

Politechnika Krakowska

im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Paweł Albrechtowicz

***Zastosowanie przesuwników fazowych do regulacji
rozpliwów mocy w systemach elektroenergetycznych***

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Promotor:

dr hab. inż. Jerzy Szczepanik, prof. PK

Promotor pomocniczy:

dr inż. Bartosz Rozegnał

Kraków, 2022

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 rozptyłów 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 rozptyłów mocy. Wspomniana kontrola rozptyłów mocy dotyczy także minimalizowania lub całkowitej eliminacji występowania przepływow 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 wzbudające i szeregowo, z wykorzystaniem elementów energoelektronicznych instalowanych w obwodzie pośredniczącym pomiędzy transformatorem wzbudającym 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 rozptyłów mocy z zachowaniem norm i wymagań dotyczących parametrów jakości energii elektrycznej, określonych przez poszczególnych operatorów systemów. 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.

Ze znanych układów przesuwników fazowych wyróżnić można układ pracujący jako asymetryczny, ale pozwalający na regulowanie, oprócz napięcia dodawczego (poprzecznego) wprowadzanego do linii poprzez szeregowo 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 rozptyłów mocy.

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 rozwiązanie 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 rozptyłów mocy dla wybranych przypadków testowych.

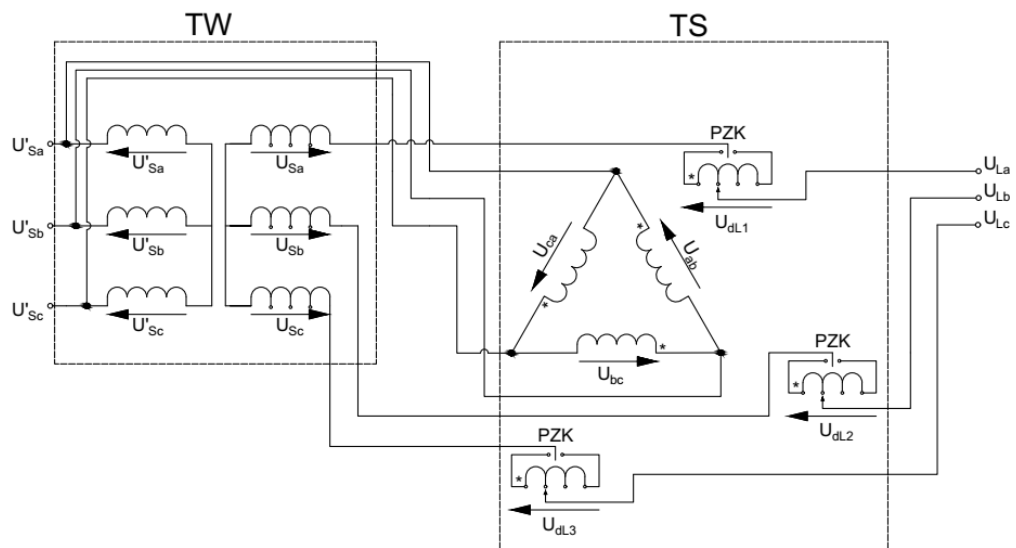
Realizacja wymienionego celu pracy jest związana z wykazaniem słuszności tezy:

Asymetryczny przesuwnik fazowy o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym może być skutecznym urządzeniem kontrolującym rozptyły 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. W kolejnym etapie, jednostki tworzące układ badanego przesuwnika zostały odpowiednio skonfigurowane, aby uzyskać przesunięcie kątowe napięcia dodatkowego równe 90° , wraz z wykonaniem układu sterowania transformatorem dodatkowym (szeregowym; regulacja napięcia dodatkowego/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 rozptyłów mocy w systemie z przesuwnikiem fazowym.

W związku z opisanymi działaniami, praca składa się z 8 rozdziałów, w których przedstawiono problematykę kontroli rozptyłów mocy w systemach elektroenergetycznych, przegląd możliwych metod i urządzeń wykorzystywanych do regulacji przesyłanej mocy, opisano testowy układ proponowanego przesuwnika fazowego, pomiary laboratoryjne i symulacyjne, a także obliczenia rozptyłów mocy w zmodyfikowanym systemie testowym złożonym z pięciu węzłów. Podsumowanie rozprawy zawarto we wnioskach, po których wymieniono spis literatury oraz dwa dodatki opisujące parametry testowego systemu do obliczeń rozptyłów mocy oraz elementy układu pomiarowego.

Na rysunku 1.1 pokazano schemat połączeń proponowanej jednostki z wyróżnieniem transformatora wejściowego (TW) regulującego napięcie wzdłużne oraz transformatora dodatkowego (TD) kontrolującego wartość napięcia dodatkowego.

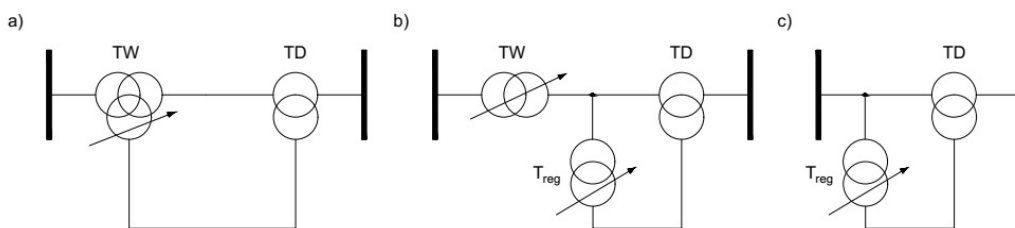


Rysunek 1.1: Schemat ideowy testowego układu przesuwnika fazowego z regulacją napięcia wzdłużnego i poprzecznego (TW - transformator wejściowy, TD - transformator dodawczy).

Rozdział 2

Transformatory dodawcze

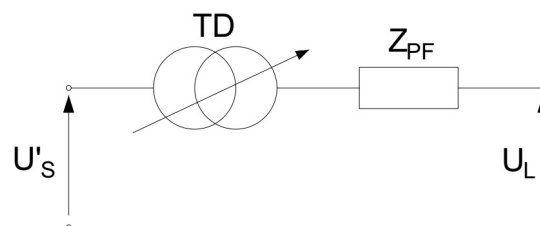
Realizacja idei napięć dodawczych jako środka do regulacji rozptyłów mocy w systemach elektroenergetycznych możliwa jest z wykorzystaniem transformatorów dodawczych TD włączanych szeregowo w linię przesyłową. Możliwych jest kilka typów układów zasilających transformator dodawczy, przez co uzyskuje się różne efekty napięć dodawczych na napięciu linii przesyłowej. Jednakże w każdym przypadku układ składa się z jednostki włączanej szeregowo w linię przesyłową oraz z jednostki bocznikowej (wzbudzająca). Możliwa jest regulacja wzdłużna napięcia, regulacja poprzeczna oraz regulacja wzdłużno-poprzeczna. Przykłady rozwiązań przedstawiono na Rysunku 2.1. W przypadku układu z Rysunku 2.1a rolę transformatora wzbudzenia pełni trzecie uzwojenie transformatora wejściowego TW.



Rysunek 2.1: Przykłady zasilania transformatora dodawczego z możliwymi regulacjami napięcia wzdłużnego, TW - transformator wejściowy, TD - transformator dodawczy, T_{reg} - transformator regulacyjny.

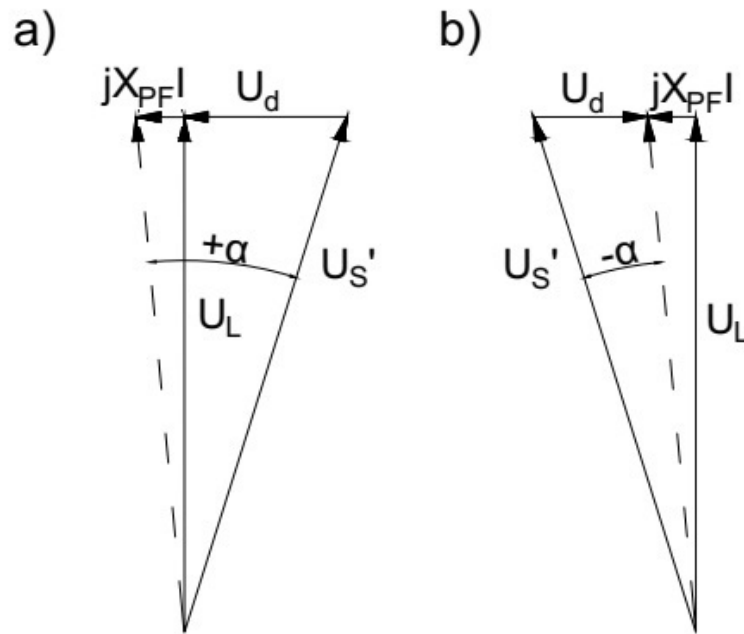
2.1 Przesuwniki fazowe

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 ϑ znane jest od wielu lat. Schemat zastępczy PF przedstawiono na Rysunku 14.



Rysunek 2.2: Schemat poglądowy przesuwnika fazowego.

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 2.3: Wykresy wskazowe dla napięcia dodawczego a) kąt wyprzedzający b) kąt opóźniający.

Realizacja regulacji przepływów mocy w systemie jest dokonywana poprzez zmianę kąta ϑ o wartość wprowadzonego przesunięcia fazowego (kąta α) 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 ϑ przedstawiono na Rysunku 2.3.

Rozdział 3

Laboratoryjny układ przesuwника fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym i poprzecznym

3.1 Proponowany przesuwnik fazowy

Na podstawie wiadomości teoretycznych został zaprojektowany przesuwnik fazowy, realizujący regulację zarówno napięcia wzdłużnego, a także napięcia dodatkowego 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.

Transformator wejściowy, regulujący napięcie wzdłużne, zaprojektowano jako element umożliwiający zarówno podnoszenie, jak i obniżanie napięcia. 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.

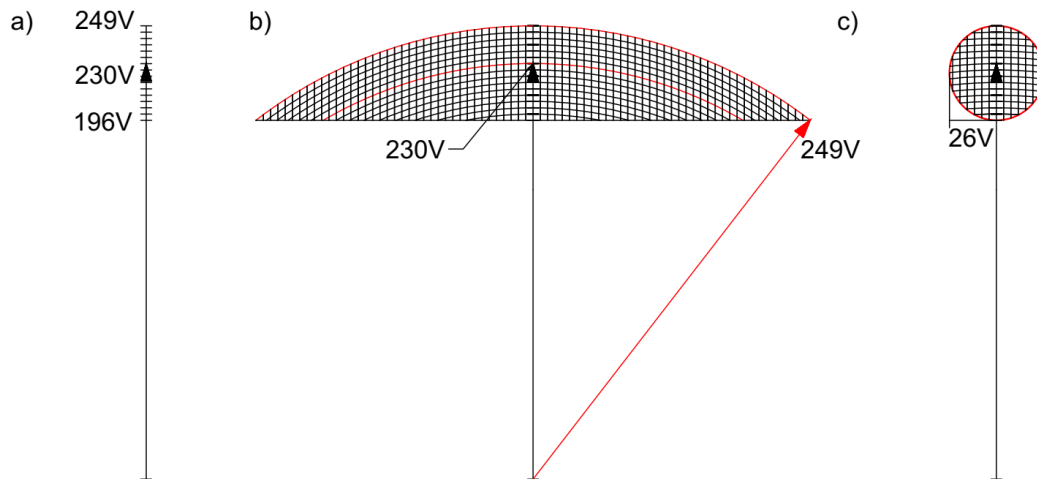
Jako jednostkę wprowadzającą napięcie dodatkowe do układu, zaprojektowano transformator dodatkowy, który ma możliwość zmiany grupy połączeń strony pierwotnej (D lub Y). Z kolei uzwojenia strony wtórnej, z racji na specyfikę zastosowania są wykonane jako izolowane. Do regulacji wartości napięć dodatkowych nie zastosowano klasycznego układu z odczepami, 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 dodatkowego.

Zależność przesyłanej mocy czynnej w linii z przesuwnikiem fazowym można obliczyć na podstawie równania:

$$P = U_R \frac{R_L(U_S \cos \vartheta - U_d \sin \vartheta - U_R) + (X_L + X_{PF})U_S \sin \vartheta + U_d \cos \vartheta}{R_L^2 + (X_L + X_{PF})^2} \quad (3.1)$$

gdzie: U_R i U_S - napięcia węzła odbiorczego i źródłowego, U_d - napięcie dodatkowe, ϑ - kąt mocy, R_L i X_L - rezystancja i reaktancja linii, X_{PF} - reaktancja uzwojenia szeregowego.

Dzięki przyjętej konstrukcji przesuwnika o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym możliwe jest wyznaczenie zakresu sterowania napięciem wyjściowym, podobnie jak ma to miejsce w przypadku urządzenia UPFC (Rysunek 3.1).



Rysunek 3.1: Wybrane stany pracy badanego przesuwника fazowego: a) praca transformatorowa - regulacja napięcia wzdłużnego, b) praca na stałą wartość napięcia, c) maksymalny okrąg regulacji napięć wyjściowych (analogiczny do UPFC).

Proponowana jednostka może funkcjonować jako transformator sieciowy regulujący wartość napięcia, przesuwnik fazowy z regulowanym napięciem wyjściowym lub realizujący funkcje analogiczne jak UPFC.

3.2 Stanowisko pomiarowe

Układ laboratoryjny przesuwника fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym i poprzecznym został zrealizowany w oparciu o dwa transformatory o specjalnej konstrukcji. Pomiary wykonywano z wykorzystaniem cęgów prądowych Fluke ac i1000s i sond różnicowych Pintek DP-35. Przebiegi prądów i napięć rejestrowano z użyciem karty pomiarowej NI USB-6259 BNC w programie SignalExpress. Przygotowany przesuwnik fazowy przedstawiono na rysunkach 3.2 - 3.3.



Rysunek 3.2: Transformator dodawczy TD.



Rysunek 3.3: Transformator wejściowy TW.

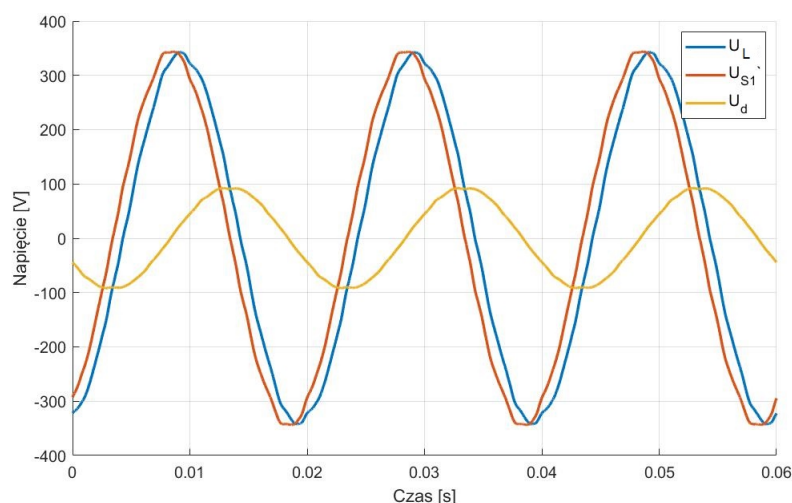
Rozdział 4

Badania laboratoryjne proponowanego przesuwника fazowego

W rozprawie przeprowadzono pomiary dla pojedynczej linii, dwóch linii równoległych o równej i różnej długości, które łączyły dwa systemy zewnętrzne, tj. zasilane z sieci zewnętrznej oraz system zewnętrzny z systemem wewnętrznym złożonym z dwóch generatorów synchronicznych.

4.1 Jałowy stan pracy

Badania przesuwника fazowego zostały przeprowadzone w stanie bez obciążenia w celu wyznaczenia wartości osiągniętych przesunięć kątowych oraz napięć wyjściowych. Na rysunku 4.1 przedstawiono przebiegi napięć chwilowych PF dla stanu jałowego i wartości napięcia wzdłużnego równego 230V.



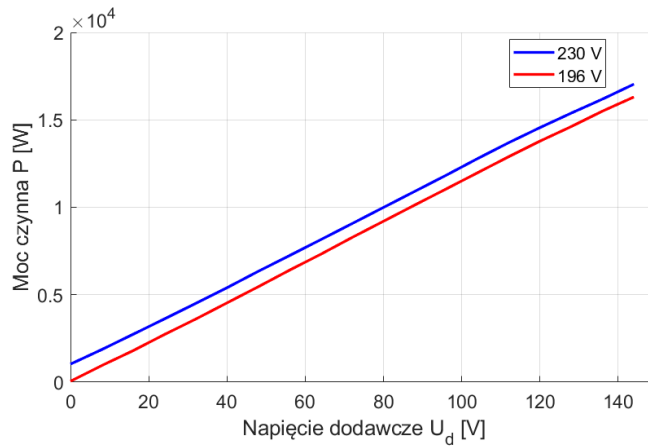
Rysunek 4.1: Przebiegi napięcia wejściowego u'_{S1} , wyjściowego z PF u_{PF} i dodatkowego u_d dla przekładni transformatora wejściowego równej 400/376 oraz zadanego napięcia dodatkowego 64V.

Z przebiegów na rysunku 4.1 widać, że przesuwnik wprowadza napięcie dodatkowe przesunięte o -90° , wskutek czego napięcie wyjściowe z PF opóźnia się względem napięcia wejściowego.

4.2 Pojedyncza linia wymiany mocy

Międzysystemowa wymiana mocy realizowana jest poprzez linie transgraniczne. Jako jeden z analizowanych przypadków pracy proponowanego przesuwника fazowego wybrano połączenie dwóch systemów za pomocą jednej linii. Na rysunku 4.2 przedstawiono porównanie przesyłanej mocy w funkcji napięć dodatkowych przy przekładni transformatora wejściowego $\eta = 1$ oraz obniżonym napięciu wzdłużnym ($\eta = 1, 18$).

Porównanie dwóch przypadków przedstawionych na Rysunku 4.2 pozwala na stwierdzenie, iż mimo mniejszego napięcia wzdłużnego, wartość przesyłanej mocy czynnej pojedynczą linią jest taka sama dla napięć dodatkowych większych o ok. 8 V (wartość fazowa RMS). Z przedstawionych wartości napięć wyjściowych w Tabeli 4.1 widać, iż dla obniżonego napięcia wzdłużnego



Rysunek 4.2: Wykres przesyłanych mocy czynnych linią o długości 22 sekcje dla przypadku napięcia wzdłużnego równego (400/230 V, przebieg niebieski) oraz obniżonego (340/196 V, przebieg czerwony).

otrzymane wartości na wyjściu układu są zdecydowanie mniejsze niż dla znamionowego napięcia wzdłużnego. Dla maksymalnej wartości napięcia dodatkowego równego 144 V w przypadku napięcia wzdłużnego nominalnego otrzymano na wyjściu przesuwника fazowego napięcie 254,8 V. Wartość ta jest o ponad 10% większa od nominalnego napięcia fazowego sieci (230 V). Dla analogicznego przypadku napięcia dodatkowego i obniżonego napięcia wzdłużnego uzyskano na wyjściu przesuwника 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 dodatkowego. Uwzględniając dane zobrazowane na Rysunku 4.2 widać, że zastosowanie obniżonego napięcia wzdłużnego pozwala na transfer mocy czynnej o takiej samej wartości przy napięciu dodatkowym większym o ok. 8 V w porównaniu do nominalnego napięcia wzdłużnego.

Tablica 4.1: Wartości poszczególnych napięć dla przekładni transformatora wejściowego TW 400/400 oraz 400/340.

U_{dzad} [V]	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
U_{L230V} [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	
U_{L230V} [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	

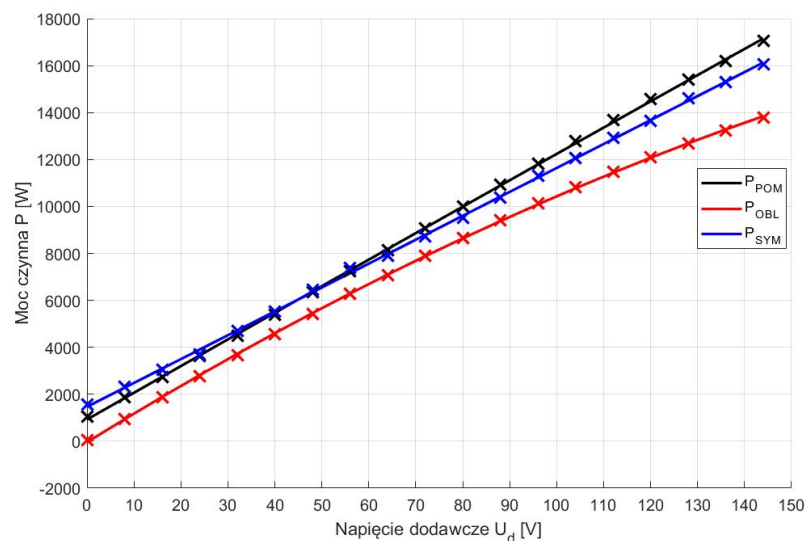
Rozdział 5

Obliczenia symulacyjne oraz numeryczne

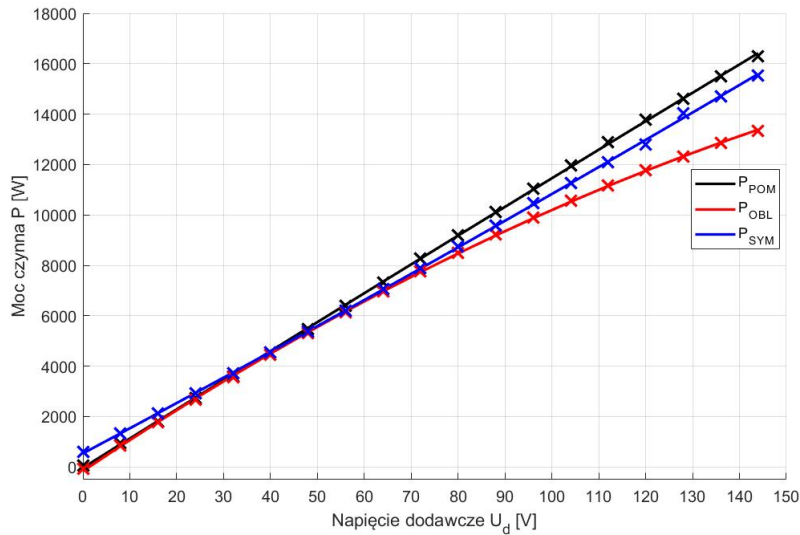
Obliczenia przeprowadzono dla przypadków pomiarowych, a także wykonano obliczenia roz-
pływów mocy w systemie testowym, którym był zmodyfikowany 5-węzłowy system IEEE.

5.1 Pojedyncza linia wymiany

Dla pojedynczej linii wymiany wykonano obliczenia oraz symulacje dla linii o długości 22
sekcje i kierunku włączenia uzwojenia dodatkowego skutkującego kątem wyprzedzającym. Otrzy-
mane przebiegi mocy czynnych przesyłanych linią przedstawiono na Rysunku 5.1 dla przekładni
transformatora wejściowego TW $\eta = 400/376$ oraz na Rysunku 5.2 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 dodatkowych różnice obliczonych wielkości od zmierzonych są największe i
wynoszą 3,3 kW dla $U_d = 148$ V.

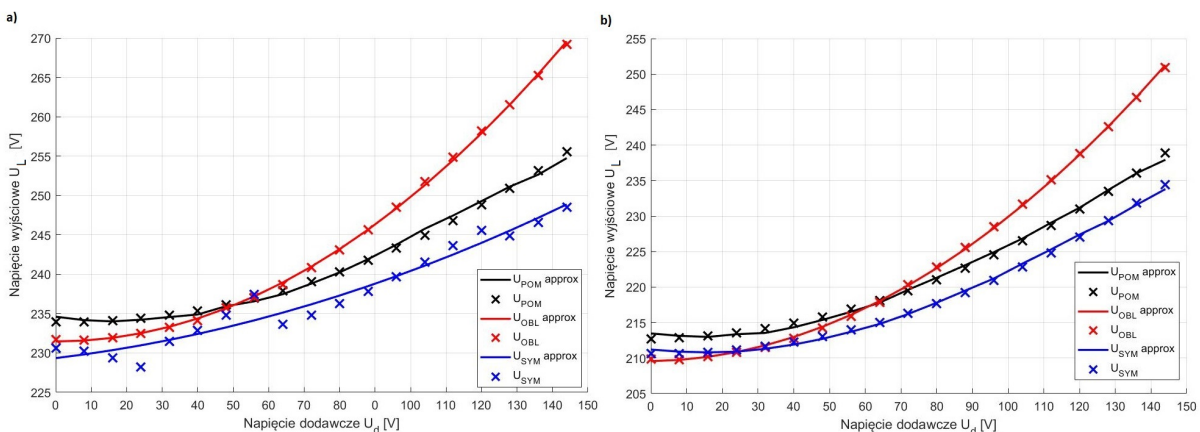


Rysunek 5.1: Przesyłana moc czynna pojedynczą linią wymiany o długości 22 sekcje w funkcji
napięcia dodatkowego dla przekładni TW $\eta = 400/376$ i uzwojenia szeregowego TD włączonego
w kierunku wyprzedzającym w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń
(czerwone) i symulacji (niebieskie).

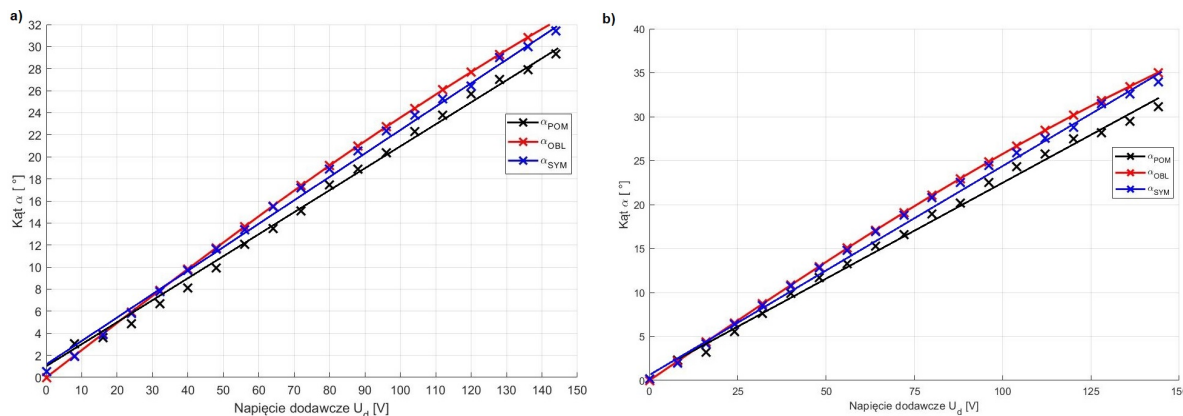


Rysunek 5.2: Przesyłana moc czynna pojedynczą linią wymiany o długości 22 sekcje w funkcji napięcia dodatkowego dla przekładni TW $\eta = 400/340$ i uzwojenia szeregowego TD włączonego w kierunku wyprzedzającym w przypadku: pomiarów laboratoryjnych (czarne), obliczeń (czerwone) i symulacji (niebieskie).

Wykresy zebrane na Rysunku 5.3 przedstawiają napięcia wyjściowe z PF. Dla obniżonego napięcia wzdłużnego, wartości dla wszystkich trzech metod są zbieżne w zakresie napięć dodatkowych 0 - 90 V. Przy wyższych napięciach dodatkowych 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 5.3: Napięcia wyjściowe z PF w funkcji napięcia dodatkowego dla pojedynczej linii o długości 22 sekcje i przekładni TW: a) $\eta = 400/376$, b) $\eta = 400/340$.

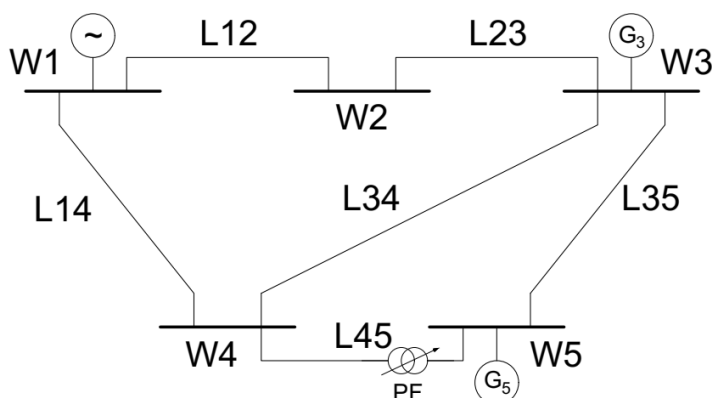


Rysunek 5.4: Przebiegi kąta przesunięcia α w funkcji napięcia dodatkowego dla przekładni TW:
a) $\eta = 400/376$, b) $\eta = 400/340$.

Analizując wprowadzane przesunięcia kątowe α 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 5.4). Widoczne różnice pojawiają się dopiero przy napięciu dodatkowym większym niż 100 V (od 8% dla $U_d = 100$ V do 11% dla $U_d = 148$ V).

5.2 Obliczenia rozplądów mocy w 5-węzłowym systemie elektroenergetycznym

Do obliczeń rozplądów mocy w SEE złożonym z 5 węzłów wykorzystano metodę Newtona-Raphsona. Schemat układu przedstawiono na Rysunku 5.5.



Rysunek 5.5: Schemat połączeń 5-węzłowego systemu.

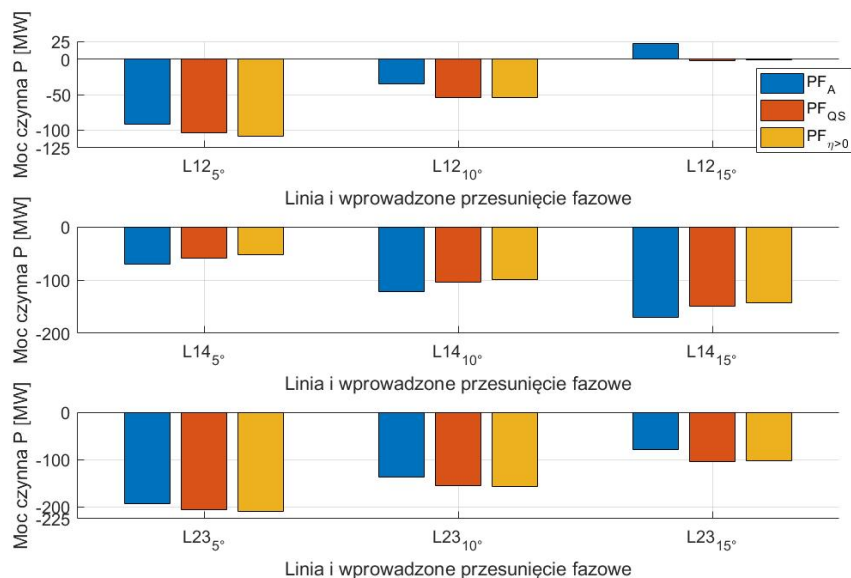
Obliczenia wykonano dla PF zainstalowanych w linii L45, wprowadzających przesunięcia kątowe 5° , 10° , 15° i następujących sposobach sterowania:

- asymetryczny PF (klasyczny układ),
- PF pracujący jako quasi-symetryczna jednostka
- asymetryczny PF z regulowanym napięciem wzdłużnym,

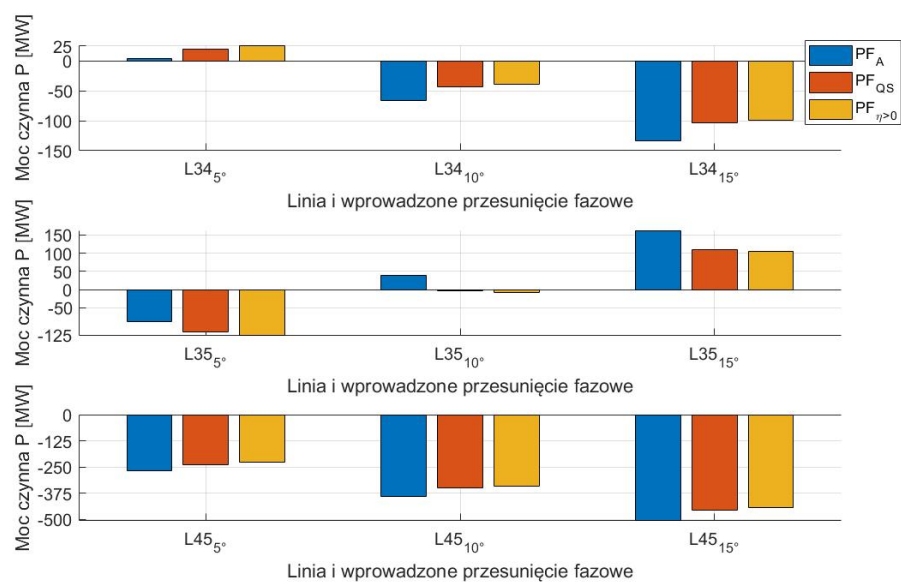
W ten sposób wykonano obliczenia rozplądów mocy, przy czym uwzględniono wpływ zmian napięcia wyjściowego z PF w zależności od wybranego typu urządzenia. Przyjęta konwencja znaku mocy wskazuje, że moc wpływająca do węzła ma znak -, a wypływająca +. Moc każdej linii odniesiona jest względem pierwszego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

Wprowadzenie PF w linię L45 skutkuje istotnymi zmianami w wartościach przesyłanych 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 (Tablica 5.1). 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 węźle 4 dla dwóch typów sterowania proponowanym PF maleje.



Rysunek 5.6: Moc czynna w poszczególnych liniach przy wprowadzonym przesunięciu kątowym równym 5°, 10°, 15° dla klasycznego asymetrycznego przesuwника fazowego (niebieski), proponowanego przesuwника fazowego w quasi-symetrycznym stanie pracy (czerwony) i proponowanego przesuwника przy obniżonym napięciu wzdłużnym do wartości napięcia znamionowego systemu (żółty).



Rysunek 5.7: Moc czynna w poszczególnych liniach przy wprowadzonym przesunięciu kątowym równym 5°, 10°, 15° dla klasycznego asymetrycznego przesuwника fazowego (niebieski), proponowanego przesuwника fazowego w quasi-symetrycznym stanie pracy (czerwony) i proponowanego przesuwника przy obniżonym napięciu wzdłużnym do wartości napięcia znamionowego systemu (żółty).

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 kąтового 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 $\alpha = 5^\circ$ i maleją do 12% przy $\alpha = 15^\circ$. 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 α (odpowiednio: $6,6^\circ$, $12,2^\circ$ i 18°).

Tablica 5.1: Wartości napięć węzłowych oraz ich kątów dla asymetrycznego PF, proponowanego PF w quasi-asymetrycznym stanie pracy oraz przy obniżonym napięciu wzdłużnym do $U_n = 400$ kV ($\eta > 1$).

	Napięcie [kV]	Kąt [°]	Napięcie [kV]	Kąt [°]	Napięcie [kV]	Kąt [°]	Napięcie [kV]	Kąt [°]
Węzeł	Brak PF		Asymetryczny 5°		Asymetryczny 10°		Asymetryczny 15°	
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
Węzeł	Quasi-symetryczny 5°		Quasi-symetryczny 10°		Quasi-symetryczny 15°			
1	1*	0*	1*	0*	1*	0*	1*	0*
2	417,6	0,66	417,6	0,15	417,6	0,15	417,6	-0,37
3	424	1,17	424	0,50	424	0,50	424	-0,19
4	411,6	0,94	410,8	1,92	409,2	2,88	409,2	2,88
5	424	1,54	424	0,51	424	0,51	424	-0,53
Węzeł	$\eta > 1$ 5°		$\eta > 1$ 10°		$\eta > 1$ 15°			
1	1*	0*	1*	0*	1*	0*	1*	0*
2	417,6	0,70	417,6	0,16	417,6	0,16	417,6	-0,39
3	424	1,23	424	0,51	424	0,51	424	-0,20
4	403,2	1,03	403,6	2,02	404,4	2,91	404,4	2,91
5	424	1,63	424	0,53	424	0,53	424	-0,54

Rozdział 6

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono analizę pracy przesuwника fazowego o regulowanym napięciu wzdłużnym i poprzecznym dla typowych przypadków obrazujących użytkowanie urządzeń przeznaczonych do kontroli rozpliwów 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 przesuwника 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 przesuwника fazowego z dodatkową możliwością regulacji napięcia wzdłużnego w systemach elektroenergetycznych, w których wymagana jest stosunkowo duża elastyczność w regulacji rozpliwów 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 przesuwника fazowego. Jest to istotną zaletą umożliwiającą szersze zastosowanie przesuwника fazowego z regulowanym napięciem wzdłużnym względem asymetrycznych przesuwników fazowych. Ponadto, jak zasygnalizowano w pracy, możliwe jest również takie sterowanie pracą układu przesuwника, 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 przesuwника w porównaniu z jednostkami symetrycznymi.

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 α , układ z obniżonym napięciem wzdłużnym przesyła mniejszą moc czynną w linii z PF względem asymetrycznego przesuwника fazowego.

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

- projekt testowego asymetrycznego przesuwника 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 przesuwника na przesył mocy,
- wykonanie modelu układu w programie Simulink,

- otrzymanie zbieżnych wyników obliczeń i symulacji z wynikami pomiarowymi,
- obliczenia rozplądów mocy w testowym systemie dla wybranych stanów pracy przesuwników fazowych.