



## METODA OCENY SYTUACJI NAPIĘCIOWEJ W SIECI PRZESYŁOWEJ UWZGLĘDNIAJĄCA DZIAŁANIE AUTOMATYKI REGULACYJNEJ

mgr inż. Jacek Jemielity / Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk  
mgr inż. Ksawery Opala / Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk

### 1. WSTĘP. PRZEGLĄD PRAKTYCZNYCH METOD OCENY SYTUACJI NAPIĘCIOWEJ W SIECI PRZESYŁOWEJ

Większość z awarii systemowych, niezależnie od przyczyny ich powstania, ulega dalszemu rozwojowi w wyniku utraty zapasu stabilności napięciowej. W związku z powyższym już w latach 90. zaczęto stosować i rozwijać różne metody oceny sytuacji napięciowej, mające na celu informowanie operatora o zapasie stabilności systemu.

Istnieje wiele metod i wskaźników badania stabilności napięciowej. Różnią się one sposobem prowadzenia obliczeń, a co za tym idzie uzyskiwanymi rezultatami. W wyniku zastosowania danej metody można otrzymać wyniki dotyczące stabilności napięciowej poszczególnych węzłów lub stabilności obszarów. Niektóre z metod pozwalają na wyznaczenie zapasu stabilności, inne zaś definiują zapas stabilności w sposób pośredni. Wiele metod wiąże się z wykonaniem wielowariantowych obliczeń i wymaga przeprowadzenia żmudnej analizy otrzymanych wyników.

Stosowanymi w praktyce metodami oceny bezpieczeństwa napięciowego sieci elektroenergetycznej są: analiza modalna, metoda krzywych nosowych QV i PV oraz metoda kontynuacji. Metody te oparte są na standardowych obliczeniach rozptylowych i w związku z tym wymagają aktualnego modelu sieci przesyłowej oraz dystrybucyjnej. Są one czasochłonne i jedynie metoda kontynuacji, jako pewne uproszczenie metody krzywych QV i PV, może być stosowana do wyznaczania w trybie *quasi on-line*, zapasu stabilności napięciowej w systemie. Kompendium wiedzy na ten temat zawiera opracowanie [1].

W dotychczasowej praktyce operatorskiej stosuje się kilka wskaźników pomocnych w pośredniej ocenie zapasu stabilności systemu. Jednym z nich jest wskaźnik rezerw mocy biernej (dla generatorów, baterii kondensatorów itd.), stosowany m.in. w systemie BPA w Ameryce Północnej [2]. Wskaźnik ten monitoruje na bieżąco sumaryczny zakres dostępnych rezerw w systemie. Podobny wskaźnik *Voltage Stability Index* (VSI) zastosowano we włoskim systemie ENEL [3]. Wskaźnik jest wzbogacony o czynnik uwzględniający pochodną zmian dostępnych rezerw mocy biernej.

$$VSI_i(t) = q_i(t) + \rho \frac{\partial q_i(t)}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie:

$q_i(t)$  – chwilowy poziom generacji mocy biernej  
 $\rho$  – współczynnik wagowy

#### Streszczenie

W ODM Bydgoszcz wdrożono wybrane funkcje Systemu Obszarowej Regulacji Napięcia (SORN), w którym zastosowano opisaną w artykule metodę oceny sytuacji napięciowej. Opracowany w systemie SORN sposób zautomatyzowanego nadzoru nad pracą układów regulacji ARNE i ARST ma na celu wspomaganie dyspozytorów w ocenie bieżącego stanu regulacji, wykrywaniu stanu zagrożenia i przeciwdziałaniu skutkom awarii systemowych. Cel ten został osiągnięty przez zastosowanie metody oceny sytuacji napięciowej w sieci przesyłowej, w której wykorzystano znormalizowane wskaźniki liczbowe opisujące punkt pracy węzłów regulacyjnych. W dalszej kolejności zastosowano analizę trendu zmian tych wskaźników do

detekcji, z wyprzedzeniem czasowym niekorzystnych zmian w profilu napięciowym czy poziomie rezerw mocy biernej. W opisanej metodzie zaproponowano rozmyty system wnioskowania do generowania odpowiedzi dla dyspozytorów ODM. Realizowane obecnie ograniczone funkcje systemu SORN mają służyć poprawie bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego, wykorzystując w tym celu istniejącą infrastrukturę układów regulacji ARNE i ARST. Łącznie z wprowadzanymi ostatnio modyfikacjami algorytmów układów ARST, system SORN ma przede wszystkim zapobiegać zagrożeniu pogłębienia lub przyspieszenia awarii napięciowej przez niezablokowaną w porę regulację transformatorową.



Wskaźniki tego rodzaju przypisane są osobno do każdego z podobszarów włoskiej sieci, którym wyznacza się tak zwany węzeł pilotujący – punkt odniesienia do regulacji napięcia obszaru. Dzięki temu uzyskano uwzględnienie lokalnego charakteru gospodarki mocą bierną.

Innym ciekawym wskaźnikiem do przybliżonej oceny zapasu stabilności jest wskaźnik napięciowy  $L_i$  [4], liczony dla każdego z węzłów sieci:

$$L_i = \frac{V_i}{V_{0i}} \quad (2)$$

gdzie:

$V_i$  – napięcie węzła  $i$  obliczone dla aktualnego modelu sieci

$V_{0i}$  – napięcie węzła  $i$  przy rozplywie mocy dla zerowych odbiorów

Nie informuje on o wartości zapasu stabilności napięciowej, jednak wskazuje konkretne węzły, które są podatne na utratę stabilności. Do wyznaczenia wskaźnika  $L_i$  potrzebny jest model sieci, ale obliczenia są uproszczone – nie ma tu problemu z rozkładem dodatkowego obciążenia, jak w metodzie krzywych nosowych.

## 2. ZAŁOŻENIA DO METODY OCENY SYTUACJI NAPIĘCIOWEJ W SIECI PRZESYŁOWEJ ZINTEGROWANEJ Z AUTOMATYKĄ REGULACYJNĄ

Opisana w artykule metoda została zaimplementowana do systemu SORN z uwzględnieniem specyfiki północnego obszaru KSE, podległego ODM Bydgoszcz. Sieć przesyłowa na tym obszarze posiada napięcia znamionowe 400 kV i 220 kV. W sieci pracują dwie elektrownie szczytowo-pompowe – Żarnowiec i Żydowo oraz łącze HVDC i 11 stacji elektroenergetycznych NN. Obie elektrownie wyposażone są w układy regulacyjne ARNE. W 10 stacjach NN pracują układy ARST, a 4 stacje wyposażone są w sterowane ręcznie baterie kondensatorów. Cechą charakterystyczną obszaru, z punktu widzenia praktyki operatorskiej, jest intensywne wykorzystywanie układów regulacji, które objawia się częstymi w ciągu doby korektami wartości zadanych dla regulatorów.

Niedostępność na bieżąco pełnego modelu sieci dla ODM Bydgoszcz (brak pomiarów z sieci 110 kV) ogranicza praktyczne zastosowanie znanych metod wyznaczania zapasu stabilności napięciowej w trybie bezpośrednim *on-line*. W związku z tym, że tylko jedna elektrownia Żarnowiec może praktycznie wpływać na poziom napięcia obszaru ODM, wskaźnik typu (1), uwzględniający zapas regulacji mocy biernej tej elektrowni, jest naturalnym sposobem oceny sytuacji napięciowej obszaru ODM. Podczas projektowania systemu SORN dla ODM Bydgoszcz postanowiono skupić się na automatycznym nadzorze nad pracą układów regulacji napięcia, w celu zwiększenia bezpieczeństwa korzystania z nich w warunkach zagrożenia awarią o charakterze napięciowym.

## 3. WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA NAPIĘCIOWEGO

W celu ułatwienia obiektywnej oceny wielkości monitorowanych w ramach systemu SORN zaproponowano trzy bezwymiarowe wskaźniki bezpieczeństwa napięciowego:

1.  $W_O$  – wskaźnik wykorzystania zakresu regulacji mocy biernej w elektrowniach
2.  $W_U$  – wskaźnik napięciowy dla węzłów wytwórczych i przesyłowych, określający odchyłkę od pożądanego profilu napięciowego
3.  $W_Z$  – wskaźnik wykorzystania zakresu regulacji przekładni transformatorów.

Pracujące układy wtórnej regulacji, zgodnie z przyjętymi kryteriami regulacji i nastawieniami, automatycznie reagują na zmiany obciążenia oraz zakłócenia w pracy systemu elektroenergetycznego. Wskaźniki  $W_O$ ,  $W_U$  i  $W_Z$  powinny umożliwić ocenę zarówno bieżącej wartości monitorowanych wielkości, jak i przewidywanej zmiany tych wartości w horyzoncie czasowym rzędu od kilku do kilkunastu minut. Ważny jest zatem rejestrowany na bieżąco przebieg zmian wskaźnika i wyznaczony z niego trend zmian. Wskaźniki bezpieczeństwa, obliczane z uwzględnieniem trendu zmian, osiągają z wyprzedzeniem wartości kryterialne  $W = 1$  lub  $W = -1$ , dając w ten sposób czas na odpowiednią reakcję dyspozytora.

Traktując przebieg wskaźnika, wyznaczony na podstawie chwilowych wartości monitorowanych wielkości, jako proces losowy, wartość wskaźnika  $W$  z uwzględnieniem trendu zmian jest wyznaczana jako suma dwóch składników:

$$W = w(t) + \Delta w(t) \quad (3)$$

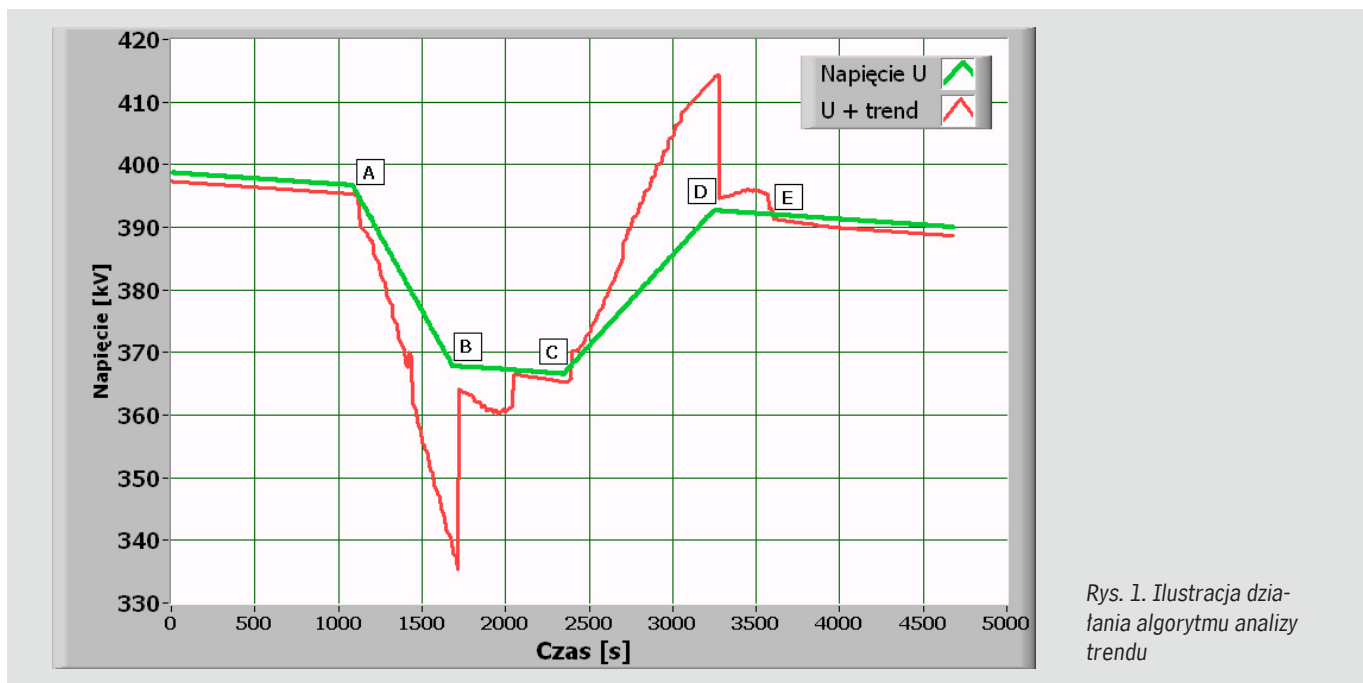
gdzie:

$w(t)$  – estymowana wartość wskaźnika na podstawie przebiegu do chwili  $t$

$\Delta w(t)$  – przyrost wartości wynikający z kontynuacji trendu zmian do chwili  $t$ , o ile taki trend istnieje, tj. ma odpowiednio wysoki współczynnik determinacji.

Ponieważ składnik  $w(t)$  we wzorze (3) jest wartością estymowaną, więc powoduje uśrednienie i wygładzenie przebiegu wskaźnika  $W$  – uwalnia go od wpływu chwilowych zakłóceń. Z kolei składnik przyrostowy  $\Delta w(t)$  reprezentuje dynamikę zmian, w tym wywołaną przez działanie układu regulacji.

Z doświadczeń eksploatacyjnych systemu SORN wynika, że wyznaczenie trendu musi przebiegać ze zmiennym horyzontem czasowym, dostosowanym do kształtu przebiegu. Zakładamy, że w (3) przewidywany przyrost  $\Delta w(t)$  wystąpi dla przedziału czasowego, dla którego wyznaczono najbardziej wiarygodny trend. Na rys. 1 pokazano dwa przebiegi: przebieg testowy napięcia (Napięcie  $U$ ) oraz przewidywaną wartość tego napięcia wyznaczoną na podstawie analizy ostatnich 20 min przebiegu testowego ( $U + \text{trend}$ ). Przebiegi na rysunku stanowią ilustrację działania zastosowanego algorytmu analizy trendu.



Rys. 1. Ilustracja działania algorytmu analizy trendu

Na rysunku w odcinkach A-B i C-D algorytm ten przyjmuje coraz dłuższy przedział czasowy jako bazę do obliczenia trendu zmian – stąd przewidywana zmiana napięcia zwiększa się. Gwarantuje to wykrycie powolnych zmian sygnału trwających kilkanaście, kilkadziesiąt minut. W odcinkach czasowych B-C i D-E, po skokowej zmianie pochodnej przebiegu testowego, następuje szybka korekta – algorytm znajduje jako bardziej wiarygodny trend wyznaczony na podstawie tylko ostatnich próbek sygnału testowego.

### 3.1. Wskaźnik wykorzystania zakresu regulacji mocy biernej $W_Q$

Zjawisku niestabilności napięciowej towarzyszy często, choć nie zawsze, wcześniejsze wyczerpanie się zakresu regulacji mocy biernej jednostek wytwórczych. Monitorowanie poziomu rezerw mocy biernej jest podstawową funkcją systemów monitorowania stabilności napięciowej. Proponowany wskaźnik wykorzystania zakresu regulacji mocy biernej jest znormalizowaną wielkością generacji mocy biernej, odniesioną do mocy biernej minimalnej  $Q_{min.}$  lub maksymalnej  $Q_{maks.}$  jednostek wytwórczych, pracujących na połączonych systemach szyn rozdzielni 400, 220 lub 110 kV. Jako poziom odniesienia proponowany jest środek zakresu regulacji. Wartość wskaźnika  $W_Q$  określa wzór (4):

$$W_Q = q(t) + \Delta q(t) \quad (4)$$



gdzie:

$q(t)$  – estymowana wartość bieżąca znormalizowanej generacji mocy biernej, tj. wartości  $Q(t)$  w węźle wytwórczym, odniesiona do różnicy pomiędzy wartością ograniczenia mocy  $Q_{min.}$  lub  $Q_{maks.}$  a połową zakresu regulacji

$\Delta q(t)$  – przewidywany przyrost wskaźnika, o ile istniejący trend będzie kontynuowany:

$$q(t) = \frac{Q(t) - \frac{1}{2}(Q_{maks.} + Q_{min.})}{\frac{1}{2}(Q_{maks.} - Q_{min.})} \quad \text{dla } Q(t) > \frac{1}{2}(Q_{maks.} + Q_{min.}) \quad (5)$$

Tab. 1. Wartości kryterialne wskaźnika  $W_Q$

Wartość $W_Q$	-1,0	0,0	1,0
Stan węzła	Maksymalne wykorzystanie zakresu mocy regulowanej pojemnościowej $Q = Q_{min.}$	Środek zakresu regulacji mocy biernej ( $Q_{min.}, Q_{maks.}$ )	Maksymalne wykorzystanie zakresu mocy regulowanej indukcyjnej $Q = Q_{maks.}$

### 3.2. Wskaźnik napięciowy $W_U$

Dla sieci przesyłowej przyjmuje się w danych warunkach optymalny profil napięcia – napięcie zadane dla układu wtórnej regulacji w połączonych systemach szyn. Proponowany wskaźnik napięciowy  $W_U$  jest znormalizowaną odchyłką napięcia węzła od aktualnego napięcia zadanego, odniesioną do napięcia blokady nadnapięciowej lub podnapięciowej układu regulacji. Zaletą jego stosowania polega na powiązaniu wyliczonej wartości wskaźnika  $W_U$  z aktualnymi nastawieniami (napięcie zadane) i parametrami (blokady) układu regulacji.

$$W_U = u(t) + \Delta u(t) \quad (6)$$

gdzie:

$u(t)$  – estymowana wartość bieżąca znormalizowanej odchyłki napięcia odniesiona do wartości najbliższej blokady napięciowej

$\Delta u(t)$  – przewidywany przyrost wskaźnika, o ile istniejący trend będzie kontynuowany:

$$u(t) = \frac{U(t) - U_{zad.}}{U_{BLN} - U_{zad.}} \quad \text{dla } U(t) > U_{zad.} \quad (7)$$

$$u(t) = \frac{U_{zad.} - U(t)}{U_{zad.} - U_{BLP}} \quad \text{dla } U(t) < U_{zad.} \quad (8)$$

$$u(t) = 0 \quad \text{dla } U(t) = U_{zad.} \quad (9)$$

$U$  – napięcie na połączonych systemach szyn

$U_{zad.}$  – napięcie zadane

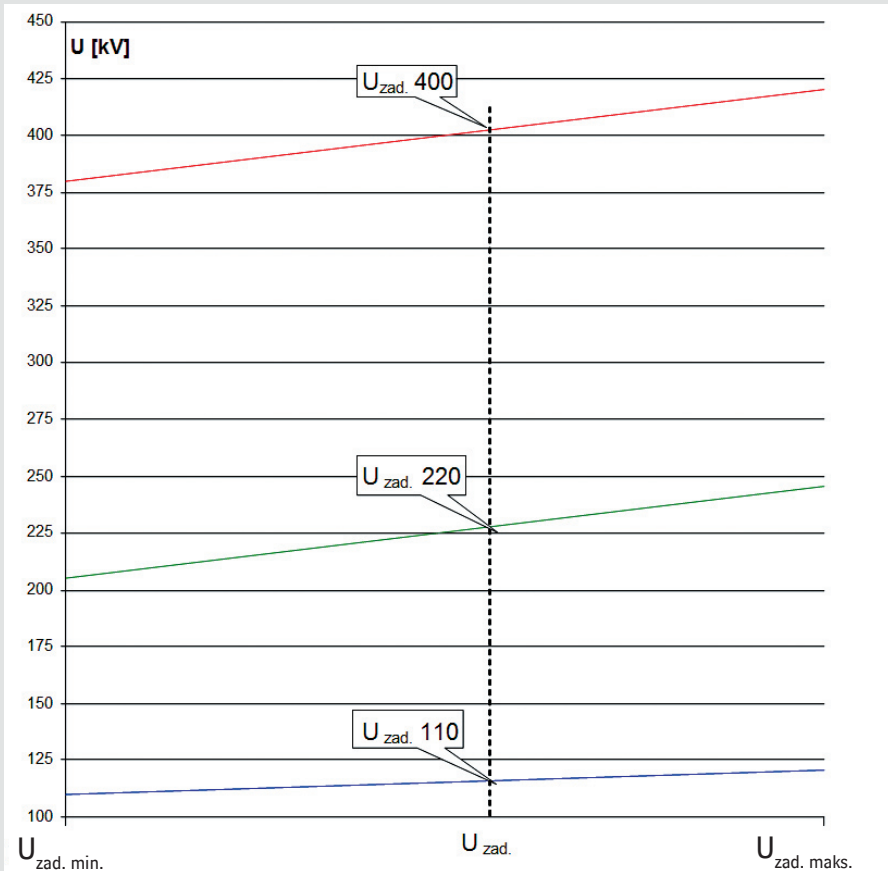
$U_{BLP}$  – napięcie blokady podnapięciowej

$U_{BLN}$  – napięcie blokady nadnapięciowej

Tab. 2. Wartości kryterialne wskaźnika  $W_U$

Wartość $W_U$	-1,0	0,0	1,0
Stan węzła	Odchyłka napięcia na poziomie blokady podnapięciowej	Brak odchyłki napięcia od wartości zadanej układu regulacji	Odchyłka napięcia na poziomie blokady nadnapięciowej

Dla sieci przesyłowej przyjmuje się dopuszczalne granice napięcia regulowanego dla rozdzielni. Większość układów regulacji transformatorowej ARST kontroluje napięcie w sieci 110 kV. Wskaźnik napięciowy dla strony 220 kV lub 400 kV transformatora należy wyznaczać, przeliczając wartość zadaną strony 110 kV proporcjonalnie do dopuszczalnych granic napięcia zadanego (rys. 2).



Rys. 2. Sposób przeliczania wartości napięcia zadanego 110, 220 i 400 kV do wyznaczenia wskaźnika  $W_u$

Jeżeli układ regulacji kontroluje przepływ mocy biernej transformatora albo regulacja automatyczna jest zablokowana i odbywa się ręcznie, to w celu wyliczenia wskaźnika  $W_u$  przyjmuje się dla strony 110 kV napięcie zadane równe mierzonemu – tak jakby regulacja napięcia właśnie się zakończyła. W takim wypadku wskaźnik  $W_u = 0$  (jeżeli nie uwzględnia się ewentualnego trendu zmian).

### 3.3. Wskaźnik wykorzystania zakresu regulacji transformatorów $W_z$

Proponowany wskaźnik wykorzystania zakresu regulacji  $W_z$  transformatorów jest wskaźnikiem pomocniczym, którego idea polega na usprawnieniu obiektywnej oceny wpływu automatycznej regulacji transformatorowej na aktualny stan napięciowy. Wskaźnik  $W_z$  jest znormalizowanym odchyleniem położenia przełącznika zacsepów transformatora od „środkowego” zacsep, przy którym zdefiniowana jest przekładnia znamionowa. Jego wartości kryterialne  $W_z = 1$  i  $W_z = -1$  są osiągane w skrajnych zacsepach przełącznika transformatora, dla minimalnej i maksymalnej przekładni, niezależnie od wykonania transformatora<sup>1</sup>.

$$W_z = z(t) + \Delta z(t) \quad (10)$$

gdzie:

$z(t)$  – estymowana wartość znormalizowanej odchyłki zacsep od położenia środkowego odniesiona do położenia zacsep skrajnego

$\Delta z(t)$  – przewidywany przyrost wskaźnika, o ile istniejący trend będzie kontynuowany:

<sup>1</sup> Stosowane są dwa rodzaje przełączników zacsepów: przekładnia rośnie albo maleje ze wzrastającym numerem zacsep.



$$z(t) = \frac{Z(t) - Z_0}{Z_{maks.} - Z_0} \quad \text{dla } Z(t) > Z_0 \quad (11)$$

$$z(t) = \frac{Z_0 - Z(t)}{Z_0 - Z_{min.}} \quad \text{dla } Z(t) < Z_0 \quad (12)$$

$$z(t) = 0 \quad \text{dla } Z(t) = Z_0 \quad (13)$$

gdzie:

$Z_0$  – środkowy zaczepek

$Z_{min.}$ ,  $Z_{maks.}$  – zaczepek skrajne

Tab. 3. Wartości kryterialne wskaźnika  $W_z$

Wartość $W_z$	-1,0	0,0	1,0
Stan PZ	Skrajny zaczepek o minimalnym napięciu strony 110 kV transformatora	Środkowy numer zaczepek, tj. położenie neutralne przełącznika zaczepek transformatora dla znamionowej przekładni	Skrajny zaczepek o maksymalnym napięciu strony 110 kV transformatora

Wskaźnik  $W_z$  należy wyznaczać z pominięciem zwartych zaczepek, dla których przekładnia transformatora nie zmienia się.

### 3.4. Monitorowanie stanu węzła za pomocą wskaźników

Dzięki zastosowaniu znormalizowanych wskaźników powiązanych z układami regulacji analiza stanu węzła staje się prostsza. Można zauważyć, że:

Jeżeli istnieje zapas mocy regulowanej  $Q$  jednostek wytwórczych, czyli gdy  $-1 < W_Q < 1$ , to wskaźnik napięciowy  $W_U$  dla rozdzielni będzie równy zero lub bliski zera (odchyłka napięcia w granicach strefy nieczułości regulacji). Jeżeli moc  $Q$  osiągnie wartość ograniczenia  $Q_{min.}$  lub  $Q_{maks.}$ , wskaźnik napięciowy  $W_U$  rozdzielni z generacją może zacząć się zmieniać.

Jeżeli układ regulacji otrzyma nową wartość zadaną, odpowiedni wskaźnik  $W_U$  dla rozdzielni przejściowo będzie różny od zera. Jeżeli jednocześnie inne wskaźniki, tj.  $W_Q$ ,  $W_U$  lub  $W_z$  nie osiągają wartości kryterialnych, stanowi to sygnał, że układ regulacji jest w trakcie regulacji (opóźnienie zadziałania).

Dla stacji z transformatorem 220/110 lub 400/110 kV/kV można zauważyć m.in., że:

- Jeżeli układ regulacji prowadzi regulację napięcia 110 kV, to wskaźnik  $W_{U/110}$  dla rozdzielni 110 kV będzie zerowy (odchyłka w granicach strefy nieczułości regulacji), aż do osiągnięcia skrajnego zaczepek lub zablokowania regulacji z powodu np. zbyt niskiego napięcia 220 kV lub 400 kV. W takim przypadku  $W_z$  osiągnie wartość kryterialną 1 lub  $W_{U/220}$  albo  $W_{U/400}$  wartość -1.
- Przyjęcie wartości kryterialnych przez wskaźniki  $W_{U/220}$  lub  $W_{U/400}$  oraz  $W_z$  dla stacji transformatorowej może stanowić sygnał do zablokowania regulacji automatycznej układu ARST albo do zmiany kryterium lub korekty wartości zadanej.

Przedstawione wyżej zależności umożliwiły autorom realizację rozmytego systemu wnioskowania (ang. *Fuzzy Inference System* [FIS]), generującego podpowiedzi dla dyspozytorów ODM. Systemy zbudowane na podstawie logiki rozmytej i tablic implikacji rozmytych są często wykorzystywane do budowy systemów eksperckich i baz wiedzy. Poniżej przedstawiono niezbędne podstawy teoretyczne metody oraz jej praktyczne zastosowanie w systemie SORN.



#### 4. ROZMYTY SYSTEM WNIOSKOWANIA OPARTY NA WSKAŹNIKACH $W_U$ , $W_Q$ , $W_Z$

Podstawą wnioskowania zastosowanego przez autorów, w odniesieniu do obszaru ODM Bydgoszcz są wartości wskaźników bezpieczeństwa  $W_U$  i  $W_Z$ , obliczone na podstawie danych z układów ARST, oraz wartość pomiaru napięcia 400 kV w SE Słupsk. Sygnały wyjściowe (podpowiedzi) dotyczą wartości napięć zadanych  $U_{Dzad}$  (dla transformatorów pracujących w kryterium regulacji napięcia 110 kV) lub napięcia strony 110 kV (dla transformatorów w regulacji ręcznej) oraz załączenia bądź wyłączenia sekcji baterii.

W przypadku elektrowni na terenie ODM i w jego bezpośrednim sąsiedztwie zastosowano monitorowanie wskaźników  $W_Q$ . W elektrowni Żarnowiec wykorzystano wartość wskaźnika do generowania podpowiedzi dotyczących wykorzystania baterii kondensatorów łącza HVDC w SE Słupsk.

##### 4.1. Podstawy teoretyczne metody zbiorów rozmytych w systemach sterowania i eksperckich

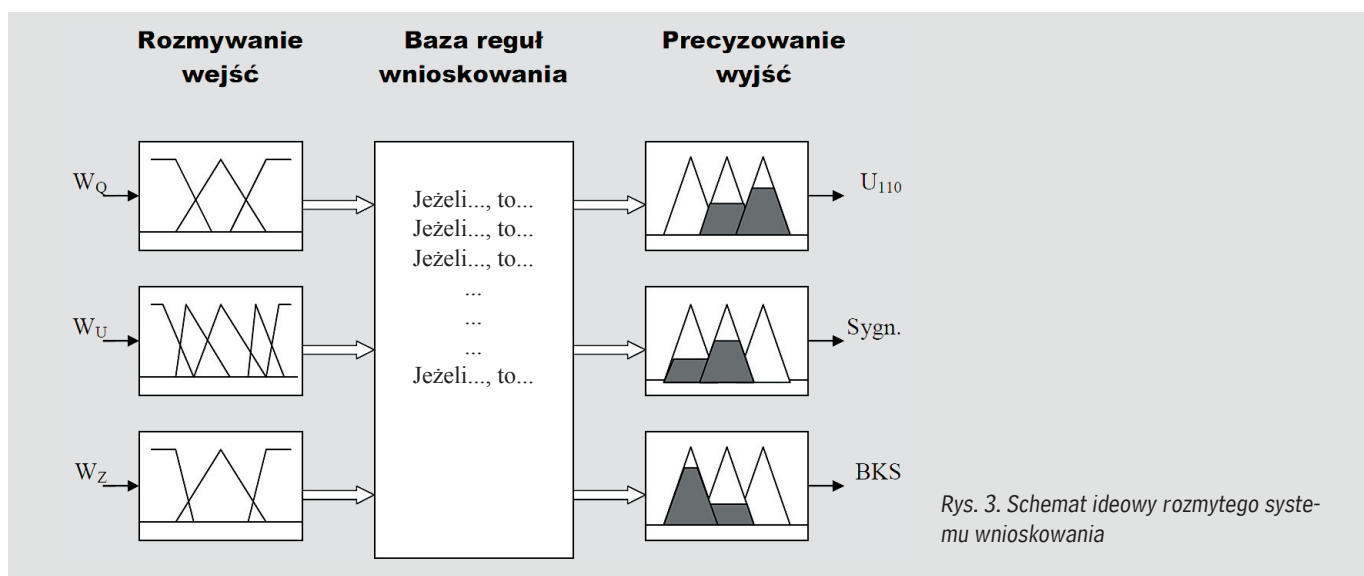
Systemy rozmyte są automatami wykorzystującymi prawa logiki rozmytej w celu podjęcia decyzji w warunkach niepewności, przykładowo przy braku dokładnego modelu matematycznego badanego zjawiska lub gdy model jest zbyt złożony [5]. Automat taki ma pewną bazę wiedzy w postaci zbioru reguł wnioskowania, które pochodzą od eksperta tworzącego system. Efektywność rozmytego systemu wnioskowania zależy głównie od jakości wiedzy eksperta, a w drugiej kolejności od poprawności jej zamodelowania za pomocą logiki rozmytej.

Typowy proces wnioskowania rozmytego zachodzi w trzech etapach:

1. Rozmywanie wartości wejściowych, czyli konwersja rzeczywistych wartości sygnałów wejściowych na zmienne lingwistyczne.
2. Zastosowanie implikacji rozmytych, czyli analiza zdefiniowanego wcześniej zbioru relacji pomiędzy rozmytymi terminami lingwistycznymi sygnałów wejściowych i sygnałem wyjściowym.
3. Precyzowanie, inaczej wyostrzanie wielkości wyjściowej, czyli konwersja rozmytej wartości sygnału wyjściowego na konkretną wartość.

Na rys. 3 przedstawiono w znacznym uproszczeniu schemat ideowy rozmytego systemu wnioskowania zastosowanego w systemie SORN. Mamy tu trzy zmienne lingwistyczne wejściowe  $W_Q$ ,  $W_U$  i  $W_Z$ , które przetwarzane są na zbiory rozmyte, stanowiące przesłanki do reguł wnioskowania zawartych w bazie reguł. Na wyjściu otrzymujemy zmienne lingwistyczne wyjściowe – podpowiedzi systemu:

- analogowe (sugerowane napięcia 110 kV)
- dwustanowe (sygnalizacja ostrzegawcza i alarmowa oraz podpowiedzi dyskretne dotyczące sterowania bateriami kondensatorów i przełączaniem trybów pracy układów ARST).



Rys. 3. Schemat ideowy rozmytego systemu wnioskowania

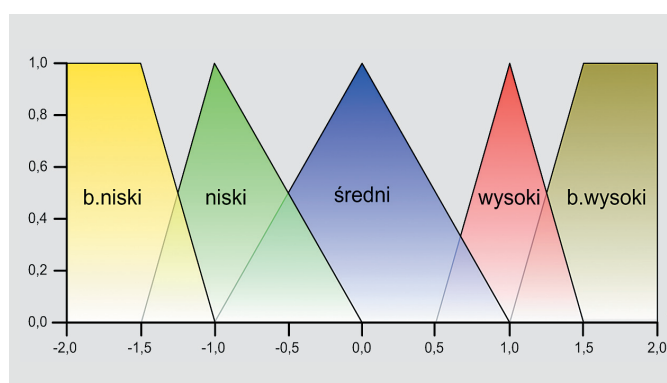
Rozmyty system wnioskowania generuje na swoim wyjściu pojedynczą liczbę – wynik działania bloku precyzowania sygnałów wyjściowych. Autorzy starali się uzyskać efekt odtworzenia działań intuicyjnych podejmowanych przez dyspozytora. Działanie systemu było testowane na przebiegach rzeczywistych, zarejestrowanych w ciągu tygodnia przed i w dniu znanej awarii 26.06.2006.

## 4.2. Rozmycie sygnałów wejściowych

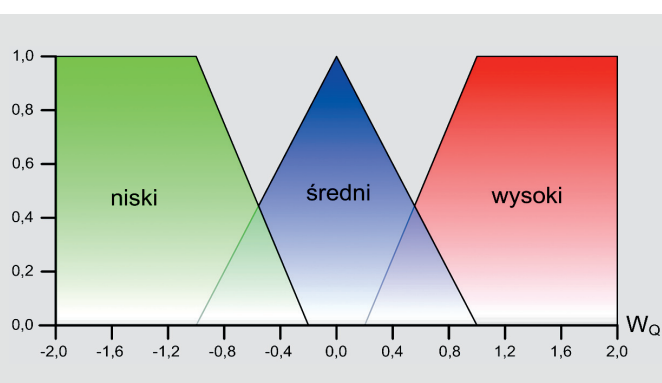
W przypadku wartości wskaźników  $W_U$  strony dolnego i górnego napięcia transformatora (odpowiednio  $W_{UD}$  i  $W_{UG}$ ) przyjęto pięć wyrażen lingwistycznych, określających zakresy wartości wskaźników: bardzo niski, niski, średni, wysoki, bardzo wysoki. Poniżej, na rys. 4, przedstawiono opisane wyrażenia i odpowiadające im zakresy wskaźnika  $W_U$  jako funkcje przynależności zbiorów rozmytych odpowiadających zmiennej lingwistycznej opisującej wskaźnik  $W_U$ .

W przypadku wskaźnika bezpieczeństwa  $W_Q$  elektrowni przyjęto trzy wyrażenia lingwistyczne określające zakresy wartości wskaźnika (rys. 5): niski, średni, wysoki.

Należy zwrócić uwagę, że dzięki przyjęciu odpowiedniej postaci wskaźników bezpieczeństwa, powiązanych z blokadami i wartościami zadanymi układów regulacji, rozmycie sygnałów wejściowych układu wnioskowania jest stałe dla zmieniających się warunków pracy systemu. Na przykład przyjęcie nowego profilu napięciowego dla niepełnej konfiguracji sieci powoduje w naturalny sposób przeskalowanie wskaźników  $W_U$  i przygotowane reguły wnioskowania pozostają w mocy.



Rys. 4. Przykład funkcji przynależności wskaźnika  $W_U$



Rys. 5. Przykładowe rozmycie wielkości wskaźnika  $W_Q$  elektrowni

## 4.3. Reguły wnioskowania dla stacji transformatorowej

Dla transformatorów pracujących w sieci przesyłowej, gdy układ regulacji ARST pracuje w kryterium  $D^2$ , przyjęto regułę, że wielkością sterującą będzie dolne napięcie zadane 110 kV –  $U_{Dzad}$ . W przypadku wyłączenia układu regulacji wielkością sterującą będzie po prostu napięcie 110 kV –  $U_D$ . Po procesie precyzowania sygnału wyjściowego generowana jest podpowiedź adekwatna do bieżącego stanu pracy układu ARST, o ile realizacja tej podpowiedzi wymaga zmiany położenia przetłącznika zaczeów. W tab. 4 przedstawiono zbiór reguł zależnych od zmiennych wejściowych  $W_{UD}$  i  $W_{UG}$ .

Tab. 4. Zasady wnioskowania stosowane przy wyznaczaniu podpowiedzi dotyczących  $U_{Dzad}$  dla typowej stacji transformatorowej

$W_{UD} \backslash W_{UG}$	b. niski	niski	średni	wysoki	b. wysoki
b. niski	0	0	2	2	2
niski	0	0	1	1	2
średni	-2	-1	0	1	2
wysoki	-2	-1	-1	0	0
b. wysoki	-2	-2	-2	0	0

W procesie precyzowania sygnału wyjściowego wartości  $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$  będą konwertowane na napięcie zadane z zakresu  $\langle U_{Dzad\_min}, U_{Dzad\_maks} \rangle$  (rys. 2).



### 4.3.1. Stacja transformatorowa – rozpoznawanie stanów awaryjnych

Najprostszą detekcję stanów awaryjnych w sieci elektroenergetycznej przeprowadzić można z wykorzystaniem tab. 5. Poniżej przedstawiono kombinacje współczynników  $W_{UD}$  i  $W_{UG}$  jednoznacznie przewidujące wystąpienie problemów napięciowych w danej stacji transformatorowej i jej najbliższym otoczeniu.

Tab. 5. Zasady wnioskowania stosowane przy wyznaczaniu podpowiedzi dotyczących stanów awaryjnych dla typowej stacji transformatorowej

$W_{UD} \backslash W_{UG}$	b. niski	niski	średni	wysoki	b. wysoki
b. niski	-2		0		
niski					
średni	-1		0	1	
wysoki	0			2	
b. wysoki					

Gdzie sygnały wyjściowe oznaczają:

- 2** obszar zbyt niskich napięć, świadczący o deficycie mocy w danym punkcie zasilania
- 2** obszar zbyt wysokich napięć, świadczący o nadmiarze mocy w danym punkcie zasilania
- 1** obszar zbyt niskich napięć, świadczący o możliwym zbliżeniu się awarii systemowej (lawinie napięć)
- 1** obszar zbyt wysokich napięć, świadczący o możliwym zbliżeniu się awarii systemowej
- 0** obszar normalnej pracy automatyki ARST w danej stacji
- 0** obszar, w którym stan ARST jest niejednoznaczny (np. po zmianie wartości zadanej).

### 4.3.2. Stacja transformatorowa z baterią kondensatorów

W przypadku stacji z zainstalowaną baterią kondensatorów zbiór wielkości wejściowych zawarty w tab. 4 jest nadal aktualny. W tab. 6 wprowadzono dodatkowe wnioskowanie dotyczące załączenia lub wyłączenia baterii kondensatorów.

Tab. 6. Zasady wnioskowania dla stacji transformatorowej z baterią kondensatorów

$W_{UD} \backslash W_{UG}$	b. niski	niski	średni	wysoki	b. wysoki
b. niski	2	2	2	0	0
niski	2	1	1	0	0
średni	2	1	0	-1	-2
wysoki	0	0	-1	-1	-2
b. wysoki	0	0	-2	-2	-2

Gdzie sygnały wyjściowe oznaczają:

- 2 – załącz wszystkie sekcje
- 1 – załącz sekcję
- 0 – bez zmian
- 1 – wyłącz sekcję
- 2 – wyłącz wszystkie sekcje.

Podpowiedź dotycząca sterowania baterią kondensatorów jest tak długo aktywna, dopóki nie zmienią się wartości sygnałów wejściowych. Efekt regulacyjny jest w tym wypadku natychmiastowy i powinien wpływać na sygnały wejściowe metody wnioskowania.

### 4.3.3. Stacja Słupsk SLK – szczególny przypadek stacji z baterią kondensatorów

Stacja SLK różni się od innych stacji przede wszystkim tym, że do jej rozdzielni 400 kV przyłączone jest łącze HVDC i nie jest wyposażona w układ regulacji ARST. Nie liczy się dla niej wskaźników  $W_{UD}$ ,  $W_{UG}$  oraz  $W_Z$ . W związku z powyższym opracowano osobną tabelę wnioskowania rozmytego. Praca baterii kondensatorów w SE SLK (2 x 95 Mvar oraz filtr 95 Mvar) jest silnie skorelowana z pracą elektrowni Żarnowiec (generacją mocy biernej). W związku z tym jako zmienne wejściowe przyjęto napięcie na rozdzielni 400 kV w stacji SLK oraz wskaźnik  $W_Q$  elektrowni Żarnowiec.

Moment załączenia lub wyłączenia baterii kondensatorów musi uwzględniać stan pracy łącza HVDC. Podczas importowania lub eksportowania mocy, na każde 200 MW mocy przepływające łączem HVDC rezerwowane jest ok. 80 Mvar mocy biernej. Przy braku przesyłu mocy łączem HVDC pracą baterii można sterować jak w typowych stacjach. W związku z powyższym po załączeniu filtra praktyczna regulacja napięcia za pomocą obu baterii jest możliwa tylko przy przesyśle mocy w granicach  $-200 \text{ MW} < P_{\text{HVDC}} < 200 \text{ MW}$ . Dla innych wartości przesyłu podpowiedzi nie są generowane. Na podstawie dotychczasowej praktyki eksploatacyjnej przyjęto, że w przypadku osiągnięcia poziomu  $\text{SLK400} > 419 \text{ kV}$  wyłącza się jedną z baterii lub gdy żadna z nich nie pracuje – załącza się dławik. Natomiast gdy napięcie  $\text{SLK400} < 391 \text{ kV}$ , dokonuje się załączenia jednej z baterii. Dodatkowo przed załączeniem baterii zwykle obniża się o kilka kV napięcie zadane w elektrowni Żarnowiec.

Poniżej w tab. 7 zaprezentowano reguły wnioskowania przyjęte do sterowania pracą baterii kondensatorów w stacji SLK.

Tab. 7. Reguły wnioskowania dla pracy baterii w SE SLK

L.p.	SLK – HVDC	SLK400	ZRC – WQ	Wynik
1	-200 MW < PHVDC < 200 MW	niskie	niski	załóż baterię
2		średnie		bez zmian
3		wysokie		wyłącz baterię
4		niskie	średni	załóż baterię
5		średnie		bez zmian
6		wysokie		wyłącz baterię
7		niskie	wysoki	załóż baterię
8		średnie		załóż baterię
9		wysokie		bez zmian

### 4.3.4. Stacje przy elektrowniach

Na obszarze ODM Bydgoszcz istnieją dwie tego typu stacje – ZRC i ZYD. W obu stacjach wszystkie bloki generacyjne przyłączone są do jednej rozdzielni. W układach ARNE sterowanie generacją mocy biernej odbywa się poprzez zadawanie napięcia na rozdzielni, do której generacja ta jest przyłączona. W stacji ZRC układ ARNE utrzymuje napięcie  $U_G$  – 400 kV, a w ZYD napięcie  $U_D$  – 110 kV. Napięcie zadane dla obu układów ARNE będzie niedotrzymane jedynie po osiągnięciu przez generatory ograniczeń na generację mocy biernej. W związku z powyższym zaproponowano monitorowanie wskaźników  $W_Q$  obu elektrowni. Wskaźniki te określają przewidywany zakres regulacji i dostarczają wystarczających informacji do oceny stanu pracy elektrowni z punktu widzenia generacji mocy biernej. W systemie SORN wskaźniki prezentowane są na wyświetlaczu z dwoma wskazówkami (rys. 6). Wskazówka czarna pokazuje aktualną wartość wskaźnika, a czerwona wartość  $W_Q$ , wynikającą z wyliczenia na bieżąco trendu.



## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda oceny sytuacji napięciowej w sieci przesyłowej pozwala na identyfikację stanów awaryjnych oraz generowanie podpowiedzi dla dyspozytorów, mające na celu minimalizowanie skutków awarii. Niewątpliwą zaletą metody jest możliwość jej zastosowania na podstawie pomiarów z sieci przesyłowej, bez konieczności tworzenia aktualnego modelu sieci. Dodatkowym atutem metody jest zastosowanie bezwymiarowych wskaźników bezpieczeństwa, uwzględniających po pierwsze – stan pracy i nastawy układów regulacji napięcia ARNE i ARST, a po drugie – trend zachodzących zmian w systemie elektroenergetycznym. Metoda została zastosowana w systemie SORN pracującym w ODM Bydgoszcz. Analiza efektów działania metody, po roku od jej wdrożenia, pozwala autorom potwierdzić jej skuteczność. Wyniki dokładnych analiz rejestracji działania systemu SORN z dłuższego okresu czasu zostaną przedstawione w późniejszym terminie.

## BIBLIOGRAFIA

1. IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, Voltage stability assessment, procedures and guides, January 2001.
2. Taylor CW., Ramanathan R., BPA Reactive Power Monitoring and Control following the August 10, 1996 Power Failure, Invited paper, VI Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Salvador, Brazil, 24–29 May 1998.
3. Corsi S., Pozzi M., Bazzi U., Moncenigo M., Marannino P, A simple Real-time and on-line voltage stability index under test in Italian Secondary Voltage Regulation, Paris, Cigre session 2000.
4. Hatziaargyrion N.D., Cutsem T. van (red.), Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena, technical report TF 38-02011, Cigre session 1994.
5. National Instruments, LabView – PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual, June 2009.