

Dobór głównych parametrów przesuwników fazowych dla zachodnich połączeń transgranicznych KSE

Streszczenie. W artykule zaprezentowano jedno z możliwych wykonań przesuwnika fazowego oraz podano związek między podstawowymi parametrami tego urządzenia. Odnosząc się do sytuacji występującej na przekroju Polska – Niemcy, dokonano oceny efektów wynikających z zastosowania regulacji przepływów mocy czynnej za pomocą przesuwników oraz zaproponowano wartości głównych parametrów tych urządzeń. Przeanalizowano również wybrane aspekty dotyczące współpracy przesuwników fazowych z liniami wymiany transgranicznej.

Abstract. The paper presents one possible design of phase shifting transformer, and provides a relationship between the basic parameters of such device. Referring to the situation on the Polish Power System western interconnections, an assessment of the effects resulting from the application of real power flow control by using phase shifters, as well as the main parameters of these devices are presented. In the paper a certain aspects of cooperation of phase shifters with the cross-border transmission lines are also analyzed. (The selection of the main parameters of phase shifting transformers for the western cross-border transmission lines of Polish Power System).

Słowa kluczowe: połączenia transgraniczne, regulacja przepływów mocy, przesuwniki fazowe.

Keywords: cross-border transmission lines, power flow control, phase shifting transformers.

doi:10.12915/pe.2014.04.28

Wstęp

Struktura połączonego systemu elektroenergetycznego oraz rozkład generacji w regionie Europy Centralnej sprawiają, że w tej części systemu systematycznie obserwuje się występowanie nieplanowanych przepływów wyrównawczych mocy czynnej między poszczególnymi obszarami. Przepływy te wykorzystują znaczącą część termicznych zdolności przesyłowych połączeń transgranicznych w regionie (szczególnie linii wymiany systemu polskiego), ograniczając tym samym ilości mocy przesyłowych udostępnianych uczestnikom rynku zainteresowanym międzysystemowym handlem energią. Jednakże znacznie poważniejszą konsekwencją tej sytuacji jest fakt, że ze względu na swój charakter, przepływy nieplanowane prowadzą do pogorszenia bezpieczeństwa pracy systemu połączonego, w tym bezpieczeństwa funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Mogą powodować również wzrost strat przesyłowych w pewnych obszarach, pogarszając tym samym ekonomikę pracy sieci.

W związku z opisaną sytuacją, operatorzy systemów przesyłowych (OSP) Europy Centralnej podejmują odpowiednie działania, zmierzające do zmniejszenia negatywnego wpływu przepływów nieplanowanych na warunki pracy sieci w regionie. Do działań podejmowanych obecnie można zaliczyć [1]:

- zmianę topologii sieci KSE poprzez dokonywanie odpowiednich przełączeń (otwieranie sprzęgieł w stacjach lub wyłączanie wybranych linii NN),
- wymuszanie przeciwnego, do istniejącego na przekroju Polska – Niemcy, przepływu mocy czynnej, przy wykorzystaniu połączeń stałoprądowych Polska – Szwecja i Niemcy – Dania (połączenie Niemiec z wyspą Zelandia, której sieć jest silnie powiązana z systemem Szwecji),
- zmianę rozdziału generacji jednostek wytwórczych w systemie polskim lub w systemach polskim i niemieckim.

Pomimo stosowania wymienionych wyżej sposobów kształtowania rozpyływu mocy w połączonym systemie, coraz częściej zdarzają się sytuacje, w których środki te stają się niewystarczające do zachowania bezpiecznej pracy systemu, głównie w stanach $n - 1$. W efekcie wzrasta ryzyko zaistnienia kaskadowych wyłączeń elementów sieci, mogących doprowadzić w skrajnych przypadkach do rozległych black-outów. Skuteczne przeciwdziałanie sformułowanemu zagrożeniu wymaga zastosowania kolejnych środków, pozwalających na efektywną redukcję przepływów nieplano-

wanych. Należy do nich regulacja przepływów mocy czynnej z wykorzystaniem przesuwników fazowych.

Regulacja przepływów mocy z wykorzystaniem przesuwników fazowych

Regulacja przepływów mocy czynnej polega na zmianie rozpyływu bez zmiany sumarycznej mocy wytwarzanej. Wykorzystywana jest tutaj znana zależność określająca przepływ mocy czynnej przez pojedynczą gałąź o charakterze indukcyjnym. Ma ona następującą postać [2]:

$$(1) \quad P = \frac{U_i U_j}{X} \sin \delta$$

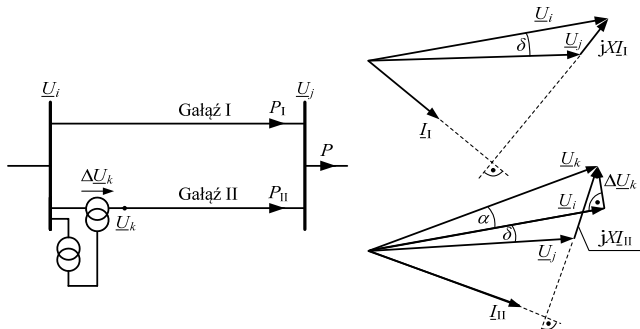
gdzie: P – moc czynna wypływająca z rozpatrywanej gałęzi, U_i , U_j – moduły napięć na początku i końcu gałęzi, δ – kąt obciążenia (różnica argumentów napięć węzłowych na początku i końcu gałęzi, $\delta = \delta_i - \delta_j$).

Z zależności (1) wynika, że moc czynną wypływającą z rozpatrywanej gałęzi sieci można zmieniać dokonując zmiany poziomów napięć U_i i U_j , wartości reaktancji X oraz kąta obciążenia δ . Możliwości sterowania przepływem mocy czynnej przy wykorzystaniu zmiany wartości napięć U_i i U_j są stosunkowo niewielkie, głównie ze względu na ograniczenia w regulacji tych napięć w odpowiednio szerokich granicach. Większe możliwości regulacji przepływu daje zmiana reaktancji ciągu przesyłowego, tzw. kompensacja szeregowo. Polega ona na sztucznym zmniejszeniu reaktancji indukcyjnej gałęzi za pomocą włączonej szeregowo baterii kondensatorów o odpowiednio dobranej reaktancji. Jednak w najszerszym zakresie przepływ mocy czynnej w gałęzi sieci można zmieniać regulując kąt obciążenia δ (sterowanie wartością kąta δ umożliwia nie tylko zmianę wartości mocy płynącej gałęzią, ale również zmianę kierunku jej przepływu). Idea metody pozwalającej na regulację kąta obciążenia, przy wykorzystaniu przesuwnika niesymetrycznego, została przedstawiona na rysunku 1.

Założono, że rozpatrywane gałęzie równoległe I i II mają jednakowe parametry, a w wyniku rozpyływu mocy jaki ukształtował się w całej sieci, napięcia na początku i na końcu omawianego ciągu przesyłowego przyjmują wartości U_i i U_j , przy czym różnica ich argumentów (kąt obciążenia) wynosi δ . Wykres fazorowy dla gałęzi I pokazano na rysunku górnym. Przy przyjętych napięciach i kącie obciążenia moc czynną w gałęzi I określa wzór $P_1 = (U_i U_j / X) \sin \delta$.

Wykres fazorowy dla gałęzi II przedstawiono na rysunku dolnym. W gałęzi tej jest zainstalowany transformator do-

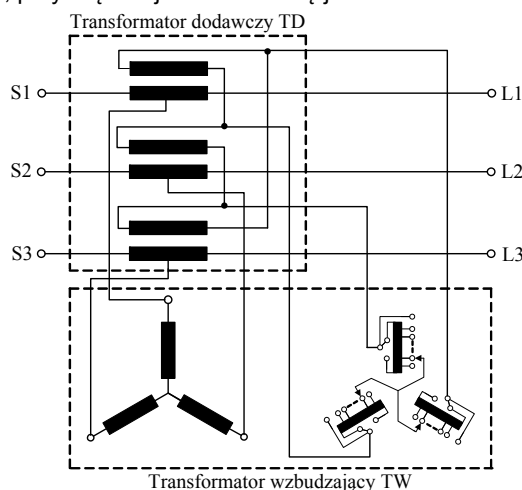
dawczy. W omawianym przypadku napięcia U_i i U_j są takie same, jak dla gałęzi I, jednakże tutaj do napięcia początkowego U_i dodawane jest prostopadle do niego napięcie ΔU_k . W rezultacie za transformatorem dodawczym występuje napięcie $\underline{U}_k = \underline{U}_i + \Delta \underline{U}_k$, a kąt obciążenia dla gałęzi II jest równy $(\delta + \alpha)$. Moc czynna w gałęzi II określona jest wzorem $P_{II} = (U_k U_j / X) \sin(\delta + \alpha)$. Ponieważ $(\delta + \alpha) > \delta$, moc P_{II} jest większa od mocy P_I . Napięcie dodawcze ΔU_k można regulować w zakresie od wartości ujemnych do wartości dodatnich. W wykonaniach praktycznych w tym celu stosuje się specjalne transformatory z regulacją poprzeczną, nazywane przesuwnikami fazowymi.



Rys.1. Ilustracja regulacji przepływu mocy czynnej za pomocą zmiany kąta obciążenia

Budowa i główne parametry przesuwników fazowych

Sposób wykonania przesuwników fazowych (PF) może być różny [3, 4, 5]. W często spotykanych rozwiązaniach urządzeń o dużej mocy przesuwnik buduje się jako symetryczny. Zawiera on dwa transformatory, na dwóch osobnych rdzeniach (rys. 2). Transformator wzbudzający TW ma oba uzwojenia połączone w gwiazdę. Uzwojenie pierwotne TW jest zasilane z sieci, a uzwojenie wtórne współpracuje z przełącznikiem zaczełów pod obciążeniem. Uzwojenie wtórne transformatora dodawczego TD, wytwarzające napięcie dodawcze, jest włączone w szereg z linią, w której reguluje się przesunięcie fazowe napięcia. Przez to uzwojenie przepływa pełny prąd linii. Uzwojenie pierwotne TD jest natomiast połączone w trójkąt (co zapewnia przesunięcie napięć o $\pi/2$) i jest zasilane z uzwojenia regulacyjnego transformatora wzbudzającego. Przy mniejszej mocy jednostka oba transformatory (TW i TD) znajdują się we wspólnej kadzi, przy większej umieszcza się je oddzielnie.



Rys.2. Schemat połączeń uzwojeń symetrycznego, dwurdzeniowego przesuwnika fazowego

Do głównych parametrów przesuwnika fazowego, oprócz napięcia znamionowego, należy zaliczyć:

- moc przechodnią – S_n ,

- moc własną – S_{TD} ,

- zakres bezobciążeniowego kąta regulacji – α .

Moc przechodnia przesuwnika wynika z jego napięcia znamionowego oraz prądu znamionowego płynącego w uzwojeniu wtórnym transformatora dodawczego (pełny prąd płynący między zaciskami S i L przesuwnika). Z kolei moc własna wynika z napięcia dodawczego wytwarzanego w transformatorze dodawczym i prądu płynącego przez jego uzwojenie. Jest ona związana z gabarytami przesuwnika.

Pomiędzy opisanymi głównymi parametrami przesuwnika fazowego (dla PF symetrycznego) zachodzi następująca zależność:

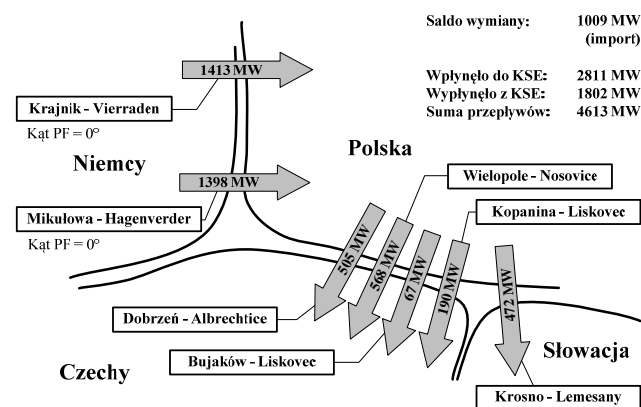
$$(2) \quad S_{TD} = 2S_n \sin \frac{\alpha}{2},$$

która sprawia, że w procesie doboru przesuwników fazowych przeznaczonych do regulacji transgranicznych przepływów mocy czynnej należy pogodzić trzy wzajemnie powiązane, ale i po części przeciwstawne wymagania:

- maksymalizację zdolności regulacyjnych przesuwników (zakres zmienności kąta α),
- dostosowanie mocy znamionowej (mocy przechodniej S_n) przesuwników do obciążalności i warunków pracy linii wymiany międzysystemowej,
- minimalizację gabarytów przesuwnika (minimalizację mocy własnej S_{TD}).

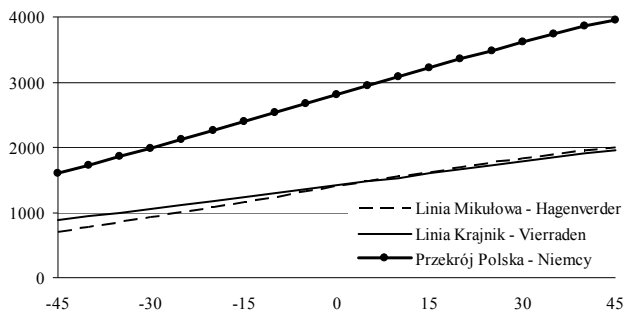
Określenie wymaganych zdolności regulacyjnych PF

W celu określenia pożądanego zakresu kąta regulacji α przesuwników przeznaczonych do instalacji na przekroju Polska – Niemcy, w pierwszej kolejności należy wykonać analizy rozpyłkowe, pozwalające m.in. na wyznaczenie charakterystyk przedstawiających zmianę przepływu mocy czynnej na połączeniach transgranicznych KSE, w zależności od nastawionej wartości kąta regulacji. Analizy takie powinny być wykonane dla różnych stanów pracy systemu połączonego. Dla przykładu, na rysunku 3 przedstawiono stan pracy systemu połączonego w szczycie letnim 2014 roku, uzyskany przy przyjęciu sald poszczególnych krajów skutkujących znaczącymi wartościami przepływów w liniach transgranicznych łączących system polski z systemem niemieckim. W tym stanie, przy zerowym kącie regulacji PF zainstalowanych w liniach wymiany Polska – Niemcy, sumaryczny przepływ mocy czynnej między systemami niemieckim a polskim osiąga wartość ponad 2800 MW.



Rys.3. Przepływy mocy czynnej na przekroju Polska – Niemcy przy zerowych wartościach kąta regulacji α przesuwników zainstalowanych w liniach Mikułowa – Hagenverder i Krajnik – Vierraden

Prowadząc skoordynowaną regulację przesuwników zainstalowanych we wszystkich torach linii Mikułowa – Hagenverder i Krajnik – Vierraden otrzymuje się odpowiednią zmianę przepływu mocy czynnej, co ilustruje rysunek 4.

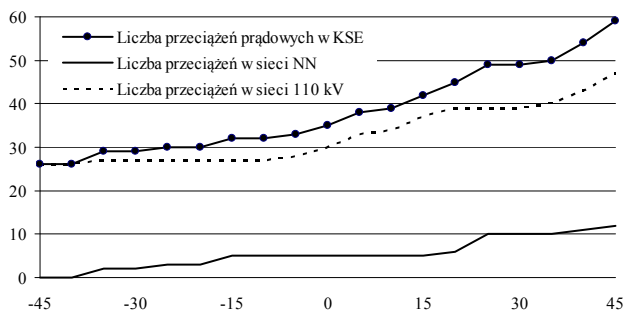


Rys.4. Przebieg mocy czynnej, w MW, na przekroju Polska – Niemcy, przy różnych nastawach kąta regulacji α , w deg, przesuwników zainstalowanych w liniach wymiany relacji Mikołowa – Hagenverder i Krajnik – Vierraden

Uzyskane wyniki wskazują, że zmniejszenie mocy czynnej wpływającej z systemu niemieckiego do systemu polskiego ma miejsce dla ujemnych nastaw kąta regulacji PF. Ponadto w analizowanym zakresie zmian tego parametru charakterystyka obrazująca przepływ przez połączenia transgraniczne KSE w funkcji kąta regulacji jest zbliżona do liniowej. Dla zmian kąta w zakresie od -45° do 45° otrzymano następujące zmiany przepływów mocy czynnej:

- przekrój Polska – Niemcy: od 1596 MW do 3950 MW (zmiana o 2354 MW, a więc średnio o 26,1 MW/ 1°),
- linia Mikołowa – Hagenverder: od 708 MW do 1999 MW (zmiana o 1291 MW, a więc średnio o 14,3 MW/ 1°),
- linia Krajnik – Vierraden: od 888 MW do 1951 MW (zmiana o 1063 MW, a więc średnio o 11,8 MW/ 1°).

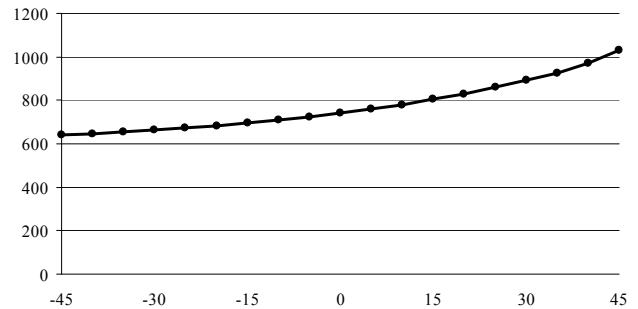
Większe zmiany przepływów dla linii Mikołowa – Hagenverder, niż dla linii Krajnik – Vierraden wynikają z większej gęstości sieci (mniejszej reaktancji) w pobliżu stacji Mikołowa, w stosunku do gęstości sieci w obszarze północnym.



Rys.5. Liczba gałęzi, w szt., z przekroczoną obciążalnością prądową, przy różnych nastawach kąta regulacji α , w deg, przesuwników zainstalowanych na połączeniach Polska – Niemcy

Określając pożądany zakres kąta regulacji przesuwników przeznaczonych do instalacji na przekroju Polska – Niemcy, należy dokonać również oceny wpływu tej regulacji na przeciążenia prądowe gałęzi oraz straty mocy czynnej w krajowej sieci 400/220/110 kV. Przy przyjęciu sald poszczególnych krajów skutkujących znaczącymi wartościami przepływów w liniach transgranicznych łączących system polski z systemem niemieckim (rys. 3), przy zerowym kącie regulacji, obserwuje się szereg przeciążeń prądowych w sieci KSE (rys. 5). Przeciążenia te oczywiście nasilają się przy wzroście mocy przesyłanej z systemu niemieckiego do systemu polskiego, przy czym naturalnym jest, że do przeciążeń dochodzi przede wszystkim w gałęziach zlokalizowanych w obszarach KSE leżących w pobliżu stacji granicznych Mikołowa i Krajnik. Z kolei „hamowanie” przesyłu z systemu niemieckiego do KSE odciąża polską sieć. Całkowita likwidacja przeciążeń prądowych w gałęziach sieci NN systemu polskiego jest możliwa przy kącie -40° .

Korzyści jakie daje możliwość regulacji przepływów międzysystemowych ujawniają się również w przypadku kolejnego wskaźnika charakteryzującego stan pracy sieci, jakim są straty mocy czynnej. Zmniejszenie mocy czynnej wpływającej z systemu niemieckiego do systemu polskiego przyczynia się do znaczącego zmniejszenia strat przesyłanych powstających w sieci zamkniętej KSE, co ilustruje rysunek 6. W rozpatrywanym stanie pracy systemu połączonego uzyskano zmniejszenie strat o 99 MW (z 741 MW przy kącie regulacji równym 0° , do 649 MW przy kącie regulacji równym -45° , a więc średnio o 2,2 MW/ 1°).



Rys.6. Straty mocy czynnej, w MW, w sieci 400/220/110 kV KSE, przy różnych nastawach kąta regulacji α , w deg, przesuwników zainstalowanych na połączeniach Polska – Niemcy

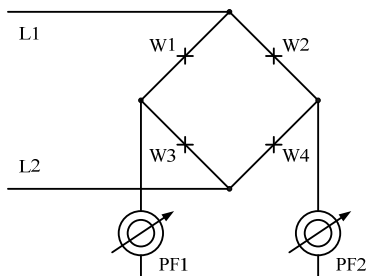
Wyniki wykonanych analiz rozptylowych pozwalają na określenie pierwszego parametru przesuwników, jakim jest pożądany zakres zmienności kąta α . W istniejących warunkach sieciowych, przy dużej reaktancji zastępczej łączonych systemów, uzyskanie znaczącej redukcji przepływu mocy czynnej na zachodnich połączeniach KSE wymaga zastosowania przesuwników fazowych o odpowiednio szerokim zakresie kąta regulacji, rzędu $\pm 40^\circ$.

Określenie mocy własnej i przechodniej – współpraca PF z liniami wymiany transgranicznej

Ograniczenia transportowe oraz możliwość posadowienia przesuwnika na terenie stacji limitują jego gabaryty, określone przez moc własną urządzenia. Zakładając, że gabaryty przesuwnika powinny być porównywalne z gabarytami największych transformatorów pracujących obecnie w sieci NN w Polsce, w pierwszym podejściu można przyjąć moc własną PF równą 500 MVA. Następnie, korzystając z zależności (2), dla kąta $\alpha = \pm 40^\circ$ i mocy $S_{TD} = 500$ MVA, uzyskuje się moc znamionową (przechodnią) urządzenia równą 750 MVA. W kolejnym kroku należy sprawdzić, czy taka wartość mocy jest wystarczająca ze względu na współpracę PF z liniami wymiany transgranicznej.

Obecnie system polski posiada dwa połączenia z systemem niemieckim. Oba połączenia są wykonane jako dwutorowe linie napowietrzne. Obciążalność jednego toru linii Mikołowa – Hagenverder dla niskich temperatur otoczenia wynosi 1386 MVA. Obciążalność torów linii Krajnik – Vierraden jest niższa, jednakże należy założyć, że w przypadku instalacji PF linia ta zostanie poddana modernizacji, skutkującej zwiększeniem jej obciążalności, co najmniej do takiego poziomu jak w przypadku linii Mikołowa – Hagenverder.

Na rysunku 7 przedstawiono schemat ideowy możliwego połączenia przesuwników z liniami wymiany. Jest to schemat czworoboku, w którym podczas uszkodzenia jednego elementu pozostałe przejmują obciążenie w sposób bezprzerwowy. Oznacza to, że w przypadku wyłączenia jednego toru linii przesuwniki PF1 i PF2 przejmują moc płynącą torem pozostającym w ruchu. Zatem łączna moc przechodnia obu PF (2×750 MVA) pozwala na pełne wykorzystanie zdolności przesyłowej tego toru (1386 MVA).



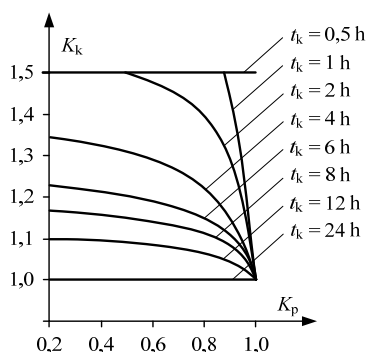
Rys.7. Schemat ideowy możliwego połączenia przesuwników fazowych z liniami (torami) wymiany – schemat czworoboku

Analizie poddano również przypadek uszkodzenia przesuwnika fazowego. W celu oceny sytuacji po wyłączeniu w wyniku usterki jednego lub dwóch PF wykonano dodatkowe analizy rozplwywe dla kąta regulacji α równego -40° (hamowanie przesyłu z Niemiec). Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przepływy mocy czynnej, w MW, przez PF (kąta $\alpha = -40^\circ$) dla różnych stanów pracy przesuwników współpracujących z liniami Mikułowa – Hagenverder i Krajnik – Vierraden

Przesuwnik	Przepływ mocy czynnej, w MW, przez PF					
Mikułowa PF1	380	x	x	405	636	x
Mikułowa PF2	379	670	x	404	634	717
Krajnik PF1	456	476	635	x	x	x
Krajnik PF2	456	476	635	822	x	860

Uzyskane wyniki analiz wskazują, że w niektórych stacjach z wyłączeniami przesuwników fazowych następuje przekroczenie mocy znamionowej pozostałych w ruchu jednostek. Przykładowo, przy wyłączeniu jednego PF w stacji Krajnik pozostały w ruchu przesuwnik jest obciążony na poziomie $K_k = 1,1$ (pominięto przepływ mocy biernej) Należy jednak zauważyć, że jest to sytuacja dopuszczalna, bowiem przesuwnik fazowy przez pewien czas może przenosić moc większą od znamionowej. Biorąc pod uwagę, że przed zaistnieniem stanu n - 1, przesuwniki w stacji Krajnik były obciążone na poziomie $K_p = 0,6$ oraz korzystając z metody określania dopuszczalnej obciążalności transformatorów olejowych [6], wyznaczony na podstawie wykresu (rys. 8), dopuszczalny czas trwania obciążenia PF na poziomie $1,1 S_n$ wynosi $t_k \approx 12$ h.



Rys.8. Dopuszczalna obciążalność przekroju $K_k = f(K_p, t_k)$ dla znamionowej trwałości izolacji i temperatury otoczenia równej 20°C

Jeszcze większe możliwości intensyfikacji wykorzystania zdolności przesyłowych PF, przy jednoczesnym zachowaniu znamionowej trwałości izolacji i minimalizacji ryzyka uszkodzenia, daje zastosowanie ciągłego monitoringu ich stanu [7]. System monitoringu, oprócz dostarczania aktualnych informacji o stanie pracy przesuwnika, pozwala również na wyznaczenie jego bieżącej (dynamicznej), dopuszczalnej obciążalności, do określenia której wykorzystuje się bieżące dane pomiarowe dotyczące obciążenia, temperatu-

ry jego newralgicznych punktów oraz temperatury otoczenia. Ważne są również informacje o aktualnym stanie systemów chłodzenia. System monitoringu umożliwi określenie czasu, przez jaki przesuwnik może być obciążony daną mocą, lub wyznaczenie maksymalnej mocy obciążenia w zadanym czasie. Zastosowanie obciążalności dynamicznej pozwala na zwiększenie dopuszczalnej obciążalności PF o około $10 \div 20\%$ w stosunku do obciążalności wyznaczonej przy braku informacji o jego bieżącym stanie pracy.

Wykonane analizy wykazały, że przy mocy znamionowej PF na poziomie 750 MVA, w niektórych stanach z wyłączeniami elementów systemu, moc przepływająca przez przesuwnik może przekroczyć tę wartość (maksymalne przekroczenie wystąpiło w zimowym szczycie wieczornym i wyniosło $1,25 S_n$). W związku z tym, jeżeli przyjąć ostrzejsze kryteria bezpieczeństwa pracy sieci, niedopuszczające przeciążeń PF w stanach n - k, konieczne staje się zwiększenie znamionowej mocy (przechodniej) tych urządzeń do wartości $S_n = 1000$ MVA. Takiej wartości mocy przechodniej, przy kącie regulacji $\alpha = \pm 40^\circ$, odpowiada moc własna jednostki wynosząca około 685 MVA.

Wnioski

Wykonane analizy wskazują, że możliwości regulacji przepływów mocy czynnej na przekroju Polska – Niemcy, przy wykorzystaniu PF zainstalowanych w poszczególnych torach linii Mikułowa – Hagenverder i Krajnik – Vierraden, zawierają się w przedziale od 26 do 32 MW/1°, przy czym większe zmiany przepływów uzyskuje się dla linii Mikułowa – Hagenverder ($14 \div 19$ MW/1°), niż dla linii Krajnik – Vierraden (około 12 MW/1°). W związku z tym, uzyskanie znaczącej redukcji mocy czynnej, wpływającej do Polski z systemu niemieckiego, wymaga zastosowania przesuwników o odpowiednio szerokim zakresie regulacji kąta α , rzędu $\pm 40^\circ$ (zastosowanie PF o niewielkim, rzędu $\pm 20^\circ$, zakresie regulacji będzie nieefektywne w istniejących warunkach sieciowych, przy dużej reaktancji zastępczej połączonych systemów). Przewidziane do instalacji PF powinny mieć moc znamionową (przechodnią) na poziomie wynoszącym co najmniej $750 \div 1000$ MVA, czemu odpowiada moc własna jednostki zawierająca się w przedziale $500 \div 685$ MVA.

LITERATURA

- [1] Majchrzak H., Purchała K., Przepływy nieplanowane i ich wpływ na bezpieczeństwo pracy systemu elektroenergetycznego, *Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój*, nr 3-4 (2012), 8-15
- [2] Machowski J., Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, *Oficina Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa (2007)
- [3] Harlow H.J., *Electric Power Transformer Engineering*, CRC Press, New York (2007)
- [4] Seitlinger W., Phase Shifting Transformers Discussions of Specific Characteristics. Paper no 12-306, *Proceedings of the 1998 CIGRE Session*, Paris, France, August (1998)
- [5] Verboomen J., Hertem Van D., Schavemaker P., Kling W., Belmans R., Phase Shifting Transformers: Principles and Applications, *International Conference on Future Power System*, Amsterdam, Netherlands, November (2005)
- [6] PN-IEC 60345:1999, Przewodnik obciążania transformatorów olejowych
- [7] Stewart P., Steward J., Witte M., Zou B., Dynamic Rating, Monitoring, Control and Communication for Power Transformers, www.dynamicratings.com

Autorzy: dr inż. Henryk Kocot, dr hab. inż. Roman Korab, dr hab. inż. Maksymilian Przygodzki, dr hab. inż. Kurt Żmuda, prof. Pol. Śląskiej; E-mail: imię.nazwisko@polsl.pl; Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice