

doi:10.15199/48.2017.04.27

„Przenoszenie” zwarć niesymetrycznych przez przesuwники fazowe

Streszczenie. Obecność przesuwników fazowych w strukturze układu sieciowego sprawia, że warunki pracy sieci podczas zwarć niesymetrycznych mogą odbiegać od „klasycznych”, znanych z układu bez przesuwników fazowych. Przesuwnik fazowy może tak „przenosić” zwarcie na drugą stronę, że rozkład parametrów prądów fazowych po obu stronach przesuwnika będzie nieidentyczny.

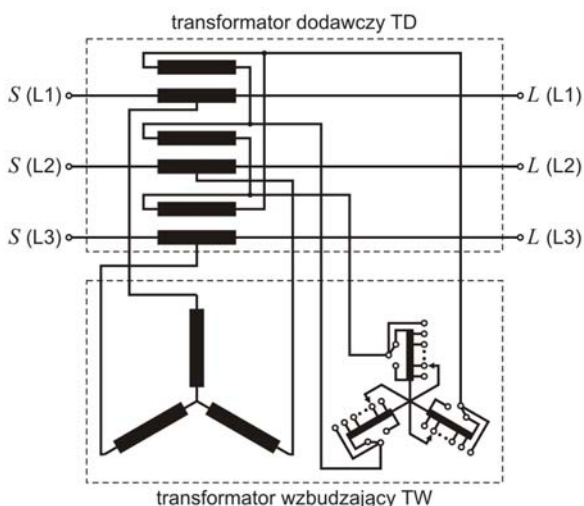
Abstract. Phase Shifting Transformers during unsymmetrical faults may change the power grid operation conditions. These conditions may differ from the “classical” ones that are typical for the grid operating conditions without these Phase Shifting Transformers. Thus, the value distribution of phase currents on both sides of the Phase Shifting Transformers may be different. (The „Propagation” of Unsymmetrical Faults by Phase Shifting Transformers).

Słowa kluczowe: przesuwniki fazowe, zwarcie niesymetryczne, zmiana rozprywu prądu zwarciegowego.

Keywords: phase shifting transformers, unsymmetrical fault, change of short-circuit current flow.

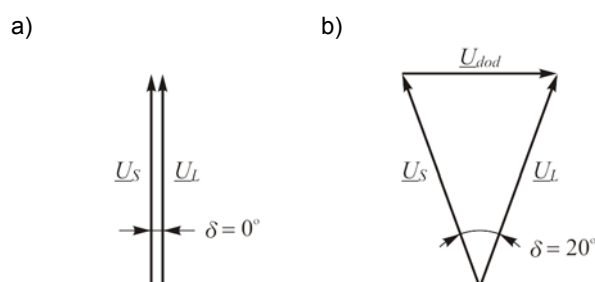
Wstęp

Przesuwniki fazowe (PF) o dużej mocy przechodniej (rzędu 1000 MV·A) i szerokim zakresie regulacji kąta przesunięcia fazowego napięcia (rzędu kilkudziesięciu stopni) zwykle są wykonywane jako dwukadziowe zespoły transformatorowe składające się z transformatora dodatkowego (TD) i transformatora wzbudzającego (TW) [1], [2]. Schemat ideowy PF przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat ideowy połączeń TD i TW dwukadziowego PF

Uzwojenia jednej ze stron transformatora TD są włączone szeregowo do obwodu głównego (między zaciski S i L – rys.1), natomiast uzwojenia drugiej strony są połączone w trójkąt. Uzwojenia te są zasilane przez transformator TW przyłączony do obwodu głównego, w środek uzwojeń szeregowych transformatora TD. Taka struktura połączeń transformatorów TD i TW umożliwia wprowadzenia napięcia dodatkowego U_{dod} do obwodu głównego między zaciski S i L . Pozwala to uzyskać przesunięcie fazowe δ napięć po obu stronach PF. Zilustrowano to na rysunku 2. W efekcie prowadzi to do zmiany przepływu mocy w gałęzi z PF (również przepływów gałęziowych w otoczeniu sieciowym miejsca przyłączenia PF). Tym samym oddziałując na przesunięcie fazowe δ wprowadzanego przez PF, można kształtować rozpryw mocy w układzie sieciowym. Zmiana kąta δ odbywa się poprzez zmianę napięcia U_{dod} . Uzyskuje się to, sterując przełącznikiem zaczepów transformatora TW (rys.1).



Rys.2. Fazory napięć węzłowych w układzie bez (a) i z PF (b)

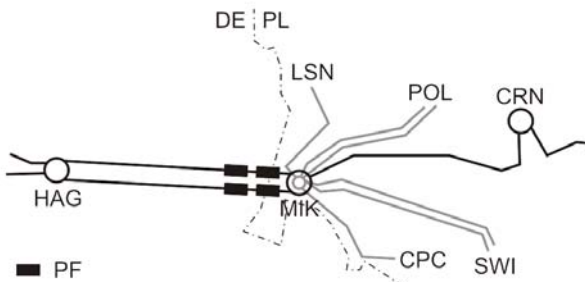
Parametry napięcia dodatkowego U_{dod} , wprowadzanego przez PF do obwodu głównego, silnie zależą od parametrów napięcia w miejscu przyłączenia PF. Jedynie dla symetrycznego napięcia trójfazowego w węzle z PF, parametry napięcia U_{dod} są jednakowe dla poszczególnych faz. Dlatego w stanach niesymetrycznych zakłóceń zwarciovych obecność PF w strukturze układu sieciowego sprawia, że warunki pracy układu towarzyszące zwarciom jedno- lub dwufazowym w otoczeniu PF mogą znacząco odbiegać od „klasycznych”, znanych z układu bez PF. Rozkład wartości i kątów fazowych prądów poszczególnych faz może być nieidentyczny po obu stronach PF. Sprawia to, że zwarcie niesymetryczne jest „przeniesione” na drugą stronę PF (tj. na stronę obszaru sieciowego przeciwległą względem obszaru sieciowego z obiektem objętym zwarcie) inaczej niż w układzie sieciowym bez PF.

W artykule przedstawiono wyniki analizy warunków prądowych towarzyszących zwarciom jednofazowym w układzie sieciowym z PF.

Model PF do badań symulacyjnych niesymetrycznych zakłóceń zwarciovych

W badaniach symulacyjnych wykorzystano opracowany szczegółowy model PF, który odzwierciedla rzeczywiste przesuwniki fazowe zainstalowane w stacji Mikułowa (rys.3) [3]. W każdym torze linii Mikułowa – Hagenwerder zastosowano układ dwóch szeregowo połączonych PF o mocy 1200 MV·A i zakresie regulacji przesunięcia fazowego $\pm 20,1^\circ$ dla jednego PF (zakres regulacji w stanie bezobciążeniowym) [2].

Model PF zrealizowano w programie MATLAB Simulink. Jest to model predestynowany m.in. do badań elektromagnetycznych stanów przejściowych towarzyszących zakłóceniom zwarciovym.



Rys.3. Lokalizacja PF w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (stacja MIK – Mikułowa, stacja HAG – Hagenwerder)

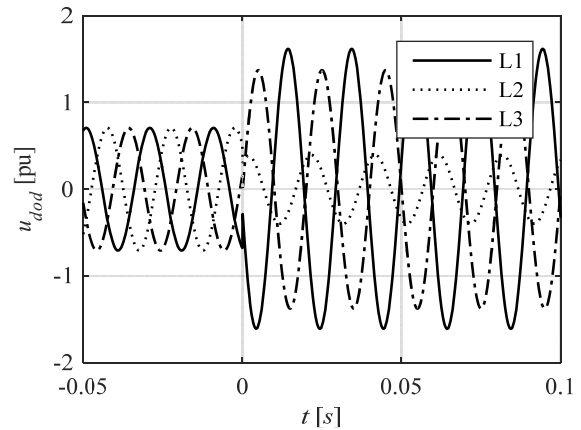
Opracowując model PF, przyjęto następujące założenia dotyczące jego funkcjonalności, parametrów i struktury:

- model trójfazowy w realizacji „pofazowej”;
- model złożony z wielu modeli elementarnych;
- struktura modelu ściśle odwzorowująca połączenia między elementami składowymi rzeczywistych przesuwników fazowych;
- parametry modelu dokładnie odwzorowujące parametry elementów składowych rzeczywistych przesuwników fazowych;
- brak dokładnego odwzorowania przełącznika zacsepów transformatora wzbudzającego rzeczywistych przesuwników fazowych;
- określone wysterowanie modelu uzyskiwane przez odpowiedni dobór parametrów modelu transformatora wzbudzającego.

Rezygnacja z dokładnego odwzorowania przełącznika zacsepów w opracowanym modelu PF wynika z ograniczeń technicznych rzeczywistych przesuwników fazowych. Podczas zwarć w PF i jego otoczeniu sieciowym nie dopuszcza się do zmiany położenia przełącznika zacsepów. Jest to podyktowane koniecznością jego ochrony przed dokonywaniem przełączeń w stanach znacznych prądów towarzyszących m.in. zwarciom. Ponadto czas ewentualnej zmiany zacsepów PF wynosi co najmniej 5 s, co znacząco przekracza dopuszczalny czas trwania zwarcia w sieci NN, w którym powinno nastąpić wyłączenie PF lub innego obiektu elektroenergetycznego objętego zwarciami.

Napięcie dodatkowe PF w stanach niesymetrycznych zakłóceń zwarciovych

Zwarcia niesymetryczne w otoczeniu PF prowadzą do znacznych zmian parametrów napięcia dodatkowego U_{dod} wprowadzanego przez PF do obwodu głównego w porównaniu do parametrów występujących w stanie przedzakłóceniovym. Zilustrowano to na rysunku 4. Przedstawione wyniki dotyczą metalicznego zwarcia doziemnego fazy L1 zaistniałego w 0 s symulacji, zlokalizowanego za zespołem dwóch PF wysterowanych na zacsep 0. Przed wystąpieniem zakłócenia napięcia wprowadzane do poszczególnych faz obwodu głównego były symetrycznie przesunięte fazowo (co 120°) i równe co do wartości (chwile czasowe poprzedzające 0 s symulacji na rys.4). Natomiast po zaistnieniu zwarcia wartości napięcia zwiększają się (dotyczy faz L1 i L3) lub zmniejszają (dotyczy fazy L2). Różnica może być znacząca, dla fazy L1 sięga prawie 2,3 poziomu napięcia w stanie przedzakłóceniovym. Zmiany dotyczą także wartości kątów fazowych napięcia dodatkowego. Po zaistnieniu rozpatrywanego zakłócenia obserwuje się zmniejszenie wartości wszystkich kątów fazowych. Powoduje to, że fazy napięć poszczególnych faz opóźniają się względem odpowiadających fazorów wyznaczonych w stanie przedzakłóceniovym (rys.5).

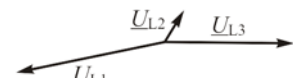


Rys.4. Przebieg wartości chwilowej fazowych napięć dodatkowych wprowadzanych przez pojedynczy PF wysterowany na zacsep 0 przy zwarciu doziemnym fazy L1 zlokalizowanym za zespołem dwóch PF

a)



b)



Rys.5. Fazory fazowych napięć dodatkowych wprowadzanych przez pojedynczy PF wysterowany na zacsep 0 w stanie przedzakłóceniovym (a) oraz w stanie quasi-ustalonym zwarcia doziemnego fazy L1 zlokalizowanego za zespołem dwóch PF (b)

Skala i charakter zmian parametrów napięcia dodatkowego PF, towarzyszących zwarciom niesymetrycznym w otoczeniu sieciowym PF, zależą m.in. od lokalizacji zwarcia oraz wysterowania PF. W tabeli 1 zestawiono względne zmiany wartości skutecznej podstawowej harmonicznej fazowych napięć dodatkowych pojedynczego PF (δU_{dod}) podczas zwarć 1f w układzie sieciowym z zespołem dwóch PF dla różnych scenariuszy symulacji. Przedstawione wyniki obejmują scenariusze symulacji dla:

- dwóch lokalizacji zakłócenia (przed lub za zespołem dwóch PF);
- trzech wysterowań PF (zacsep 0, zacsep 32A i zacsep 32R); zacsep 32 to maksymalny zacsep przesuwników fazowych zastosowanych w stacji Mikułowa, natomiast litera A oznacza wysterowanie PF „wzmacniające” przesył mocy linią Mikułowa – Hagenwerder, litera R oznacza wysterowanie PF „hamujące” przepływ gałęziowy.

Względną zmianę wartości skutecznej napięcia dodatkowego wprowadzanego do L -tej fazy obwodu głównego układu sieciowego przez pojedynczy PF zespołu dwóch PF ($\delta U_{dod,L}$) dla k -tego scenariusza symulacji wyznaczano, korzystając z zależności (1):

$$(1) \quad \delta U_{dod,L} = \frac{U_{k,L-F} - U_{k,L}}{U_{k,L}} \cdot 100, \text{ dla } L=L1, L2, L3,$$

gdzie: $U_{k,L-F}$ – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej fazowego napięcia dodatkowego w quasi-ustalonym stanie zwarcia, $U_{k,L}$ – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej fazowego napięcia dodatkowego w stanie przedzakłóceniovym.

Zmianę wartości kątów fazowych napięcia dodatkowego ($\Delta\varphi_{dod}$) dla danej fazy, wywołaną zwarciem 1f w układzie z PF, przedstawiono w tabeli 1 jako różnicę wartości występującej w quasi-ustalonym stanie symulowanego zakłócenia i wartości w stanie przedzakłóceniovym.

Tabela 1. Zmiany parametrów fazowych napięć dodawczych PF podczas zwarcia 1f dla różnych scenariuszy symulacji

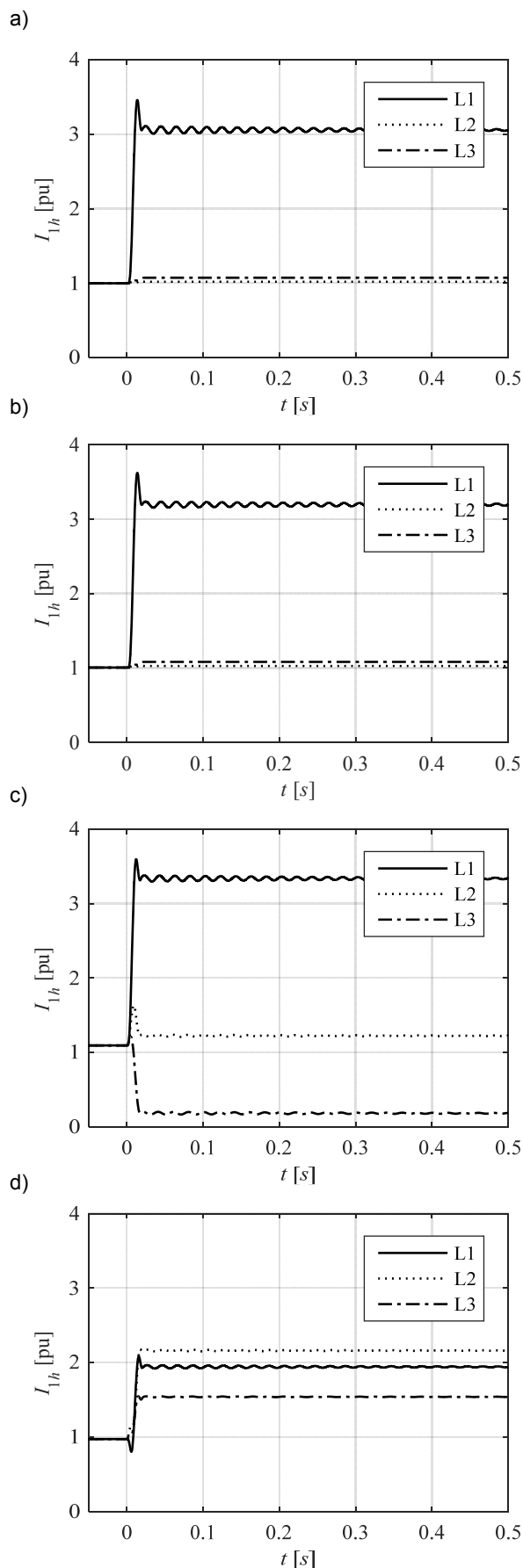
Lokalizacja zwarcia	Wysterowanie PF	$\delta U_{dod} [\%]$			$\Delta\varphi_{dod} [^\circ]$		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3
za PF	0	128	-44	94	-61,5	-74,5	-13,7
	32A	-8	-4	-30	12,7	-3,9	0,7
	32R	-5	-37	-12	-9,0	-5,2	11,0
przed PF	0	-53	-12	-10	-2,7	14,6	-15,0
	32A	1	-35	-37	-0,2	-22,9	21,3
	32R	-6	-17	-51	9,7	-19,1	7,6

W następstwie zwarcia 1f w otoczeniu PF wartość fazowego napięcia dodawczego zwykle zmniejsza się w odniesieniu do poziomu występującego w stanie przedzakłóceniovym. Jednak zmiany te nie są jednakowe w poszczególnych fazach obwodu głównego. Różnice dotyczą zarówno skali zmiany (różny zakres zmiany wartości w poszczególnych fazach), jak i charakteru zmiany (dla niektórych scenariuszy można zaobserwować zwiększenie napięcia jednej fazy a zmniejszenie napięcia innej fazy). Podobne niejednoznaczności zmian występują dla kąta fazowego napięcia dodawczego. Niemniej, zwykle zwarcie 1f w otoczeniu PF wywołuje opóźnienie fazorów napięcia względem położenia właściwego dla chwil czasowych w stanie przedzakłóceniovym. Stąd wielkość $\Delta\varphi_{dod}$ przyjmuje wartości ujemne dla większości scenariuszy symulacji ujętych w tabeli 1.

Prądy fazowe gałęzi sieciowej z PF w stanach niesymetrycznych zakłóceń zwarciovych

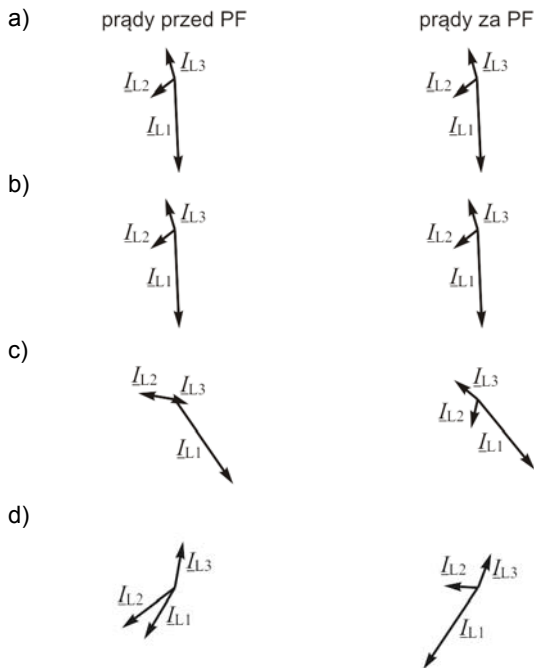
Niesymetria napięcia dodawczego PF, towarzysząca niesymetrycznym zakłóceniom zwarciovym w otoczeniu PF, może prowadzić do „nie-klasycznego” rozplywu prądów fazowych w układzie sieciowym z PF. Rozkład wartości prądów poszczególnych faz może być inny niż w układzie bez PF dla identycznego scenariusza zakłócenia, a także niejednakowy po obu stronach PF. Co więcej, po stronie obszaru sieciowego przeciwnego względem obszaru sieciowego z obiektem objętym zwarciev 1f prąd fazy zwartej nie musi być największy. Istotnie zmienia to warunki pracy układu sieciowego towarzyszące zwarciev niesymetrycznym. W układzie bez PF podczas zwarciev metalicznych prąd fazy objętej zakłóceniev zwykle jest znacząco większy od prądów faz „zdrowych” (dotyczy sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym). Na rysunku 6 zamieszczono przebiegi wartości skutecznej podstawowej harmonicznej prądów fazowych wpływających do zespołu dwóch PF przy zwarciev 1f zlokalizowanym za zespołem PF. Dla porównania przedstawiono również wyniki symulacji dla identycznego zakłócenia w układzie sieciowym bez PF. PF zastąpiono obiektem, który odwzorowywał wyłącznie parametry wzdluzne PF (pominięto strukturę połączeń elementów składowych PF). Takie podejście pozwala określić rozplyw prądu zwarciovego dla układu bez PF o impedancji pętl zwarciev równej impedancji występującej w układzie po przyłączeniu przesuwników fazowych. Tym samym umożliwia to bezpośrednie zestawienie uzyskanych wyników symulacji warunków pracy sieci bez i z PF.

Podczas zwarciev niesymetrycznych w układzie z PF rozkład wartości prądów fazowych wpływających do PF silnie zależy od wysterowania PF. Dla rozpatrywanej lokalizacji zwarciev 1f jedynie w układzie z PF wysterowanym na zaczepek 0 (rys.6b) można zaobserwować analogię do warunków występujących w układzie sieciowym bez PF (rys.6a).



Rys.6. Przebieg wartości skutecznej podstawowej harmonicznej prądów fazowych (I_{1h}) podczas zwarciev doziemnego fazy L1 w układzie bez PF (a) oraz w układzie z PF wysterowanym na zaczepek 0 (b), 32A (c) i 32R (d) – odniesiono do prądu znamionowego PF

Dla takiego scenariusza pracy PF relacja wartości poszczególnych prądów fazowych pokrywa się z „klasyczną”, właściwą dla układu bez PF, tj. dla zwarcia w fazie L1: $I_{1hL1} \gg I_{1hL2} \approx I_{1hL3}$. Dla PF wystereowanych na inny zaczepek taki rozkład wartości prądów może nie obowiązywać. Przy ustawieniu PF na zaczepek 32A wartości prądów faz „zdrowych” znacząco się od siebie różnią (rys. 6c). Niemniej, są wielokrotnie mniejsze od wartości prądu fazy L1 objętej zwarcie. Natomiast dla PF wystereowanego na 32R nawet ta prawidłowość nie obowiązuje. Wartość prądu fazy L1 jest mniejsza o ponad 0,2 pu od prądu fazy L2. Tym samym, spośród prądów fazowych wpływających do zespołu PF przy zwarcie za tym zespołem, prąd płynący w fazie ze zwarcie nie jest największy ($I_{1hL1} < I_{1hL2}$).



Rys. 7. Fazory prądów wpływających i wypływających z zespołu PF w stanie quasi-ustalonego zwarcia doziemnego fazy L1 zaistniałego za zespołem PF w układzie bez PF (a) oraz w układzie z PF wystereowanym na zaczepek 0 (b), 32A (c) i 32R (d)

Odmienność warunków zwarciovych występujących przy wystereowaniu PF w kierunku „hamowania” przesyłu mocy (zaczepek oznaczone literą R) dotyczy wyłącznie obszaru sieciowego zlokalizowanego po stronie przeciwległej względem obszaru z obiektem objętym zwarcie. Rozkład wartości poszczególnych prądów fazowych wypływających z PF do miejsca zwarcia zlokalizowanego za PF pokrywa się z występującym w układzie sieciowym bez PF i nie zależy od wystereowania PF. Tym samym obowiązuje „klasyczna” relacja wartości poszczególnych prądów fazowych, właściwa dla układu bez PF, tj. dla zwarcia w fazie L1: $I_{1hL1} \gg I_{1hL2} \approx I_{1hL3}$. Porównanie wartości skutecznej podstawowej harmonicznej prądów fazowych za zespołem PF dla identycznych scenariuszy symulacji jak na rysunku 6 (metaliczne zwarcie doziemne fazy L1 za zespołem dwóch PF), zestawiono w tabeli 2. Dodatkowo zamieszczono wartości prądów wpływających wówczas do PF. Pozwala to ocenić „przenoszenie” zwań przez PF. Jedynie w układzie z PF wystereowanym na 0 wartości prądów fazowych po obu stronach zespołu PF są identyczne i bardzo zbliżone do wartości występujących w układzie bez PF (z prostym,

„impedancyjnym” modelem PF). Natomiast ustawienie w PF zaczepek innego niż 0 prowadzi do zmiany wartości prądów wpływających i wypływających z PF w poszczególnych fazach układu sieciowego. Dla niektórych scenariuszy symulacji wartość prądu przed PF może być mniejsza od wartości prądu za PF. Jest to podyktowane niesymetrią napięcia dodatkowego wprowadzanego przez PF do obwodu głównego sieci. Skutkuje to różnicą kątów fazowych prądów wpływających i wypływających z PF. Różnice te mogą być znaczące.

„Przenoszenie” zwań niesymetrycznych przez PF schematycznie przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 2. Wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądów fazowych w układzie z PF w quasi-ustalonym stanie zwarcia 1f dla różnych scenariuszy symulacji

Wystereowanie PF	prądy wpływające do PF			prądy wypływające z PF do miejsca zwarcia		
	I_{1hL1} [pu]	I_{1hL2} [pu]	I_{1hL3} [pu]	I_{1hL1} [pu]	I_{1hL2} [pu]	I_{1hL3} [pu]
0	3,19	1,03	1,08	3,19	1,03	1,08
32A	3,34	1,22	0,18	2,94	0,99	1,01
32R	1,94	2,16	1,54	3,18	1,12	1,21
bez PF	3,06	1,02	1,07	3,06	1,02	1,07

Podsumowanie

Obecność PF w strukturze układu sieciowego może prowadzić do zmiany sposobu „przenoszenia” zwań niesymetrycznych między obszarami sieci zlokalizowanymi po obu stronach PF. Objawia się to, m.in. tym, że rozkład wartości prądów fazowych towarzyszących tym zakłóceniom może się różnić od „klasycznego”, znanego z układów bez PF, wg którego wartość prądu fazy objętej zwarcie metalicznym znacząco przewyższa prądy faz „zdrowych”. Różnice dotyczą również kątów fazowych prądów wpływających do PF i wypływających z PF. Jest to podyktowane niesymetrią napięcia dodatkowego wprowadzanego do układu sieciowego przez PF.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych rozpatrywań pozwalają domniemywać, że PF mogą znacząco zmieniać warunki działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej obiektów sieci, determinując potrzebę stosowania m.in. „nie-klasycznych” algorytmów decyzyjnych (patrz [4]).

Autorzy: prof. dr hab. inż. Adrian Halinka, dr inż. Piotr Rzepka, dr inż. Mateusz Szablicki, E-mail: Mateusz.Szablicki@polsl.pl; Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

LITERATURA

- [1] Schinnerl H., Phase shifting transformers. Guidance for planning and operation, CIGRE RSEEC 2012, październik 10-12, (2012), Sibiu, Rumunia
- [2] Klimpel A., Lubicki W., Wybrane zagadnienia doboru przesuwników fazowych, Konferencja Aktualne problemy budowy, rozwoju i eksploatacji sieci elektroenergetycznych w Polsce, grudzień 9, (2010), Warszawa, Polska
- [3] Kocot H., Korab R., Przygodzki M., Żmuda K., Zastosowanie przesuwników fazowych do sterowania przepływami mocy na połączeniach transgranicznych KSE, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr 9, 282-285
- [4] Halinka A., Szablicki M., Nowe kryterium sum impedancji algorytmu decyzyjnego obszarowych zabezpieczeń odległościowych, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr 3, 63-67