

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/277021954>

Metodyka pomiarów synchronicznych (PMU) oraz przykłady zastosowania

Article · August 2014

CITATIONS

0

READS

1,364

3 authors:



Adrian Halinka

Silesian University of Technology

52 PUBLICATIONS 65 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Michal Szewczyk

Silesian University of Technology

30 PUBLICATIONS 33 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Mariusz Talaga

Energotest

4 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Implementation of the PMU-Based Technology in the Polish Power Grid [View project](#)



New Hardware and Software Functionalities of the Power Automation in the Polish Power System [View project](#)

dr hab. inż. Adrian Halinka, prof. Politechniki Śląskiej
dr inż. Michał Szewczyk
Politechnika Śląska
mgr inż. Mariusz Talaga
Energotest sp. z o.o.

Metodyka pomiarów synchronicznych (PMU) oraz przykłady zastosowania

Streszczenie

W artykule przeanalizowano możliwość praktycznego wykorzystania pomiarów synchronicznych w systemie elektroenergetycznym lub jego wydzielonym fragmencie. Skupiono się na dynamicznych właściwościach algorytmów estymacji synchrofazora, częstotliwości i jej pochodnej. Wymagania te mają szczególne znaczenie, gdy pomiary synchroniczne wykorzystywane są do realizacji automatyki przy szybko zmieniającej się częstotliwości Systemu Elektroenergetycznego (SEE). Omówiono wybrane wymagania na przykładzie aplikacji realizującej zadania monitorowania, automatycznego bilansowania i odciążania SEE w sytuacjach awaryjnych. Podjęto również próbę usystematyzowania wymagań stawianych PMU (Phasor Measurement Unit) w tym zakresie.

1. Wstęp

Wykorzystanie techniki pomiarów synchronicznych w elektroenergetyce stwarza potencjalne nowe możliwości, m.in. w zakresie monitorowania i sterowania w obszarowych (rozległych) strukturach sieci elektroenergetycznych. Możliwość dokładnej synchronizacji pomiarów z czasem uniwersalnym (UTC) którą oferuje technika synchrofazorów pozwala na porównywanie i analizę wyników pomiarów pozyskiwanych z oddalonych miejsc systemu elektroenergetycznego z zachowaniem ich spójności informacyjnej. Istnieje wiele potencjalnych zastosowań tej techniki dla poprawy funkcjonowania SEE [6] [12]. Cecha spójności informacyjnej pomiarów jest szczególnie pożądana w stanach dynamicznych pracy SEE, np. podczas kołysań mocy, szybkich zmian częstotliwości czy wydzielania części systemu do pracy wyspowej, a więc w sytuacjach awaryjnych lub zagrożenia awarią. Przy rosnącej liczbie w strukturze SEE rozproszonych źródeł energii (często niestabilnych funkcjonalnie) możliwość szybkiej i poprawnej estymacji stanu pracy obserwowanej sieci nabiera jeszcze większego znaczenia. W tym kontekście wykorzystanie techniki pomiarów synchronicznych wydaje się działaniem efektywnym, szczególnie w zakresie poprawy „jakości” i bezpieczeństwa pracy krajowych, jak i regionalnych systemów elektroenergetycznych. Świadczą o tym również programy - dotyczące zagadnień „pomiarów synchronicznych” - wdrażane w różnych krajach świata, m.in. w USA, Chinach, Brazylii, Niemczech, Szwajcarii i Danii. O znaczeniu wprowadzania techniki pomiarów synchronicznych w monitorowaniu, sterowaniu i prowadzeniu pracy SEE świadczą również nakłady inwestycyjne przeznaczone na ten cel. Przykładowo, budżet przeznaczany przez departament energetyki na wprowadzanie technologii SmartGrid w USA wynosi 4,5 mld \$, w tym ok. 400 mln \$ przeznaczają się na technikę tzw. synchrofazorów [13]. Od lat 90 - tych ubiegłego wieku prowadzone są prace nad odpowiednim zdefiniowaniem i unormowaniem zagadnienia pomiarów synchronicznych [1]. Jednak nawet najnowsze unormowania z 2011 roku [3][4], w których określono już część wymagań dynamicznych, nie uwzględniają wszystkich czynników wpływających na estymację synchrofazora, częstotliwości i jej pochodnej. Stąd mogą pojawić się istotne różnice w zastosowanych przez różnych producentów PMU algorytmach pomiarowych, a tym samym otrzymywanych w efekcie ich realizacji wynikach. Wskazuje się również na trudności w implementacji tych wymagań, jak i na potrzebę nowelizacji unormowań w tym zakresie [9].

W zależności od zastosowania wskazane jest, aby algorytmy dokonujące estymacji parametrów synchrofazora oraz częstotliwości i jej pochodnej charakteryzowały się odpowiednimi właściwościami. Osiągnięcie celu, jakim jest dostarczenie przez PMU do odpowiednich aplikacji wiarygodnych i właściwie zdefiniowanych danych pomiarowych, uwarunkowane jest metodycznym podejściem do zagadnienia. W dalszej części artykułu przeanalizowano wymagania metrologiczne dla urządzeń PMU pod kątem zastosowania w aplikacjach służących do nadzorowania awaryjnego bilansowania mocy czynnej i biernej i wydzielania obszarów sieciowych. Dla tych zastosowań konieczna jest poprawna estymacja mierzonych wielkości w szerokich granicach częstotliwości, jak i przy potencjalnie dużej dynamice jej zmian. Wydaje się, że spełnienie wymagań przez PMU w tym zakresie pozwoli na wykorzystanie uzyskanych danych pomiarowych do wielu innych zastosowań.

2. Porównanie klasycznego odciażania częstotliwościowego (SCO) z aplikacjami wykorzystującymi obszarowe pomiary synchroniczne.

Automatyka odciażająca stosowana jest w SEE na wypadek poważnych awarii systemowych skutkujących znacznym deficytem mocy czynnej. Ze względu na prostotę realizacji najbardziej rozpowszechniona jest automatyka realizująca Samoczynne Częstotliwościowe Odciażanie (SCO). W połączonym europejskim systemie elektroenergetycznym ENTSO-E katastrofalną byłaby sytuacja, kiedy częstotliwość spada do progu I-go stopnia automatyki SCO. Towarzyszyłby temu ubytek mocy czynnej rzędu 20-30 GW. Zatem można przyjąć, że istotą działania automatyki SCO jest ingerencja w pracę lokalnych struktur sieciowych na skutek wystąpienia awarii czego następstwem może być konieczność wydzielenia „wyspy” sieciowej lub dezintegracji systemu ENTSO-E. Niemożliwość oszacowania na podstawie pomiaru częstotliwości rozległości awarii powoduje, że automatyka SCO może działać nieefektywnie z powodu:

- a) opóźnionego działania (jeśli nie są wykorzystywane człony df/dt),
- b) możliwości nieskutecznego działania (gdy moc wyłączana przez SCO jest niewystarczająca),
- c) rozrzutu parametrów przekaźników realizujących SCO (różne czasy własne i dokładności algorytmów pomiarowych),
- d) niejednolite podejście do zasad parametryzowania automatyki SCO,
- e) nieokreślonej faktycznej mocy wyłączanej dla poszczególnych stopni (odbiorcy mogą pracować z inną mocą niż założona lub być wyłączone),
- f) możliwości pogorszenia bilansu obszarów (wyłączenia w pobliżu źródeł w obszarach silnie uprzemysłowionych).

Mimo prostoty idei działania automatyki SCO, przytoczone powyżej sytuacje skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań w tym zakresie. Zastosowanie aplikacji wykorzystujących technikę pomiarów synchronicznych pozwala wyeliminować lub znacznie zredukować wady klasycznego SCO. Przykładem takiego systemu jest aplikacja SmartLoad [6] wdrożona w Polsce w dwóch zakładach przemysłowych posiadających własne źródła o mocy kilkudziesięciu MW, a służąca do bilansowania i wydzielania autonomicznego obszaru sieciowego w przypadku awarii systemowych. Rozszerzenie tego rodzaju aplikacji poza jednostkę gospodarczą na większe obszary sieciowe jest znacznie trudniejszym przedsięwzięciem głównie z powodów formalnych, chociażby ze względu na zróżnicowaną własność i odpowiedzialności czy sposoby wymiany informacji.

Zasada działania systemu SmartLoad polega na ciągłym monitorowaniu topologii sieci, częstotliwości oraz bilansu mocy czynnej i biernej nadzorowanego obszaru. W przypadku deficytu mocy czynnej wskazywane są odbiory przeznaczone do wyłączenia. Odbiory te wyznaczone są na podstawie ich priorytetów i bieżącego bilansu mocy. Przy spadku częstotliwości do progu pobudzenia bilansowania następuje wyłączenie wyznaczonych odbiorów (jeśli jest taka potrzeba) w czasie ok. 0,2 s (czas własny automatyki). Dalsze obniżenie częstotliwości do ustawionej wartości progu „odciążenia” powoduje po nastawionym czasie (0,5 s) wydzielenie już zbilansowanego obszaru sieciowego, co znacznie zwiększa szansę utrzymania wydzielonego obszaru.

3. Analiza wymagań metrologicznych PMU pod kątem zastosowania w automatyce odciażającej i rozcinającej.

Głównym problemem metrologicznym w przypadku wykorzystania PMU jest „pomiar” wielkości elektrycznych (napięć, mocy czynnej i biernej, częstotliwości) w sytuacji dynamicznej zmiany tych wielkości, szczególnie zaś zmiany częstotliwości. Odpowiednia synchronizacja pomiarów, oraz algorytmy wyznaczania potrzebnych wielkości w warunkach pracy normalnej i zakłóceńowej są

niezbędne do osiągnięcia satysfakcjonujących efektów. Dobrą podstawą, choć niewystarczającą dla wymagań metrologicznych stawianych jednostkom pomiarowym, są wymagania przedstawione w tabeli 1 i 2 określone dla PMU w najnowszej normie z 2011 r. Uwzględniają one wymagania pomiaru częstotliwości oraz wymagania w stanach dynamicznych [3]. Wcześniejsza wersja normy [2] z 2005 r. nie podaje żadnych wymagań dotyczących pomiaru częstotliwości w stanach dynamicznych.

Jak można wywnioskować z tabeli 1 do zastosowania w automatyce odciążającej, ze względu na spodziewany zakres częstotliwości sygnału $f_N \pm 5$ Hz, do wyznaczania fazora nadają się PMU klasy 1 lub M. Jednak ze względu na brak wymagań dla klasy 1 odnośnie pomiaru częstotliwości preferowane jest stosowanie klasy M. Aby osiągnąć zakres pracy „w klasie” dla częstotliwości $f_N \pm 5$ Hz należy zastosować częstość raportowania na poziomie 25 lub 50 ramek na sekundę.

Wymaganie 4 dotyczące niewrażliwości na zawartość harmoniczną jest „dedykowane” tylko częstotliwości znamionowej. W tym stanie spełnienie wymagań jest łatwe dla wszystkich klas. Zastosowanie filtrów ortogonalnych pełnookresowych lub będących wielokrotnością okresu – „nie dostrojonych” do częstotliwości znamionowej, a stosowanych do wyznaczenia fazora – w naturalny sposób tłumi wyższe harmoniczne. Stąd w normie [5] pojawia się dodatkowe wymaganie, aby ten test przeprowadzić również dla częstotliwości odbiegającej od znamionowej o ± 1 Hz w stosunku do częstotliwości znamionowej. Natomiast wydaje się, że w celach informacyjnych wskazane by było przeprowadzenie tego rodzaju testu dla całego zakresu pomiarowego ± 5 Hz.

LP.	Wielkość, której wartość ulega zmianie podczas testu	Wartości odniesienia	Wymagany zakres zmienności lub poziom zakłóceń mierzonego sygnału przy zachowaniu 1% błędu TVE			
			C37.118-2005		C37.118.1-2011	
			Klasa 0	Klasa 1	Klasa P	Klasa M
1	Częstotliwość sygnału	50Hz lub 60Hz	±0,5 Hz	±5 Hz	±2 Hz	±2 Hz ($F_s \leq 10$) ±5 Hz ($F_s \geq 25$) $F_s/5$ ($F_s = 10 \dots 25$)
2	Amplituda sygnału	100% znamionowej	80% -120%	10% - 120%	dla napięcia	
					80% -120%	10% -120%
					dla prądu	
					10% - 200%	
3	Kąt fazowy	0 radianów	±π			
4	Odporność na zawartość pojedynczej harmonicznej od 2-giej do 50-tej	<0,2% (THD)	1%	10%	1%	10%
5	Zakłócenie interferencyjne o częstotliwości poza pasmem przenoszenia	<0,2%	1%	10%	-	TVE – 1,3% 10% dla $F_s \geq 10$ brak wymagań dla $F_s < 10$
6	Temperatura (test nr 1)	23°C	-	-	0°C 50°C	0°C 50°C

Tabela 1. Porównanie wymagań poszczególnych klas PMU (estymacja fazora) [2][3].

F_s - częstość raportowania w ramach na sekundę; TVE – Total Vector Error;

Z tabeli 2 wynika, że dla pomiaru częstotliwości i jej pochodnej nie podano wymagań dla zmienności od takich parametrów jak amplituda sygnału, temperatura otoczenia, obecność składowej przeciwnej i zerowej dla układów 3-fazowych, czy zakłóceń harmonicznnych dla częstotliwości innych niż znamionowa. Brak tych wymagań nie powinien zwolnić producenta (użytkownika) od sprawdzenia działania PMU w tych warunkach.

Dla zapewnienia zakresu pracy „w klasie” przy zmianach częstotliwości o ± 5 Hz względem częstotliwości znamionowej należy używać częstotliwości raportowania co najmniej 25 ramek na sekundę (Tabela 1 i 2). Warto zwrócić uwagę na wymaganie dotyczące pomiaru pochodnej częstotliwości w obecności zakłóceń harmonicznnych. Dopuszcza się tu błąd rzędu 6 Hz/s dla $F_s > 20$,

co wydaje się wartością zbyt „łagodną”. Zasadne jest zatem, aby przy potrzebie wykorzystania pomiaru pochodnej częstotliwości określić własne ostrzejsze wymagania dostosowane do celów jakim mają służyć.

LP	Wielkość, której wartość ulega zmianie podczas testu	Wartości odniesienia	Wymagany zakres zmienności lub poziom zakłóceń sygnału według C37.118-1:2011		Dopuszczalny błąd częstotliwości FE i pochodnej częstotliwości RFE			
			Klasa P	Klasa M	Klasa P		Klasa M	
					FE [Hz]	RFE [Hz/s]	FE [Hz]	RFE [Hz/s]
1	Częstotliwość sygnału	50 Hz lub 60 Hz	± 2 Hz	± 2 Hz ($F_s \leq 10$) ± 5 Hz ($F_s \geq 25$) $F_s/2$ ($F_s = 10 \dots 25$)	0,005	0,01	0,005	0,01
2	Odporność na zawartość pojedynczej harmonicznej od 2-giej do 50-tej	<0,2% (THD)	1%	10%	0,005	0,01	$(F_s \leq 20)$	
							0,005	2
							$(F_s > 20)$	
3	Zakłócenie interferencyjne o częstotliwości poza pasmem przenoszenia	<0,2%	Brak wymagań	10%	Brak wymagań	0,01	0,1	
							0,1	

Tabela 2. Wymagania dot. pomiaru częstotliwości i jej pochodnej dla klasy P i M [3].

F_s - częstość raportowania w ramach na sekundę

4. Charakterystyka wymagań dynamicznych PMU

4.1. Pasma przenoszenia sygnałów

Norma C37.118.1 [3] z roku 2011 wprowadza dla PMU wymagania dynamiczne. Spełnienie tych wymagań pozwala na porównywanie wyników pomiarów z różnych PMU w stanach dynamicznych takich jak kołysania mocy, liniowa zmiana częstotliwości, czy skok jednostkowy amplitudy lub fazy sygnału. Wymagania i testy pozwalają również ocenić przydatność pomiarów dokonywanych przez PMU do implementacji różnych algorytmów bazujących na tych pomiarach.

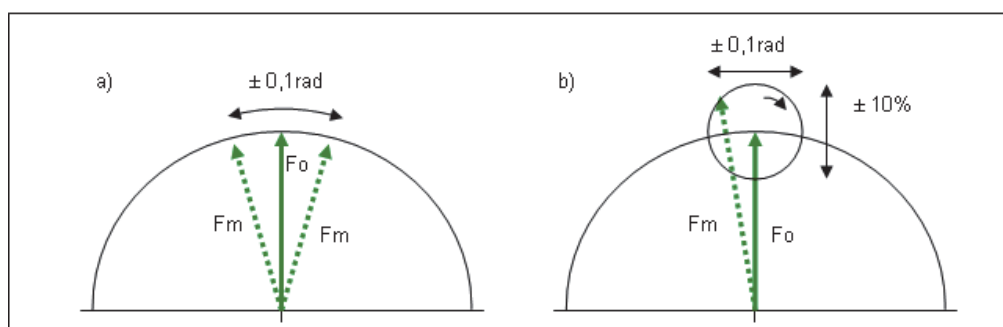
Poziom modulacji	Wartości odniesienia	Zakresy modulacji i wymagania. Dopuszczalny błąd TVE, wyznaczania częstotliwości RE i jej pochodnej RFE							
		Klasa P				Klasa M			
		Zakres modulacji	TVE	FE	RFE	Zakres modulacji	TVE	FE	RFE
Amplitudowa 10%	100% znamionowej amplitudy, częstotliwość znamionowa	od 0,1Hz do $F_s/5$ nie więcej niż 2 Hz	3%	0,01 Hz ($F_s \leq 20$)	0,2 Hz/s ($F_s \leq 20$)	od 0,1 Hz do $F_s/10$ nie więcej niż 5 Hz	3%	0,06 Hz ($F_s \leq 20$)	2 Hz/s ($F_s \leq 20$)
Fazowa 0,1rad				0,06 Hz ($F_s > 20$)	3 Hz/s ($F_s > 20$)			0,3 Hz ($F_s > 20$)	30 Hz/s ($F_s > 20$)

Tabela 3. Wymagane pasmo przenoszenia PMU [3]

F_s - częstość raportowania w ramach na sekundę;

Pasma przenoszenia PMU jest sprawdzane przy pomocy dwóch testów wykorzystujących modulację sygnałów. Na rys. 1 przedstawione przykładowe trajektorie fazora modulowanego fazowo

i amplitudowo. Sygnały o wartości znamionowej poddaje się modulacji amplitudy (10%) i fazy (0,1 rad) w pierwszym teście i modulacji jedynie fazy (0,1rad) w drugim. Modulacja amplitudy i fazy pozwala na przetestowanie jakości pomiarów PMU w symulowanych warunkach kołysań mocy. W tabeli 3. przedstawiono wymagania dla klas P i M. Pasma przenoszenia zmodulowanych sygnałów przez algorytmy pomiarowe uzależnione jest od częstości raportowania, i jest dobrane tak, aby nie występowało zjawisko aliasingu. Analizując wymagania zawarte w powyższej tabeli można zauważyć, że wymagania dotyczące pomiaru częstotliwości i jej pochodnej dla klasy M są znacznie bardziej łagodne niż dla klasy P. Dopuszczalne wartości błędów na poziomie 0,3 Hz dla FE i 30 Hz/s dla RFE wydają się zbyt duże, aby były do zaakceptowania w aplikacjach bazujących na tych pomiarach.



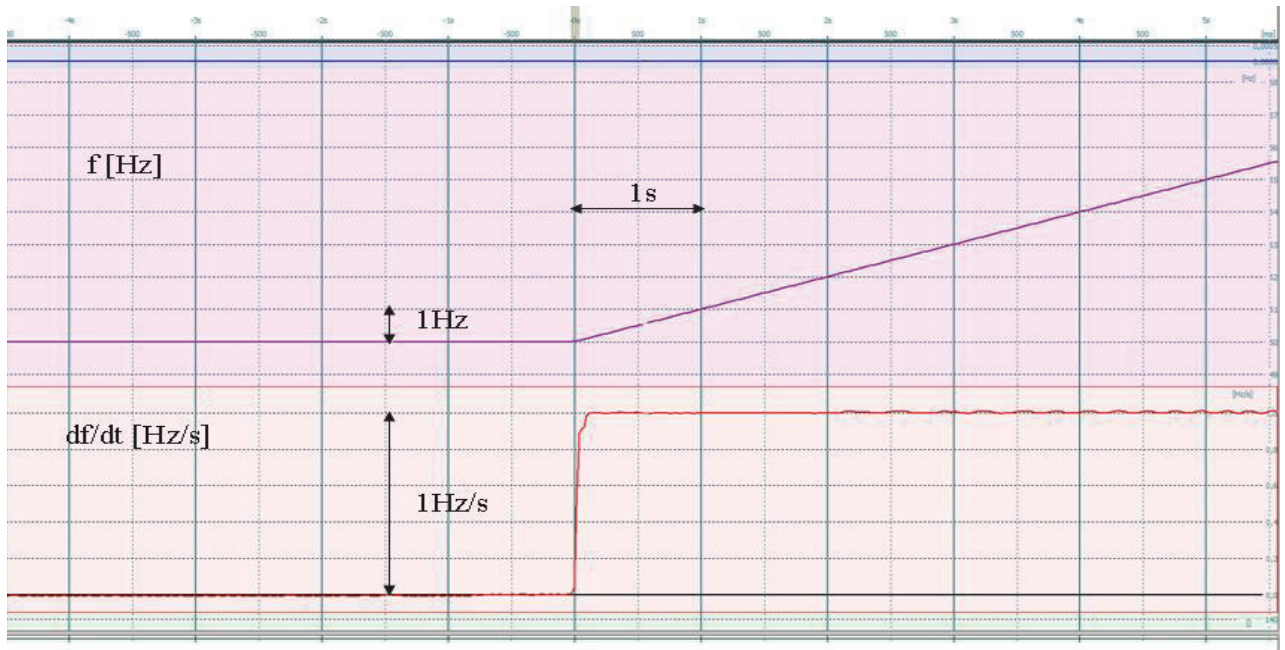
Rys 1. Przykład modulacji fazora o częstotliwości znamionowej dla modulacji fazowej a) oraz amplitudowej i fazowej b)

4.2. Liniowa zmiana częstotliwości

Test z wykorzystaniem sygnałów o liniowo w czasie zmiennej częstotliwości symuluje stan niezbalansowania mocy czynnej w systemie. Ma na celu wykazać, że PMU spełnia wymagania zawarte w tabeli 4 podczas dynamicznej zmiany częstotliwości. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że dopuszczalny błąd estymacji częstotliwości dla klasy M wynosi 5m Hz przy liniowej zmianie częstotliwości z szybkością $\pm 1 \text{ Hz/s}$. Zatem algorytm dokonujący obliczeń musi „wykazać się” odpowiednią dynamiką wynikającą z zapisów normy [3], wymagane jest tu precyzyjne uwzględnienie długości okna pomiarowego.

Sygnał testowy	Zakres zmian i wymagania							
	Dopuszczalny błąd TVE, wyznaczania częstotliwości RE i jej pochodnej RFE							
	Klasa P				Klasa M			
	Zakres	TVE	FE	RFE	Zakres	TVE	FE	RFE
Linowa zmiana częstotliwości $\pm 1,0 \text{ Hz/s}$	$\pm 2,0 \text{ Hz}$	1%	0,01 Hz	0,1 Hz/s	$\pm 5,0 \text{ Hz}$	1%	0,005 Hz	0,1 Hz/s

Tabela 4. Wymagania podczas liniowych zmian częstotliwości

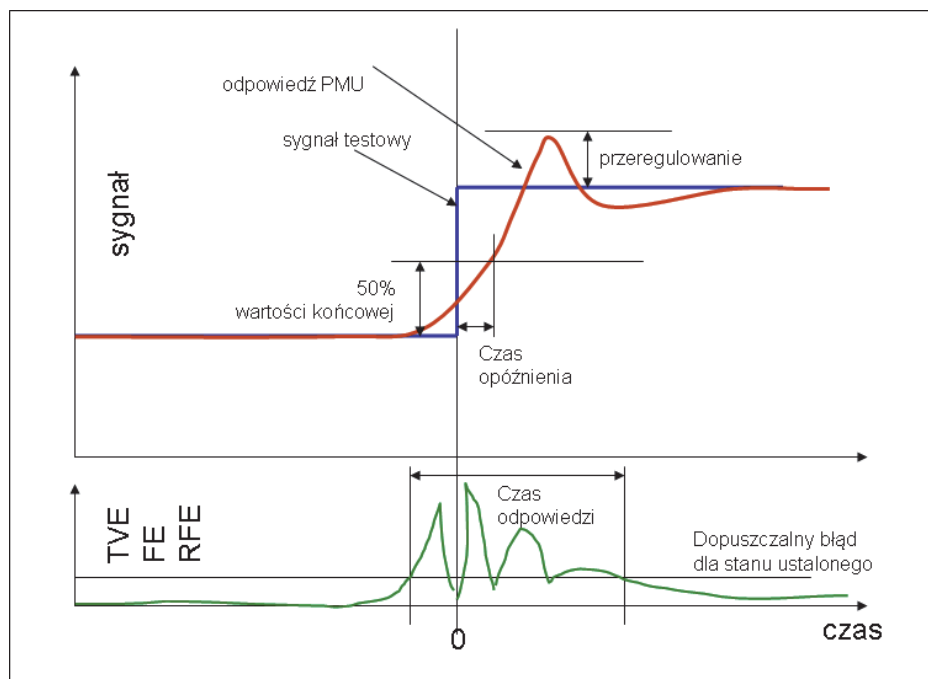


Rys. 2. Zarejestrowane dane z PMU (RZ40) firmy Energotest – odpowiedź na liniową zmianę częstotliwości

Również w tym przypadku wymagania stawiane przez normy wydają się być niewystarczające. Ograniczono się do zmian częstotliwości z szybkością 1 Hz/s. W rzeczywistych warunkach zmiana ta może osiągać wyższe wartości, zatem wymagany zakres pomiarowy df/dt jest zbyt mały.

4.3. Odpowiedź na skok jednostkowy

Wymagania stawiane PMU podczas skoku jednostkowego amplitudy lub fazy określone zostały w tabeli 5, a definicja wielkości opisujących odpowiedź na skok jednostkowy została podana na rys. 3. Jest to rysunek poglądowy, skok jednostkowy może dotyczyć amplitudy lub fazy i może być dodatni lub ujemny. Skok amplitudy lub fazy będzie jednak skutkował stanem przejściowym dla tych pomiarów. Czas opóźnienia zdefiniowany jak na rys. 1, ze względu na stosowanie kompensacji (oznaczanie próbek czasem przesuniętym o połowę długości okna pomiarowego filtrów), może być dodatni lub ujemny (w wymaganiach określona jest wartość bezwzględna).



Rys. 3. Zobrazowanie wielkości opisujących odpowiedź PMU na skok jednostkowy

Sygnał testowy Skokowa zmiana	Wymagania				
	Czas odpowiedzi TVE	Czas opóźnienia	Maks. przeregulowanie	Czas odpowiedzi dla pomiaru częstotliwości	Czas odpowiedzi dla pomiaru pochodnej częstotliwości
Klasa P					
Amplitudy $\pm 10\%$	34 ms	$\pm 1/(4 F_s)$	5%	70 ms	80 ms
Kąta $\pm 10^\circ$					
Klasa M					
Amplitudy $\pm 10\%$	Tabela 6	$\pm 1/(4 F_s)$	10%	Tabela 6	Tabela 6
Kąta $\pm 10^\circ$					

Tabela 5. Wymagania dla skoku jednostkowego amplitudy lub kąta.

 F_s - częstość raportowania w ramkach na sekundę;

Wymagania według normy C37.118-1		Częstość raportowania dla systemu 50Hz		
		[ramki / s]		
		10	25	50
Czas odpowiedzi	Fazora (TVE)	0,595 s	0,231 s	0,199 s *)
	Częstotliwość (FE)	0,869 s	0,328 s	0,130 s
	Pochodna częstotliwości (RFE)	1,038 s	0,369 s	0,134 s

Tabela 6. Czasy odpowiedzi dla klasy M w zależności od częstości raportowania.

 F_s - częstość raportowania w ramkach na sekundę (Tabela 1.);

*) prawdopodobny błąd, patrz opis poniżej

Organizacja North American Synchrophasor Initiative (NASPI) promująca i koordynująca prace związane z wdrażaniem techniki synchrofazorów zasygnalizowała [9], że w normie C37.118-1:2013 istnieją błędy edytorskie. Taki błąd występuje w powyższej tabeli. Czas odpowiedzi estymacji fazora dla F_s wynoszącego 50 ramek/s powinien wynosić ok. 0,1 s.

Z tabeli 6 wynika, że dla szybkości raportowania na poziomie 25 ramek na sekundę, producenci PMU mogą zastosować algorytm pomiaru częstotliwości i jej pochodnej o czasie własnym wynoszącym ponad 300 ms. Takie wartości maksymalnego czasu odpowiedzi są niezadowolające nawet dla algorytmów pomiarowych realizujących klasyczną automatykę SCO. Stąd zastosowanie szybkości raportowania na poziomie 50 ramek/s jest bardziej zasadne oraz umożliwia uzyskanie czasów odpowiedzi nie dłuższych niż 135 ms.

5. Zalecenia i rekomendacje

Technika pomiarów synchrofazorów jest użyteczna wtedy, kiedy wszystkie urządzenia dokonujące estymacji fazora (PMU) dla realizacji pewnych algorytmów na rozpatrywanym obszarze będą posiadały zbliżone parametry. Stąd ważne są uregulowania normatywne w tym zakresie. W artykule starano się wykazać, iż unormowania te nie są jednak jeszcze wystarczająco kompletne i precyzyjne, aby bezkrytycznie podchodzić do pozyskiwanych z PMU danych.

Zakres wymagań normatywnych jest na tyle szeroki, że zastosowanie różnych konstrukcji PMU, spełniających kryteria określone w normach, nie gwarantuje uzyskania „spójności” właściwości algorytmów, a tym samym uzyskanych w wyniku ich realizacji danych pomiarowych [14]. Stąd potrzeba doprecyzowania i uściślenia wymagań normatywnych pod kątem konkretnego zastosowania. Dlatego prawdopodobnie zaistnieje również potrzeba określenia dodatkowych wymagań dla PMU.

Normy serii C37.118 nie przewidują testów, które mogą być istotne dla użytkownika, zaleca się więc przynajmniej w celach poznania właściwości PMU, aby przeprowadzić dodatkowe badania urządzeń PMU pod kątem przydatności stosowania w rozważanej aplikacji. Do testów tych można zaliczyć np. zbadanie odporności na zakłócenia interharmoniczne, odpowiedź na skok jednostkowy częstotliwości,

obecność składowej symetrycznej przeciwnej i zerowej, czy dokładność pomiaru częstotliwości przy obniżonej amplitudzie sygnału.

Można przypuszczać, że do zastosowań w automatyce odciążającej i rozcinającej korzystne będzie zastosowanie urządzenia PMU klasy M z ustawioną częstością raportowania na 50 ramek/s. Konieczne jest również rozszerzenie zakresu pomiarowego pochodnej częstotliwości np. do ± 5 Hz/s.

Zbyt duże są natomiast dopuszczalne błędy określone w normie dotyczące pomiaru częstotliwości i jej pochodnej, być może wynikające z pomyłki edytorskiej, np. dopuszczalny błąd pomiaru pochodnej częstotliwości na poziomie 6Hz/s przy występujących zakłóceniami sygnałem harmonicznym do wartości 10%. Również dopuszczalny błąd pomiaru częstotliwości (0,3 Hz) i jej pochodnej (30 Hz/s) przy modulacji sygnałów pomiarowych (symulacja kołysań mocy) wydaje się zbyt duży. Stąd potrzeba określenia własnych znacznie ostrzejszych wymagań.

6. Doświadczenia eksploatacyjne

Od sierpnia 2013 r. algorytm PMU klasy M jest zaimplementowany w rejestratorach RZ40 w czterech lokalizacjach, w sieci 400kV, na dużym bloku energetycznym i dwóch miejscach sieci niskiego napięcia w Gdańsku i Gliwicach. Dokonywana jest ciągła rejestracja ramek wysyłanych przez PMU. Rejestrowany jest fazy składowej zgodnej napięcia, częstotliwość i jej pochodna. Dane z jednego dnia zajmują ok. 215MB przestrzeni dyskowej, a po bezstratnej kompresji ok. 70 MB/dobę (25 GB/rok). Dzięki ciągłej lokalnej archiwizacji danych system w swoim działaniu zbliżony jest do koncepcji rejestratora permanentnego [11]. Analiza danych z jednego PMU z jednego dnia pod kątem wyszukania zdarzenia spełniającego proste kryteria zajmuje ok. 3 min. przy użyciu współczesnego komputera klasy PC. Uzyskane dane są analizowane m. in. pod kątem dyspozycyjności i wiarygodności. Dla przykładu na rys. 4 pokazano zarejestrowane przebiegi częstotliwości na północy i południu Polski podczas awaryjnego wyłączenia bloku pracującego z mocą 1253 MW we Francji (ENTSO-E). Dane zarejestrowane przez PMU zaimplementowane w rejestratorze RZ40.



Rys. 4. Przykład spójności pomiaru częstotliwości podczas odległych awarii sieciowych

7. Podsumowanie

Zebrane doświadczenia potwierdzają duże możliwości aplikacyjne techniki pomiarów synchronicznych w pracy SEE jak również stanowią przyczynek do prowadzenia dalszych badań i doświadczeń w tym zakresie.

Po uwzględnieniu przedstawionych rekomendacji i uwag wydaje się, że urządzenia PMU są w stanie sprostać zadaniu dostarczania wiarygodnych danych w czasie rzeczywistym.

Mimo iż w Polsce nie są jeszcze wykorzystywane dane on-line pozyskiwane z jednostek PMU w algorytmach decyzyjnych na dużych obszarach istotne jest, aby już teraz rejestrować dane generowane przez PMU. Mogą one posłużyć w przyszłości do opracowywania i testowania algorytmów decyzyjnych z użyciem rzeczywistych historycznych danych.

Literatura

- [1] 1344-1995 - IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems
- [2] C37.118-2005 - IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems
- [3] C37.118.1-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems
- [4] C37.118.2-2011 - IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems
- [5] C37.242-2013 - IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control
- [6] Adrian Halinka, Michał Szewczyk, Mariusz Talaga. „Pomiary synchroniczne w systemie elektroenergetycznym – system SmartLoad do bilansowania mocy w obszarach wysp sieciowych”. Materiały konferencyjne „Automatyka w elektroenergetyce”. Zawiercie 17-19 kwietnia 2013.
- [7] IEC/TR 61850-90-5 ed1.0. Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-5: Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118
- [8] NASPI. Synchrophasor Technology Roadmap March 13, 2009
- [9] NASPI. Performance and Standard Task Team Announcemet. Regarding IEEE Standard C37.118-1:2011. June 19, 2013.
- [10] Mariusz Talaga. „Tworzenie zbilansowanych wysp jako sposób na ograniczenie skutków awarii systemowych - System Smart Load”. Automatyka Elektroenergetyczna 3/2011.
- [11] Mariusz Talaga. Wizja rozwoju rejestratorów zakłóceń. Automatyka Elektroenergetyczna nr 3 (52)/2006
- [12] NASPI. Actual and potential phasor data applications. 12/1/2009.
- [13] U.S. Department of Energy. Synchrophasor Technologies and their Deployment in the Recovery Act Smart Grid Program. August 2013.
- [14] Michał Szewczyk. Wymagania normatywne pomiarów synchronicznych w infrastrukturze elektroenergetyki. Przegląd Elektrotechniczny, R. 90 nr 3, 2014, s. 80-83.

