

Systemy automatyki częstotliwościowego odciążania i bilansowania mocy czynnej obszarów sieciowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane wyniki analiz określających warunki działania automatyki samoczynnego częstotliwościowego odciążania (SCO) i automatyki bilansującej w obszarach sieciowych o różnych współczynnikach odciążania sieci. Sformułowano podstawowe parametry funkcjonalne automatyki SCO w zależności od powstałego deficytu mocy. Przeprowadzone analizy są szczególnie istotne obecnie, w dobie gwałtownie rosnącego nasycenia sieci elektroenergetycznych lokalnymi, rozproszonymi źródłami wytwórczymi. Powstałe struktury sieciowe charakteryzują się dużym ryzykiem wydzielenia się obszarów (podsystemów) o dużym niezbilansowaniu mocy i możliwym znacznym gradientie zmian częstotliwości. Dla takich złożonych funkcjonalnie i konfiguracyjnie układów sieciowych określono zasady formułowania i realizacji systemów automatyki odciążającej i bilansującej opartych na obszarowych, rozproszonych systemach pomiarowo-decyzyjnych.

Abstract. The paper presents selected aspects of operating of frequency load shedding and balancing of active power automatics systems for network areas with different load shedding network coefficients. The basic functional parameters of these systems were formulated depending on the resulting power deficit. Moreover some principles of creating and implementing of these systems using Wide Area Measurements techniques and decision-making systems were formulated. The proposed automatics system is dedicated for network systems of high complexity both in their functional and configuration problems such as the ones networks with distributed generation sources. (*Automatic Systems of Frequency Load Shedding and Balancing of Active Power for Network Areas*).

Słowa kluczowe: obszary sieciowe niezbilansowane mocowo z lokalnymi źródłami wytwórczymi, automatyka wydzielająca i bilansująca wyspy sieciowe, rozproszone systemy automatyki odciążającej i bilansującej.

Keywords: unbalanced network areas with local energy sources, islanded networks balancing automatic, distributed automatic systems with frequency load shedding and balancing active power.

doi:10.12915/pe.2014.08.25

Wstęp

W pracy systemu elektroenergetycznego (SEE) mogą występować zdarzenia, których skutkiem może być niezrównoważenie bilansu mocy czynnej, tj. pojawienie się różnicy pomiędzy mocą czynną generowaną a sumą mocy czynnej odbieranej oraz mocy strat przesyłowych. Sytuacja taka może mieć miejsce np. w wyniku wyłączenia z pracy generatora lub linii zasilającej daną strukturę sieciową albo linii sprzęgającej sieci (podsystemy) elektroenergetyczne w następstwie zakłócenia lub błędnych manipulacji łączeniowych. Wzrastająca obecność rozproszonych, lokalnych źródeł wytwórczych (w tym odnawialnych źródeł energii) w strukturze systemu elektroenergetycznego, często o niestabilnym poziomie generacji mocy czynnej, również stanowi potencjalne źródło zagrożenia bilansu mocy czynnej. Efektem niezbilansowania mocy czynnej w danej strukturze sieciowej jest obecność w niej obszarów charakteryzujących się niedomiarem mocy generowanej, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia się częstotliwości w stosunku do jej wartości znamionowej.

W zależności od obserwowanego niezbilansowania mocy czynnej dynamika zmian częstotliwości – zazwyczaj obniżania się jej wartości – jest różna. Przy niewielkim deficycie mocy generowanej dynamika obniżania się częstotliwości jest stosunkowo mała, co pozwala – poprzez wykorzystanie szybkich regulatorów turbin „klasycznych”, tj. wielkoskalowych, źródeł wytwórczych – na wprowadzenie w krótkim przedziale czasu rezerwy wirującej mocy generowanej, powodującej ponowny wzrost, a w konsekwencji stabilizację, wartości częstotliwości (bilansując moc generowaną i odbieraną).

Częstotliwość w niezbilansowanych obszarach sieciowych

W sytuacjach dużego deficytu mocy czynnej generowanej, szczególnie w wielkoobszarowych strukturach sieci elektroenergetycznej, może nastąpić dynamiczne obniżenie częstotliwości do poziomu mogącego doprowadzić do całkowitego rozpadu systemu elektroenergetycznego. Jest to zazwyczaj następstwem zbyt wolnej reakcji regulatorów źródeł wytwórczych, uniemożliwiającej w krótkim czasie wprowadzić do sieci

odpowiednie rezerwy mocy czynnej, lub też brakiem dostępnej odpowiedniej rezerwy mocy czynnej generowanej pozwalającej na pokrycie występującego deficytu. Przyjmuje się, że maksymalnie 20% rezerwy mocy wirującej jest dostępnych w pierwszych 5-10 sekundach od momentu wystąpienia deficytu mocy [1], [2]. Sama dynamika zmian częstotliwości, szczególnie na dużym obszarze sieciowym nasycenym źródłami lokalnymi, jest trudna do wyznaczenia ze względu na jej zależność od wielu parametrów zmiennych w czasie, m.in. konfiguracji sieci, typu źródeł wytwórczych i zdolności regulacji ich pracy, stopnia niezależności wytwarzania energii, wielkości deficytu mocy, charakteru obciążeń.

Wobec tego w sytuacjach dużego niezbilansowania mocy w hierarchicznych (wielonapięciowych) obszarach sieciowych oraz obserwowanego znacznego gradientu zmian częstotliwości i przy jednoczesnym braku dyspozycyjności odpowiednich rezerw mocy generacyjnej, groźących całkowitym rozpadem systemu elektroenergetycznego (wskutek „wypadnięcia z pracy” kolejnych generatorów), wykorzystuje się automatykę samoczynnego częstotliwościowego odciążania (SCO) i/lub automatykę rozcinającą system na wydzielone podobszary wyspowe (zbilansowane mocowo), w których możliwości regulacji częstotliwości pozwalają na ich późniejszą, ponowną synchronizację z SEE [3].

W przypadkach, gdy na wydzielonym obszarze sieciowym (wyspa) dyspozycyjne moce generatorów nie są w stanie pokryć w stu procentach zapotrzebowania na moc odbiorów, konieczne jest również w tej strukturze wykorzystanie automatyki SCO w celu zbilansowania mocy czynnej. Dynamika zmian częstotliwości w obszarze sieciowym oraz jej nowa wartość ustalona po zrównoważeniu bilansu mocy generowanej i odbiorczej uzależniona jest głównie od trzech czynników:

- wielkości przeciążenia (deficytu mocy czynnej generowanej);
- bezwładności sieci elektroenergetycznej wyrażonej bezwładnością mas wirujących;
- współczynnika odciążania sieci d .

Wyznaczenie bezwładności mas wirujących pozwala określić zdolność sieci do przejmowania niektórych

gwałtownych zmian (udarów) mocy. Najczęściej wyraża się ją za pomocą stałej bezwładności H opisanej zależnością [4]:

$$(1) \quad H = \frac{E_{kin}}{S},$$

gdzie: E_{kin} – sumaryczna energia kinetyczna mas wirujących wszystkich generatorów pracujących w analizowanej sieci, S – sumaryczna moc pozorna wszystkich generatorów pracujących w sieci.

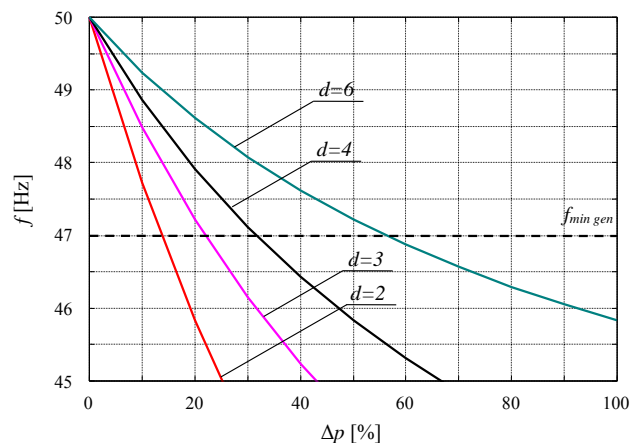
Wartość stałej H uzależniona jest od wielkości momentu napędowego danego generatora oraz liczby par biegunów. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wartości stałej bezwładności H dla turbo- i hydrogeneratorów.

Tabela 1. Przykładowe wartości stałej bezwładności H

Generatory z turbinami wodnymi		Turbogeneratory			
		Z turbinami wysoko- i niskoprężnymi		Przemysłowe z turbinami wysokoprężnymi	
S_N [MV·A]	H [s]	S_N [MV·A]; p [-]	H [s]	S_N [MV·A]; p [-]	H [s]
0 ÷ 40	1,5 ÷ 4	10 ÷ 60 ($p = 1$)	7 ÷ 4	5 ÷ 100 ($p = 1$)	4 ÷ 3
40 ÷ 200	3 ÷ 5,5	100 ÷ 500 ($p = 1$)	10 ÷ 4		
		300 ÷ 1000 ($p = 1$)	5 ÷ 2		
		10 ÷ 100 ($p = 2$)	10 ÷ 7		
		300 ÷ 1000 ($p = 2$)	8 ÷ 5		

gdzie: S_N – moc znamionowa generatora, p – liczba par biegunów.

Z kolei współczynnik odciążania sieci d wyraża procentową redukcję mocy czynnej odniesioną do zmniejszenia się częstotliwości o 1%. Najczęściej, wg. IEEE, współczynnik odciążania d przyjmuje wartości 1, 2 oraz 3% [2], chociaż spotyka się również struktury sieciowe o wartości współczynnika d dochodzącej do 7...8%.



Rys.1. Obniżenie się częstotliwości w zależności od wielkości deficytu mocy w obszarze sieciowym Δp dla różnych współczynników odciążania sieci d (w oparciu o [4]); gdzie: $f_{min, gen}$ – nastawa zabezpieczenia podczęstotliwościowego generatora (wyłączającego)

Wobec tego wielkość zmiany – obniżenia się – częstotliwości sieciowej (względem wartości znamionowej f_N) na skutek wystąpienia deficytu mocy generowanej w analizowanym obszarze sieciowym jest uzależniona od wartości współczynnika d tej sieci. Zależność wiążącą zmianę częstotliwości w funkcji wartości względnego

deficytu mocy Δp dla zadanych wartości współczynnika odciążania d opisuje równanie:

$$(2) \quad f = \frac{1 + \frac{d-1}{d} \Delta p}{1 + \Delta p} f_N.$$

Na rysunku 1 przedstawiono wpływ wartości współczynnika odciążania d na obniżanie się wartości częstotliwości sieciowej f w funkcji wielkości względnego deficytu mocy generowanej Δp . Dla obszaru sieciowego o dużej wartości współczynnika d określony deficyt mocy wywołuje mniejszy spadek częstotliwości w tej sieci. Przykładowo, deficyt mocy na poziomie 5% powoduje obniżenie się częstotliwości w sieci o $d = 2$ do wartości 48,8 Hz, z kolei w sieci o wartości $d = 6$ taki sam deficyt mocy wywołuje obniżenie się częstotliwości jedynie do wartości około 49,7 Hz.

Automatyka samoczynnego częstotliwościowego odciążania (SCO)

Automatyka częstotliwościowego odciążania powinna zapobiec obniżeniu się częstotliwości sieciowej do poziomu powodującego wyłączenie źródła wytwórczego przez zabezpieczenie podczęstotliwościowe. Jest ona zazwyczaj realizowana za pomocą od dwóch do czterech tzw. stopni odciażających.

Obecnie minimalna nastawa progu częstotliwościowego automatyki odciażającej dobierana jest o 1 Hz wyższa od nastawy zabezpieczenia podczęstotliwościowego, tj. 48 Hz lub 48,5 Hz. Pozostałe stopnie odciażania ograniczone są tzw. graniczną wartością maksymalną wynoszącą zwykle 49 Hz lub 49,5 Hz. Ze względu na to, że wartość odciażanej mocy czynnej w ramach automatyki SCO zależy od wielkości niezbilansowania, poziomy wartości wyłączanej mocy w poszczególnych stopniach odciażania powinny być jak najmniejsze, jednak wystarczające dla uzyskania stabilizacji częstotliwości na poziomie wyższym niż dopuszczalny dla źródeł wytwórczych. Z tego względu istotne jest wyznaczenie wartości całkowitej mocy odciażania dla występującej mocy niezbilansowania – uwzględniając m.in. współczynnik odciażania d analizowanej sieci – koniecznej do uzyskania stabilnej częstotliwości gwarantującej zrównoważenie bilansu mocy czynnej na poziomie „bezpiecznym” dla sieci lub jej wydzielonych obszarów. Do wyznaczenia wartości całkowitej mocy odciażania można posłużyć się zależnością [1]:

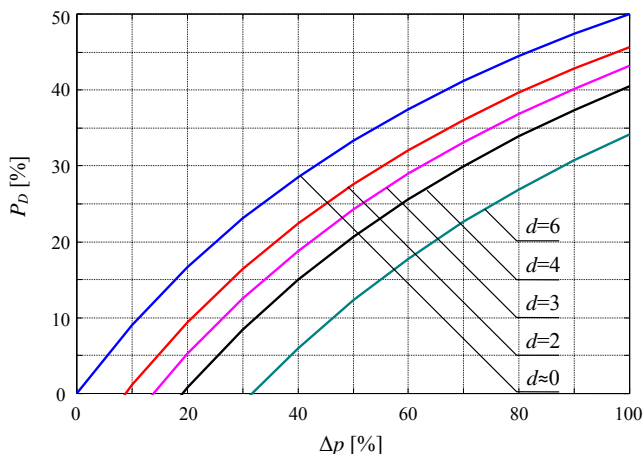
$$(3) \quad P_D = \frac{\frac{\Delta p}{1 + \Delta p} - d \left(1 - \frac{f}{f_N} \right)}{1 - d \left(1 - \frac{f}{f_N} \right)},$$

gdzie: P_D – względna całkowita moc odciażania pozwalająca na uzyskania częstotliwości zbilansowania na poziomie f , f – częstotliwość sieci po zbilansowaniu mocy czynnej.

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zależności (3) dla wybranych wartości współczynnika odciażania sieci d .

Nastawa pierwszego stopnia odciażania powinna uwzględniać wielkość istniejącej rezerwy wirującej, jak również wartość współczynnika odciażania sieci d . Przy wyznaczaniu parametrów charakteryzujących poszczególne stopnie odciażania realizowanego w danym obszarze sieciowym, tj. wielkości odciażanej mocy w poszczególnych stopniach, wartości częstotliwości stabilizacji bilansu mocy czynnej oraz czasu opóźnienia działania poszczególnych stopni odciażania, można posłużyć się zależnościami przedstawionymi w tabeli 2.

W przypadkach dużego niezbilansowania mocy w obszarze sieciowym zastosowanie statycznych stopni odciążania jest niewystarczające dla uzyskania stabilnej częstotliwości wyższej niż wymagana dla źródeł wytwórczych. Jest to spowodowane relatywnie długim czasem działania zabezpieczeń częstotliwościowych i wyłączników mocy w odniesieniu do dynamicznych, gwałtownych zmian częstotliwości. W takich sytuacjach konieczne jest zastosowanie w automatyce SCO członów dynamicznego pomiaru zmian częstotliwości w czasie df/dt , które w sytuacjach krytycznych mogą decydować o jednoczesnym zrzucie całkowitej mocy przypisanej poszczególnym stopniom odciążania.



Rys.2. Wielkość mocy odciążania automatyki SCO w funkcji mocy niezbilansowania dla uzyskania stabilnej częstotliwości na poziomie 47,5 Hz

Rozproszone systemy automatyki odciążającej i bilansującej

Współczesne cyfrowe rozwiązania automatyki odciążającej i bilansującej dedykowanej obszarom sieciowym opierają swoją funkcjonalność na złożonych systemach pomiarowo-decyzyjnych wykorzystujących m.in. dane i informacje dotyczące identyfikacji aktualnej topologii sieci, stanu źródeł wytwórczych oraz obiektów odbiorczych, warunków eksploatacyjnych nadzorowanej sieci. W tym celu dokonuje się przesyłu i wymiany danych na różnych poziomach hierarchii systemu automatyki, jak i wymiany informacji z systemem nadrzędnym prowadzenia pracy sieci elektroenergetycznej [5], [6]. Struktura takich systemów ma charakter rozproszony i dla jej prawidłowego funkcjonowania konieczne jest zapewnienie odpowiedniej infrastruktury teleinformatycznej pozwalającej na szybki i swobodny przepływ danych [5]. Dla poprawnego obrazowania – w jednostkach nadrzędnych – aktualnego stanu pracy nadzorowanego obszaru sieciowego istotne

jest, aby pozyskiwane dane pomiarowe charakteryzowały się tym samym znacznikiem czasowym, tj. pomiary lokalne powinny być dokonywane jednocześnie. Spełnienia tego warunku można dokonać, wykorzystując pomiary synchroniczne oparte na tzw. technice synchronofazorów, realizowane w jednostkach PMU (*Phasor Measurement Unit*) zlokalizowanych w odpowiednich punktach obszaru sieciowego [7], [8].

Systemy automatyki odciążającej i bilansującej np. wydzielone wyspy sieciowe opierają swoją funkcjonalność na dwóch metodach inicjalizacji procesu odciążania mocy czynnej. Pierwsza metoda wykorzystuje techniki predykcji niezbilansowania mocy dla określonych wcześniej wariantów konfiguracji pracy nadzorowanej sieci, które taki deficyt generują. Na tym etapie wyznaczone są również operacje łączeniowe – głównie na źródłach wytwórczych oraz liniach wymiany mocy, których konsekwencją jest pojawienie się określonej topologii sieci z danym niezrównoważeniem bilansu mocy czynnej. Druga metoda wykorzystuje wyznaczone progi (stopnie) częstotliwościowe, dla których zostały określone wartości mocy czynnej odbieranej, konieczne do wyłączenia, aby nadzorowana sieć była zdolna do odbudowy częstotliwości na poziomie znamionowym. Zatem dla skutecznej realizacji procesu odciążania i bilansowania mocy czynnej w obszarze sieciowym, a w konsekwencji wypracowania warunków wymaganych do powtórnej synchronizacji sieci z systemem elektroenergetycznym, konieczne jest:

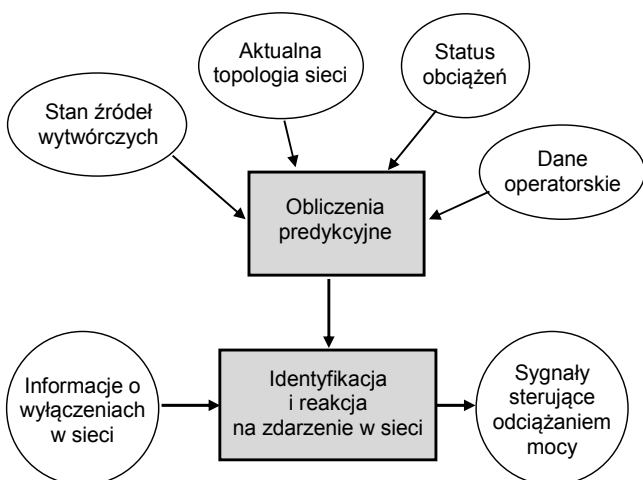
- akwizycja danych i informacji lokalnych pozyskiwanych w nadzorowanym obszarze sieciowym, w tym pomiarów synchronicznych;
- śledzenie aktualnej topologii sieci w celu identyfikacji stanów klasyfikowanych jako stany wymuszające redukcję obciążenia;
- dynamiczne wyznaczanie wielkości odciążanej mocy czynnej i adresacja wyłączanych odbiorów z uwzględnieniem ich charakterystyk częstotliwościowo-napięciowych dla rozpoznanej topologii pracy sieci [7];
- ciągły, synchroniczny pomiar częstotliwości oraz dynamiki jej zmian df/dt w odpowiednich miejscach nadzorowanej sieci;
- dynamiczna selekcja indywidualnych odbiorów przeznaczonych do wyłączeń w ramach procesu odciążania, uwzględniająca m.in. ustalone wcześniej priorytety, aktualnie mierzony pobór mocy, jak również istniejącą strukturę konfiguracyjną pracującej sieci;
- podejmowanie decyzji odciążających oraz generacja sygnałów sterujących (łączeniowych) w przedziałach czasu nieprzekraczających kilkudziesięciu milisekund (80 ms);
- nadzór nad łączami komunikacyjnymi z kontrolą jakości ich pracy.

Tabela 2. Przykładowe zależności określające nastawy poszczególnych stopni odciążania automatyki SCO [1]

Poziom odciążania	Względna moc odciążania odniesiona do mocy generowanej	Częstotliwości stabilizacji bilansu mocy czynnej wyspy	Opóźnienie czasowe odciążania mocy na danym stopniu
1	$\frac{P_1}{1 - (P_1 + P_2)} = P_1''$	$f'' = f_1 - \frac{f_N t_{R+CB} (P_1'' + P_2'')}{2H} + \frac{P_2''}{P_1'' + P_2''} (f_1 - f_2)$	$\frac{2H(f_N - f_1)}{f_N(P_1'' + P_2'')} + t_{R+CB} = t_1''$
2	$\frac{P_2}{1 - (P_1 + P_2)} = P_2''$		$\frac{2H(f_N - f_2)}{f_N(P_1'' + P_2'')} + t_{R+CB} = t_2''$

gdzie: f_N – częstotliwość znamionowa, f_1, f_2 – częstotliwości „nastawione” dla poszczególnych stopni odciążania, P_1, P_2 – względne wartości odciążanej mocy, P_1'', P_2'' – wartości mocy odciążanej odniesione do mocy generowanej w wydzielonej wyspie, t_1'', t_2'' – czasy opóźnienia zrzutu mocy dla poszczególnych stopni odciążania, t_{R+CB} – sumaryczny czas własny zabezpieczenia i wyłącznika mocy.

Do realizacji funkcjonalności przedstawionych rozproszonych systemów automatyki odciążającej i bilansującej można wykorzystać obszarowe systemy automatyki elektroenergetycznej opisane m.in. w [9] i [10]. Przykładową architekturę rozproszonego systemu automatyki odciążającej i bilansującej przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Przykładowa struktura funkcjonalna rozproszonego systemu odciążania i bilansowania mocy czynnej obszaru sieciowego

Podsumowanie

Przedstawione w artykule rozważania pozwalają stwierdzić, że współczesna automatyka SCO jest efektywnym narzędziem pozwalającym na znalezienie równowagi pomiędzy mocą generowaną i odbieraną w nadzorowanym obszarze sieciowym. Realizowana jest ona poprzez obszarowe, rozproszone systemy pomiarowo-decyzyjne o złożonej funkcjonalności i zaawansowanych technikach identyfikacji, przetwarzania danych oraz komunikacji. Duże możliwości w zakresie dynamicznego, predykcyjnego odciążania oraz bilansowania mocowego zarówno małych terytorialnie, jak i rozległych obszarów sieciowych oferuje technika pomiarów synchronicznych bazująca na synchronofazorach. Funkcjonalność takich systemów opiera się na nadążnej – w czasie quasi *on-line* – identyfikacji warunków eksploatacyjnych obszarów

sieciowych, ich zbilansowaniu mocowemu poprzez statyczne i/lub dynamiczne odciążanie lub wydzielenie zrównoważonych mocowo obszarów autonomicznych (wysp), a w konsekwencji stworzeniu warunków pozwalających na powrót sieci do pracy przy częstotliwości znamionowej lub ponowną synchronizację wydzielonych obszarów z systemem elektroenergetycznym.

LITERATURA

- [1] Harrison A., *Überlegungen zum Aufbau eines Lastabwurfprogramms*, Brown Boveri Mitt. 10-80, 593-598
- [2] *Projektierungsrichtlinien für den Frequenzabhängigen Lastabwurf*, Materiały niepublikowane BBC
- [3] Laghari, J.A., Mokhlis H., Abu Bakar A.B.H., Karimi M., Shahriari A., An intelligent under frequency load shedding scheme for islanded distribution network, *Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO)*, IEEE International, Melaka, 6-7 June 2012
- [4] Halinka A., Schau H., Winkler W., *Elektrische Schutzrichtungen in Industriennetzen und -anlagen. Grundlagen und Anwendungen*, Hüthig and Pflaum, Heidelberg, 2008
- [5] Allen W., Lee T., *Flexible High-Speed Load Shedding Using a Crosspoint Switch*, Schweitzer Engineering Laboratories
- [6] Kilcline B.J., Salopek V., *Use of Control System to Implement an Underfrequency Load Shedding and Restoration Scheme*, CIGRE Session 2004
- [7] Halinka A., Szewczyk M., Talaga M., *Pomiary synchroniczne w systemie elektroenergetycznym – system SmartLoad do bilansowania mocy w obszarach wysp sieciowych*, XVI Seminarium "Automatyka w elektroenergetyce", Zawiercie, 17-19 kwietnia 2013, 12.1-12.7
- [8] Junjie T., Junqi L., Ponci F., Monti A., Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements, *Power Systems, IEEE Transactions on*, 28 (2013), nr 2, 2035-2047
- [9] Halinka A., *Techniki zabezpieczeń elektroenergetycznych*, Wyd. Pol. Śl., Gliwice, 2013
- [10] Halinka A., Szablicki M., System Automatyki Układów Odczepowych (SAUO), *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 8, 44-49

Autorzy: dr hab. inż. Adrian Halinka, profesor Politechniki Śląskiej, E-mail: Adrian.Halinka@polsl.pl; dr inż. Piotr Rzepka, E-mail: Piotr.Rzepka@polsl.pl; dr inż. Mateusz Szablicki, E-mail: Mateusz.Szablicki@polsl.pl; Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice.

