

KONCEPCJA ZBOCZNIKOWANIA DŁAWIKIEM PRZESUWNIKA FAZOWEGO NA GRANICY POLSKO-NIEMIECKIEJ

Krzysztof SZUBERT

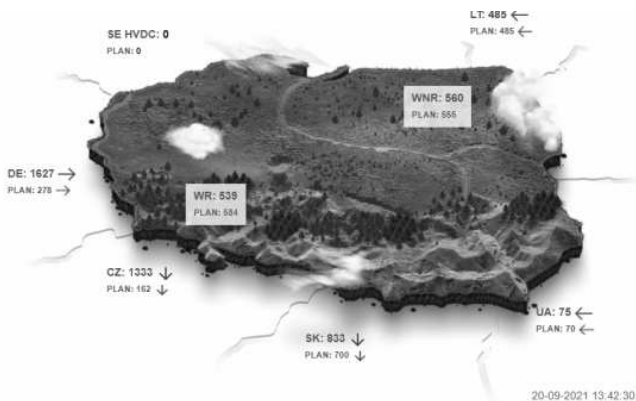
Politechnika Poznańska; Instytut Elektroenergetyki
tel.: 48 61 665 2282 e-mail: Krzysztof.szubert@put.poznan.pl

Streszczenie: W artykule przeanalizowano wpływ sterowników FACTS (PST oraz IPC) na pracę połączenia transgranicznego Polska-Niemcy. Stwierdzono, że przesuwnik fazowy PST spełnia podstawowe wymagania i tylko w niewielkim stopniu wpływa na automatykę zabezpieczeniową. Jego rozbudowa do układu międzyfazowego sterownika mocy IPC umożliwiłaby dodatkowo odcięcie się od zakłóceń pochodzących z niemieckiego systemu, jednakże wymagałaby istotnych zmian w automatyce zabezpieczeniowej.

Słowa kluczowe: FACTS, PST, IPC, sterowanie przepływem mocy, zakłócenia.

1. WPROWADZENIE

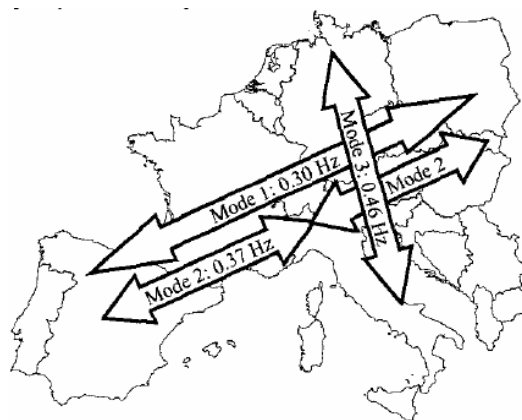
W związku z tym, że w systemie niemieckim występuje znaczący udział elektrowni wiatrowych, następuje nieplanowany przesył energii polską siecią wzdłuż zachodniej granicy z Niemiec głównie do Czech (rys. 1).



Rys. 1. Chwilowy przepływ mocy na polskiej granicy [1]

Dopóki nie występowało przeciążenie linii przesyłowych, a wahania mocy nie zagrażały naszemu systemowi, strona polska pobierała korzystne dla gospodarki opłaty za transfer energii. Jednakże zbyt duże obciążenia sieci spowodowały, że w stacjach Mikułowa i Krajnik, na granicy Polski-Niemieckiej wprowadzono przesuwniki fazowe dzięki którym można ograniczyć niepożądane przepływy prądu [2]. Na rysunku 1 pokazano różnicę między planowaną, a rzeczywistą wymianą energii na linii Niemcy-Polska-Czechy, która wynika z braku szybkiej regulacji przepływającej mocy dostosowanej do planów. Zastosowane układy przesuwników utrzymują jednak założone zdolności przesyłowe, co ułatwia utrzymanie stabilności w niemieckim systemie i brak przeciążeń w polskich liniach.

Po awarii w japońskiej elektrowni atomowej w Fukushima, w niemieckim systemie wyłączono elektrownie atomowe. Dodatkowo w celu zmniejszenia efektu cieplarnianego Niemcy wiodą prymat we wprowadzaniu „zielonej energii” i powoli odchodzą od węgla. Dla zainstalowanej mocy źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych ilość dostarczanej przez nie energii istotnie zależy od zazwyczaj zmiennych warunków pogodowych. Wpływa to na kłopoty ze sterownością systemu elektroenergetycznego ze znaczną liczbą źródeł odnawialnych. Do jego ustabilizowania wykorzystywane są po części systemy krajów ościennych, co powoduje, że z systemu niemieckiego rozchodzą się zakłócenia na Europę (rys. 2).



Rys. 2. Oscylacje mocy występujące w Europie [3]

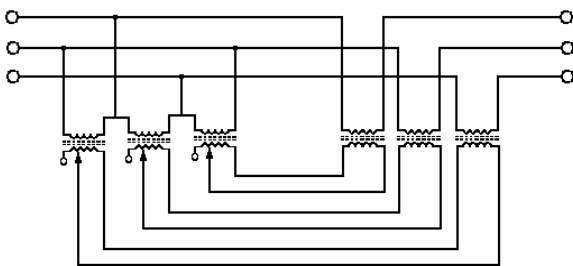
Ponieważ maksymalny kąt rozchyłu napięć w polskim systemie jest poniżej 30° , oscylacje te (rzędu 5°) nie stanowią zagrożenia dla stabilności naszego systemu (kąt delta $30 \pm 5^{\circ}$, a granica stabilności wynosi 90°). Ich występowanie generuje straty przesyłowe (a zatem dodatkowe koszty), równocześnie przyczyniając się do wzrostu temperatury przewodów i ograniczenia ich prądowej zdolności przesyłowej.

Analogiczny problem występował na granicy Amerykańsko – Kanadyjskiej; gdzie pierwotnie zastosowano sterownik PST, który wymagał nadążnych układów regulacji. Z drugiej strony dla tego rozwiązania zaobserwowano wystąpienie samoregulacji przesyłanej mocy po zbrocznikowaniu sterownika PST dławikiem – tak powstał międzyfazowy sterownik mocy (ang. Interphase Power Controller – IPC) [4]. Rozwiązanie to wydaje się docelowo bardzo dobrym dla Polski, jednakże

wymagającym dodatkowych modyfikacji wskutek występowania zasadniczych różnic w połączeniach między opisywanymi systemami. W przypadku Polski krótki odcinek linii transgranicznej i gęste powiązania sieci po obu jej końcach spowodują, że należy spodziewać się perturbacji w pracy zabezpieczeń.

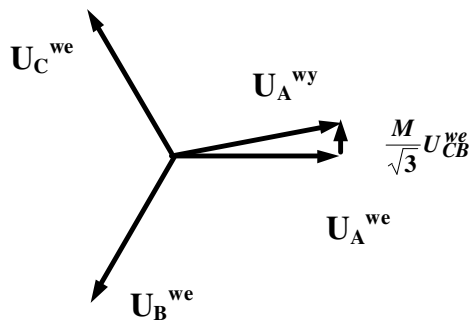
2. WŁAŚCIWOŚCI PRZESUWNIKA FAZOWEGO

Przesuwniki fazowe małej mocy są często budowane jako zatrzymane silniki pierścieniowe. W energetyce siły mechaniczne, które by wówczas występowały powodowałyby uszkodzenia mechaniczne takiego PST. W celu ich ograniczenia wykorzystuje się pokazany na rysunku 3 układ dwóch transformatorów, pierwszy podłączony jest standardowo w trójkąt, drugi pracuje w układzie szeregowym przy zasilaniu napięciem międzyfazowym faz „obcych” (U_A z U_{BC}).



Rys. 3. Ideowy schemat obwodów głównych sterownika PST

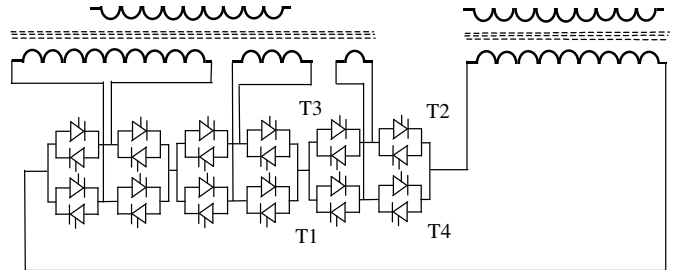
Ponieważ w układzie 3 fazowym napięcie międzyfazowe faz „obcych” jest przesunięte względem napięcia odniesienia o kąt 90° , powstaje trójkąt prostokątny, a suma rozpatrywanych napięć wprowadza napięcie przesunięte o nieco większej amplitudzie (rys. 4).



Rys. 4. Kształtowanie napięć przez przesuwnik fazowy

Transformator równoległy do pracy w układzie sterownika PST dobiera się najczęściej z trzema uzwojeniami wtórnymi. Najlepszy ich podział w stosunku 1:3:9, pozwala uzyskać ± 13 kolejnych jednostkowych stopni regulacji. Gdy przesunięcie fazowe jest mniejsze od 15° , powodowany przez nie wzrost napięcia jest niższy od 3,5%, dzięki czemu zazwyczaj nie jest wymagana korekta modułu napięcia. W przeciwnym wypadku wprowadza się dodatkowy autotransformator o przekładni zbliżonej do jedności uzyskując sterownik VRPST zarówno do regulacji przepływu mocy biernej jak i czynnej. Obie regulacje nie są płynne, lecz wielostopniowe. Załączenie poszczególnych stopni strony wtórnej transformatora równoległego odbywa się poprzez mostki tyrystorowe (rys. 5), w których łączniki

energoelektroniczne pracują przy pełnym wysterowaniu. Dzięki takiemu rozwiązaniu w napięciu nie generują się wyższe harmoniczne i występuje ograniczenie strat przełączeniowych. Każde uzwojenie może być wyłączone (rys.5 T3 i T2 załączone, T1 i T4 wyłączone) lub załączone w stronę dodatnich (T1 i T2 załączone, T3 i T4 wyłączone) albo ujemnych (T3 i T4 załączone T1 i T2 wyłączone) wartości.

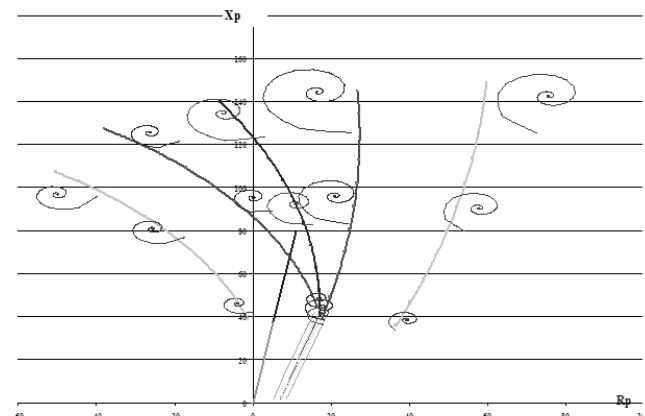


Rys 5. Schemat jednofazowy tyrystorowego przełącznika zaczeptów sterownika TCPST

Biorąc pod uwagę występowanie kąta rozchyłu wektorów napięć w polskim systemie poniżej 30° oraz możliwość jego regulacji przez PST od 10° do, to takie rozwiązanie techniczne dla energetyki jest co najmniej wystarczające. Z drugiej strony w tym układzie ma miejsce brak płynności w regulacji (wielostopniowość), co ogranicza jego zastosowanie do skutecznego tłumienia kołysania mocy.

Zamontowanie PST nie miało większego wpływu na pracę zabezpieczeń. Z racji wymagań redundancji, aby nie podwajać liczby zespołów układów pomiarowych, zabezpieczeń i wyłączników stosuje się rezerwowanie ich w sposób zdalny (między stacjami). Zatem należy zastosować zabezpieczenia, które potrafią określić, czy awaria wystąpiła w podstawowej strefie ich działania, czy w obszarze gdzie automatyka pełni funkcje rezerwowe. To powoduje, że zabezpieczenia odległościowe (nawet gdy pełnią funkcje tylko rezerwowe) znajdują się na większości stacji.

Przykładową modyfikację pomiaru impedancji przez te zabezpieczenia na skutek zainstalowania PST (poprzez wprowadzenie napięcia dodatkowego) pokazano na rysunku 6.

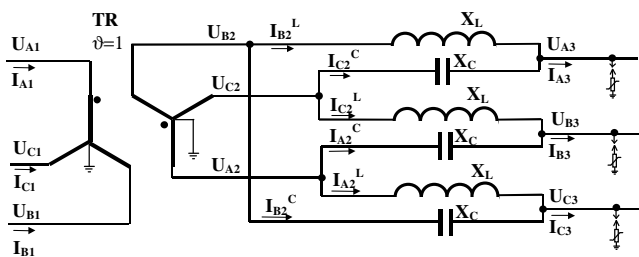


Rys. 6. Impedancje pomierzone przez zabezpieczenie odległościowe uzyskane na podstawie zaimplementowanych w urządzeniu wzorów analitycznych, oraz pomierzone na stacji w trakcie symulacji [5]

W pierwszej i drugiej strefie działania zabezpieczenia wartość zafalszowania pomiaru impedancji jest w zasadzie nieistotna (nie wymaga zmiany charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia). W trzeciej strefie widać wyraźną różnicę głównie w wartościach rezystancji. Zwiększając nastawę zabezpieczenia tejże strefy w zakresie rezystancji i nieznacznie reaktancji zapewnia się prawidłową pracę zabezpieczenia – nie wymaga się stosowania innych zestawów zabezpieczeń niż te, które stosowano przed montażem PST.

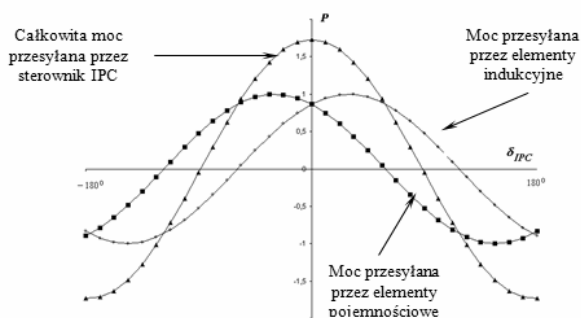
3. WŁAŚCIWOŚCI MIĘDZYFAZOWEGO STEROWNIKA MOCY

Międzyfazowy sterownik mocy przesyła do danego miejsca w sieci energię przez dwa elementy reaktancyjne zasilane z punktów o różnych przesunięciach fazowych względem siebie i względem punktu docelowego. Najprostsze rozwiązanie takiego układu zbudowane z transformatora Yy_6 oraz kondensatorów i dławików przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Obwód główny najprostszego sterownika IPC

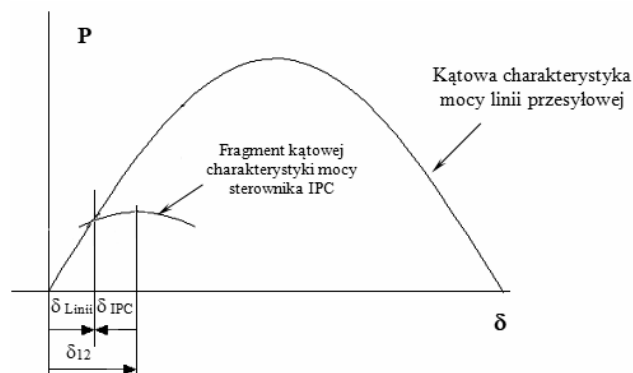
Dzięki takiemu połączeniu, chociaż moc czynna przesyłana przez poszczególne reaktancje jest funkcją sinusa kąta rozchylenia wektorów napięć, wypadkowa moc czynna przesyłana jest funkcją cosinusa tego kąta (rys. 8).



Rys. 8. Kątowa charakterystyka mocy sterownika IPC [6]

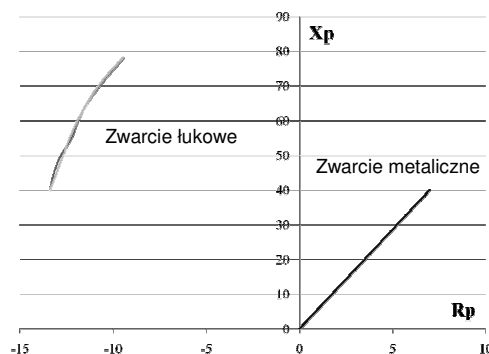
Ustawiając na PST kąt około 60^0 i bocznikując sterownik reaktancją indukcyjną podłączoną do fazy przesuniętej o 120^0 , otrzymuje się podobny rozkład napięć i prądów dysponując równocześnie możliwością regulacji mocy maksymalnej przesyłanej przez sterownik.

Biorąc pod uwagę różnice stromości charakterystyk przesyłowych $P=f(\delta)$ linii (sinusoida w okolicach 30^0) i sterownika IPC (kosinusoida w okolicach 0^0) oraz, że taka sama moc musi być przesyłana przez oba elementy, zmiany kąta pomiędzy systemami będą się głównie odkładały na sterowniku, a nie na linii (rys. 9), w efekcie wypadkowa moc przesyłana będzie zmieniać się nieistotnie (występujące normalnie zmiany zostaną wytłumione).



Rys. 9. Kątowe charakterystyki mocy linii przesyłowej i sterownika IPC podczas kołysań mocy

Opisywany sterownik w czasie zwarcia zachowuje się jak źródło prądowe [7]. Zatem prąd zwarcioowy płynący od sterownika jest wielokrotnie mniejszy niż dopływający do miejsca zwarcia z przeciwnego końca linii. Jeśli zwarcie ma charakter rezystancyjny to właśnie ten drugi prąd spowoduje powstanie spadku napięcia na rezystancji w miejscu zwarcia. Dodatkowo prądy te są przesunięte względem siebie o około 90^0 , co w konsekwencji spowoduje duży błąd pomiaru impedancji przez zabezpieczenie odległościowe (rys. 10).



Rys. 10. Impedancje zwarcioowe zmierzone przez zabezpieczenie odległościowe w linii bezpośrednio za IPC

W efekcie pomiar impedancji przesuwają się w miejsce niedostępne dla pierwszej strefy zabezpieczenia odległościowego. Zastosowanie tego zabezpieczenia na linii w pobliżu IPC nie ma sensu (po wyłączeniu drugiego końca linii pomiar odzwierciedla wartości rzeczywiste, ale wzrasta czas przerwy bezprądowej, co zwiększa zagrożenie utraty stabilności na jakże ważnej linii). W związku z tym należałoby zastosować podwojenie ciągów automatyki zabezpieczeniowej (przekładniki, zabezpieczenie różnicowe wzdłużne, wyłącznik, odłącznik) w tym miejscu.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowane na granicy Polsko-Niemieckiej przesuwniki fazowe zapewniają możliwość ograniczenia niepożądanego transferu energii z Niemiec przez Polskę do Czech. W efekcie zapobiegają przeciążeniu sieci przesyłowej na zachodnich granicach Polski. Nie wymagają również przebudowy sieci ze względu na automatykę zabezpieczeniową. Nie umożliwiają jednak kompensacji kołysania mocy. Rozbudowa PST do IPC umożliwiłaby

tłumienie kołysania mocy, a nawet ograniczenie wszelkich zakłóceń pochodzących od strony systemu niemieckiego. Wiązałyby się to jednak nie tylko z przebudową stacji z FACTS ale również ze zmianami w układach zabezpieczeń.

5. BIBLIOGRAFIA

1. <https://www.pse.pl/dane-systemowe> (z dn. 20.09.2021).
2. <https://www.pb.pl/me-infrastruktura-przesylu-energii-niemloda-ale-system-jest-bezpieczny-866920> (z dn. 20.09.2021).
3. Handschin E., Schnurr N., Wellsow W. H.: Damping potential of FACTS devices in the European power system, Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, Vol. 4, 13-17 July 2003, pp. 2355 – 2360.
4. Habasi K., Lambard J., Mourad S., Pelletier P., Morin G., Beauergard F., Brochu J.: The Design of a 200 MW Interphase Power Controller Prototype. IEEE Transactions PWRD, Vol.9, No 2, April 1994, pp 1041-1048.
5. Szubert K.: Influence of phase shift transformer on distance protection's operation. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 89 NR 7/2013, pp 177-181.
6. Szubert K.: Regulacyjne właściwości międzyfazowego sterownika mocy, Automatyka Elektroenergetyczna nr 1/2007, str. 4-7.
7. Szubert K.: Jak międzyfazowy sterownik mocy ogranicza prądy zwarciove, Automatyka Elektroenergetyczna nr 2/2007, str. 12-20.

THE CONCEPT OF SHIFTING WITH THE INDUCTION COIL OF THE PHASE SHIFT TRANSMITTER AT THE POLISH-GERMAN BORDER

Unplanned energy flow from Germany via Poland to the Czech Republic caused overheating of transmission lines in the west of our country. In order to prevent the necessity to switch off these lines, phase shift transformers (PST) were placed on the border. However, the German system is highly saturated with wind electricity and therefore difficult to steer, which makes it a source of interference for neighbouring countries. The article analyses the impact of flexible AC transmission system (FACTS) drivers on the operation of the Poland-Germany cross-border electrical connection. It was found that the PST meets the basic requirements and has only a slight influence on the protection automatics. Expanding it to the interphase power controller (IPC) would additionally cut off the interference from the German system, however, it would require profound changes in the protection automatics.

Keywords: FACTS, PST, IPC, power flow control, disturbance.