

Grzegorz BENYSEK

UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI
INSTYTUT INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ

Pomiary w sieciach SN do wymiarowania układów IPFC¹

Dr inż. Grzegorz Benysek

studia wyższe o specjalności automatyka w elektroenergetyce ukończył w 1994 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej, gdzie w 1998 uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Od zakończenia studiów pracuje w Instytucie Inżynierii Elektrycznej Politechniki Zielonogórskiej. Obecnie zajmuje się tematyką związaną z układami FACTS, analizą ich właściwości i algorytmów sterowania. Autor artykułów w czasopiśmie oraz konferencyjnych krajowych i zagranicznych.



Streszczenie

W chwili obecnej stosowanych jest wiele rozwiązań umożliwiających poprawę jakości energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym są to m.in.: i) Sterowniki Przesyłu Mocy z ang. UPFC; ii) Zunifikowane Sterowniki Jakości Mocy z ang. UPQC; iii) Międzysystemowe Sterowniki Przepływu Mocy z ang. IPFC. Układy IPFC stanowią szeregowo lub szeregowo-równoległe połączenie filtrów aktywnych pracujących dla określonej liczby linii przesyłowych z jednym, wspólnym dla wszystkich linii, elementem magazynującym energię. Właściwości układów IPFC obejmują: sterowanie przepływem mocy między liniami przesyłowymi, kompensację mocy biernej, poprawę stabilności systemu itp. W artykule wykazano, że przy podejściu probabilistycznym, do procesów zachodzących w systemie elektroenergetycznym, możliwa jest znaczna redukcja mocy przekształtnika równoległego wchodzącego w skład układu IPFC.

Abstract

To improve energy quality in distribution systems, many different solutions are implemented, for example: i) Unified Power Flow Controllers (UPFC); ii) Unified Power Quality Conditioners (UPQC); iii) Interline Power Flow Controllers (IPFC). Interline Power Flow Controllers are classic series or series-parallel filters applied to given number of independent lines with common, for all lines, DC element. Their possible functions are enlarging and include power flow control between lines, reactive power compensation and distribution system's stability improvement. In the paper we will show that using probabilistic approach to the distribution system we can considerably decrease power rating of the Interline Power Flow Controller's.

1. Wprowadzenie

W chwili obecnej prowadzone są intensywne badania nad wykorzystaniem układów UPFC (Unified Power Flow Controller), UPQC (Unified Power Quality Conditioner) IPFC (Interline Power Flow Controller) w systemach elektroenergetycznych [1, 2, 3, 4, 7]. Ww. układy wykorzystują, w chwili obecnej można powiedzieć klasyczne, połączenie szeregowo-równoległe dwóch przekształtników DC/AC. Taka konfiguracja umożliwia m.in. sterowanie przepływem mocy czynnej i biernej, kompensację harmonicznych napięcia i prądu, kompensację mocy biernej, stabilizację napięcia od-

biornika itp. Spośród wymienionych układów praktycznej realizacji doczekały się, jak na razie, układy UPFC oraz IPFC. W układzie UPFC przekształtnik równoległy odpowiada za utrzymywanie stałej wartości napięcia na wspólnym elemencie magazynującym energię, natomiast przekształtnik szeregowy wprowadzając sterowane co do amplitudy i fazy napięcie steruje przepływem mocy czynnej i biernej. W przypadku systemów rozproszonych, w których ze względu na dużą liczbę linii przesyłowych układy UPFC nie są optymalnym rozwiązaniem, stosowane są układy IPFC. W literaturze przedmiotu można spotkać dwa rozwiązania układowe układów IPFC [2, 5, 7]. Pierwsze z nich wykorzystuje szeregowo włączone, z każdą niezależną linią przesyłową, przekształtniki DC/AC oraz wspólny element magazynujący energię. Takie rozwiązanie może jednak doprowadzić do sytuacji w której sterowanie przepływem mocy w jednej linii pogorszy jakości energii w innej (może doprowadzić do zwiększenia mocy biernej). Dzieje się tak ponieważ przekształtnik szeregowy może samodzielnie wygenerować jedynie napięcie prostopadłe do prądu, natomiast generacja składowej napięcia w fazie z prądem związana jest z poborem mocy czynnej z innej linii przesyłowej. Problem degradacji mocy można rozwiązać np. poprzez wyposażenie układu IPFC w dodatkowy równoległy przekształtnik DC/AC (połączony obwodem DC z przekształtnikami szeregowymi), zadaniem którego będzie pokrywanie zapotrzebowania na moc czynną (w chwili generacji napięcia w fazie z prądem) przekształtników szeregowych. Przekazywanie mocy czynnej jest możliwe dzięki wspólnemu elementowi magazynującemu energię.

Osobnym problemem jest natomiast dobór mocy przekształtnika równoległego. W literaturze przeważa pogląd iż moc przekształtnika dodatkowego musi wystarczyć na pokrycie maksymalnego zapotrzebowania na moc czynną poszczególnych przekształtników szeregowych, wchodzących w skład IPFC [7]. Jednak biorąc pod uwagę fakt, że procesy zachodzące w systemie elektroenergetycznym są losowe (wartości napięć, prądów itp.) moc przekształtnika równoległego może być znacznie ograniczona przy podejściu probabilistycznym (z bardzo dużym poziomem ufności) w porównaniu z podejściem deterministycznym (obecnym).

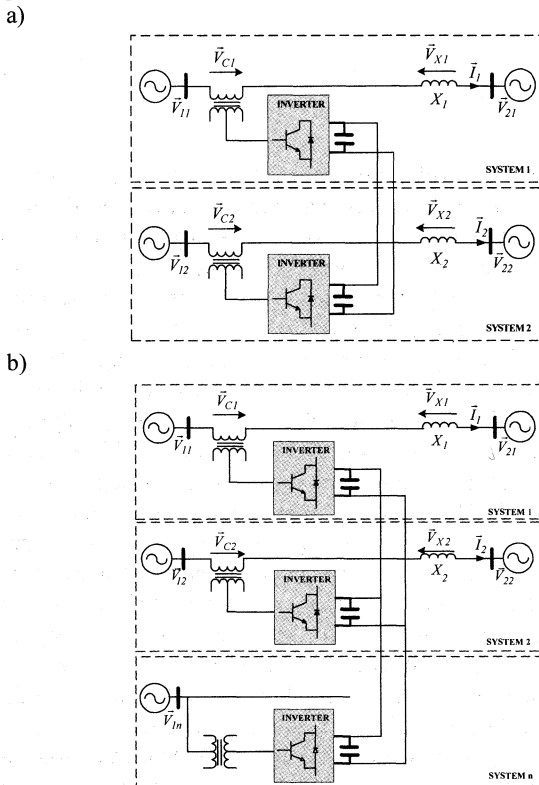
Poprawność analizy probabilistycznej jest jednak w dużym stopniu uwarunkowana trybem wykonania pomiarów (długość pomiarów, dokładność itp.) oraz sposobem opracowania uzyskanych wyników. W związku z powyższym celem artykułu jest opis: i) zasady działania oraz podstawowych właściwości układów IPFC; ii) metody pomiaru i przygotowania danych do analizy probabilistycznej.

2. IPFC – właściwości

Wyobraźmy sobie dwie linie przesyłowe w których, do sterowania przepływem mocy czynnej i biernej, zastosowano IPFC składający się jedynie z dwóch szeregowych przekształtników DC/AC (patrz Rys.1a). System 1 reprezentowany przez reaktancję X_1 ma szynę zasilającą o napięciu V_{11} (np. generator wiatrowy) oraz szynę odbiorczą, o napięciu V_{21}

¹ Praca powstała w ramach grantu KBN: 8T10A 01820

(odbiorcy energii). Podobnie System 2 reprezentowany jest za pomocą reaktancji X_2 oraz napięć V_{12} ,



Rys. 1. Rozpatrywane układy IPFC: a) bez przekształtnika równoległego; b) z przekształtnikiem

V_{22} . Sterowanie przepływem mocy, w rozpatrywanym układzie, odbywa się za pomocą napięć dodatkowych V_{C1} oraz V_{C2} generowanych przez poszczególne szeregowy przekształtniki DC/AC. Ponieważ przekształtnik szeregowy samodzielnie może wytworzyć jedynie napięcie prostopadłe do prądu, zależność na moc czynną pobieraną ze wspólnego obwodu DC (moc potrzebna do wytworzenia napięcia w fazie z prądem), gdy do odbiorców dostarczana jest jedynie moc czynna, jest następująca[6]:

$$P_{21}^* = const; Q_{21}^* = 0$$

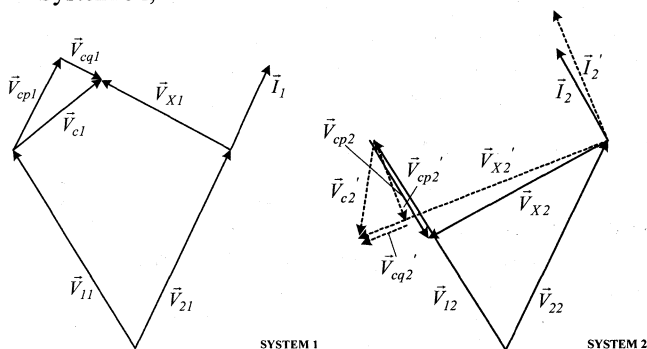
$$P_{IPFCi} = (V_{2i} - V_{1i} \cos \delta_i) \frac{P_{2i}^*}{V_{2i}} \quad (1)$$

gdzie:

$$\delta_i < (\vec{V}_{11}, \vec{V}_{21})$$

P_{2i}^* - wymagana moc czynna dostarczana do odbiorców w Systemie i ;

Q_{2i}^* - wymagana moc bierna dostarczana do odbiorców w Systemie i ;



Rys. 2. Wykresy wektorowe rozpatrywanych Systemów

Na podstawie zależności (1) można powiedzieć, że jedynie w sytuacji, gdy spełnione są warunki $V_{11}=V_{22}$ i $V_{21}=V_{12}$ oraz, gdy moce przesyłane przez poszczególne linie są takie same (proporcje między napięciami są inne dla różnych mocy w poszczególnych liniach) sterowanie przepływem mocy w jednym Systemie nie doprowadzi do pogorszenia jakości mocy w innym ($P_{IPFC}=0$). W każdym innym przypadku przekształtnik np. w Systemie 2 musi pokrywać deficyt mocy czynnej w obwodzie DC, sterując w ograniczonym stopniu przesyłem mocy w „swoim” Systemie (patrz Rys.2), zgodnie z zależnością:

$$|\vec{I}_1 \vec{V}_{cp1}| = |\vec{I}_2 \vec{V}_{cp2}| = |\vec{I}_2' \vec{V}_{cp2}'| \quad (2)$$

Aby jednak nie dopuścić do degradacji mocy, IPFC należy wyposażać w przekształtnik równoległy (patrz Rys.1b), którego zadaniem będzie pokrycie zapotrzebowania szeregowych przekształtników na moc czynną. Zależność na moc przekształtnika równoległego, przy podejściu deterministycznym, jest następująca:

$$P_{Parallel} = \sum_{i=1}^n P_{IPFCi}^{max} = \sum_{i=1}^n \left[\left(1 - \frac{V_{1i}^{min}}{V_{2i}^{max}} \cos \delta_i^{max} \right) P_{2i}^{*max} \right] \quad (3)$$

gdzie:

i – numer linii przesyłowej;

$V_{1i}^{min}, V_{2i}^{max}, \delta_i^{max}, P_{2i}^{*max}$ - max lub min odchylenia.

Biorąc pod uwagę fakt, że procesy zachodzące w systemie elektroenergetycznym są losowe, moc przekształtnika równoległego może być znacznie ograniczona przy podejściu probabilistycznym (z bardzo dużym poziomem ufności) w porównaniu z podejściem deterministycznym (3).

Poprawność analizy probabilistycznej jest jednak w dużym stopniu uwarunkowana trybem wykonania pomiarów (długość pomiarów, dokładność itp.) oraz sposobem opracowania uzyskanych wyników.

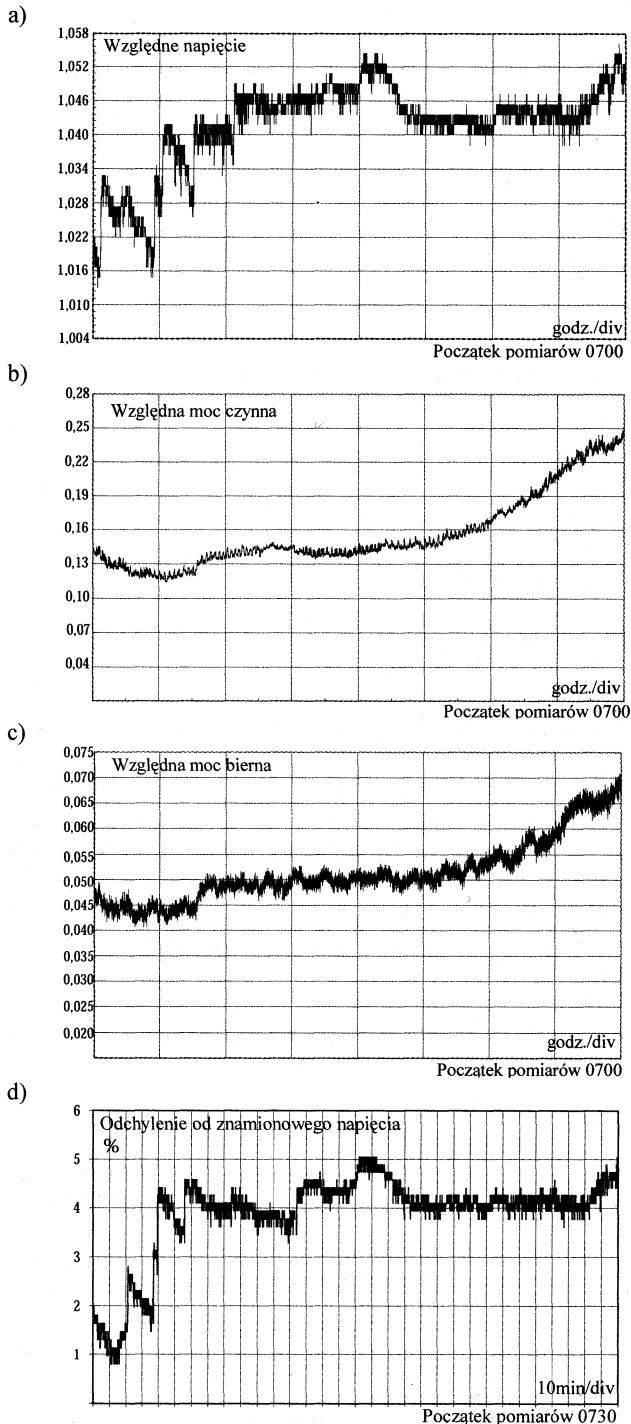
3. Pomiary wielkości elektrycznych w systemie elektroenergetycznym

Aby wyniki analizy probabilistycznej były miarodajne, pomiary wielkości elektrycznych (niezbędnych do określenia mocy przekształtnika równoległego) jak również same urządzenia pomiarowe, metody pomiarów, metody obliczeń powinny spełniać odpowiednie wymagania norm (np. min. 7-mio dniowy okres pomiarów, częstotliwość samplowania 6.4kHz itp.).

Sposób wykonywania pomiarów określa norma PN 50160 [9] (jest to Europejska norma EN 50160 przyjęta przez CE-NELEC w 1994r., a w Polsce przez PKN w październiku 1998r.). Norma ta mówi, że wartość średniego, 10-minutowego napięcia RMS powinna mieścić się w granicach +/-10% napięcia zasilającego. Przy czym średnie napięcie 10-minutowe to wartość wyliczona z próbek kalkulowanych w sposób ciągły okres po okresie (co każde 20ms/lub10ms z ilością co najmniej 128 sampli na okres). Oznacza to, iż prawidłowy rejestrator powinien wyliczyć wartość średnią napięcia RMS za każde 10 minut uwzględniając (buforując w pamięci) co najmniej 30 tys. próbek z każdej 10-minutowki. Rejestratory, które nie kalkulują wartości średniej z pomiarów okres po okresie, są niewystarczające, gdyż pozostają „ślepe” na krótkotrwałe wahania napięcia i co za tym idzie ich odczyt średni jest niemiarodajny.

Tak więc właściwy rejestrator nie tylko powinien samplować sygnał napięciowy z częstotliwością 6,4kHz w mo-

mencie wykonywania kalkulacji wartości RMS, ale co najważniejsze- powinien uwzględniać każdy okres przy obliczaniu średniej wartości 10 minutowej.



Rys.3. Wyniki pomiarów w wybranych przedziałach czasowych (napięcie odniesione jest do napięcia deklarowanego, moce czynna i bierna odniesione są do znamionowej mocy transformatora 16MVA)

10 minutowe zmiany napięcia są wymagane w analizie jakościowej energii elektrycznej (Rys.3d). Natomiast w przypadku analizy probabilistycznej uwzględniać należy jedynie wartości chwilowe (Rys.3a.b.c) napięć, prądów, moce ponieważ przekształtnik równoległy musi pokrywać chwilowe zapotrzebowanie na moc czynną.

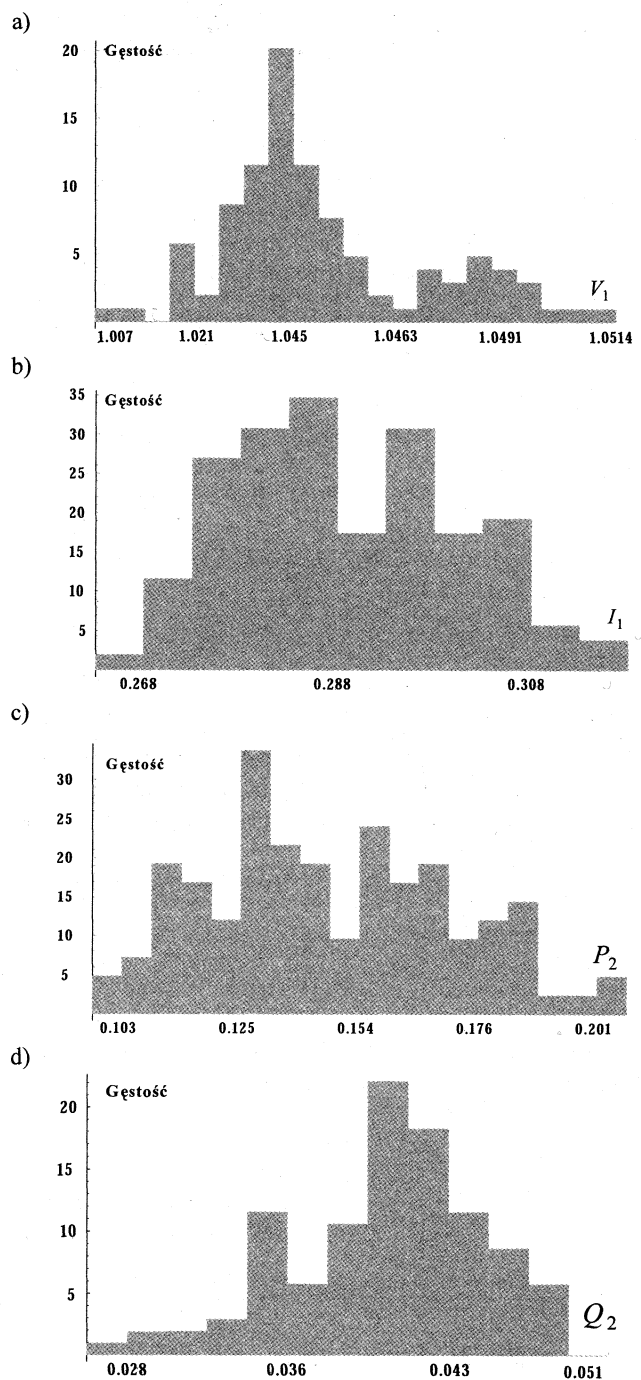
Do pomiarów wykorzystano analizator i rejestrator sieci trójfazowych SKYLAB HT9032 firmy HT ITALIA, który umożliwia pomiar i rejestrację parametrów sieci zgodnie z wymogami normy PN50160 (próbki-128 próbek na

okres, pamięć 2MB-miesiąc nieprzerwanej rejestracji) [8]. Pomiary wykonano w okresie czterech tygodni (lipiec 2002r.), na stacji GPZ, w polu transformatora 110kV/15kV po stronie 15kV.

4. IPFC – analiza probabilistyczna

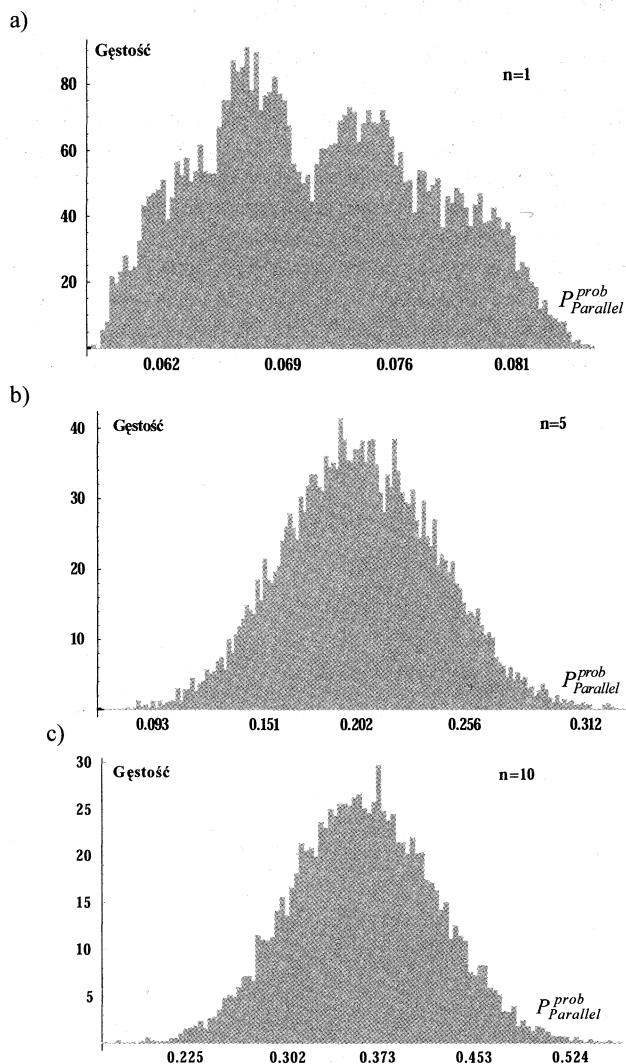
Przy podejściu deterministycznym moc przekształtnika równoległego, wchodzącego w skład układu IPFC, dobiera się tak, aby był w stanie pokryć maksymalne zapotrzebowanie na moc czynną przekształtników szeregowych. Biorąc pod uwagę fakt, że procesy zachodzące w systemie elektroenergetycznym są losowe wyznaczmy moc przekształtnika równoległego przy podejściu probabilistycznym.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, wyznaczono rozkłady losowe mierzonych w systemie elektroenergetycznym wielkości (Rys.4, rozkłady dla 28 dniowego cyklu pomiarowego). Następnie przy użyciu metod numerycznych,



Rys.4. Rozkłady mierzonych wielkości

wykorzystując rozkłady losowe, zależność (1) oraz biorąc pod uwagę korelacje eksperymentalne między mierzonymi wielkościami wyznaczono wypadkowe rozkłady mocy przekształtnika równoległego $P_{Parallel}^{prob}$ (Rys.5a., jeden System, Rys.5b, pięć Systemów, Rys.5b, dziesięć Systemów).



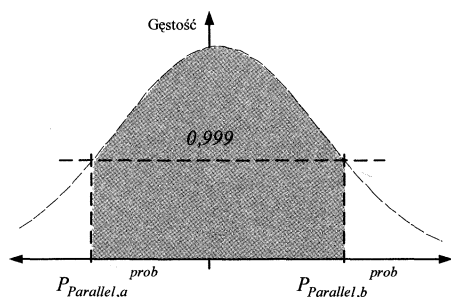
Rys.5. Wypadkowe rozkłady mocy przekształtnika równoległego

Moc przekształtnika równoległego przy podejściu probabilistycznym wyznaczono na podstawie zależności (4) wybierając granicę obszaru odpowiadającego poziomowi ufności 0,999 (patrz Rys.6.).

$$P_{Parallel}^{prob} = \max \left(\text{abs} \left(P_{Parallel,a}^{prob}, P_{Parallel,b}^{prob} \right) \right) \quad (4)$$

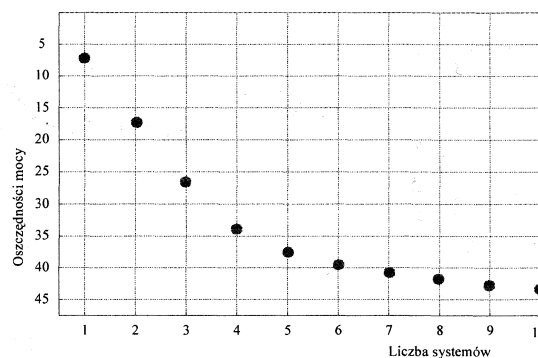
gdzie:

$P_{Parallel,a}^{prob}, P_{Parallel,b}^{prob}$ - zakresy dla max gęstości prawdopodobieństwa z poziomem ufności 0.999.



Rys.6. Metoda wyznaczania $P_{Parallel}^{prob}$

Na Rys.7. przedstawiono oszczędności mocy przekształtnika równoległego, jakie są możliwe do osiągnięcia, przy podejściu



Rys.7. Oszczędności mocy przekształtnika równoległego

probabilistycznym. Na podstawie krzywej można stwierdzić, że dla jednego Systemu ($n=1$), IPFC jest wówczas „zwykłym” układem UPFC, oszczędności mocy są znaczące i wynoszą 7%. W miarę jak IPFC swoim działaniem obejmuje większą liczbę Systemów oszczędności wzrastają i w przypadku 10 wynoszą 43%.

5. Podsumowanie

W artykule opisano układy IPFC, które mogą być wykorzystywane, w systemie elektroenergetycznym, do sterowania przesyłem mocy czynnej i biernej. Aby uniknąć sytuacji w której sterowanie przesyłem mocy w jednej linii prowadzi do pogorszenia jakości mocy w innej, IPFC należy wyposażyć w przekształtnik równoległy. Biorąc pod uwagę fakt, że procesy zachodzące w systemie elektroenergetycznym są losowe, moc przekształtnika równoległego może być znacznie ograniczona przy podejściu probabilistycznym w porównaniu z podejściem deterministycznym.

Poprawność analizy probabilistycznej jest w dużym stopniu uwarunkowana trybem wykonania pomiarów oraz sposobem opracowania uzyskanych wyników.

Literatura

- [1] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems," *IEEE Press*, New York, 2000.
- [2] Y.H. Song, A.T. Johns, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)," *IEE Power and Energy Series 30*, TJ Internat. Ltd, Padstow, Cornwall, 1999.
- [3] R. Strzelecki, H. Supronowicz, "Filtracja harmonicznych w sieciach zasilających prądu przemiennego," *Wydaw. Adam Marszałek*, Toruń, Wyd.1/2, 1997/99.
- [4] R. Strzelecki, H. Supronowicz, "Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy," *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 2000.
- [5] Strzelecki R., Benysek G., Bojarski J.: *Interline power flow controller*, SENE Conference, POLAND, 2001, Vol. 2, pp. 591–596.
- [6] Strzelecki R., Bojarski J., Benysek G.: *Probabilistic method for parallel filter's power selection in interline power flow controller*, PMAPS 2002, Vol.2, pp. 997–1002. Naples, Włochy.
- [7] Gyugyi L., Kalyan K. Sen., Schauder Colin D.: *The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.14, No.3, pp.1115-1122.
- [8] Instrukcja użytkownika SKYLAB HT9032.
- [9] PN-EN 50160 – Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.

Artykuł recenzowany.