

Koncepcja obszarowego systemu automatyki elektroenergetycznej do nadzoru autonomicznych struktur sieci SN z lokalnymi źródłami w postaci źródeł biogazowych

Streszczenie. Tworzenie autonomicznych struktur sieci SN zasilanych lokalnymi źródłami energii (np. źródłami biogazowymi) wymaga pokonania szeregu barier, m.in. zmiany zasad funkcjonowania układów automatyki elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej. Wynika stąd potrzeba opracowania obszarowego układu automatyki elektroenergetycznej umożliwiającego pracę autonomicznym strukturom sieci dystrybucyjnej SN, które są zasilane lokalnymi źródłami. Koncepcję takiego układu automatyki przedstawiono w niniejszym artykule.

Abstract. Creating autonomous MV network structures powered by local sources of energy (eg. biogas sources) requires overcoming a number of barriers, including change the rules functioning of the power distribution network automation. Therefore, it is necessary to develop a new area automatic system for supervisory control of autonomous MV network structures with local sources, which concept is presented in this paper. (Concept of Area Automatic System for Supervisory Control of Autonomous MV Network Structures with Local Electricity Biogas Sources).

Keywords: autonomous MV network, supervisory control, biogas

Słowa kluczowe: autonomiczne struktury sieci, sieci energetyczne, automatyka

doi:10.12915/pe.2014.08.24

Wprowadzenie

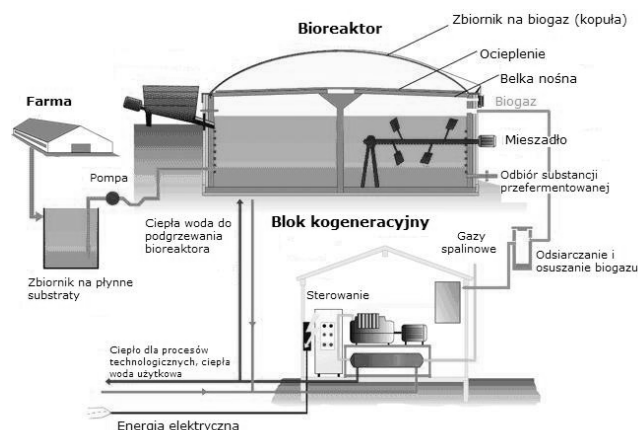
Obserwowany wzrost liczby źródeł lokalnych w sieci dystrybucyjnej, w tym źródeł biogazowych, skłania do zastanowienia się nad możliwościami wykorzystania potencjału tych źródeł do zapewnienia rezerwowego zasilania wybranych (krytycznych) odbiorców w katastrofalnych stanach pracy systemu elektroenergetycznego (SEE). Przeprowadzone analizy w tym zakresie wskazują, że w układach sieci dystrybucyjnych z generacją rozproszoną potencjalnie istnieje możliwość wyodrębnienia niewielkiego fragmentu tej sieci zasilanego lokalnymi źródłami w celu zapewnienia rezerwowego zasilania krytycznych odbiorców – czyli odbiorców bardzo wrażliwych na utratę zasilania (np. budynki użyteczności publicznej pełniące ważne funkcje społeczne, m.in.: szpitale, przepompownie ścieków itp.). Tworzenie autonomicznych układów sieciowych może zapewniać tym odbiorcom ważne dostawy energii elektrycznej w awaryjnych stanach pracy SEE, np. w sytuacji blackout'u.

Z przeprowadzonego przeglądu poszczególnych rodzajów źródeł rozproszonych wynika, że w zakresie zapewnienia zasilania autonomicznych układów sieciowych, dobrymi właściwościami cechują się źródła biogazowe średnich i dużych mocy. W tego typu źródłach instalowany jest zwykle generator synchroniczny, który z punktu widzenia m.in. jakości generowanej energii elektrycznej oraz zachowania się w stanach zakłóceń posiada dobre właściwości do zasilania autonomicznych struktur sieci. Ponadto źródła biogazowe mogą generować zadaną wartość energii elektrycznej praktycznie niezależnie od występujących warunków atmosferycznych. Uzyskuje się to m.in. dzięki zbiornikom biogazu będących ważnymi elementami składowymi biogazowni. Zbiorniki te gwarantują, w pewnym przedziale czasowym, stałość dostaw gazu wykorzystywanego w jednostce wytwórczej.

Obecnie źródła biogazowe, które instalowane są coraz częściej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) [1], zwykle nie są wykorzystywane do zasilania krytycznych odbiorców. Jest to spowodowane, m.in. problemami związanymi z przesłaniem wyprodukowanej energii elektrycznej do krytycznych odbiorców. Występująca odległość między tymi podmiotami jest zazwyczaj stosunkowo duża i kształtuje się w zakresie od kilku do kilkunastu km. Koszty budowy niezależnej linii

elektroenergetycznej łączącej źródła lokalne i krytycznych odbiorców są na tyle duże, że rozwiązanie to w praktyce nie jest spotykane. W związku z tym do przesyłu energii pomiędzy tymi obiektami, w awaryjnych stanach pracy SEE, proponuje się wykorzystać wydzielony fragment sieci dystrybucyjnej będącej pod nadzorem operatora systemu dystrybucyjnego (OSD). Wdrożenie takiego rozwiązania wymaga jednak pokonania szeregu barier technicznych związanych z pracą wydzielonego fragmentu sieci dystrybucyjnej oraz źródeł z nim współpracujących.

Złożoność zagadnień technicznych dotyczących autonomicznej pracy sieci dystrybucyjnej zasilanej źródłami lokalnymi powoduje, że obecnie operatorzy systemów dystrybucyjnych nie dopuszczają takiej możliwości. Świadczą o tym m.in. zapisy zawarte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnych [2] wszystkich głównych OSD w KSE.



Rys.1. Przykładowa struktura biogazowni [3]

Z badań przeprowadzonych przez autorów wynika, że autonomiczna, stabilna praca fragmentów sieci dystrybucyjnych zasilanych lokalnymi źródłami biogazowymi jest możliwa i może przynieść wiele korzyści w awaryjnych stanach pracy SEE. Jednak wprowadzenie takich układów pracy wymaga w szczególności przeprowadzenia znacznej modyfikacji istniejących układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ) wydzielonego fragmentu sieci dystrybucyjnej. Przeprowadzone analizy

wskazują ponadto, że modyfikacja struktur EAZ autonomicznych układów sieciowych cechujących się dużą liczbą lokalnych źródeł przyłączonych w sposób rozproszony będzie charakteryzować się znacznym poziomem złożoności. Zapewnienie odpowiedniej ochrony takich układów sieciowych przy wykorzystaniu klasycznych układów automatyki (bazujących jedynie na sygnałach z lokalnej aparatury pomiarowej: przekładników prądowych i napięciowych) jest bardzo trudne do osiągnięcia, a w niektórych przypadkach może okazać się wręcz niemożliwe [4]. W związku z tym do realizacji ochrony autonomicznych układów sieciowych proponuje się wykorzystanie tzw. Obszarowych układów automatyki. Układy tego typu, z uwagi na możliwość wypracowania decyzji na podstawie informacji pozyskanych z różnych punktów nadzorowanego obszaru sieciowego, cechują się znacznie większymi możliwościami funkcjonalnymi niż konwencjonalne układy zabezpieczeń. Przykładową koncepcją głównych struktur takiego obszarowego układu automatyki dedykowanego do nadzoru wydzielonego fragmentu sieci dystrybucyjnej SN przeznaczonego do pracy autonomicznej w stanach awaryjnych pracy SEE zaprezentowano w niniejszym artykule.

Problematyka działania EAZ wydzielonych fragmentów sieci dystrybucyjnej przeznaczonych do pracy autonomicznej

Pracujące obecnie w KSE sieci dystrybucyjne SN były projektowe na założenie, że ich zasilanie będzie pochodzić z sieci WN. Bezpośrednie zasilanie sieci dystrybucyjnej SN realizuje się poprzez tzw. główne punkty zasilające (GPZ) – stacje elektroenergetyczne WN/SN. Założenie to spowodowało, że stosowane obecnie w sieciach SN układy EAZ zapewniają odpowiedni poziom bezpieczeństwa pracy elementów sieciowych, jeśli sieć ta będzie posiadać źródło zasilania przyłączone do szyn zbiorczych SN pracujących w stacji GPZ. Ponadto źródło to powinno charakteryzować się dużą mocą zwarciovą. Jest to niezbędne do zapewnienia m.in. odpowiedniej skuteczności zadziałania podstawowych zabezpieczeń tych sieci. Warunki zasilania wydzielonego fragmentu sieci dystrybucyjnej SN (zasilanego źródłami lokalnymi) znacznie różnią się od przedstawionych. Układ autonomiczny może być zasilany z jednego lub kilku źródeł o stosunkowo niewielkich mocach, które są przyłączane w różnych punktach sieci SN (zwykle w głębi sieci).

Sposób zasilania układu sieciowego (z systemu elektroenergetycznego bądź ze źródeł lokalnych) ma bezpośredni wpływ na rozpyły prądów zwarciovych występujący podczas zakłóceń. Zmianie może ulec zarówno kierunek przepływającego prądu zwarciovego, jak i jego wartość, która w układzie autonomicznym może być znacząco mniejsza (dotyczy to zarówno zwarc wieloprądowych oraz zwarc jednofazowych). Wpływa to bardzo niekorzystnie na poprawność działania istniejących układów EAZ wydzielonego fragmentu sieci dystrybucyjnej. Można wykazać, że zmiana rozpyły prądu zwarciovego występująca w wydzielonym fragmencie sieci pracującym autonomicznie spowoduje, że istniejące układy EAZ praktycznie nie będą w stanie poprawnie realizować swoich zadań, w tym również mogą nie identyfikować zakłóceń zwarciovych.

Duże różnice warunków pracy sieci podczas stanów zakłóceń występujących w normalnym i autonomicznym układzie pracy sieci są podstawową przyczyną komplikującą zasady funkcjonowania struktur EAZ takiej sieci. Z punktu widzenia praktycznego te same układy automatyki powinny gwarantować odpowiednią ochronę elementów sieciowych w różnych stanach pracy nadzorowanego układu sieciowego (charakteryzujących się zmianą w szerokich granicach występujących wartości

prądów w stanach pracy normalnej), tzn. powinny zapewniać odpowiednią ochronę w przypadku współpracy analizowanego układu sieciowego z SEE, gdzie występuje duża moc zwarciovą i „pierwotny” rozpyły prądów zwarciovych, oraz w przypadku pracy autonomicznej tego układu, gdzie występująca moc zwarciovą jest niewielka, a kierunek przepływającego prądu zwarciovego przez dany punkt zabezpieczeniowy może być praktycznie dowolny. Dodatkową przyczyną komplikującą warunki działania struktur EAZ pracujących w autonomicznym układzie sieci jest dopuszczalna duża zmienność konfiguracyjna (np. wyłączenie jednego ze źródeł) i funkcjonalna (np. zmiana charakteru sieci z dystrybucyjnej na „przesyłową”). Powoduje to, że wiele operacji w takim układzie sieci jest wzajemnie ze sobą powiązanych i nie można ich traktować rozdzielnie. W związku z tym układy EAZ autonomicznego układu sieciowego przede wszystkim powinny się nadadźnie adaptować do zmieniających się warunków występujących w układzie.

Mając na uwadze przedstawione uwarunkowania pracy analizowanych układów sieciowych, stwierdza się, że wykorzystanie w nich klasycznych form zabezpieczeń sieci SN nie przyniesie oczekiwanego rezultatu. Istotną przyczyną tego są m.in. ograniczone możliwości identyfikacji aktualnego stanu pracy wyodrębnianego układu sieciowego, w tym określania występującej konfiguracji połączeń w tym układzie. W analizowanych układach sieciowych, m.in. w celu uzyskania odpowiedniej ochrony przed skutkami zakłóceń, konieczne jest wprowadzenie wielokrotnych, wzajemnych powiązań decyzyjnych pomiędzy automatyką źródeł i automatyką EAZ sieci pracującą w różnych punktach nadzorowanego układu sieciowego. W założenia te wpisuje się koncepcja obszarowych systemów automatyki zabezpieczeniowej OSAZ [5], które m.in. na skutek ciągłego rozwoju łączy teleinformatycznych oraz technik pomiarów synchronicznych, a także standaryzacji komunikacyjnej w rozproszonych systemach automatyki elektroenergetycznej posiadają coraz większe możliwości funkcjonalne.

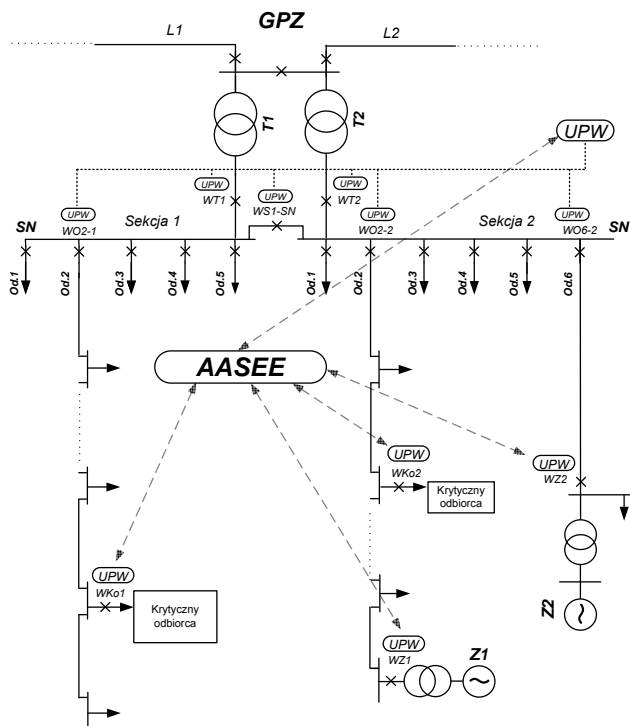
W podstawowym ujęciu system OSAZ to dedykowana złożonym obiektom sprzętowa i programowa rozproszona struktura wielopoziomowa wykorzystująca nowoczesne metody przetwarzania danych i informacji, jak również podejmowania decyzji. System OSAZ może realizować m.in. następujące funkcje [5]:

- identyfikacji aktualnego stanu pracy obiektu oraz jego elementów składowych;
- elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej i pomiarowej;
- adaptacji odniesionej do automatyki pomiarowej i zabezpieczeniowej;
- analizy zagrożeń i zakłóceń;
- sterowania (w sensie adresowania i przesyłu sygnałów do urządzeń wykonawczych) w stanach pracy normalnej obiektu;
- sterowania prewencyjnego lub restytucyjnego w stanach przed- lub poawaryjnych;
- komunikowania się zarówno w obrębie własnej struktury, jak i z systemami automatyki innych obiektów przynależnych do tej samej lub do innej grupy, w celu przesyłu lub wymiany informacji.

Mając na uwadze korzystne cechy OSAZ, w szczególności w zakresie poprawności wypracowania decyzji dla obiektów elektroenergetycznych cechujących się dużą złożonością [6], zaproponowano koncepcję systemu automatyki dedykowanego dla nadzoru autonomicznych struktur sieci SN (będącą przedmiotem niniejszego artykułu) opartą na podstawowych założeniach systemu OSAZ.

Koncepcja obszarowego systemu automatyki elektroenergetycznej dla nadzoru autonomicznych struktur sieci SN

Proponowany obszarowy system automatyki elektroenergetycznej do nadzoru autonomicznych struktur sieci SN nazwano automatyką autonomicznych systemów elektroenergetycznych (AASEE). Realizację systemu AASEE przedstawiono na przykładzie fragmentu sieci dystrybucyjnej SN z lokalnymi źródłami w postaci źródeł biogazowych (rys. 2). Przedstawiona na tym rysunku sieć obejmuje stację GPZ oraz wybrane ciągi liniowe sieci dystrybucyjnej SN, do których przyłączono źródła biogazowe: Z1 (0,5 MV·A), Z2 (1 MV·A). Wybrany przykład jest modelowym układem, który może wystąpić jako skutek rozwoju źródeł biogazowych średnich i dużych mocy w strukturach KSE.



Rys.2. Realizacja obszarowego systemu AASEE na przykładzie fragmentu sieci dystrybucyjnej SN z lokalnymi źródłami w postaci źródeł biogazowych

Podstawowym zadaniem proponowanego systemu AASEE jest sprawowanie nadzoru nad fragmentem sieci dystrybucyjnej przewidzianej do pracy w sposób autonomiczny. W skład tego fragmentu wchodzi: szyny zbiorcze SN, kilka ciągów liniowych z przyłączonymi źródłami oraz odbiorcami krytycznymi. Nadzór nad wydzielanym fragmentem sieci powinien być sprawowany w taki sposób, aby zapewnić (we wszystkich stanach pracy: zasilanie z SEE, praca autonomiczna) bezpieczeństwo odbiorców, elementów sieciowych i źródeł wytwórczych, przy jednoczesnym zwiększeniu poprawności eliminacji występujących zakłóceń oraz podejmowaniu działań prewencyjnych i restytucyjnych mających również na celu zwiększenie stabilności autonomicznego układu sieciowego.

Wykonanie zadania podstawowego system AASEE będzie realizowane m.in. za pomocą funkcji:

- pomiarowej (uwzględniającej wykorzystanie technik pomiarów synchronicznych) oraz pozyskania i akwizycji danych z jednostek lokalnych;
- identyfikacji (rozpoznania) aktualnego stanu pracy układu sieciowego oraz przyłączonych do niego obiektów

(np. źródeł wytwórczych, odbiorców itp.), z wykorzystaniem estymatora stanu pracy;

- elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, funkcja ta będzie podzielona na funkcje EAZ realizowane w jednostce głównej systemu AASEE i funkcje EAZ realizowane w jednostkach podstawowych układu np. tzw. agentach;
- adaptacji konfiguracyjnej EAZ, polegającej na zmianie aktywnych algorytmów zabezpieczeniowych, wartości kryterialnej tych algorytmów lub zmianie samych kryteriów decyzyjnych (wynikających np. ze zmiany sposobu pracy punktu neutralnego sieci w wydzielonym układzie) [5];
- sterowania w stanach normalnej pracy układu, np. w celu minimalizacji zagrożeń;
- sterowania w stanach pracy zakłóceń, np. w celu eliminacji występującego zakłócenia;
- sterowania prewencyjnego lub restytucyjnego, np. poprzez podejmowanie działań restytucyjnych w zakresie automatyki samoczynnego ponownego załączenia (SPZ) linii elektroenergetycznych;
- dokonywania operacji łączeniowych z uwzględnieniem obowiązujących warunków blokad oraz sprawdzania warunków kontroli synchronizmu;
- komunikacji w obrębie struktury AASEE: z aparaturą łączeniową, ze źródłami lokalnymi i z odbiorcami krytycznymi (w celu przesyłu sygnałów sterowniczych lub wymiany informacji), z OSD w zakresie przekazywania informacji o stanie pracy układu oraz koordynacji działań i pobierania wytycznych do dalszych działań.

Budowa i struktura funkcjonalna systemu AASEE

Proponowany system AASEE posiada architekturę rozproszoną, składającą się z głównej jednostki identyfikacyjno-decyzyjnej oraz układów pomiarowo-wykonawczych rozlokowanych w wyodrębnionym fragmencie sieci, które mogą być realizowane m.in. w postaci tzw. agentów [7]. Wszystkie jednostki elementarne są powiązane są wzajemnie rozbudowaną siecią teleinformatyczną, cechującą się dużą szybkością i niezawodnością przesyłu informacji.

W celu poprawnej realizacji zadań stawianych systemowi AASEE struktura funkcjonalna tego systemu również przyjmuje postać rozproszoną. Otóż zakłada się, że funkcje systemu AASEE będą realizowane zarówno w głównej jednostce identyfikacyjno-decyzyjnej, jak i w układach pomiarowo-wykonawczych.

Główna jednostka identyfikacyjno-decyzyjna na podstawie informacji uzyskanych z układów pomiarowo-wykonawczych (agentów), wypracowuje najbardziej wiarygodny „obraz” stanu pracy nadzorowanego fragmentu sieci, dokonuje identyfikacji stanu pracy tej sieci oraz podejmuje odpowiednie decyzje do zaistniałej sytuacji. Zadania te realizowane są za pomocą stosownych operacji wykonywanych w czterech podstawowych modułach tej jednostki: komunikacyjnym, estymatora stanu pracy układu, decyzyjnym, archiwizacji danych. Podstawowym zadaniem modułu komunikacyjnego jest prowadzenie wymiany informacji z agentami oraz komunikowanie się z systemami operatorskimi OSD. Głównym zadaniem modułu estymatora stanu pracy jest wyznaczenie estymaty stanu nadzorowanego fragmentu układu sieciowego. Dzięki temu modułowi, na podstawie cząstkowych informacji o stanie pracy nadzorowanego układu pochodzących z agentów, kształtowana jest estymata („obraz”) stanu pracy całego nadzorowanego fragmentu sieci. Zakłada się, że „redundantność” informacji o warunkach pracy elementów sieci powinna powodować wzrost stopnia pewności (wiarygodności) wypracowanej estymaty. Natomiast w module decyzyjnym zaimplementowane są poszczególne

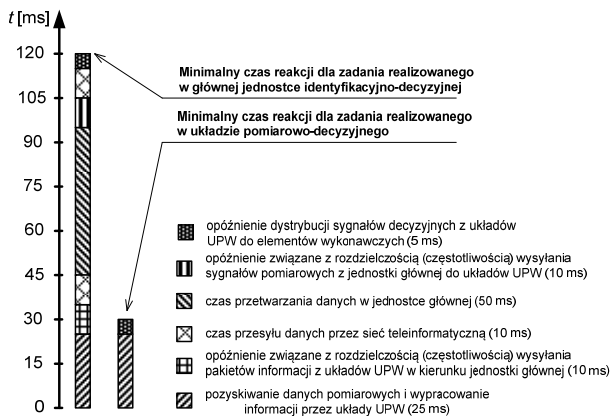
funkcje o algorytmach umożliwiającą realizację zadań stawianych AASEE. Złożoność tych zadań uzależniona jest przede wszystkim od stopnia skomplikowania nadzorowanego układu sieciowego. Z kolei w module archiwizacji danych dokonywana jest archiwizacja danych pochodzących z estymatora stanu pracy oraz sygnałów decyzyjnych w celu m.in. rejestracji zdarzeń i zakłóceń występujących w analizowanym układzie.

Pozyskiwanie danych z nadzorowanego obiektu elektroenergetycznego i oddziaływanie na ten obiekt realizowane jest za pomocą układów pomiarowo-wykonawczych (UPW). Układy te powinny realizować funkcje:

- pomiarowe (w oparciu o tzw. techniki pomiarów synchronicznych);
- wykonawcze automatyki sterującej (realizacji decyzji sterowniczych, np. zmiana położenia wyłącznika);
- automatyki zabezpieczeniowej (w szczególności funkcje zabezpieczeniowe o bezzwłocznym czasie opóźnienia zadziałania);
- wymiany informacji z sterownikami polowymi (systemami stacyjnymi) lub sterownikami źródeł.

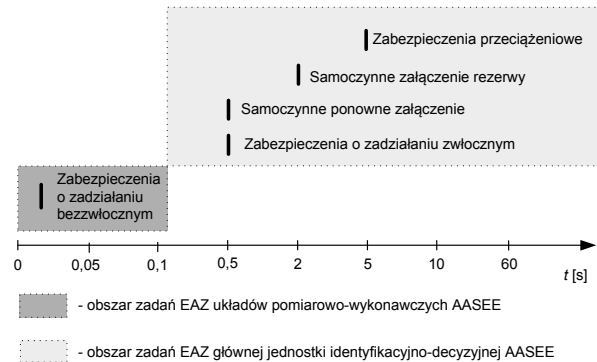
Zadania EAZ realizowane w systemie AASEE

Zakres zadań EAZ, który może być realizowany w systemie AASEE, jest determinowany m.in. tzw. minimalnym czasem reakcji poszczególnych elementów tego systemu na występujące zakłócenia. Główne opóźnienia cząstkowe występujące w systemie AASEE, składające się na minimalny czas realizacji zadań wykonywanych za pomocą głównej jednostki identyfikacyjno-decyzyjnej i układu pomiarowo-wykonawczego, przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Opóźnienia cząstkowe i minimalny czas reakcji zadania realizowanego w głównej jednostce identyfikacyjno-decyzyjnej oraz w układzie pomiarowo-wykonawczym systemu AASEE

Analizę możliwości wykorzystania proponowanego obszarowego systemu automatyki do sprawowania nadzoru nad autonomicznymi strukturami sieci SN przeprowadzono m.in. na podstawie porównania czasu reakcji i wyłączeń dokonywanych przez system AASEE (ok. 120 ms – dla jednostki identyfikacyjno-decyzyjnej, ok. 30 ms dla układu pomiarowo-wykonawczego) z czasem działania poszczególnych rodzajów automatyki sieciowej pracującej w sieci SN (rys.4). Z przeprowadzonego porównania wynika, że system AASEE będzie mógł realizować większość zadań wykonywanych przez konwencjonalne układy automatyki elektroenergetycznej pracujące w sieci dystrybucyjnej SN. Wyjątek stanowią wyłączenia dokonane przez niektóre czony bezzwłoczne zabezpieczeń i układów regulacji obiektów elektroenergetycznych, które mogą być realizowane w lokalnych układach pomiarowo-wykonawczych.



Rys.4. Orientacyjne zestawienie minimalnych czasów reakcji EAZ sieci SN na tle obszaru możliwych czasów reakcji poszczególnych elementów systemu AASEE

Uwagi końcowe

Rozwój źródeł biogazowych tworzy zupełnie nowe możliwości zapewnienia rezerwowego zasilania krytycznych odbiorców w awaryjnych stanach pracy SEE. Wymaga to jednak gruntownej modyfikacji zasad działania struktur EAZ wydzielanego fragmentu sieci dystrybucyjnej.

Obserwowany rozwój techniczny m.in. z zakresu przesyłu informacji oraz pomiarów synchronicznych umożliwia tworzenie obszarowych układów automatyki elektroenergetycznej (takich jak AASEE), które będą w stanie nadzorować pracę autonomicznych systemów elektroenergetycznych tworzonych w oparciu o fragment sieci dystrybucyjnej SN i lokalne źródła energii.

Zakres działań funkcjonalnych zaproponowanego systemu automatyki AASEE, opartego na pomiarach synchronicznych i zaawansowanych technikach decyzyjnych, daleko wykracza poza klasyczne formy zabezpieczeń stosowane w sieciach SN.

LITERATURA

- [1] Raport Krajowy Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki 2013 [on-line], Raport Urzędu Regulacji Energetyki [dostęp 10.08.2013]. Dostęp w Internecie: <http://www.ure.gov.pl>
- [2] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej z dnia 31 marca 2009 r. (obowiązująca na terenie dawnego ENION) [dostęp 10.08.2013]. Tauron Distribution Poland S.A. Dostęp w Internecie: <http://www.tauron-dystrybucja.pl> (oraz IRIESD innych spółek dystrybucyjnych)
- [3] <http://www.praze.pl> – portal Powiślańskiej Regionalnej Agencji Zarządzania Energią
- [4] Halinka A., Rzepka P., Szablicki M., Szewczyk M.: Potrzeba rewizji sposobu funkcjonowania automatyki elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej SN – przyłączenie źródeł wiatrowych. AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁOCENIA, Inteligentne sieci elektroenergetyczne, Inteligentne opomiarowanie, Gdańsk, 2012, INFOTECH
- [5] Halinka A.: Technika zabezpieczeń elektroenergetycznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
- [6] Begovic M., Novosel D., Karlsson D., Henville C., Michel. G.: Wide-Area Protection and emergency control. IEEE Trans. Power Syst., vol. 93, no. 5, May 2005
- [7] Szablicki M.: Obszarowa adaptacyjna automatyka zabezpieczeniowa linii elektroenergetycznych WN z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi. Rozprawa doktorska, Gliwice, 2013

Autorzy: dr hab. inż. Adrian Halinka, prof. Pol. Śl., E-Mail: Adrian.Halinka@polsl.pl; dr inż. Piotr Rzepka, E-Mail: Piotr.Rzepka@polsl.pl; Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice