U'_S$  do układu przesuwnika fazowego, gdyż wskutek przedstawionych zależności nie jest możliwe odpowiednie kształtowanie wartości kąta  $\alpha$  (naturalnie zmniejszony zakres możliwych zmian wartości kąta  $\alpha$ ), a tym samym ograniczona jest możliwość sterowania przesyłaną mocą.

Rowzinięciem przyjętego układu przesuwnika fazowego jest wprowadzenie regulacji napięcia wejściowego  $U'_{S}$  (tutaj określane jako napięcie wzdłużne). Dzięki zmianom wartości napięcia wejściowego do układu przesuwnika fazowego możliwa jest odpowiednia regulacja napięć pozwalająca na właściwe kształtowanie przepływów mocy danym układzie przesyłowym. Odzwierciedleniem idei powstawania napięcia wyjściowego oraz wprowadzanego kąta przesunięcia fazowego  $\alpha$  jest Rysunek 4.13. Wykorzystując możliwość regulacji napięcia wzdłużnego można przedstawić zależność przesyłanej mocy czynnej jako:

$$P = \frac{U_R}{X_L + X_{PF}} \left(\frac{U'_S}{\eta} \sin \vartheta + U_d \cos \vartheta\right)$$
(4.7)

Przy czym parametr  $\eta$  jest przekładnią transformatora wejściowego wyrażoną poprzez stosunek napięcia wejściowego  $U'_S$  do napięcia strony wtórnej  $U_S$  wprowadzanego na zaciski transformatora dodawczego (zgodnie z Rysunkiem 4.13).

$$\eta = \frac{U'_S}{U_S} \tag{4.8}$$

Równanie 4.7 opisuje zależność na moc czynną dla linii przesyłowych, w których stosunek reaktancji indukcyjnej  $X_L$  do  $R_L$  jest większy od 6. Natomiast w liniach, w których relacja pomiędzy tymi parametrami jest mniejsza, należy uwzględnić wpływ rezystancji linii [69]. Skutkiem tego podejścia będzie równanie 4.9:

$$P = U_R \frac{R_L (U_S \cos\vartheta - U_d \sin\vartheta - U_R) + (X_L + X_{PF}) U_S \sin\vartheta + U_d \cos\vartheta}{R_L^2 + (X_L + X_{PF})^2}$$
(4.9)



Rysunek 4.13: Wykres wskazowy asymetrycznego przesuwnika fazowego z regulacją wzdłużną napięcia dla napięcia dodawczego opóźniającego, przy czym  $U'_S$  jest napięciem węzła wysyłającego, a  $U_S$  jest napięciem transformowanym przez przekładnię  $\eta$  transformatora TW.

W przypadku analizy wpływu badanego PF na przesyłaną moc bierną, należy dokonać analogicznych przekształceń wzoru 2.8, jak dla mocy czynnych. Uwzględniając wymienione wcześniej zależności trygonometryczne powstające przy zastosowaniu tego typu PF, otrzymuje się następujące równanie:

$$Q = \frac{U_R}{X_L + X_{PF}} \left(\frac{U_S'}{\eta} \cos \vartheta - U_d \sin \vartheta - U_R\right)$$
(4.10)

Dla równań opisujących przesyłaną moc liniami elektroenergetycznymi, z uwzględnieniem wpływu PF, o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym, wykreślono charakterystyki mocy czynnej (Rysunek 4.14), biernej (Rysunek 4.15) i kąta  $\alpha$  (Rysunek 4.16) w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni  $\eta$  równych 1,33, 1 oraz 0,8, co odpowiada transformacji napięcia wejściowego  $U'_S$  na napięcia  $U_S$  odpowiednio wynoszące: 75% napięcia zadanego, równe zadanemu i 125% napięcia zadanego.



Rysunek 4.14: Wpływ regulacji napięcia wzdłużnego na przesyłaną moc czynną w linii z badanym PF dla kąta mocy  $\vartheta = 10^{\circ}$ .



Rysunek 4.15: Wpływ regulacji napięcia wzdłużnego na przesyłaną moc bierną w linii z badanym PF dla kąta mocy  $\vartheta = 10^{\circ}$ .



Rysunek 4.16: Wpływ regulacji napięcia wzdłużnego na wprowadzany do linii kąt przesunięcia  $\alpha$  dla kąta mocy  $\vartheta$ =10°.

Przedstawione na rysunkach 4.14 - 4.16 charakterystyki wskazują, iż poprzez obniżenie napięcia na transformatorze wejściowym (regulacja wzdłużna) możliwe jest osiągnięcie większych kątów  $\alpha$  dla tych samych wartości napięć dodawczych  $U_d$ . Charakterystyki przesyłanych mocy są prostymi równoległymi. Moc bierna w zależności od przekładni  $\eta$  może zmieniać znak. Z kolei przesyłana moc czynna dla obniżonego napięcia wzdłużnego ( $\eta > 1$ ) przyjmuje mniejsze wartości dla odpowiadających napięć dodawczych  $U_d$ . Porównując wartości napięć dodawczych i kątów dla tej samej wartości mocy czynnej (P = 1, 16pu), otrzymano następujące wartości napięć dodawczych, kątów oraz napięć wyjściowych z PF:

• 
$$U_S = 0.75U'_S(\eta > 1) \rightarrow U_d = 1, \alpha = 53^{\circ} (0.925 \text{ rad}), U_L = 1.25 pu,$$

• 
$$U_S = U'_S(\eta = 1) \rightarrow U_d = 0,957, \alpha = 44^{\circ} (0,768 \text{ rad}), U_L = 1,38 pu,$$

• 
$$U_S = 1,25U'_S(\eta < 1) \rightarrow U_d = 0,913, \alpha = 36^{\circ} (0,628 \text{ rad}), U_L = 1,55 pu.$$

Warto zwrócić uwagę na wartości napięć wyjściowych z PF dla wybranych przypadków. Obniżenie napięcia skutkuje najniższą wartością napięcia wyjściowego, co jest korzystną cechą pracy PF, ponieważ możliwy jest szerszy zakres regulacyjny takiego PF bez przekraczania granicznych wartości napięć w danym układzie przesyłowym. Teoretyczne przebiegi napięcia wyjściowego dla przedstawiono na Rysunku 4.17.



Rysunek 4.17: Wpływ regulacji napięcia wzdłużnego na napięcie wyjściowe z PF dla wybranych wartości przekładni  $\eta$ .

Wyznaczone zależności pomiędzy wartościami napięć i prądów, wynikające z konstrukcji badanego PF, mogą zostać przedstawione również w zapisie macierzowym na podstawie schematu zastępczego (Rysunek 4.18).



Rysunek 4.18: Reprezentacja obwodowa PF z regulacją wzdłużną i poprzeczną [53].

$$\begin{bmatrix} U'_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\alpha} & 0 \\ 0 & e^{-j\alpha^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_R \\ I_R \end{bmatrix}$$
(4.11)

Na podstawie zapisu macierzowego możliwe jest otrzymanie zależności na przesyłaną moc w takiej samej formie jak zapisano w równaniach (4.7) i (4.10).

## 4.3 Możliwości sterowania przesuwnikiem fazowym

Jak już wspomniano w rozdziale 4.2, w zależności od wybranego połączenia uzwojenia wzbudzającego i uzwojenia szeregowego, możliwe jest uzyskanie napięć dodawczych w linii przesuniętych względem napięcia linii  $\pm 90^{\circ}$ ,  $\pm 60^{\circ}$ ,  $\pm 120^{\circ}$ . W pracy analizowany jest przypadek dodawania napięcia przesuniętego w fazie o  $\pm 90^{\circ}$ . Dzięki konstrukcji obu transformatorów wchodzących w skład przesuwnika fazowego istnieje możliwość pracy PF nie tylko jako klasycznej jednostki asymetrycznej, ale również kształtowania napięcia wejściowego  $U_S$  oraz napięcia wyjściowego z PF  $U_L$  na zadanym przez operatora poziomie. Tak więc możliwy jest również quasi-symetryczny stan pracy PF. W tym stanie pracy napięcie linii przed PF ( $U'_S$ ) i napięcie wyjściowe z PF ( $U_L$ ) mają takie same wartości RMS, są jedynie przesunięte w fazie. Pojęcie "quasi-symetryczny" stan pracy odnosi się do braku symetrii obu napięć względem napięcia zasilającego uzwojenie/transformator wzbudzający, a jedynie do utrzymania równych wartości napięć, tak jak ma to miejsce w symetryczny PF. W ten sposób analizowany asymetryczny przesuwnik fazowy może być sterowany na wybrany przez operatora sposób, dzięki

czemu usunięta jest główna wada klasycznych jednostek asymetrycznych, w których wartość skuteczna napięcia wyjściowego z PF jest zawsze większe od napięcia wejściowego.

$$U_L > U'_S \tag{4.12}$$

Teoretyczne wartości napięć wejściowych, dodawczych oraz uzyskanego przesunięcia kątowego  $\alpha$  dla sterowania na stałą wartość napięcia wyjściowego przedstawiono w Tabeli 4.3.

Tablica 4.3: Wartości napięcia wzdłużnego  $U_S$  i dodawczego  $U_d$  oraz kąt  $\alpha$  dla stałej wartości napięcia wyjściowego z przesuwnika fazowego  $U_L$ .

$U_S$ [V]	$U_d$ [V]	Kąt $\alpha$ [ °]	$U_L$ [V]
230,0	0,0	0	230
229,9	8,0	2	230
229,4	16,0	4	230
228,7	24	6	230
227,8	32	8	230
226,5	39,9	10	230
225,0	47,8	12	230
223,2	55,6	14	230
221,1	63,4	16	230
218,8	71	18	230
216,1	78,6	20	230
213,3	86,1	22	230
210,1	93,5	24	230
206,7	100,8	26	230
203,1	107,9	28	230
199,2	114,9	30	230
195,1	121,8	32	230

Zgromadzone w Tabeli 4.3 dane w sposób przejrzysty dowodzą, iż prezentowany asymetryczny przesuwnik fazowy umożliwia znaczące zwiększenie zakresu regulacji względem klasycznych rozwiązań asymetrycznych. Ponadto, możliwe jest wyznaczenie teoretycznych wartości napięcia dodawczego dla quasi-symetrycznej pracy tego układu dla wybranych wartości przesunięcia kątowego  $\alpha$ . W Tabeli 4.4 przedstawiono teoretycznie wyznaczone wartości dla zadanych kątów  $\alpha$  równych 5°, 10°, 15° i zakresu napięć fazowych linii 200 – 250 V.

$U_S'$	$U_L$	$U_d$	$U_S$	$U_d$	$U_S$	$U_d$	$U_S$
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
		$\alpha = 5^{\circ}$		$\alpha = 10^{\circ}$		$\alpha = 15^{\circ}$	
200	200	17,5	199,2	35,2	196,9	53,6	192,7
205	205	17,9	204,2	36,1	201,8	54,9	197,5
210	210	18,4	209,2	37,0	206,7	56,2	202,3
215	215	18,8	214,2	37,9	211,6	57,6	207,1
220	220	19,2	219,2	38,8	216,6	58,9	212,0
225	225	19,7	224,1	39,7	221,5	60,3	216,8
230	230	20,1	229,1	40,5	226,4	61,6	221,6
235	235	20,5	234,1	41,4	231,3	62,9	226,4
240	240	21,0	239,1	42,3	236,2	64,3	231,2
245	245	21,4	244,1	43,2	241,2	65,6	236,1
250	250	21,9	249,0	44,1	246,1	67,0	240,9

Tablica 4.4: Wartości napięcia wzdłużnego  $U_S$  i dodawczego  $U_d$  dla stałych wartości kąta  $\alpha$  równych 5°, 10° i 15 ° dla quasi-symetrycznego stanu pracy PF.

W zależności od zadanego kąta  $\alpha$  i aktualnej wartości napięcia fazowego linii  $U'_S$  możliwe jest wyznaczenie przekładni transformatora wejściowego, tak by zrealizować założone przesunięcie kątowe. Należy zwrócić uwagę, iż w prezentowanych wynikach obliczeń niektóre wartości napięcia  $U_S$  nie mieszczą się w teoretycznym zakresie sterowania transformatorem wejściowym (np. dla napięcia  $U'_S=200$  V i kąta  $\alpha=15^{\circ}$  napięcie  $U_S=192,7$  V). Jednakże dane zawarte w Tabeli 4.4 dowodzą, iż możliwe jest utrzymanie stałej wartości napięcia fazowego wyjściowego  $U_L$ , względem napięcia fazowego  $U'_S$ , doprowadzonego do zacisków PF. Mimo wspomnianych wybranych opcji sterowania transformatorem wejściowym oraz transformatorem szeregowym, dopuszczalne jest zapewnienie asymetrycznego stanu pracy przesuwnika fazowego bez jakiejkolwiek ingerencji w regulację napięcia wzdłużnego. Wówczas układ działa podobnie do klasycznego asymetrycznego PF z jednym wyjątkiem: przez transformator wejściowy o przekładni napięciowej 1:1 przesyłana jest moc, wskutek czego powiększone są straty mocy względem klasycznego asymetrycznego przesuwnika fazowego (niezależnie czy jest to przesuwnik bezpośredni, czy niebezpośredni).

Analizując wyniki z tablic 4.3 oraz 4.4 możliwe jest narysowanie wykresów wskazowych dla asymetrycznego przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym, podobnie jak ma to miejsce w przypadku urządzenia UPFC (Rysunek 4.19).





Obliczenia wartości zebranych w tablicach 4.3 oraz 4.4 wykonane zostały dla jałowego stanu pracy. W przypadku pracy PF pod obciążeniem, niezbędne jest uwzględnienie parametrów obydwu transformatorów, będocych elementami składowymi rozwiązania. Wskutek występowania rezystancji oraz reaktancji indukcyjnych obu jednostek przy przepływie prądu wystąpi strata napięcia. Jej efektem będzie obniżenie wartości napięcia wyjściowego względem obliczonych.

Warto dodać, że operator polskiego systemu przesyłowego (PSE SA) podaje, jakie powinny być poziomy napięć w przypadku stanów bez zakłóceń i w stanach zakłóceniowych [70]. W Tabeli 4.5 przedstawiono wymagane poziomy napięć dla rozdzielni o napięciu nominalnym wyższym lub równym 110 kV. Z danych tych wynika, że napięcie nie może trwale przekraczać napięć granicznych, zwłaszcza górnych wartości. Z tego powodu w procesie regulacji przepływów mocy warto dysponować urządzeniem umożliwiającym dostosowanie napięć do poziomów wymaganych przez operatora przy jednoczesnym maksymalnym zakresie wprowadzanych kątów przesunięcia  $\alpha$ . Z kolei w sieciach o niższym napięciu nominalnym wymagane poziomy napięć powinny spełniać wymóg  $\pm 10\%$  względem deklarowanego napięcia znamionowego [71], [72], [73]. Na tej podstawie można również stwierdzić, że w sieciach dystrybucyjnych napięcie nie może się zmieniać w sposób dowolny, a zatem ewentualne stosowanie PF powinno wiązać się ze spełnieniem wymagań stawianych przez operatora sieci dystrybucyjnej.

Tablica 4.5: Wymagane poziomy napięć dla rozdzielni i sieci o napięciu znamionowym większym lub równym 110 kV (zaczerpnięto z: [70]).

Rodzaj rozdzielni/sieć	750 kV	400 kV	220 kV	110 kV
Rozdzielnie NN i 110 kV,				
do których przyłączono				
bezpośrednio jedn. wytwórcze	-	400÷420	220÷245	110÷121
oraz rozdzielnie zasilane				
z transformatorów NN/110 kV				
Pozostałe rozdzielnie	710.787	280 · 420	210.245	105 · 121
NN i 110 kV	/10-/0/	300 <del>-</del> 420	210-243	105-121

# Rozdział 5

## Stanowisko pomiarowe i układ symulacyjny

## 5.1 Stanowisko pomiarowe

Układ laboratoryjny, którego koncepcja została przedstawiona w rozdziale 4., dotyczący przesuwnika fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym i poprzecznym został zrealizowany w oparciu o dwa transformatory o specjalnej konstrukcji. Zbudowany PF przedstawiono na rysunkach 5.1 - 5.2.



Rysunek 5.1: Transformator dodawczy TD.

Obydwa transformatory wchodzące w skład przesuwnika fazowego zostały połączone zgodnie ze schematami przedstawionymi w Rozdziale 4.



Rysunek 5.2: Transformator wejściowy TW.

Przesuwnik fazowy został włączony do laboratoryjnego systemu elektroenergetycznego, w którego skład wchodzą [74]:

- 7 sekcjonowanych linii przesyłowych zamodelowanych jako czwórnik typu  $\pi$  o parametrach skupionych,
- 5 punktów węzłowych,
- 4 generatorów synchronicznych,
- 2 obciążeń dynamicznych,
- 4 obciążeń statycznych RL.

Podstawowy układ połączeń laboratoryjnego systemu elektroenergetycznego przedstawiono na Rysunku 5.3. Obciążenia statyczne RL przyłączone są do szyn zbiorczych węzłów W1, W3, W4 i W5. Każde z obciążeń składa się z niezależnych części: rezystancyjnej o mocy 0 - 9kW z krokiem zmian obciążenia co 0,6 kW; indukcyjnej o mocy 0 - 9 kVAr z liniową regulacją. Obciążenia dynamiczne zainstalowano w węzłach W2 oraz W5 jako silniki indukcyjne z możliwością zwrotu energii elektrycznej do sieci zasilającej. Generatory synchroniczne pełnią funkcję lokalnych źródeł energii elektrycznej. Z kolei elektroenergetyczne linie przesyłowe wykonane zostały jako sekcjonowane o różnej liczbie sekcji w zależności od linii. Każdą sekcję stanowi czwórnik typu  $\pi$  o następujących parametrach:

•  $r_0 = 0.04 \, \Omega/\text{sekcja}$ ,

- $x_0 = 0.23 \Omega$ /sekcja,
- $b_0 = 2.5 \ \mu \text{S/sekcja}$ .

Układ ten może być dowolnie konfigurowany w zależności od potrzeb badawczych. Możliwości te została wykorzystana do badań PF w statycznych stanach pracy, dzięki czemu zbudowano układ składający się z pojedynczej linii wymiany, równoległych linii wymiany o równej długości. Linie łączyły dwa systemy: S1 oraz S2, przy czym system S1 stanowiła sieć zewnętrzna, a S2 stanowiła sieć zewnętrzna lub wewnętrzny system zasilany z generatorów synchronicznych.



Rysunek 5.3: Podstawowa konfiguracja systemu laboratoryjnego.

W zależności od scenariusza badań, system  $S_2$  był odpowiednio zasilany z sieci zewnętrznej lub generatorów synchronicznych. Na potrzeby prowadzonych badań PF w liniach wymiany łączących dwa systemy laboratoryjny układ zmodyfikowano do postaci przedstawionych na Rysunkach 5.4 – 5.6.

Ze względu na weryfikację funkcjonalności analizowanego przesuwnika fazowego o regulowanych napięciach wzdłużnym i poprzecznym, ograniczono liczbę przypadków do przedstawionych na rysunkach 5.4 - 5.6. Parametry obu systemów zewnętrznych  $S_1$  oraz  $S_2$  zestawiono w Tabeli 5.1.



Rysunek 5.4: Schemat ideowy układu laboratoryjnego z pojedynczą linią wymiany łączącej dwa systemy zewnętrzne. Tr – transformator separacyjny 400/400; Treg – transformator separacyjny o regulowanej przekładni (400/360, 400/400, 400/440);  $U_1$ ,  $U_2$  – napięcia systemów  $S_1$  i  $S_2$ .



Rysunek 5.5: Schemat ideowy układu laboratoryjnego z równoległymi liniami wymiany (L1 oraz L2) łączącymi dwa systemy zewnętrzne.

Należy zwrócić uwagę, iż wartości napięć obu systemów są wielkościami zmierzonymi, jednak z uwagi na zasilanie sieciowe i możliwe występowanie wahań napięcia w sieci, wartości te mogą się w trakcie pomiarów zmieniać. Napięcia obu systemów wyznaczane są względem potencjału ziemi.

Wykorzystane generatory (oznaczone jako  $G_3$ ,  $G_5$ , przy czym indeks wskazuje węzeł, do którego są przyłączone) do budowy systemu wewnętrznego to maszyny synchroniczne napędzane silnikiem prądu stałego z możliwością sterowania każdego z nich na stały moment lub stałą prędkość. Generator pracujący na stały moment wydaje do systemu stałą wartość mocy czynnej oraz utrzymuje stałe napięcie (węzeł typu PV). Z kolei sterowanie na stałą prędkość oznacza wykorzystanie generatora jako elementu utrzymującego stałą częstotliwość danego systemu – jest to tzw. generator bilansujący (ang. swing bus/slack bus). Wybrane parametry generatorów zebrano w Tabeli 5.2.



Rysunek 5.6: Schemat ideowy układu laboratoryjnego z równoległymi liniami wymiany (L1 oraz L2) łączącymi system zewnętrzny S1 z wewnętrznym systemem zasilanym z lokalnego generatora.

Tablica 5.1: Parametry systemów  $S_1$  oraz  $S_2$ .

System	$R\left[\Omega\right]$	$X\left[\Omega\right]$	$Z\left[\Omega ight]$	$U_{RMS}\left[V ight]$
$S_1$	0,31	0,34	0,46	425
<i>S</i> <sub>2</sub>	1,05	0,66	1,24	390

Tablica 5.2: Parametry generatorów  $G_3$  oraz  $G_5$ .

Generator	$S_N [kVA]$	$n_{obr} [min^{-1}]$	$U_N\left[V ight]$	$X_d \left[ \Omega \right]$	$X'_d \left[ \Omega \right]$	$X_d''[\Omega]$	$X_q \left[ \Omega \right]$
$G_3$	10	3000	400	46,4	3,2	1,0	27,2
$G_5$	16	3000	400	38,2	2,6	1,0	16,6

Układ pomiarowy składał się z elementów mierzących wartości chwilowe prądów i napięć. Do pomiaru prądu wykorzystano cęgi prądowe Fluke ac i1000s z zakresem pomiarowym 100 A (dokładność pomiaru 2 % ± 5 mV). Napięcia rejestrowano z wykorzystaniem sond różnicowych Pintek DP-35 z tłumieniem 100:1 (dokładność pomiaru  $\leq \pm 2$  %). Wszystkie przebiegi rejestrowano z użyciem karty pomiarowej National Instruments USB-6259 BNC w programie SignalExpress. Zebrane dane pomiarowe analizowano w Matlabie. Szczegółowe parametry elementów wchodzących w skład układu pomiarowego zamieszczono w Załączniku B.

#### 5.2 Model symulacyjny

Do symulacji różnych stanów pracy PF wybrano program Simulink będący częścią składową pakietu Matlab. W Simulinku, za pomocą bloczków modelujących poszczególne elementy układów elektrycznych i dostępnych w bibliotece programu, zbudowano układ odpowiadający systemowi laboratoryjnemu.



Rysunek 5.7: Układ przesuwnika fazowego zamodelowanego w programie Simulink dla przypadku pojedynczej linii wymiany, a) układ testowy, b) struktura podsystemu PRZESUWNIK FAZOWY.

W zależności od potrzeb badawczych układ dostosowywano do wymagań poprzez dołączenie linii równoległej czy też wymieniając blok systemu S2 na generator synchroniczny odpowiadający laboratoryjnej jednostce. Parametry transformatorów tworzących układ PF zmieniano w ustawieniach każdego z bloków, aby odpowiadały one rzeczywistym parametrom wyznaczonym dla danego odczepu w przypadku transformatora TW oraz załączonych uzwojeń szeregowych transformatora TS.

### 5.3 Metoda obliczania rozpływów mocy w SEE

W celu przedstawienia wpływu proponowanego PF na przesyłane moce oraz wartości napięć w węzłach systemu przeprowadzono obliczenia rozpływów mocy w 5-węzłowym systemie testowym z wykorzystaniem klasycznej metody Newtona-Raphsona. W literaturze znane są różne metody obliczeniowe dla systemów elektroenergetycznych o różnym stopniu skomplikowania, które odznaczają się istotnymi właściwościami znajdującymi zastosowanie w zależności od potrzeb obliczeniowych użytkownika [75], [76], [77], [78], [79]. Jednak na potrzeby wykazania wpływu PF z regulacją wzdłużną i poprzeczną na regulację mocy w SEE oraz porównania osiąganych wyników z asymetrycznym PF stwierdzono, iż metoda Newtona-Raphsona, która opiera się na wykorzystaniu rozkładu funkcji na szereg Taylora jest wystarczającą. Ponadto, badany system jest układem 5-węzłowym, co dodatkowo nie wpływa na czas obliczeń.

Metoda Newtona-Raphsona jest szeroko znana i wykorzystywana do obliczeń inżynierskich. Algorytm iteracyjny dla analizy rozpływów mocy przyjmuje postać [75], [76]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix}$$
(5.1)

przy czym,  $\Delta \delta$  i  $\Delta U$  to odpowiednio przyrost kąta mocy oraz przyrost napięcia w węźle. Natomiast *J* to macierz Jakobiego wyrażona w postaci:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}$$
(5.2)

Z kolei elementy macierzy J są pochodnymi mocy czynnej i biernej względem przyrostów kąta lub napięcia. Wielkości te można przedstawić jako:

$$H = \left[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \Delta \delta_j}\right] \tag{5.3}$$

$$N = \left[\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \Delta U_j}\right] \tag{5.4}$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \Delta \delta_j} \end{bmatrix}$$
(5.5)

$$L = \left[\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \Delta U_j}\right] \tag{5.6}$$
Równania przyrostów mocy dla i-tego węzła, wyrażone są jako:

$$\Delta P_{i} = \frac{\partial \Delta P_{i}}{\partial \delta_{i}} \Delta \delta_{i} + \sum_{j \in n_{i}} \frac{\partial \Delta P_{i}}{\partial \delta_{j}} \Delta \delta_{j} + \frac{\partial \Delta P_{i}}{\partial U_{i}} \Delta U_{i} + \sum_{j \in n_{i}} \frac{\partial \Delta P_{i}}{\partial U_{j}} \Delta U_{j}$$
(5.7)

$$\Delta Q_i = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{j \in n_i} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} \Delta U_i + \sum_{j \in n_i} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j$$
(5.8)

Uwzględniając równania 5.7 i 5.8 w podmacierzach H, N, M, L otrzymuje się równania:

•  $j \neq i$ :

$$\frac{\partial \Delta P_j}{\partial \delta_i} = U_j U_i (G_{ji} \sin \delta_{ji} - B_{ji} \cos \delta_{ji})$$
(5.9)

$$\frac{\partial \Delta P_j}{\partial U_i} = U_j (G_{ji} cos \delta_{ji} + B_{ji} cos \delta_{ji})$$
(5.10)

$$\frac{\partial \Delta Q_j}{\partial \delta_i} = -U_j U_i (G_{ji} cos \delta_{ji} + B_{ji} sin \delta_{ji})$$
(5.11)

$$\frac{\partial \Delta Q_j}{\partial \delta_i} = U_j (G_{ji} \sin \delta_{ji} - B_{ji} \cos \delta_{ji})$$
(5.12)

• j=i

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{j \in n_i} U_j U_i (G_{ji} \sin \delta_{ji} - B_{ji} \cos \delta_{ji})$$
(5.13)

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} = 2U_i G_{ii} + \sum_{j \in n_i} U_j (G_{ji} \cos \delta_{ji} + B_{ji} \sin \delta_{ji})$$
(5.14)

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \in n_i} U_j U_i (G_{ji} \cos \delta_{ji} + B_{ji} \sin \delta_{ji})$$
(5.15)

$$\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} = -2U_i B_{ii} + \sum_{j \in n_i} U_i (G_{ji} sin \delta_{ji} - B_{ji} cos \delta_{ji})$$
(5.16)

Kąt  $\delta_{ji}$  jest różnicą kątów w węźle *j* oraz *i*, natomiast  $G_{ji}$  i  $B_{ji}$  są składowymi admitancji (konduktancją i susceptancją) linii łączącej węzły *j* oraz *i*.

Przedstawione zależności pozwalają na rozwiązanie nieliniowych równań algebraicznych i wyznaczenie rozpływów mocy w każdej z linii rozpatrywanego SEE.

## Rozdział 6

# Badania laboratoryjne proponowanego przesuwnika fazowego

### 6.1 Jałowy stan pracy

Badania przesuwnika fazowego zostały przeprowadzone w stanie bez obciążenia w celu wyznaczenia wartości osiąganych przesunięć kątowych oraz napięć wyjściowych. Dane dla wybranych wartości przekładni transformatora zebrano w tablicach 6.1 - 6.3.

Tablica 6.1: Wartości napięć: zadanego dodawczego  $U_{dzad}$ , rzeczywistego dodawczego  $U_d$ , wejściowego do PF  $U'_S$ , wyjściowego z PF  $U_L$ , wzdłużnego  $U_S$  oraz kąta przesunięcia  $\alpha$  dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/400

$U_{dzad}$	$U_d$	$U_S'$	$U_L$	$U_S$	α
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[°]
0	1,5	242,0	245,2	245,2	0
16	16,4	240,1	243,9	243,5	-4
32	32,9	241,7	247,2	245,1	-8
48	49,3	241,7	249,9	245,1	-11
64	65,8	241,5	253,5	244,9	-15
80	82,2	241,6	258,3	245,0	-19
96	98,8	241,9	264,2	245,3	-23
112	115,0	241,6	270,4	245,0	-26

Tablica 6.2: Wartości napięć: zadanego dodawczego  $U_{dzad}$ , rzeczywistego dodawczego  $U_d$ , wejściowego do PF  $U'_S$ , wyjściowego z PF  $U_L$ , wzdłużnego  $U_S$  oraz kąta przesunięcia  $\alpha$  dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/376

$U_{dzad}$	$U_d$	$U_S'$	$U_L$	$U_S$	α	
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[°]	
0	1,3	242,1	230,6	230,6	0,0	
16	16,5	241,9	231,1	230,4	-5	
32	32,9	241,9	232,8	230,4	-9	
48	49,3	241,9	235,6	230,4	-12	
64	65,8	241,8	239,5	230,3	-16	
80	82,2	241,7	244,4	230,2	-20	
96	98,8	241,8	250,4	230,3	-24	
112	115,2	241,8	257,4	230,3	-28	
128	131,7	242,0	265,3	230,5	-30	
144	147,9	241,7	273,3	230,2	-33	

U <sub>dzad</sub>	$U_d$	$U_S'$	$U_L$	$U_S$	α
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[°]
0	1,2	241,9	208,5	208,5	0
16	16,4	241,2	208,6	207,9	-5
32	33,0	241,5	210,8	208,2	-10
48	49,3	241,4	213,9	208,1	-14
64	65,8	241,8	218,5	208,4	-18
80	82,4	242,4	224,6	209,0	-23
96	98,8	241,9	230,5	208,5	-26
112	115,2	241,9	237,9	208,5	-29
128	131,5	241,3	245,8	208,0	-32
144	148,1	241,7	255,2	208,4	-35
160	164,5	242,0	265,2	208,6	-38
176	180,9	241,5	275,5	208,5	-41

Tablica 6.3: Wartości napięć: zadanego dodawczego  $U_{dzad}$ , rzeczywistego dodawczego  $U_d$ , wejściowego do PF  $U'_S$ , wyjściowego z PF  $U_{PF}L$ , wzdłużnego  $U_S$  oraz kąta przesunięcia  $\alpha$  dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/340

Z danych przedstawionych w tabelach 6.1 - 6.3 można zauważyć, że wprowadzenie regulacji wzdłużnej skutkuje różnymi wartościami wprowadzanych do układu kątów przesunięcia  $\alpha$ , a także napięciami wyjściowymi PF.

Na rysunkach (6.1 - 6.3) przedstawiono przebiegi napięć chwilowych PF dla stanu jałowego i wartości napięć wzdłużnych równych odpoweidnio: 196V, 230V i 241V.



Rysunek 6.1: Przebiegi napięcia węzła  $S_1 u'_{S1}$ , wyjściowego z PF  $u_L$  i dodawczego  $u_d$  dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/400 oraz zadanego napięcia dodawczego 64V.



Rysunek 6.2: Przebiegi napięcia węzła  $S_1 u'_{S1}$ , wyjściowego z PF  $u_{PF}$  i dodawczego  $u_d$  dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/376 oraz zadanego napięcia dodawczego 64V.



Rysunek 6.3: Przebiegi napięcia węzła  $S_1 u'_{S1}$ , wyjściowego z PF  $u_{PF}$  i dodawczego  $u_d$  dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/340 oraz zadanego napięcia dodawczego 64V.

Porównując przebiegi chwilowe napięć dla różnych wartości przekładni transformatora wejściowego widać, że dla napięcia wzdłużnego o najmniejszej wartości (196/340V) wprowadzenie napięcia poprzecznego o takiej samej wartości zadanej, jak dla pozostałych przypadków skutkuje największym przesunięciem fazowym. Przesunięcia kątowe i wartości RMS napięć dla przedstawionych przebiegów chwilowych zebrano w Tabeli 6.4 oraz przedstawiono na wy-kresach wskazowych na Rysunku 6.4.

Tablica 6.4: Zestawienie wartości skutecznych napięcia wzdłużnego wejściowego do uzwojeń szeregowych transfromatora dodawczego TD  $U_S$ , dodawczego  $U_d$ , wyjściowego z PF  $U_L$  oraz uzsykanego przesunięcia fazowego  $\alpha$ .

Przekładnia $\eta$	400/400	400/376	400/340
$U_S$ [V]	244,9	230,3	208,4
$U_d$ [V]	65,8	65,8	65,8
$U_L$ [V]	253,5	239,5	218,5
α[°]	-15	-16	-18



Rysunek 6.4: Wykresy wskazowe dla zadanego napięcia dodawczego równego 64V i przekładni: a) 400/400, b) 400/376, c) 400/340.

Przeprowadzone pomiary dla jałowego stanu pracy PF pozwalają stwierdzić, iż jego działanie jest zgodne z założonymi efektami. Wzdłużna regulacja napięcia wejściowego PF pozwala na właściwe dla zadanej funkcji celu dobranie napięcia dodawczego i utrzymanie w zadanym zakresie napięć wyjściowych. Zmierzone przypadki, dla których wprowadzano względnie duże napięcie dodawcze skutkujące wzrostem napięcia ponad przyjęty zakres napięć roboczych linii są poglądowymi i w normalnym stanie pracy układu nie są dopuszczalne, np. uzyskanie wartości równej 120% napięcia znamionowego linii (275 V).

#### 6.2 Pojedyncza linia wymiany mocy

Międzysystemowa wymiana mocy realizowana jest poprzez linie transgraniczne. Jako pierwszy przypadek analizy pracy proponowanego przesuwnika fazowego wybrano połączenie dwóch systemów za pomocą jednej linii (Rysunek 6.5). Dzięki możliwości zmiany liczby sekcji linii przesyłowej zrealizowano pomiary dla linii o liczbie sekcji od 4 do 24 z krokiem zmian co 2 sekcje. Wpływ przesuwnika na przesyłaną moc czynną przedstawiono na Rysunku 6.7.



Rysunek 6.5: Poglądowe przedstawienie pojedynczej linii łączącej dwa systemy.



Rysunek 6.6: Schemat połączeń układu laboratoryjnego do badań przesuwnika fazowego zainstalowanego w pojedynczej linii łączącej system  $S_1$  z systemem  $S_2$ .

Układ laboratoryjny do badań pojedynczej linii przesyłowej łączącej dwa systemy został

zestawiony zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 6.6. Łączna liczba sekcji w liniach L34 oraz L35 zmieniała się od 4 do 24 sekcji.



Rysunek 6.7: Moc czynna przesyłana linią wymiany w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego  $U_S$  równego 230/400 V.

Wraz ze zmniejszaniem liczby sekcji linii przesyłowej, a tym samym impedancji wzdłużnej rośnie wartość przesyłanej mocy dla tej samej wartości napięcia dodawczego wprowadzanego przez przesuwnik fazowy. Dla braku napięcia dodawczego, transfer mocy czynnej był stosunkowo niewielki względem wartości otrzymanych z zastosowaniem przesuwnika fazowego. Dla zerowego napięcia dodawczego wartość mocy czynnej przesyłanej linią wynosiła od 1 kW do 3 kW, odpowiednio dla przypadków linii złożonej z 24 oraz 4 sekcji. Z kolei dla przypadków zastosowania przesuwnika fazowego osiągane moce czynne przekraczały 16 kW. Wraz ze zmniejszeniem długości linii, wpływ napięcia dodawczego był bardziej zdecydowany i ta sama wartość napięcia wprowadzana przez uzwojenie szeregowe transformatora dodawczego skutkowało większą mocą czynną przesyłaną linią. Wpływ napięcia dodawczego na wartość przesyłanej mocy czynnej ma przede wszystkim długość linii wyrażona poprzez impedancję wzdłużną  $Z_L$ . Napięcie  $U_R$ , naturalny kąt fazowy  $\vartheta$  oraz reaktancja  $X_{PF}$  można przyjąć za parametry o stałych wartościach. Mimo iż reaktancja PF zmienia się wraz ze zmianami napięcia dodawczego, to w każdym badanym przypadku długości linii, to samo napięcie dodawcze oznacza wprowadzenie do układu tej samej wartości reaktancji  $X_{PF}$ , dlatego takie uproszczenie jest dopuszczalne.



Rysunek 6.8: Wykres przesyłanych mocy czynnych linią o długości 22 sekcje dla przypadku napięcia wzdłużnego równego (230/400 V, przebieg niebieski) oraz obniżonego (196/340 V, przebieg czerwony).

$U_{dzad}[V]$	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
<i>U</i> <sub><i>L</i>230<i>V</i></sub> [V]	234,6	234,2	234,0	234,2	234,6	234,9	235,9	236,6	237,5	238,8
$U_{L196V}[V]$	213,5	213,1	213,0	213,4	213,5	214,3	215,4	216,5	217,8	219,6
$U_{dzad}[V]$	80	88	96	104	112	120	128	136	144	
<i>U</i> <sub><i>L</i>230<i>V</i></sub> [V]	240,2	241,9	243,8	245,8	247,5	249,3	251,1	252,7	254,8	
$U_{L196V}[V]$	221,3	223,1	224,9	226,8	229,1	231,2	233,7	236,1	237,9	

Tablica 6.5: Wartości poszczególnych napięć dla przekładni transformatora wejściowego TW 400/400 oraz 400/340.

Porównanie dwóch przypadków przedstawionych na Rysunku 6.8 pozwala na stwierdzenie, iż mimo mniejszego napięcia wzdłużnego, wartość przesyłanej mocy czynnej pojedynczą linią

jest taka sama dla napięć dodawczych większych o ok. 8 V (wartość fazowa RMS). Dzięki takiej zależności można zauważyć zaletę zastosowania proponowanego przesuwnika fazowego zwłaszcza pod kątem analizy napięcia wyjściowego z przesuwnika. Wartości napięć wyjściowych z przesuwnika zebrano w Tabeli 6.5.

Z przedstawionych wartości napięć wyjściowych w Tabeli 6.5 widać, iż dla obniżonego napięcia wzdłużnego otrzymane wartości na wyjściu układu są zdecydowanie mniejsze niż dla znamionowego napięcia wzdłużnego. Dla maksymalnej wartości napięcia dodawczego równego 144 V w przypadku napięcia wzdłużnego nominalnego otrzymano na wyjściu przesuwnika fazowego napięcie 254,8 V. Wartość ta jest o ponad 10% większa od nominalnego napięcia fazowego sieci (230 V). Dla analogicznego przypadku napięcia dodawczego i obniżonego napięcia wzdłużnego uzyskano na wyjściu przesuwnika fazowego wartość 237,9 V. Poprzez obniżenie napięcia wzdłużnego uzyskano wartości napięć wyjściowych mniejszych od 21 V do 17 V w zależności od wartości napięcia dodawczego. Uwzględniając dane zobrazowane na Rysunku 6.8 widać, że zastosowanie obniżonego napięcia wzdłużnego pozwala na transfer mocy czynnej o takiej samej wartości przy napięciu dodawczym większym o ok. 8 V w porównaniu do nominalnego napięcia wzdłużnego.



Rysunek 6.9: Wprowadzany przez przesuwnik kąt α w funkcji napięcia dodawczego dla pojedynczej linii o długości 22 sekcje dla dwóch przypadków napięcia wzdłużnego: linia ciągła – 230 V, linia przerywana – 196 V.

Potwierdzeniem wcześniejszych założeń dotyczących możliwości osiągania większych wartości kąta przy obniżonym napięciu wzdłużnym są charakterystyki przedstawione na Rysunku 6.9. Zastosowanie przekładni  $\eta = 400/340$  skutkuje wyższymi wartościami kąta  $\alpha$  względem przekładni 400/376 odpowiadającej nominalnemu napięciu wejściowemu ( $U_S = 230/400V$ ) do uzwojeń dodawczych.

#### 6.3 Równoległe linie wymiany mocy o tej samej długości

Opis teoretyczny idei pracy przesuwnika fazowego jest przedstawiany w klasycznym układzie linii równoległych o takich samych wartościach impedancji (Rysunek 6.10). Z tego powodu zdecydowano sprawdzić wpływ badanego przesuwnika fazowego na przesyłane moce w układzie linii równoległych o jednakowej liczbie sekcji w zakresie od 4 do 11 sekcji w każdej z linii.



Rysunek 6.10: Rysunek poglądowy przedstawiający równoległe linie łączące dwa systemy (dla równych linii równoległych  $Z_{L1} = Z_{L2}$ ).



Rysunek 6.11: Schemat połączeń układu laboratoryjnego do badań przesuwnika fazowego zainstalowanego w liniach łączących system  $S_1$  z systemem  $S_2$ .

Schemat układu do badań przesuwnika fazowego widoczny jest na Rysunku 6.11. W ukła-

dzie tym długość linii L45 była równa sumie długości linii L34 i L35 (od 4 do 11 sekcji) tak, żeby uzyskać równe linie.

W układzie dwóch linii równoległych wykonano pomiary z uwzględnieniem dwóch przypadków włączenia uzwojenia szeregowego TD:

- $K_1K_3$  dla otrzymania kąta  $\alpha > 0$ , czyli kierunek wyprzedzający,
- $K_2K_4$  dla otrzymania kąta  $\alpha < 0$ , czyli kierunek opóźniający,

przy napięciach wzdłużnych międzyfazowych U<sub>S</sub> równych 400 V oraz 340 V.



Rysunek 6.12: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego  $U_S = 230V$  (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe).

W tak zestawionym układzie widoczny jest kołowy przepływ mocy czynnej. Linia z przesuwnikiem fazowym transmituje znacznie więcej mocy, jednakże wskutek występowania równoległej linii, część mocy czynnej przesyłana jest z powrotem w kierunku źródła. Im dłuższa linia, tym wartość bezwzględna stosunku przesyłanych mocy w obu liniach jest większa. Dla 11-sekcyjnych linii, moce czynne przyjmują wartości: 17,8 kW oraz -3,2 kW. Natomiast dla krótkich linii, np. 4 sekcji, linią z PF przepływa blisko 16,7 kW mocy czynnej, a linią równoległą -5 kW. W zakresie niskich wartości napięć dodawczych, obie linie przesyłają moc czynną w tym samym kierunku. Również dla każdego przypadku długości linii, możliwe jest wyznaczenie takiego punktu pracy układu przesyłowego, aby wyzerować przesyłaną moc czynną w linii bez zainstalowanego PF. Na kolejnych dwóch wykresach zestawiono moce obu linii dla różnych długości sekcji i kierunków włączenia uzwojenia dodawczego szeregowego transformatora TS.



Rysunek 6.13: Moc czynna przesyłana liniami równoległymi w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego  $U_S = 196V$  i kierunku wyprzedzającym (linie przesyłowe z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym wykreślono jako ciągłe).

Zestawiając przebiegi z rysunków 6.13 i 6.14 można dostrzec wpływ przesuwnika na kierunek przepływu mocy w linii w zależności od kierunku włączenia uzwojenia dodawczego. Włączenie w kierunku opóźniającym (przez  $K_2K_4$ ) skutkuje w całym zakresie napięć dodawczych przeciwnym przepływem mocy względem drugiej linii równoległej. W ten sposób w liniach równoległych pomiędzy obydwoma węzłami powstaje kołowy przepływ mocy, przy czym transfer mocy czynnej w tym przypadku włączenia PF odbywa się od systemu  $S_2$  do  $S_1$ , a zatem od węzła o napięciu niższym do węzła o napięciu wyższym.

Porównanie przesyłanych mocy dla długości linii równych 4 i 11 sekcji przy napięciach wzdłużnych 230 V i 196 V przedstawiono na rysunku 6.15. Dla linii o długości 11 sekcji z zainstalowanym PF widoczny jest podobny trend, jak w przypadku pojedynczej linii wymiany z poprzedniego podrozdziału. Obniżenie napięcia wzdłużnego na transformatorze wejściowym



Rysunek 6.14: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego  $U_S = 196V$  i kierunku opóźniającym (linie przesyłowe z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym wykreślono jako ciągłe).

umożliwia przesył mocy o takiej samej wartości, jak dla wzdłużnego napięcia nominalnego, przy wprowadzeniu napięcia dodawczego większego o ok. 8 V w zakresie małych wartości napięć dodawczych i do ok. 5,5 V przy największych rozpatrywanych napięciach dodawczych. W linii równoległej bez PF w obu przypadkach rozważanych napięć wzdłużnych, przesyłana moc jest podobna. Sumując odpowiadające sobie moce obu linii uzyskać można moc wpływającą do systemu  $S_2$ . Obniżenie napięcia wzdłużnego powoduje zmniejszenie mocy wpływającej do systemu  $S_2$ . Względne obniżenie przesyłanej mocy zmienia się od kilkunastu procent dla niskich wartości  $U_d$ , do 3 - 4 % dla najwyższych napięć dodawczych. Z kolei dla linii krótkich rozbieżności w przebiegach obu linii są bardziej widoczne. Mimo możliwego do osięgnięcia stanu pracy linii z PF przy obniżonym napięciu wzdłużnym skutkującego przesyłem tej samej mocy co dla napięcia znamionowego, to różnice w przesyłanych mocach są na tyle duże, że finalnie przesyłane jest mniej mocy z systemu  $S_1$  do  $S_2$ . Względna różnica w każdym z przypadków wynosi od 11% dla 40 V napięcia dodawczego, do ponad 30 % przy braku napięcia dodawczego.

Analiza pracy proponowanego przesuwnika fazowego nie może skupiać się jedynie na wartości przesyłanej mocy. Ze względu na konstrukcję układu, ważnym czynnikiem jest również

L. sekcji	11	10	9	8	7	6	5	4
$U_d$	$P_{S1}$							
[V]	[kW]							
0	0,72	0,74	0,82	0,91	0,99	1,20	1,44	1,77
8	-0,31	-0,31	-0,25	-0,19	-0,10	0,04	0,27	0,58
16	-1,25	-1,30	-1,26	-1,18	-1,17	-1,09	-0,81	-0,45
24	-2,17	-2,21	-2,25	-2,12	-2,14	-2,02	-1,83	-1,44
32	-3,02	-3,08	-3,10	-3,03	-2,96	-2,98	-2,62	-2,17
40	-3,89	-3,96	- 3,99	- 3,79	-3,95	-3,73	-3,48	-2,87
48	-4,59	-4,75	-4,77	-4,53	-4,71	-4,56	-4,06	-3,42
56	-5,36	-5,38	-5,49	-5,21	-5,29	-5,08	-4,62	
64	-5,99	-6,07	-6,03	-5,87	-5,90	-5,60		
72	-6,57	-6,64	-6,56	-6,29	-6,44			
80	-7,01	-7,14	-7,15	-6,72				
88	-7,54	-7,44	-7,54					
96	-7,79	-7,92						
104	-8,23							

Tablica 6.6: Wartości mocy czynnej w węźle systemu  $S_1$ . Wartości dodatnie oznaczają moc wypływającą z węzła, ujemne moc wpływającą.

napięcie wyjściowe przesuwnika fazowego  $U_L$ , którego zmiany w funkcj napięcia dodawczego przedstawiono na Rysunku 6.16. Rozważania dotyczące przesyłanych mocy wskazywały, iż wyższe napięcie wzdłużne wpływa na większy transfer mocy pomiędzy systemami. Jednak porównując wcześniejsze analizy przesyłanych mocy z napięciami wyjściowymi z PF widać, że dla tego samego kierunku włączenia uzwojeń dodawczych wyjściowe napięcie jest znacząco niższe dla  $U_S = 196V$ . W przypadku linii złożonych z 11 sekcji, dla najwyższych napięć dodawczych  $U_d$  napięcia wyjściowe wynoszą blisko 240 V dla  $U_S = 230V$  oraz 221 V dla  $U_S = 196V$ , natomiast przesyłane moce czynne do systemu  $S_2$  i odpowiadające obu przypadkom wynoszą odpowiednio: 14,6 kW oraz 14,1 kW.



Rysunek 6.15: Moc czynna przesyłana liniami równoległymi w funkcji napięcia dodawczego dla dwóch przypadków wartości napięcia wzdłużnego:  $U_S = 196$  V i  $U_S = 230$  V i wyprzedzającym kierunku uzwojenia dodawczego (przez  $K_1K_3$ ) (linie przesyłowe z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym wykreślono jako ciągłe).

Wartości kąta  $\alpha$  są do siebie zbliżone dla tych samych napięć dodawczych w wybranych przypadkach. Dla włączenia uzwojenia szeregowego skutkującego ujemnymi wartościami kąta  $\alpha$ , osiągnięcie tej samej wartości kąta, co w przeciwnym kierunku, wymaga dodania napięcia poprzecznego o wartości wyższej. Jest to konsekwencją wyższych wartości napięć wzdłużnych w przypadku tego kierunku włączenia uzwojenia (Rysunek 6.16).



Rysunek 6.16: Napięcie wyjściowe  $U_L$  z przesuwnika fazowego dla linii o długości 11 sekcji i napięć wzdłużnych  $U_S = 196V$  i  $U_S = 230V$ .



Rysunek 6.17: Wprowadzany przez przesuwnik kąt  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla linii o długości 11 oraz 4 sekcje dla dwóch przypadków napięcia wzdłużnego: $U_S = 196V$ i  $U_S = 230V$  i obu kierunków uzwojenia dodawczego.

# 6.4 Równoległe linie wymiany pomiędzy systemem $S_1$ a wewnętrznym systemem generatorowym

W rozważanym przypadku równoległe linie wymiany mocy łączą system S1 z systemem generatorowym, który zasilany był z dwóch generatorów o łącznej mocy zainstalowanej równej 26 kVA. Do analiz wykorzystano pomiary dla przypadków linii równoległych o równych długościach (obie linie złożone z 10 sekcji) oraz dla linii o różnych długościach (4 i 10 sekcji).





W przedstawionym na Rysunku 6.18 układzie, długości linii L34 oraz L45 były odpowiednio modyfikowane w zależności od rozpatrywanego przypadku (4 lub 10 sekcji). Węzły W3 oraz W5 połączono bezpośrednio, aby obydwa generatory pracowały w tym samym punkcie sieci (można przyjąć, że długość linii L35 wynosiła 0).

#### 6.4.1 Linie równoległe o długościach 10 sekcji każda

W przypadku równych linii o długości 10 sekcji otrzymano transfer mocy czynnej w obu liniach przedstawiony na Rysunku 6.19.



Rysunek 6.19: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji każda w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego 196/340 V oraz 245/424 V i uzwojenia szeregowego transformatora dodawczego włączonego w kierunku wyprzedzającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe).

Należy zaznaczyć, iż zachowano znaki mocy względem węzła  $S_1$ , dlatego moc przesyłana do węzła  $S_1$  ma znak ujemny, podobnie jak w poprzednim rozdziale.

Transferowana moc czynna dla obniżonego napięcia wzdłużnego (196V) jest wyższa niż dla napięcia równego 230/400V dla analogicznych wartości napięć dodawczych. Warto dodać, że wyzerowanie przepływu mocy czynnej w linii bez PF dla obu przypadków następuje przy przesyle mocy w linii z PF równej -7450W i napięciu dodawczym  $U_d = 20$  V przy obniżonym napięciu wzdłużnym oraz -7300 W przy napięciu dodawczym  $U_d = 32$  V dla przekładni transformatora wejściowego 400/400. Zatem przepływ kołowy występuje przy wyższym napięciu dodawczym dla przypadku napięcia  $U_S = 245/424$  V niż ma to miejsce dla obniżonego napięcia wzdłużnego.

W przypadku włączenia przeciwnego uzwojenia szeregowego przesuwnika fazowego (przez K2K4) otrzymano wartości przesyłanych mocy w obu liniach zaprezentowane na Rysunku 6.20. Moc przesyłana w linii z PF wraz ze wzrostem napięcia dodawczego zwiększa się, a następnie zmienia znak i przesyłana jest od węzła systemu  $S_1$  do węzła generatorowego. Jednocześnie po



Rysunek 6.20: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji każda w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego 196/340 V oraz 245/424 V i uzwojenia szeregowego transformatora dodawczego włączonego w kierunku opóźniającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe).

zmianie znaku występuje kołowy przepływ mocy.





Wartości wprowadzanego do układu kąta  $\alpha$  są ujemne, co jest konsekwencją przyjęcia innego punktu odniesienia niż dla poprzednich analiz. Włączenie uzwojenia dodawczego przez styczniki K2K4 skutkuje dla obu napięć wzdłużnych podobnymi wartościami kąta  $\alpha$ , co jest

#### zbieżne z przesyłanymi mocami czynnymi dla tego przypadku.



Rysunek 6.22: Napięcie wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodawczego dla linii równoległych o długościach 10 sekcji i obu kierunkach włączenia uzwojenia dodawczego.

Napięcie wyjściowe PF nieznacznie wzrasta wraz z dodawaniem wyższych wartości napięć. Ze względu na przyjętą przekładnię transformatora wejściowego równą 400/400, napięcia wyjściowe PF dla przebiegów koloru czarnego przyjmują wartości przekraczające 245 V, a dla największych napięć dodawczych przekraczają 110% napięcia znamionowego sieci. Obniżenie napięcia wzdłużnego powoduje pracę linii na napięciu, które nie przekracza granicznych wartości wymaganych przez operatora sieci.

#### 6.4.2 Linie równoległe o długościach 4 sekcje z PF oraz 10 sekcji

W badaniach laboratoryjnych analizowanego PF przeprowadzono również pomiary przesyłanych mocy dla linii równoległych o różnych długościach. W tym celu układ sieć zewnętrzna – system generatorowy połączono liniami równoległymi złożonymi z odpowiednio 4 i 10 sekcji. W wyniku różnych długości linii, większy transfer mocy czynnej następuje z wykorzystaniem linii krótszej, w której jest zainstalowany PF. Obniżenie napięcia wzdłużnego wpływa na zwiększenie przesyłanej mocy w linii z PF, jednocześnie w dłuższej linii równoległej praktycznie dla każdego napięcia dodawczego następuje przepływ mocy w kierunku przeciwnym względem linii z PF. Dla braku napięcia dodawczego moc w linii  $L_{45}$  wynosi 500 W i przesyłana jest do systemu  $S_1$ , podobnie jak moc w linii z PF. Dla przekładni równej 400/400 przepływ kołowy



Rysunek 6.23: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji oraz 4 sekcje z PF w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego 196/340 V oraz 245/424 V i uzwojenia szeregowego transformatora dodawczego włączonego w kierunku wyprzedzającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe).

mocy następuje przy napięciu dodawczym większym niż 16 V.

Odwrócenie uzwojenia dodawczego powoduje zmianę rozpływów mocy w liniach. W takich warunkach pracy, moc przesyłana do węzła systemu  $S_1$  stopniowo zmniejsza się aż do osiągnięcia wartości równej 0, a następnie dochodzi do przesyłu mocy czynnej do węzła generatorowego. Wyzerowanie mocy następuje przy napięciu dodawczym równym ok. 25 V oraz 27 V odpowiednio dla napięcia wzdłużnego równego napięciu sieci oraz napięcia obniżonego do 196/340 V. Mimo różnych długości linii możliwe jest wykorzystanie dłużej linii do przesyłania mocy i odciążenia linii krótszej.

Otrzymane wartości wprowadzanych przez przesuwnik fazowy kątów  $\alpha$  odznaczają się tym samych charakterem zmian z otrzymanymi przebiegami przesyłanych mocy czynnych.



Rysunek 6.24: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji oraz 4 sekcje z PF w funkcji napięcia dodawczego dla napięcia wzdłużnego 196/340 V oraz 245/424 V i uzwojenia szeregowego transformatora dodawczego włączonego w kierunku opóźniającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe).



Rysunek 6.25: Przebiegi kąta przesunięcia  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla obu kierunków włączenia uzwojenia dodawczego i napięć wzdłużnych (196/340 V i 245/424 V).



Rysunek 6.26: Napięcie wyjściowe PF w funkcji napięcia dodawczego dla linii równoległych o długościach 10 sekcji oraz 4 sekcje z PF i kierunkach włączenia skutkującymi wyprzedzającym i opóźniającym kątem α.

#### 6.5 Moc bierna w wybranych przypadkach pracy PF

Analiza wpływu PF na przesyłane moce czynne dla szerokiego spektrum przypadków omówionych wcześniej pozwoliła zauważyć, iż badany układ PF z regulacją wzdłużną i poprzeczną napięć umożliwia skuteczną regulację w zakresie przesyłanych mocy w systemie. Ze względu na fakt, iż w liniach przesyłowych występuje nie tylko moc czynna, ale również moc bierna, dla wybranych przypadków zostanie wykonana analiza przesyłanych mocy biernych. Przyjęta konwencja oznaczeń mocy biernej w rozdziale 2 jest następująca: moc czynna i bierna indukcyjna mają te same znaki, jeśli moc bierna ma znak przeciwny, wówczas jej charakter jest pojemnościowy (Rysunek 2.7).



Rysunek 6.27: Czterokwadrantowy wykres moc czynnych i biernych dla równych linii równoległych o długościach 10 i 4 sekcje.

Na Rysunku 6.27 zaznaczono wybrane punkty pracy PF. Dla stosunkowo długich linii (10 sekcji) wartości przesyłanych mocy czynnych są zbliżone dla odpowiadających sobie napięć dodawczych. Z kolei moce bierne dla tego przypadku mają różne wartości, a także charaktery. Moc bierna dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/400 ma charakter pojemnościowy i wzrasta od wartości 0,9 kVAr do 2,7 kVAr. Natomiast dla obniżonego napięcia wzdłużnego (przekładnia 400/340) widoczna jest duża wartość mocy biernej indukcyjnej przy braku wprowadzonego napięcia poprzecznego do linii (0 V: -4,5 kVAr), która wraz ze wzrostem napięcia dodawczego maleje (48 V: -0,5 kVAr) zachowując ujemny znak, czyli charakter

indukcyjny.

Zastosowanie PF w liniach krótkich (4 sekcje) skutkuje dużym przesyłem mocy czynnej dla obniżonego napięcia wzdłużnego. Moc ta wzrasta wraz dodawaniem wyższych napięć poprzecznych do linii, natomiast moc bierna dla tego przypadku zmniejsza się z -8,8 kVAr do -6,5 kVAr dla  $U_d = 16V$  i ma charakter indukcyjny. Praca analizowanego przesuwnika przy przekładni 400/400 dla linii czterosekcyjnej skutkuje wzrostem mocy biernej pojemnościowej od poziomu 1,2 kVAr przy braku napięcia dodawczego do 7,7 kVAr dla  $U_d = 32V$ .

W związku z przedstawionymi zmianami przesyłanych mocy czynnych i biernych widoczne są następujące wpływy PF:

- wzrost napięcia dodawczego dla przekładni 400/400 skutkuje zwiększeniem przesyłanej mocy biernej i zmniejszeniem współczynnika mocy (dla linii 10 sekcji: U<sub>d</sub> = 0V i cosφ = 0,941 → U<sub>d</sub> = 48V i cosφ = 0,809; dla linii 4 sekcje: U<sub>d</sub> = 0V i cosφ = 0,905 → U<sub>d</sub> = 32V i cosφ = 0,816),
- wzrost napięcia dodawczego dla przekładni 400/340 skutkuje zmniejszeniem przesyłanej mocy biernej oraz wzrostem współczynnika mocy (dla linii 10 sekcji: U<sub>d</sub> = 0V i cosφ = 0,608 → U<sub>d</sub> = 48V i cosφ = 0,999; dla linii 4 sekcje: U<sub>d</sub> = 0V i cosφ = 0,555 → U<sub>d</sub> = 24V i cosφ = 0,945).

Powyższe obserwacje wynikają z zależności opisujących moc bierną przesyłaną w linii. Zgodnie z równaniem (2.8) przesyłana moc bierna zależy m.in. od wartości różnicy  $cos\vartheta$  oraz stosunku napięcia w węźle odbierającym  $U_R$  do napięcia węzła wysyłającego  $U'_S$ . Dla przypadków braku regulacji wzdłużnej, wartość mocy czynnej zwiększa się wraz ze wzrostem napięć dodawczych, ponieważ wówczas zwiększa się również stosunek  $\frac{U_S}{U_R}$  ze względu na wzrost napięcia wyjściowego z PF. Z kolei w przypadkach obniżonego napięcia wzdłużnego, wówczas największy stosunek  $\frac{U_S}{U_R}$  jest przy braku napięcia dodawczego, następnie wraz z dodawaniem coraz to większych napięć poprzecznych, stosunek ten maleje.

## **Rozdział 7**

## Obliczenia symulacyjne oraz numeryczne

Symulacje wybranych stanów pracy PF wykonano na modelu bazowym, który został przedstawiony na Rysunku 5.7. Na potrzeby konkretnych układów połączeń, model bazowy byl odpowiednio modyfikowany. Wyniki obliczeń symulacyjnych (na podstawie modelu w programie Simulink - Rozdział 5.2) i numerycznych (na podstawie równań z Rozdziału 4.2) zostaną przedstawione z wartościami zmierzonymi w układzie laboratoryjnym w celu ułatwienia analizy porównawczej. Do zestawień wybranych wielkości opisanych w kolejnych podrozdziałach wykorzystano przypadek pojedynczej linii wymiany o długości 22 sekcje łączącej dwa systemy (zasilane z sieci zasilającej) oraz linii równoległych łączących system zasilany z sieci zewnętrznej z wewnętrznym, niezależnym systemem zasilanym z generatorów synchronicznych.

#### 7.1 Pojedyncza linia wymiany

Dla pojedynczej linii wymiany wykonano obliczenia oraz symulacje dla linii o długości 22 sekcje i kierunku włączenia uzwojenia dodawczego skutkującego kątem wyprzedzającym. Otrzymane przebiegi mocy czynnych przesyłanych linią przedstawiono na Rysunku 7.1 dla przekładni transformatora wejściowego TW  $\eta = 400/376$  oraz na Rysunku 7.2 dla  $\eta = 400/340$ . Wartości przesyłanych mocy zarówno dla symulacji, jak i dla obliczeń numerycznych są bardzo zbliżone do wartości zmierzonych w rzeczywistym układzie laboratoryjnym. Należy zaznaczyć, że przy dużych napięciach dodawczych różnice obliczonych wielkości od zmierzonych są największe i wynoszą 3,3 kW dla  $U_d = 148$  V.



Rysunek 7.1: Przesyłana moc czynna pojedynczą linią wymiany o długości 22 sekcje w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/376$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku wyprzedzającym w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).



Rysunek 7.2: Przesyłana moc czynna pojedynczą linią wymiany o długości 22 sekcje w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/340$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku wyprzedzającym w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).

Wykresy zebrane na Rysunku 7.3 przedstawiają napięcia wyjściowe z PF. Dla obniżonego napięcia wzdłużnego, wartości dla wszystkich trzech metod są zbieżne w zakresie napięć do-

dawczych 0 - 90 V. Przy wyższych napięciach dodawczych widoczny jest szybszy wzrost napięć wyjściowych w porównaniu do pozostałych dwóch przypadków. Przy braku regulacji napięcia wzdłużnego widoczna jest podobna zależność, łącznie z przyrostem wartości napięcia wyjściowego obliczonego numerycznie.



Rysunek 7.3: Napięcie wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodawczego dla pojedynczej linii o długości 22 sekcje i przekładni TW: a)  $\eta = 400/376$ , b)  $\eta = 400/340$ .



Rysunek 7.4: Przebiegi kąta przesunięcia  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/376$ , b)  $\eta = 400/340$ .

Analizując wprowadzane przesunięcie kątowe  $\alpha$  można zaobserwować, że dla pomiarów laboratoryjnych w obu przypadkach wartości kąta są mniejsze od pozostałych metod, które w znacznej części się ze sobą pokrywają (Rysunek 7.4). Widoczne różnice pojawiają się dopiero przy napięciu dodawczym większym niż 100 V (od 8% dla  $U_d = 100$  V do 11% dla  $U_d = 148$  V).

#### 7.2 Linie równoległe o długościach 10 sekcji każda

W przypadku linii równoległych o tej samej długości (10 sekcji) największe wartości przesyłanych mocy w obu liniach widoczne są dla obliczeń symulacyjnych. Brak napięcia dodawczego lub jego małe wartości skutkowały zbliżonymi wartościami dla wszystkich metod, natomiast zwiększanie napięcia dodawczego wpłynęło na największe przyrosty przesyłanych mocy właśnie w modelu symulacyjnym. Obliczone wartości z kolei są zbliżone do tych uzyskanych w pomiarach laboratoryjnych, dzięki czemu widoczny jest prawidłowy opis matematyczny wraz z parametrami elementów układu.





Porównując przypadek pracy PF z przekładnią  $\eta = 400/400$  do pracy przy obniżonym napięciu wzdłużnym ( $\eta = 400/340$ ) widać, że obliczone wartości mocy czynnej w drugim przypadku przyjmowały wartości niższe niż zmierzone. Z symulacji pracy układu dla obniżonego napięcia wzdłużnego można zauważyć znaczący wpływ PF na przesyłane moce czynne (przyrosty mocy dla kolejnych napięć dodawczych są największe), przez co dla 48 V napięcia dodawczego wielkości obliczone w trakcie symulacji mają największe wartości.



Rysunek 7.6: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji każda w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/340$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku wyprzedzającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).

Porównanie mocy czynnych przesyłanych liniami równoległymi wskazało, iż wykonane obliczenia oraz model symulacyjny są na poziomie pozwalającym na wykorzystanie badanego PF w różnego typu obliczeniach. Na Rysunku 7.7 przedstawiono porównanie napięć wyjściowych z PF dla przypadku braku transformacji napięcia wejściowego oraz przy obniżonym napięciu wzdlużnym (przekładnia  $\eta = 400/340$ ). Napięcie wyznaczone w symulacji w Simulinku przyjmuje większe wartości od zmierzonego (7.7a) i obliczonego. Różnice w granicznym przypadku ( $U_d = 48$  V) wynoszą 8 V pomiędzy symulacją a pomiarem, i 14 V pomiędzy symulacją a obliczeniami. Obliczenia i symulacje dla obniżonego napięcia wzdłużnego dają zbliżone rezultaty, jednak są one niższe od napięcia zmierzonego (różnica zmienia się w zakresie 9 - 11 V dla obliczeń i 11 - 9 V dla symulacji przy wzroście napięcia dodawczego).

W zależności od analizowanego przypadku, wartości kąta przesunięcia  $\alpha$  są dla każdej metody zbliżone, ponieważ w całym zakresie pomiarowym różnice nie przekraczają 1° (Rysunek 7.8b). Natomiast znaczące różnice (zwłaszcza dla symulacji) widoczne są na Rysunku 7.8a. Mimo, że wartości kąta  $\alpha$  są mniejsze dla symulacji (przy napięciach dodawczych większych niż 16 V), przesyłane moce czynne są większe niż w pozostałych dwóch przypadkach. Ta sytuacja jest konsekwencją wzrostu napięć w węzłach układu, czego potwierdzeniem jest przebieg



Rysunek 7.7: Napięcie wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodawczego dla równych linii równoległych o długościach 10 sekcji i przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .

napięcia wyjściowego z PF na Rysunku 7.7a.



Rysunek 7.8: Przebiegi kąta przesunięcia  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .

Podobnie, jak dla włączenia uzwojenia dodawczego w kierunku wyprzedzającym (przez  $K_1K_3$ ), uzyskane wartości przesyłanych mocy dla przeciwnego włączenia uzwojenia szeregowego transformatora TD są zbliżone dla symulacji i obliczeń. Wyjątkiem jest moc przesyłana w linii z PF dla obniżonego napięcia wzdłużnego. Wówczas wielkość ta przyjmowała zdecydowanie większe wartości niż dla pomiaru czy też symulacji.

Istotną różnicą zauważalną na Rysunku 7.11 jest zmiana napięcia wyjściowego PF dla obu przypadków. Zmiana kierunku włączenia napięcia dodawczego skutkuje zmniejszaniem napięcia wyjściowego. Do wykonania symulacji przy zmianie kierunku uzwojeń szeregowych transformatora TD zamieniono początki i końce poszczególnych uzwojeń transformatora dodawczego w modelu w Simulinku, co jest zgodne z rzeczywistymi pomiarami w laboratorium (przełączenie kierunku zasilania z  $K_1K_3$  na  $K_2K_4$ ). Jednak w symulacji uzyskany efekt po-



Rysunek 7.9: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji każda w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/400$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku opóźniającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).

przez takie działanie skutkuje zmniejszeniem napięcia wyjściowego. Sytuacja ta jest związana z uproszczeniami w modelowaniu napędów, układów wzbudzenia i generatorów synchronicznych, co skutkuje większymi zmianami napięć w węźle generatorowym, a tym samym również zmianami napięć wyjściowych PF.

Zmiany kąta  $\alpha$  są liniowe, dla przekładni  $\eta = 400/400$  wartości zmierzone i obliczone nieznacznie się różnią (zwłaszcza dla dużych napięć dodawczych). Natomiast dla obniżonych napięć wzdłużnych ( $\eta = 400/340$ ) przebiegi te praktycznie się ze sobą pokrywają, wykazując dużą zbieżność. Jedynie wyniki symulacyjne odbiegają od pozostałych, zwłaszcza dla przypadku z Rysunku 7.12b.


Rysunek 7.10: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 10 sekcji każda w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/340$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku opóźniającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).



Rysunek 7.11: Napięcie wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodawczego dla równych linii równoległych o długościach 10 sekcji i przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .



Rysunek 7.12: Przebiegi kąta przesunięcia  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .

#### 7.3 Linie równoległe o długościach 4 sekcje z PF i 10 sekcji

W analizie wpływu PF na możliwości sterowania rozpływem mocy w liniach przesyłowych uwzględniono przypadek dotyczący linii o różnych długościach. Pod względem zbieżności wyników dla przesyłanych mocy czynnych obydwoma liniami widoczne są dla braku regulacji napięcia wzdłużnego (Rysunek 7.13). Mimo, że przy wyższych wartościach napięć dodawczych (powyżej 20V) obliczone wartości na bazie symulacji są większe od pozostałych metod, to w zakresie poniżej 20 V wszystkie trzy metody osiągają zbliżone do siebie rezultaty. Warto zwrócić uwagę, że w dla  $U_d = 16$  i  $\eta = 400/400$  następuje zmiana kierunku przepływu mocy czynnej w linii bez PF (o długości 10 sekcji).



Rysunek 7.13: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 4 sekcje z PF i 10 sekcji w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/400$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku wyprzedzającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).

Obniżenie napięcia wzdłużnego na transformatorze TW (przekładnia  $\eta = 400/340$ ) skutkuje znaczącymi rozbieżnościami w wynikach otrzymanych na podstawie modelu numerycznego. O ile wartości mocy w linii bez PF są bliskie wartościom z pozostałych dwóch rozważanych metod, to moc w linii z PF jest mniejsza o 4 kW dla braku napięcia dodawczego, a dla  $U_d = 32$  V różnica pomiędzy obliczoną mocą a zmierzoną wynosi niespełna 2 kW. Wyróżnić można jedynie zbieżność jakościową widoczną w podobnej charakterystyce zmian mocy czynnej w funkcji napięcia dodawczego.



Rysunek 7.14: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 4 sekcje z PF i 10 sekcji w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/340$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku wyprzedzającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).

Przebiegi napięć wyjściowych PF przedstawiono na Rysunku 7.15. Podobnie jak dla wcześniejszych przypadków występują rozbieżności, zwłaszcza między wartościami obliczonymi a zmierzonymi. Wyniki symulacji przyjmują najwyższe wartości. Dla kątów przesunięcia fazowego  $\alpha$  pomiary laboratoryjne oraz obliczenia mają podobny charakter i uzyskane przebiegi są prostymi równoległymi (za wyjątkiem wartości kąta dla braku napięcia dodawczego). Natomiast zmiany kąta  $\alpha$  wyznaczone w trakcie symulacji są najminiejsze dla rozpatrywanego zakresu napięć dodawczych.



Rysunek 7.15: Napięcie wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodawczego dla równych linii równoległych o długości 4 sekcje z PF i 10 sekcji dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .



Rysunek 7.16: Przebiegi kąta przesunięcia  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .

Odwrócenie kierunku uzwojeń dodawczych TD dla asymetrycznych linii równoległych skutkuje znaczną różnicą wartości przesyłanych mocy czynnych w linii z zainstalowanym PF. Sytuacja ta występuje zarówno dla braku, jak i ze zmianą wartości napięcia wzdłużnego, co przedstawiono na rysunkach 7.17 i 7.18. Wartości przesyłanych mocy w linii bez PF w obu przypadkach są zbieżne ilościowo. Obliczone numerycznie wartości mocy czynnej dla linii z PF są zdecydowanie nieakceptowalne dla tego przykładu, ponieważ wartość błędu przekracza 600% dla największego napięcia dodawczego (Rysunek 7.18).



Rysunek 7.17: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 4 sekcje z PF i 10 sekcji w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/400$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku opóźniającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).



Rysunek 7.18: Przesyłana moc czynna liniami równoległymi o długości 4 sekcje z PF i 10 sekcji w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW  $\eta = 400/340$  i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku opóźniającym (linie z zainstalowanym przesuwnikiem fazowym są ciągłe) w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).



Rysunek 7.19: Napięcie wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodawczego dla równych linii równoległych o długości 4 sekcje z PF i 10 sekcji dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .

Charakter zmian napięć wyjściowych z PF jest zgodny z wyznaczonymi wielkościami dla analizowanych wcześniej długości linii. Obliczone wartości mają największą różnicę względem zmierzony przy zerowym napięciu dodawczym, najmniejszą dla 48V (Rysunek 7.19a). Z kolei dla sytuacji z Rysunku 7.19b widać większe przyrosty wartości dla obliczeń numerycznych, jednak różnice między przebiegami (czarnym i czerwonym) nie zmieniają się w takim charakterze jak dla przypadku z brakiem zmian napięcia wzdłużnego. Ta sytuacja jest potwierdzeniem dla występujących wcześniej analiz napięć wyjściowych z PF.

Obliczone numerycznie kąty przesunięcia fazowego  $\alpha$  są zbliżone do wartości zmierzonych, a dla obniżonego napięcia wzdłużnego obie linie się praktycznie pokrywają ze sobą. Podobnie jak dla wcześniejszych przypadków, wartości kątów wyznaczone przez symulację mają mniejsze wartości od pozostałych metod.



Rysunek 7.20: Przebiegi kąta przesunięcia  $\alpha$  w funkcji napięcia dodawczego dla przekładni TW: a)  $\eta = 400/400$ , b)  $\eta = 400/340$ .

#### 7.4 Obliczenia rozpływów mocy w 5-węzłowym systemie elektroenergetycznym

Do obliczeń rozpływów mocy w SEE złożonym z 5 węzłów wykorzystano metodę Newtona-Raphsona. Schemat układu przedstawiono na Rysunku 7.21. Wybrano układ, w którym każdy z węzłów został zdefiniowany w sposób przedstawiony w Tabeli 7.1.



Rysunek 7.21: Schemat połączeń 5-węzłowego systemu.

		Moc obciążenia węzła	Moc generowana	Napięcie
Nr węzła	Typ węzła		w węźle	w węźle
		[MVA]	[MVA]	[jw/pu]
1	Bilansujący	150+j50	0	1
2	Odbiorczy	100+j40	0	var
3	Generatorowy	90	200+j75	1,06
4	Odbiorczy	180+j100	0	var
5	Generatorowy	0	360+j165	1,06

Tablica 7.1: Zadane	<i>parametry</i>	poszczególnych	węzłów
	1 2		

Natomiast długości linii wynoszą odpowiednio:

- Linia L12 90 km,
- Linia L14 180 km,
- Linia L23 30 km,
- Linia L34 240 km,
- Linia L35 30 km,
- Linia L45 180 km.

Parametry jednostkowe linii wynoszą:  $r_0 = 0,053\Omega/km, x_0 = \Omega/km, b_0 = \mu S/km$ , przy czym  $r_0$ - rezystancja jednostkowa,  $x_0$  - reaktancja jednostkowa,  $b_0$  - susceptancja jednostkowa. Z kolei jako moc bazową przyjęto wartość 250 MVA, a napięcie to 400 kV.

Obliczenia wykonano poprzez zdefiniowanie wszystkich parametrów i zaimplementowanie ich do programu MATPOWER [80] będącym pakietem m-plików w Matlabie, który pozwala na dowolne konfigurowanie układów przesyłowych i wyznaczanie rozpływów mocy. Przygotowany układ dostosowywano do założeń wstępnych (zadanych wartości przesunięć fazowych) zmieniając wybrane parametry w celu pokazania wpływu PF na przesyłane moce oraz wartości napięć węzłowych. W celu wykazania wpływu proponowanego PF z regulacją napięcia wzdłużnego na przesyłane moce oraz napięcia w węzłach, wykonano także obliczenia dla analogicznego PF asymetrycznego, ale bez regulacji napięcia wzdłużnego. Obliczenia wykonano dla następujących wartości zadanych:

- brak PF naturalne rozpływy w badanym układzie,
- asymetryczny PF zainstalowany w linii L45 wprowadzający przesunięcie 5°, 10°, 15°,
- PF z regulowanym napięciem wzdłużnym w linii L45 wprowadzający przesunięcie 5°, 10°, 15°,

W ten sposób wykonano obliczenia rozpływów mocy, przy czym uwzględniono wpływ zmian napięcia wyjściowego z PF w zależności od wybranego typu urządzenia. Przyjęta konwencja znaku mocy wskazuje, że moc wpływająca do węzła ma znak -, a wypływająca +. Moc każdej linii odniesiona jest względem pierwszego wymienionego węzła w opisie linii.

Dla analizowanego systemu, przy braku wprowadzania jakichkolwiek napięć dodawczych, wartości przesyłanych mocy w poszczególnych liniach są następujące:

Tablica 7.2: Moce czynne przesyłane w liniach systemu przy braku PF.

Linia	L12	L14	L23	L34	L35	L45
Moc czynna [MW]	-149	-15	-251	78	-220	-138

Wartości mocy czynnych oraz napięcia węzłowe przedstawiono odpowiednio na rysunkach 7.22 - 7.23 oraz w Tablicy 7.3.



Rysunek 7.22: Moc czynna w poszczególnych liniach przy wprowadzonym przesunięciu kątowym równym 5°, 10°, 15° dla klasycznego asymetrycznego przesuwnika fazowego (niebieski), proponowanego przesuwnika fazowego w quasi-symetrycznym stanie pracy (czerwony) i proponowanego przesuwnika przy obniżonym napięciu wzdłużnym do wartości napięcia znamionowego systemu (żółty).



Rysunek 7.23: Moc czynna w poszczególnych liniach przy wprowadzonym przesunięciu kątowym równym 5°, 10°, 15° dla klasycznego asymetrycznego przesuwnika fazowego (niebieski), proponowanego przesuwnika fazowego w quasi-symetrycznym stanie pracy (czerwony) i proponowanego przesuwnika przy obniżonym napięciu wzdłużnym do wartości napięcia znamionowego systemu (żółty).

Tablica 7.3: Wartości napięć węzłowych oraz ich kątów dla asymetrycznego PF, proponowanego PF w quasi-asymetrycznym stanie pracy oraz przy obniżonym napięciu wzdłużnym do  $U_n = 400 \text{ kV} (\eta > 1).$ 

	Napięcie	Kąt	Napięcie Kąt		Napięcie	Kąt	Napięcie	Kąt	
	[kV]	[°]	[kV]	[°]	[kV]	[°]	[kV]	[°]	
Wozoł	Brok I	DE	Asymetryczny		Asymetr	yczny	Asymetryczny		
VV ÇZCI	DIAKI	1	5°		100	þ	15	0	
1	1*	0*	1*	0*	1*	0*	1*	0*	
2	417,6	1,11	417,6	0,51	417,6	-0,11	417,6	-0,75	
3	424	1,77	424	0,98	424	0,16	424	-0,69	
4	412,4	0,02	412,4	1,16	413,2	2,21	414,4	3,17	
5	424	2,46	424	1,28	424	0,11	424	-1,03	
	**7 *		Quasi-symetryczny						
	Wezeł		Quasi-sym	etryczny	Quasi-sym	etryczny	Quasi-sym	etryczny	
	Węzeł		Quasi-sym 5°	etryczny	Quasi-sym	etryczny	Quasi-sym 15	• •	
	Węzeł 1		Quasi-sym 5° 1*	etryczny 0*	Quasi-sym 10°	etryczny	Quasi-sym 15 1*	o 0*	
	Węzeł 1 2		Quasi-sym 5° 1* 417,6	etryczny 0* 0,66	Quasi-sym 10° 1* 417,6	etryczny 0* 0.15	Quasi-sym 15 1* 417,6	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
	Węzeł 1 2 3		Quasi-sym 5° 1* 417,6 424	etryczny 0* 0,66 1,17	Quasi-sym 10° 1* 417,6 424	etryczny 0* 0.15 0,50	Quasi-sym 15 1* 417,6 424	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
	Węzeł 1 2 3 4		Quasi-sym 5° 1* 417,6 424 411,6	etryczny 0* 0,66 1,17 0.94	Quasi-sym 10 <sup>6</sup> 1* 417,6 424 410,8	etryczny 0* 0.15 0,50 1,92	Quasi-sym 15 1* 417,6 424 409,2	0*       -0,37       -0,19       2,88	
	Węzeł 1 2 3 4 5		Quasi-sym 5° 1* 417,6 424 411,6 424	etryczny 0* 0,66 1,17 0.94 1,54	Quasi-sym 10° 1* 417,6 424 410,8 424	etryczny 0* 0.15 0,50 1,92 0,51	Quasi-sym 15 1* 417,6 424 409,2 424	0*       -0,37       -0,19       2,88       -0,53	
	Węzeł 1 2 3 4 5		Quasi-sym 5° 1* 417,6 424 411,6 424	etryczny 0* 0,66 1,17 0.94 1,54	Quasi-sym 10° 1* 417,6 424 410,8 424	etryczny 0* 0.15 0,50 1,92 0,51	Quasi-sym 15 1* 417,6 424 409,2 424	0*       -0,37       -0,19       2,88       -0,53	
	Węzeł 1 2 3 4 5 Wezeł		Quasi-sym 5° 1* 417,6 424 411,6 424 η >	etryczny 0* 0,66 1,17 0.94 1,54 ·1	Quasi-sym 10° 1* 417,6 424 410,8 424 η >	etryczny 0* 0.15 0,50 1,92 0,51 1	Quasi-sym 15 1* 417,6 424 409,2 424 η >	etryczny ∘ 0* -0,37 -0,19 2,88 -0,53 ·1	

Wprowadzenie PF w linię L45 skutkuje istotnymi zmianami w wartościach przesyłanych

1\*

417,6

424

403,2

424

1

2

3

4

5

0\*

0,70

1,23

1,03

1,63

1\*

417,6

424

403,6

424

0\*

0,16

0,51

2,02

0,53

1\*

417,6

424

404,4

424

0\*

-0,39

-0,20

2,91

-0,54

mocy w analizowanym systemie elektroenergetycznym. Istotą przedstawionych obliczeń jest wskazanie wpływu wybranych typów sterowania proponowanym PF względem asymetrycznego PF. Przede wszystkim widoczny jest pozytywny wpływ PF pracującego z obniżonym napięciem wzdłużnym (przypadek  $\eta > 1$ ) na poziomy napięć w węźle 4, dla którego napięcia są niższe o 9 kV względem asymetrycznego PF. Quasi-symetryczny stan pracy wskazuje na spadek napięcia w węźle 4 dla kolejno zadawanych przesunięć kątowych. Jest to konsekwencją wzrostu spadków napięcia wskutek przesyłanych większych mocy, co przy stałej wartości napięcia wyjściowego z PF skutkuje zmniejszeniem wartości napięcia w węźle typu odbiorczego. Dlatego też różnica wartości napięć w weźle 4 dla dwóch typów sterowania proponowanym PF maleje.

Wartości przesyłanych mocy dla PF z regulacją wzdłużno-poprzeczną są zbliżone do siebie dla każdej linii. Z powodu nieznacznych różnic w przesyłanych mocach, właśnie parametry napięcia powinny być uwzględniane w ocenie pracy każdego typu PF. Różnice w przesyłanych mocach widoczne są pomiędzy proponowanym PF a jednostką asymetryczną. Dla linii L45 z zainstalowanym w niej PF dla każdego przesunięcia kątowego widoczny jest największy transfer mocy z asymetrycznym PF. Przesyłane moce za pomocą quasi-symetrycznego sterowania PF są mniejsze o 10%, natomiast dla pracy z obniżonym napięciem wzdłużnym różnice sięgają 15% dla  $\alpha = 5$  i maleją do 12% przy  $\alpha = 15$ . Obserwacje te są zgodne z przeprowadzonymi badaniami laboratoryjnymi i symulacjami. W proponowanym PF przy obniżonym napięciu wzdłużnym osiągnięcie tej samej wartości przesyłanej mocy czynnej wymaga wprowadzenia większego kąta  $\alpha$ .

Z kolei ze względu na zachowanie bilansu przesyłanych mocy w badanym systemie, wskutek różnic w przesyłanych mocach w linii z PF, można zaobserwować różnice w przesyłanych mocach pozostałymi liniami pomiędzy asymetrycznym PF a proponowanym PF. Wprowadzenie PF do układu skutkuje zmianami rozpływów mocy w systemie. To z kolei powoduje zmiany w wartościach strat mocy czynnej i biernej w każdej z linii. Z analizy otrzymanych wyników można wnioskować, że straty mocy w 5-węzłowym SEE z asymetrycznym PF dla każdego przesunięcia kątowego są większe od pozostałych przypadków (Tablica 7.4).

	$\Delta P$	$\Delta Q$	$\Delta P$	$\Delta Q$	$\Delta P$	$\Delta Q$
	[ <b>MW</b> ]	[MVAr]	[ <b>MW</b> ]	[MVAr]	[ <b>MW</b> ]	[MVAr]
		5°	1	10°	1	5°
Asymetryczny PF	8,1	47,8	13,4	83,1	22,2	140.9
Quasi-symetryczny PF	7,1	47,3	11,4	77,8	18,4	127,7
<b>PF dla</b> η >1	8,9	47,2	15,4	76,9	25,8	125,5

Tablica 7.4: Całkowite straty mocy w badanym systemie przy wprowadzonych przesunięciach 5°, 10° i 15°.

Przedstawione w Tablicy 7.4 straty mocy w systemie dla PF z możliwością regulacji napięcia wzdłużnego różnią się w bardzo małym stopniu dla quasi-symetrycznego i obniżonego napięcia wzdłużnego. Natomiast, jak wspomniano wcześniej, są zdecydowanie mniejsze od strat w systemie z asymetrycznym PF. Warto zaznaczyć, że impedancja asymetrycznego PF wprowadzana w linię jest mniejsza niż impedancja proponowanego PF ze względu na brak transformatora wejściowego TW w tym typie przesuwnika fazowego.

Ze względu na różnice przesyłanych mocy w liniach z przesuwnikiem fazowym obliczono wartości kątów, napięć dodawczych i napięć wyjściowych PF w celu przedstawienia różnic w funkcjonowaniu porównywanych PF. Na rysunkach 7.24 - 7.25 przedstawiono wartości przesyłanych mocy czynnych w każdej z linii systemu testowego. Uzyskanie takiego samego transferu mocy czynnej w linii L45, w której zainstalowano przesuwnik fazowy nie skutkuje identycznymi wartościami przesyłanych mocy w pozostałych liniach. W linii L12 dla 10° zauważalna jest mniejsza wartości przesyłanej mocy dla obu przypadków proponowanego PF (-34 MW dla asymetrycznego i -31 MW dla proponowanego), a dla 15° widoczne są większe moce (22 MW dla asymetrycznego i 30 dla proponowanego). Znaczące różnice przesyłanych mocy (rzędu kilku MW) widoczne są także w liniach: L23 dla 10° i 15°, L35 dla 10° i 15°.



Rysunek 7.24: Moc czynna w poszczególnych liniach przy wprowadzonym przesunięciu kątowym równym 5°, 10°, 15° dla klasycznego asymetrycznego przesuwnika fazowego (niebieski), proponowanego przesuwnika fazowego w quasi-symetrycznym stanie pracy (czerwony) i proponowanego przesuwnika przy obniżonym napięciu wzdłużnym do wartości napięcia znamionowego systemu (żółty).



Rysunek 7.25: Moc czynna w poszczególnych liniach przy wprowadzonym przesunięciu kątowym równym 5°, 10°, 15° dla klasycznego asymetrycznego przesuwnika fazowego (niebieski), proponowanego przesuwnika fazowego w quasi-symetrycznym stanie pracy (czerwony) i proponowanego przesuwnika przy obniżonym napięciu wzdłużnym do wartości napięcia znamionowego systemu (żółty).

Tablica 7.5: Wartości napięć węzłowych oraz ich kątów dla asymetrycznego PF, proponowanego PF w quasi-asymetrycznym stanie pracy oraz przy obniżonym napięciu wzdłużnym do  $U_n = 400 \text{ kV} (\eta > 1)$  dla równych mocy w linii L45 dla wszystkich przypadków.

Wozoł	Napięcie Kąt		Napięcie	Kąt	Napięcie	Kąt	Napięcie	Kąt	
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	[kV]	[°]	[kV]	[°]	[kV]	[°]	[kV]	[°]	
Wezeł	Brak F	DE	Asymetryczny		Asymetr	yczny	Asymetryczny		
WĘŻCI	Diakir		5°		100	0	15	0	
1	1*	0*	1*	0*	1*	0*	1*	0*	
2	417,6	1,11	417,6	0,51	417,6	-0,11	417,6	-0,75	
3	424	1,77	424	0,98	424	0,16	424	-0,69	
4	412,4	0,02	412,8	1,20	413,2	2,32	414,4	3,38	
5	424	2,46	424	1,24	424	-0,01	424	-1,29	
	Wozoł		Quasi-sym	etryczny	Quasi-sym	etryczny	Quasi-symetryczny		
	VV ÇZCI		6,2	C	12,1	0	17,9°		
	1		1*	0*	1*	0*	1*	0*	
	2		417,6	0,53	417,6	-0,84	417,6	-0,71	
	3		424	1,04	424	0,19	424	-0,63	
	4		411,6	1,19	408,4	2,30	406	3,37	
	5		424	1,28	424	0,06	424	-1,17	
	Wozoł		η>	1	η>	1	η>	1	
	WĘŻCI		6,6	o	12,2	20	18	>	
	1		1*	0*	1*	0*	1*	0*	
	2		417,6	0,53	417,6	-0,08	417,6	-0,71	
	3		424	1,00	424	0,19	424	-0,63	
	4		403,2	1,36	403,6	2,43	404,8	3,41	
	5		424	1,27	424	0,06	424	-1,17	

Przy realizacji celu, jakim było zadanie takiej samej wartości przesłanej mocy czynnej w linii otrzymano wartości napięć w węźle 4 równe 411,6 408,4 oraz 406 kV dla kolejnych przesunięć kątowych w stanie quasi-symetrycznym. Natomast dla pracy przy obniżonym napięciu wdłużnym różnicę zaobserwowano dla największego przesunięcia kątowego  $\alpha$ , gdzie napięcie wynosiło 404,8 kV.

Wartości strat mocy przedstawiono w Tablicy 7.6. Praca PF przy obniżonym napięciu wzdłużnym skutkuje największymi stratami mocy dla każdego zadanego przesunięcia kątowego, przy czym dla największego zadanego kąta straty mocy czynnej i biernej są równe dla stanu quasi-symetrycznego i obniżonego napięcia wzdłużnego.

Tablica 7.6: Całkowite straty mocy w badanym systemie przy przesyłanej równej mocy dla każdego przypadku pracy PF.

	$\Delta P$	$\Delta Q$	$\Delta P$	$\Delta Q$	$\Delta P$	$\Delta Q$
	[ <b>MW</b> ]	[MVAr]	[ <b>MW</b> ]	[MVAr]	[ <b>MW</b> ]	[MVAr]
		5°	1	10°	1	15°
Asymetryczny PF	8,1	47,8	13,4	83,1	22,2	140,9
Quasi-symetryczny PF	7,8	52,9	19,5	95,0	33,1	163,9
PF dla $\eta > 1$	10,7	54,6	19,5	96,0	33,1	163,9

### **Rozdział 8**

### Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono analizę pracy przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym dla typowych przypadków obrazujących użytkowanie urządzeń przeznaczonych do kontroli rozpływów mocy w ustalonych stanach pracy. Do analiz wykorzystano wyniki pomiarów z laboratoryjnego systemu elektroenergetycznego ze specjalnie przygotowanym przesuwnikiem fazowym, wartości obliczone na podstawie równań matematycznych opisujących zależności na przesyłane moce z zastosowaniem badanego przesuwnika fazowego, a także z symulacji wykonanych na modelu odzwierciedlającym układ laboratoryjny. Rezultaty dla większości analizowanych przypadków były zbieżne, w nielicznych sytuacjach jedna z metod odbiegała od pozostałych. Jest to konsekwencją uproszczeń, które zawsze się pojawiają przy budowie modelu danego układu czy też opisu matematycznego.

Zasadność stosowania przesuwnika fazowego z dodatkową możliwością regulacji napięcia wzdłużnego w systemach elektroenergetycznych, w których wymagana jest stosunkowo duża elastycznośc w regulacji rozpływów mocy, została potwierdzona poprzez badania pracy tej jednostki. Proponowany przesuwnik pozwala na osiągnięcie przepływów mocy porównywalnych z klasycznymi układami przesuwników asymetrycznych przy jednoczesnym zlikwidowaniu głównej ich wady, tj. wzrostu napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego do przesuwnika fazowego. Jest to istotną zaletą umożliwiającą szersze zastosowanie przesuwnika fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym względem asymetrycznych przesuwników fazowych. Ponadto, jak zasygnalizowano w pracy, możliwe jest również takie sterowanie pracą układu przesuwnika, aby osiągnąć przesunięcie kątowe przy równoczesnym utrzymaniu stałej wartości napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego. Taki stan pracy, nazwany quasi-symetrycznym, stanowić może przyczynek do szerszej analizy przesuwnika w porównaniu z jednostkami symetrycznymi. Poza wymienionymi sposobami sterowania, możliwe jest zastosowanie dowolnej funkcji pracy tego przesuwnika w celu uzyskania odpowiedniej wartości napięcia, co stanowi o elastyczności asymetrycznego przesuwnika fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym. Należy również zaznaczyć, iż w niniejszej pracy skupiono się wyłącznie na napięciach dodawczych wprowadzanych prostopadle do napięć fazowych linii. Natomiast sam przesuwnik, poprzez zmianę zasilania odpowiednich faz uzwojeń dodawczych, może pracować przy innych kątach napięcia dodawczego względem napięcia fazowego linii przesyłowej.

Przedstawiona w pracy teza, dotycząca skuteczności regulacji rozpływów mocy oraz szerokiego pola zastosowań asymetrycznego przesuwnika fazowego, została udowodniona. Zbudowane stanowisko z testowym układem przesuwnika pozwoliło zaobserwować zmiany w rozpływach mocy w poszczególnych liniach, łącznie z brakiem przepływu mocy w danej linii przesyłowej lub odwróceniem kierunku jej przesyłu. W trakcie projektowania asymetrycznego przesuwnika fazowego z możliwością regulacji napięcia wzdłużnego zaproponowano rozwiązanie dotyczące regulacji wartości napięć dodawczych oparte o niezależne uzwojenia szeregowe, które można w dowolny sposób ze sobą łączyć wprowadzając w ten sposób żądaną wielkość napięcia do linii. Zaplanowano sterowanie przekładnią transformatora wejściowego z wykorzystaniem mikrokontrolera, dzięki czemu możliwy będzie dobór właściwego poziomu napięcia wzdłużnego w zależności od zadanej funkcji celu w programie sterownika.

Potwierdzeniem możliwości regulacji rozpływów mocy są zestawione z pomiarami obliczenia na podstawie opisu matematycznego oraz modelu symulacyjnego w Simulinku. Zależność matematyczna opisująca przesyłaną moc pomiędzy dwoma węzłami pozwala w prosty sposób wyznaczyć spodziewane wartości dla zadanych napięć dodawczych. Warto odnotować, że zależności te są uproszczonymi i powszechnie stosowanymi w obliczeniach rozpływu mocy, dlatego celowo pominięto wpływ gałęzi poprzecznych transformatorów składających się na układ przesuwnika i strat mocy na nich występujących. Model symulacyjny odzwierciedlał pracę rzeczywistego układu w granicach przyjętego błędu, czego potwierdzeniem są wyniki otrzymane dla pracy przesuwnika fazowego przy połączeniu dwóch zewnętrznych systemów. Większe rozbieżności zaobserwowano przy połączeniu systemu zewnętrznego z wewnętrznym systemem generatorowym, na który składały się dwa generatory synchroniczne. Widoczne różnice, są przede wszystkim konsekwencją modelowania układów wzbudzenia oraz napędów generatorów. Mimo pewnych uproszczeń i niedokładności w zadanych wielkościach wymaganych do zamodelowania generatorów, należy uznać, że praca całego systemu została poprawnie odtworzona w modelu symulacyjnym. Badania pracy przesuwników fazowych w testowym 5-węzłowym systemie elektroenergetycznym uwydatniły zalety rozpatrywanej jednostki względem klasycznego asymetrycznego PF. Napięcie w wybranym węźle miało niższe wartości, natomiast transfer mocy czynnej w linii z zainstalowanym PF był o 12 - 15 % mniejszy dla proponowanego rozwiązania dla tego samego kąta przesunięcia, co znajduje potwierdzenie w badaniach laboratoryjnych i symulacjach komputerowych. Obniżenie napięcia wzdłużnego skutkuje potrzebą dodania wyższego napięcia poprzecznego w linii, aby uzyskać ten sam przepływ mocy czynnej. Z kolei to przekłada się na fakt, iż dla tych samych przesunięć kątowych  $\alpha$ , układ z obniżonym napięciem wzdłużnym przesyła mniejszą moc czynną w linii z PF względem asymetrycznego przesuwnika fazowego.

Wykazane w pracy właściwości badanego przesuwnika fazowego stanowią jedynie o użyteczności opisanego rozwiązania. Zagadnienie zastosowania asymetrycznego przesuwnika fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym jest szerokim tematem badawczym. Do licznych opracowań dotyczących optymalizacji przesyłu mocy w systemie z wykorzystaniem klasycznych przesuwników fazowych (symetrycznych i asymetrycznych) należy wprowadzić możliwość użycia analizowanej jednostki, zwłaszcza z uwzględnieniem jego szerokich możliwości sterowania. W dalszej badaniach zaplanowano wykorzystanie istniejącej jednostki do pomiarów jej wpływu na pracę systemu w stanach dynamicznych, zwłaszcza przy występowaniu zakłóceń i stanów pozakłóceniowych. Opracowywane jest również rozwiązanie konstrukcyjne umożliwiające syntetyczne wykorzystanie właściwości przedstawionego przesuwnika fazowego i przygotowanie na zgłoszenia patentowego, które nie może być ujawnione.

Za najbardziej istotne rezultaty pracy dotyczącej asymetrycznego przesuwnika fazowego z regulacją napięcia wzdłużnego można przyjąć:

- projekt testowego asymetrycznego przesuwnika fazowego z regulacją wzdłużno-poprzeczną,
- wykonanie układu sterowania dla napięć wzdłużnych i poprzecznych,
- adaptacja laboratoryjnego systemu elektroenergetycznego na potrzeby prowadzonych badań,
- wyznaczenie zależności opisujących wpływ przesuwnika na przesył mocy,
- wykonanie modelu układu w programie Simulink,
- otrzymanie zbieżnych wyników obliczeń i symulacji z wynikami pomiarowymi,

• obliczenia rozpływów mocy w testowym systemie dla wybranych stanów pracy przesuwników fazowych.

#### Bibliografia

- Ogryczak T., Opala K., Automatic Adjustment of Phase Shifting Transformers the Ability to Control the Active Power Flow in International Exchange Line, ActaEnergetica, 2017, 2/31, 149–157.
- [2] Ogryczak T., Opala K., Badanie możliwości regulacji przepływu mocy czynnej w liniach wymiany międzynarodowej, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 53, pp. 87-90, 2017.
- [3] Małkowski, R., Kosmecki, M., Badania układu UPFC w oparciu o model laboratoryjny i symulacyjny, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki I Automatyki Politechniki Gdańskiej, 51, pp. 27-32, 2016.
- [4] ENTSO-E TYNDP 2020 Main Report; Version for ACER Opinion, ENTSOE, Bruksela, Belgia, 2021.
- [5] ENTSO-E Regional Investment Plan Northern Seas; Draft Version Prior to Public Consultation, ENTSOE, Bruksela, Belgia, 2020.
- [6] ENTSO-E Regional Investment Plan CCE; Draft Version Prior to Public Consultation, ENTSOE, Bruksela, Belgia, 2020.
- [7] Polster S., Renner R., *Generalisation of the Line Outage Distribution Factors on Phase Shifting Transformers*, 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2018.8541998.
- [8] Przygrodzki M., Rzepka P., Szablicki M. Sterowanie przepływami mocy w systemie elektroenergetycznym z wykorzystaniem transformatorów z regulacją wzdłużno-poprzeczną, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki I Automatyki Politechniki Gdańskiej, 42, pp. 73-80, 2015.

- [9] Ziemianek S., Model matematyczny zespołu transformatorowego z trapezoidalnym zakresem regulacji przekładni zespolonej do analiz ustalonych i quasi-ustalonych stanów pracy symetrycznych fazowo, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, nr 6, pp. 143-151, 2013.
- [10] Ziemianek S., Zespoły transformatorowe z regulacją przekładni poprzecznej jako sieciowe środki kształtowania przepływów mocy (energii) w SEE, Wiadomości Elektrotechniczne, 12, 3-8, 2006.
- [11] Ziemianek S., Zespoły transformatorowe z regulacją przekładni poprzecznej w optymalizacji stanów pracy systemu elektroenergetycznego, Konferencja Optymalizacja w elektroenergetyce '05, Jachranka, 29-30.09.2005.
- [12] Sosnina E., Loskutov A., Asabin A., Bedretdinov R., Kryukov E., *Power flow control device prototype tests*, 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT-Asia), 2016, pp. 312-316, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2016.7796404.
- [13] Szczepanik J., Wielofazowy przekształtnik macierzowy dla zastosowań w systemie elektroenergetycznym, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki Kraków, Wydawnictwo PK, Polska, 2015.
- [14] Wasiak I., ELEKTROENERGETYKA W ZARYSIE Przesył i rozdział energii elektrycznej, Politechnika Łódzka, Łódź, 2009.
- [15] Zdun Z., Księżyk K., Zdun T., Praca elementów sieci przesyłowej, Systemy elektroenergetyczne, Wykład 4, PLANS Sp.z o.o., Warszawa, 2020.
- [16] Kowalak, R., Autoreferat, Autoreferat habilitacyjny, Gdańsk, 2019.
- [17] Zbroński A., Metoda lokalizacji układów kompensatorów statycznych w systemie elektroenergetycznym, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2016.
- [18] Purchała K., Rynek energii elektrycznej w UE: dobry, zły i brzydki, Elektroenergetyka : współczesność i rozwój, Nr 2(19), 2018, ss. 6- 13.
- [19] Kocot H., Korab R., Owczarek R., Przygrodzki M., Żmuda K., Metody przeciwdziałania nieplanowym przepływom mocy w połączonym systemie elektroenergetycznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka, Zeszyt 4 (236), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2015.

- [20] PSE S.A. Podsumowanie stanowiska Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A. w sprawie propozycji modelu rynku energii elektrycznej, zawartej w pakiecie Ćzysta energia dla wszystkich Europejczyków", Raport PSE S.A., 2017.
- [21] Alassi A., Bañales S., Ellabban O., MacIver C., HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 112, pp. 530-554, 2019.
- [22] International Energy Agency, Large-Scale Electricity Interconnections Technology and prospects for cross-regional networks, Paryż, Francja, 2016.
- [23] Jędrzejewski P., *Modelling the European cross-border electricity transmission*, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology, Sweden, 2020.
- [24] Urząd Regulacji Energetyki Sprawozdanie z działalności Prezesa URE w 2019r., URE,
   2020
- [25] Joint Study Joint Study by ČEPS, MAVIR, PSE and SEPS Regarding the Issue of Unplanned Flows in the CEE Region In Relation to the Common Market Area Germany—Austria, Raport, 2013.
- [26] Machowski J., Regulacja systemu elektroenergetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2017.
- [27] Machowski J., Lubośny Z., Stabilność systemu elektroenergetycznego, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2018.
- [28] Lis R., Problemy z oceną i sposoby poprawy stabilności napięciowej sieci przesyłowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013.
- [29] Gyugyi,L., A Unified Power Flow Control Concept for Flexible ACTransmission Systems, IEE PROCEEDINGS-C, Vol. 139, No. 4, July 1992.
- [30] Gyugyi L., Schauder C. D., Williams S. L., Rietman T. R., Torgerson D. R., Edris A., *The unified power flow controller: a new approach to power transmission control*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2, pp. 1085-1097, April 1995, doi: 10.1109/61.400878.

- [31] Nilsson S.L., Xu S., Lei B., Deng Z., Andersen B.R. Application Examples of UPFC and Its Variants In: Andersen B., Nilsson S. (eds) Flexible AC Transmission Systems. CIGRE Green Books. Springer, Cham., 2020, https://doi.org/10.1007/978-3-030-35386-515
- [32] Okoń T., Wilkosz K., Wpływ trybów pracy układu UPFC na estymację stanu systemu elektroenergetycznego, Acta Energetica, 2011, nr 3, ss. 53-59.
- [33] Bulac C., Eremia M., Balaurescu R., Stefanescu V., Load flow management in the interconnected power systems using UPFC devices, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,, 2003, pp. 5 pp. Vol.3-, doi: 10.1109/PTC.2003.1304360.
- [34] Mohamed J. K., *Investigation of the application of UPFC controllers for weak bus systems subjected to fault conditions*, University of Bradford, 2012.
- [35] Shahgholian G., Mahdavian M., Janghorbani M., Eshaghpour I., Ganji E., Analysis and simulation of UPFC in electrical power system for power flow control, 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017, pp. 62-65, doi: 10.1109/ECTI-Con.2017.8096173.
- [36] Radwański M., Dobór nastawień przekładni poprzecznych oraz adaptacyjne dostosowywanie (w stanach quasi-ustalonych)obszarów regulacji grup przesuwników fazowych w SEE, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2016.
- [37] Szablicki M., Rzepka P., Przygrodzki M., Application of Voltage-regulating and Phase Shifting Transformers to Control Power Flows in the Power System, Acta Energetica, vol. 4, no. 25, pp. 0-0, Oct. 2015.
- [38] Schauder C.D., Williams S.L., Gyugyi L., Transmission line power controller with a continuously controllable voltage source responsive to a real power demand and a reactive power demand, Patent nr US5734257A, USA, 1994.
- [39] Gyugyi L., Nelson R.J., *Transmission line power flow controller with unequal advancement and retardation of transmission angle*, Patent nr US5469044A, USA, 1995.

- [40] Schauder C., The unified power flow controller-a concept becomes reality, IEE Colloquium Flexible AC Transmission Systems - The FACTS, 1998, pp. 7/1-7/6, doi: 10.1049/ic:19980973.
- [41] Chang B.H., Jeon Y.S., Kwak N.H., Choo J.B., Xu X.K., Lam B.P., Study of UPFC Operation Strategies in KEPCO System(1)-Steady State Characteristics, IFAC Proceedings Volumes, Volume 36, Issue 20, 2003, Pages 1079-1085, ISSN 1474-6670, doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34619-0.
- [42] Kim S.Y., Yoon J.S., Chang B.H., Baek D.H., *The operation experience of KEPCO UPFC*, 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, pp. 2502-2505 Vol. 3, doi: 10.1109/ICEMS.2005.203026.
- [43] J. Sun et al., Operating characteristics of the convertible static compensator on the 345 kV network, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004., 2004, pp. 732-738 vol.2, doi: 10.1109/PSCE.2004.1397740.
- [44] Kong X., Gong X., Li J., Li P., Analysis on the Transmission Line Power Flow Control Strategy of the UPFC Project in Western Nanjing Power Grid, 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2018, pp. 3081-3086, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601746.
- [45] IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers, in IEEE Std C57.135-2011 (Revision of IEEE Std C57.135-2001), vol., no., pp.1-50, 19 Aug. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5993462.
- [46] Klimpel A., Lubicki W., Wybrane zagadnienia doboru przesuwników fazowych, Konferencja Aktualne problemy budowy, rozwoju i eksploatacji sieci elektroenergetycznych w Polsce, grudzień, (2010), Warszawa, Polska
- [47] Yu M., Yuan J., Li Z., Li F., Yang X., Zhang W., Xu S., Mei J., Power Flow Optimization and Economic Analysis Based on High Voltage Phase Shifting Transformer, Energies, 2022; 15(7):2363. https://doi.org/10.3390/en15072363
- [48] Korab R., Owczarek R., Kształtowanie transgranicznych przepływów mocy z wykorzystaniem przesuwników fazowych, Rynek Energii, 2012, 5, 8 - 15.

- [49] Albrechtowicz P., Phase-Shifting Transformer Efficiency Analysis Based on Low-Voltage Laboratory Units, Energies, 2021; 14(16):5049, doi.org/10.3390/en14165049.
- [50] Bednarczyk T., Szablicki M., Halinka A., Rzepka P., Sowa P., Phase Shifting Transformer Electromagnetic Model Dedicated for Power System Protection Testing in a Transient Condition, Energies, 2021; 14(3):627, doi.org/10.3390/en14030627.
- [51] Verboomen J., Van Hertem D., SchavemakerP. H., Kling W. L., Belmans R., *Phase shi-fting transformers: principles and applications*, 2005 International Conference on Future Power Systems, 2005, pp. 6 pp.-6, doi: 10.1109/FPS.2005.204302.
- [52] Ramamoorty M., Toma L., *Phase Shifting Transformer: mechanical and static devices*, pp. 409-458, Rozdział 7, 2016.
- [53] Van Hertem D., THE USE OF POWER FLOW CONTROLLING DEVICES IN THE LI-BERALIZED MARKET, Katholieke Universiteit Leuven, 2009, D/2009/7515/7, Haverlee, Belgium.
- [54] Siemens Energy, Phase Shifter Application Workshop, PJM Power Pool, March. 2015. Dostęp online: https://pjm.com/-/media/committees-groups/taskforces/partf/20150514/20150514-item-03-pjm-phase-shifting-transformerprinciples.ashx (dnia 25.03.2021r.).
- [55] Schmidt T., Phase-shifting transformers Applications and Technology, ABB AG Transformers, 2016.
- [56] Siemens, *Transform(ers) Our Future*, Siemens AG Österreich Transformers Weiz, 2019.
- [57] Tamini Energy Transformers A huge Phase Shifting Transformer in the world. Four units installed in the Italian grid, Dostęp online: http://www.tamini.it/product-focus/phase-shifting-transformers-pst (dnia 24.01.2022r.).
- [58] Albrechtowicz P., Szczepanik J., *The Comparative Analysis of Phase Shifting Transformers*, Energies, 2021; 14(14):4347, doi.org/10.3390/en14144347.
- [59] Sen K. K.; Sen M. L., Versatile power flow transformers for compensating power flow in a transmission line, Patent nr US6420856B1, USA, 2002.

- [60] Sen K. K.; Sen M. L., Versatile power flow transformers for compensating power flow in a transmission line, Patent nr US6384581B1, USA 2002.
- [61] Sen K. K.; Sen M. L., Introducing the family of Sen"transformers: a set of power flow controlling transformers, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 149-157, Jan. 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2002.803725.
- [62] Sen K. K.; Sen M. L., Comparison of the Sen"transformer with the unified power flow controller, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1523-1533, Oct. 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.817817.
- [63] Sen K. K.; Sen M. L., Unique capabilities of Sen Transformer: A power flow regulating transformer, 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741518.
- [64] Sen K. K.; Sen M. L., Comparison of operational characteristics between a Sen Transformer and a phase angle regulator, 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741516.
- [65] Yuan J., Chen L., Chen B., *The improved Sen transformer A new effective approach to power transmission control*, 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014, pp. 724-729, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953467.
- [66] Bhaskar M. A., Venkatesh A., Dash S. S., Subramani C., Kumar M. J., Voltage stability improvement using "Sen" transformer, India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/IICPE.2011.5728141.
- [67] Patel D., Chowdury A., Dynamic Control and Performance of a Sen Transformer for Stabilizing an AC Transmission System and Improved Voltage Profile, 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), 2018, pp. 85-90, doi: 10.1109/ICPECTS.2018.8521640.
- [68] ENTSO-E Phase Shift Transformers Modelling, ENTSOE, Bruksela, Belgia, 2014.
- [69] Albrechtowicz P., Cisek P., An impact of the line resistance on the power flow calculations with installed phase-shifting transformer in different voltage levels power systems, Electric Power Systems Research, Volume 209, 2022, 107970, ISSN 0378-7796, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107970.

- [70] PSE SA, Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci. Tekst ujednolicony obowiązujący od dnia 29 listopada 2021r., Warszawa, Polska, 2021.
- [71] Sarnicki M., WPŁYW PRZESUWNIKÓW FAZOWYCH NA PRACĘ SYSTEMU ELEKTRO-ENERGETYCZNEGO, Politechnika Gdańska, Gdańsk, Polska, 2018.
- [72] Olesz M., Rózga J., Wymagania prawne dotyczące jakości energii w instalacjach elektroenergetycznych, XLI Konferencja Naukowo-Techniczna GDAŃSKIE DNI ELEKTRYKI, Gdańsk, Polska, 2016.
- [73] PN EN 50160: 2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, 2014.
- [74] Szczepanik J., Rozegnał B., *The development of the real life model of the five node power system*, Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika, 2015, 112, 83–102.
- [75] Kanicki A., Systemy elektroenergetyczne, Dostęp online: http://www.ssdservice.pl/FTPserwer/ELEKTROTECHNIKA/systemy/systemy%20roz.%203.pdf (dnia 22.03.2022r.).
- [76] Zdun Z., Księżyk K., Zdun T., Obliczenia rozpływowe, Systemy elektroenergetyczne, Wykład 7, PLANS Sp.z o.o., Warszawa, 2020.
- [77] Trias A., The Holomorphic Embedding Load Flow method, 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 2012, s. 1–8, ISSN: 1932-5517, doi: 10.1109/PESGM.2012.6344759.
- [78] Trias A., Fundamentals of the Holomorphic EmbeddingLoad-Flow Method, Computing Research Repository (CoRR), vol. abs/1509.02421, 2015, arXiv: 1509.02421, url: http://arxiv.org/abs/1509.02421.
- [79] Wędzik A., HELM nowa metoda obliczania rozpływów mocy w sieciach elektrotenergetycznych, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 62, XIX Konferencja Naukowa AKTUALNE PROBLEMY W ELEKTROENER-GETYCE APE'19, Jastrzębia Góra, 12-14 czerwca 2019, doi: 10.32016/1.62.05
- [80] Zimmerman R. D., Murillo-Sanchez C. E. MATPOWER User's Manual Version 7.1, [Software]. Dostępne: https://matpower.org, 2020, doi: 10.5281/zenodo.4074135

## **Dodatek** A

## Parametry 5-węzłowego systemu do obliczeń rozpływów mocy

Dane bazowe dla 5-węzłowego systemu elektroenergetycznego, który wykorzystano do obliczeń w celu pokazania wpływu pracy proponowanego PF przy obniżonym napięciu oraz w pracy quasi-symetrycznej i porównania z asymetrycznym PF.

Moc bazową przyjęto jako 250 MVA (mpc.baseMVA = 250).

Każdemu węzłowi przypisano odpowiedni typ (1 - odbiorczy, 2 - wytwórczy, 3 -bilansujący) oraz dobrano parametry.

bus_i	type	Pd	Qd	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	Vmax	Vmin
1	3	150	50	0	0	1	1	0	400	1	1.1	0.9
2	1	100	40	0	0	1	1	0	400	1	1.1	0.9
3	2	90	0	0	0	1	1	0	400	1	1.1	0.9
4	1	200	140	0	0	1	1	0	400	1	1.1	0.9
5	2	0	0	0	0	1	1	0	400	1	1.1	0.9

Tablica A.1: Parametry każdego węzła systemu.

Zdefiniowano wielkości opisujące poszczególne węzły pod kątem generacji energii. Założono wielkości generowanych mocy czynnych i biernych, a także wartości minimalne i maksymalne mocy biernej. Wszystkie parametry i dane zawarto w Tablicy A.2.

bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	status	Pmax	Pmin
1	0	0	0	0	1	100	1	800	0
2	0	0	0	0	1	100	1	0	0
3	200	75	125	-125	1.06	100	1	250	0
4	0	0	0	0	1	100	1	0	0
5	360	165	250	-250	1.06	100	1	400	0

Tablica A.2: Parametry generatorów.

Wprowadzenie danych każdej z linii wymagało określenia węzła początkowego (fbus) i końcowego (tbus). Rezystancja, reaktancja indukcyjna oraz susceptancja zostały wyznaczone na podstawie paremetrów linii z modelu laboratoryjnego. W zależności od typu PF i wartości przesunięcia kątowego zmieniano wartości kąta (angle) oraz przekładni (ratio), a także wprowadzano obliczone wartości elementów wzdłużnych PF do danej linii. Przyjęto, że zmiany kątów mogą się zawierać w przedziale od -360° do 360°.

fbus	tbus	r	X	b	rateA	rateB	rateC	ratio	angle	status	
1	2	0.0075	0.045	0.14	0	0	0	0	0	1	
1	4	0.015	0.09	0.28	0	0	0	0	0	1	
2	3	0.0025	0.015	0.047	0	0	0	0	0	1	
3	4	0.02	0.12	0.375	0	0	0	0	0	1	
3	5	0.0025	0.015	0.047	0	0	0	0	0	1	
4	5	0.015	0.09	0.28	0	0	0	0	0	1	

Tablica A.3: Parametry poszczególnych gałęzi tworzących system.

# **Dodatek B**

# Parametry elementów układu pomiarowego

Parametry poszczególnych elementów wchodzących w skład układu pomiarowego przedstawiono w kolejnych tablicach. W Tablicy B.2 zawarto dane dotyczące karty pomiarowej NI.

Parametr	Wartość		
Rozdzielczość A/C	16-bit		
Rozdzielczość czasowa	50 ns		
Dokładność czasowa	50 ppm		
Próbkowanie	1,25 MS/s (1 kanał)		
TIOKOwallie	1 MS/s (wielokanałowo)		
Pasmo przenoszenia	1,7 MHz		
Impedancia waiściowa	>10 GΩ/100pF		
impedancja wejsciowa	(do masy)		
Waiścia	16 różnicowych		
wejsela	32 pojedyncze		
Maksymalne napięcie	±11 V		
wejść analogowych	(względem AI GND)		
Współczynnik CMRR	100 dB		
(DC do 60 Hz)	100 UD		
Prąd wejściowy polaryzacji	± 100 pA		

Tablica B.1: Dane katalogowe karty pomiarowej NI USB-6259 BNC (źródło: NI Corp.).

Dokładność dla zakresu $\pm 10~{ m V}$							
Szum losowy	$280 \ \mu V_{RMS}$						
Dokładność bezwzględna dla	10 <b>2</b> 0 µV						
pełnego zakresu pomiarowego	1920 µV						
Czułość	112,0 <i>µV</i>						
Błąd wzmocnienia	60 ppm wart. odczytanej						
Błąd przesunięcia	20 ppm zakresu						
Przesunięcie cieplne	21 ppm zakresu/°C						
<b>Dokładność dla zakresu</b> $\pm 5V$							
Szum losowy	140 $\mu V_{RMS}$						
Dokładność bezwzględna dla	1010						
pełnego zakresu pomiarowego	1010 $\mu v$						
Czułość	56,0 µV						
Błąd wzmocnienia	70 ppm wart. odczytanej						
Błąd przesunięcia	20 ppm zakresu						
Przesunięcie cieplne	21 ppm zakresu/°C						
Dokładność dla z	zakresu ±2 V						
Szum losowy	57 $\mu V_{RMS}$						
Dokładność bezwzględna dla	410						
pełnego zakresu pomiarowego	410 μ v						
Czułość	22,8 µV						
Błąd wzmocnienia	s 70 ppm wart. odczytanej						
Błąd przesunięcia	20 ppm zakresu						
Przesunięcie cieplne	24 ppm zakresu/°C						

Tablica B.2: Parametry karty NI USB-6259 BNC dla zakresów 10, 5 i 2 V (źródło: NI Corp.).

Pomiar napięć w układzie testowym realizowano z wykorzystaniem różnicowych sond napięciowych firmy Pintek (Tablica B.3).

Z kolei rejestracja prądów wykonana była z wykorzystaniem cęgów prądowych firmy Fluke, których parametry przedstawiono w Tablicy B.4.

Parametr	Wartość
Impedancja wejściowa	9 <i>M</i> Ω/ 1,7 <i>pF</i> (różnicowo)
	4,5 <i>M</i> Ω/3,4 <i>pF</i> (do masy)
Napięcie wyjściowe	$\leq \pm 8V$
Współczynnik CMRR (tłumienie 100:1)	
Dla 60 Hz	> 80 dB
Dla 100 Hz	> 60 dB
Dla 1 MHz	> 50 dB
Maksymalne napięcie wej. 1600 $V_{(DC+ACpeak)}$ (tłumienie 100:1)	
Dokładność	$\leq$ $\pm 2\%$
Pasmo przenoszenia	35 MHz
Szum	$\leq 1,0mV_{RMS}$

Tablica B.3: Parametry różnicowych sond napięciowych Pintek DP-35 (źródło: Pintek Electronics Co Ltd.).

Tablica B.4: Parametry cęgów prądowych Fluke AC i1000s (źródło: Fluke Corp.).

Parametr	Wartość
Pasmo przenoszenia	od 5 Hz do 100 kHz
Max. wart. di/dt	$10 A/\mu s$
Wpływ zbliżenia	$1,0 mA/A_{AC}$
Czas narastania / opadania	$< 40 \ \mu s$
Dokładność	2% wart. odczytanej $\leq 5mV$
	(dla zakresu pom. od 100 mA do 100 A)
Napięcie wyjściowe	$\leq \pm 2V$
Maksymalne przesunięcie fazowe (10mV/A - zakres 100 A)	
Dla prądu od 0,1 do 5 A	N/A
Dla prądu od 5 do 20 A	15°
Dla prądu od 20 do 100 A	10°

Mierzone przebiegi prądów i napięć rejestrowano z wykorzystaniem programu SignalExpress firmy National Instruments.