



ARTYKUŁY REFERENCYJNE  
BIBLIOTEKA ŹRÓDŁOWA ENERGETYKI PROSUMENCKIEJ  
[www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl)



# STEROWANIE JAKOŚCIĄ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W WARUNKACH RYNKOWYCH. WYBRANE ZAGADNIENIA TECHNICZNE

**Bernard Witek**

**Słowa kluczowe:** elastyczne układy elektroenergetyczne, sterowanie, jakość zasilania

**Streszczenie.** Pożądana przez odbiorców energii elektrycznej jakość zasilania może być osiągnięta m.in. przez odpowiednie opcje sterowania pracą układu zasilającego (np. w oparciu o tzw. inteligentne systemy wieloagentowe), zastosowanie układów energoelektronicznych nowej generacji oraz rozwijanie generacji rozproszonej. Niniejszy artykuł koncentruje się na zagadnieniu doboru środków technicznej realizacji układu zasilania w oparciu o tzw. centra sterowania jakością (CSJ) w jednym z kluczowych aspektów ich funkcjonowania tzn. w zakresie zapewnienia wymaganej jakości napięcia zasilającego w węzłach odbiorczych, w tym prewencji i ograniczania skutków zapadów napięcia.

## 1. WSTĘP

W analizach jakości rozróżnia się zaburzenia w postaci odkształceń (*variations*), tzn. odchyłeń od wartości oczekiwanych (np. napięcia) oraz zdarzeń (*events*), odnoszących się do nagłych zmian parametrów wywołanych zarówno czynnościami eksploatacyjnymi (*normal events*) jak i zakłóceniami (*abnormal events*) [2]. Do zdarzeń można zaliczyć np.: zapady i skoki napięcia, przepięcia, przerwy, wyłączenia, a do odkształceń np.: zakłócenia harmonicznymi i składowymi wysokiej częstotliwości, zakłócenia impulsowe, składowe przejściowe, wahania częstotliwości i inne. Pogorszenie jakości energii elektrycznej ma istotny wpływ na urządzenia strony odbiorczej, ale także na dostawców energii - zarówno w zwiększonej awaryjności systemu zasilającego i urządzeń, jak również w stratach z tytułu nie dostarczonej energii. W ramach działań prewencyjnych proponuje się stosowanie rozmaitych środków, dostępnych obecnie m.in. w zakresie: energoelektroniki, małych generatorów i zasobników energii oraz techniki mikroprocesorowej i informatycznej. Zastosowania te wiążą się m.in. z przyszłościowymi strukturami sieci rozdzielczych, opartymi na tzw. centrach sterowania jakością zasilania (CSJ) [11], w których proponuje się zastosowanie wielorakich środków zarówno w warstwie technologicznej (aktywne układy kondycjonowania energii, energetyczne filtry aktywne, małe źródła, zasobniki energii itd.), jak i w warstwie informatycznej (sterowanie rozproszone np. z wykorzystaniem tzw. inteligentnych systemów wieloagentowych – ISW) [10].

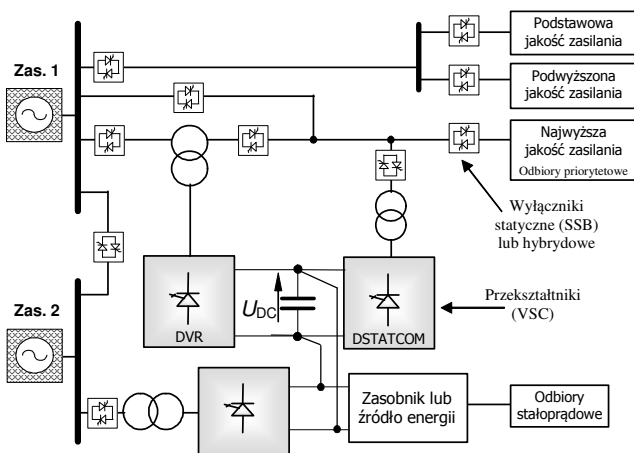
## 2. ZASILANIE ODBIORCÓW W OPARCIU O CENTRA STEROWANIA JAKOŚCIĄ

Ewolucja sieci rozdzielczych związana m.in. z rozwojem generacji rozproszonej (GR), zmianą struktury odbiorów, rosnącymi wymaganiami wielu odbiorców w zakresie jakości zasilania sprawia, że podejście do

jakości energii ulega stopniowej weryfikacji. Proponuje się na przykład podejście do jakości energii elektrycznej opierające się na założeniu, że większość odbiorców jest skłonna zaakceptować kompromis polegający na zapewnieniu im przez dostawcę energii o dobrej jakości (nie powodującej zagrożenia dla poprawnej pracy urządzeń odbiorczych) za cenę zaakceptowaną przez obie strony. Dla części odbiorców dostawca, drogą indywidualnych negocjacji, może zapewnić dostawę energii o podwyższonych parametrach jakościowych. Z realizacją wyższych poziomów zasilania wiązać się będzie zastosowanie dodatkowych środków technicznych i zaawansowanych metod sterowania. Pośród wielorakich propozycji rozwoju optymalna wydaje się opcja zdefiniowania trzech poziomów jakości zasilania scharakteryzowana m.in. w [11] (por. rys. 1).

Centra sterowania jakością mogą być zlokalizowane w sieci rozdzielczej (D-CSJ) lub na poziomie odbiorcy (O-CSJ). W układzie D-CSJ obok tradycyjnych elementów sieciowych (transformatory, wyłączniki itd.) mogą być stosowane także elementy i układy energoelektroniczne, zasobniki i źródła energii. Poziom napięcia po stronie zasilania może być dynamicznie sterowany przez układ tyrystorowy VQC, układ SVC/SVG może zapewniać kompensację mocy biernej, łączniki statyczne SSB szybkie przełączenia, EFA filtrację harmonicznych, a połączenia light-HVDC efektywne zasilanie odbiorów stałoprądowych. Podstawowymi elementami w strukturze O-CSJ (por. rys. 1) są urządzenia DFACTS oraz inne elementy i układy energoelektroniczne. Ich zastosowanie pozwala na ograniczenie skutków najczęściej występujących zakłóceń. Na uwagę zasługuje kompleksowe rozwiązanie w postaci tzw. zunifikowanego kondycjonera jakości energii (UPQC) stanowiącego podstawowy segment CSJ. Możliwości UPQC można wykorzystać poprzez odpowiednie opcje i koordynację sterowania [10] dla realizacji takich funkcji jak:

1) poprawa profilu napięcia (np. zapady i skoki napięcia), 2) dynamiczna regulacja mocy czynnej i biernej, 3) aktywna filtracja, 4) kompensacja asymetrii, 5) zasilanie bezprzerwowe i inne. Do gałęzi stałoprądowej może być przyłączone źródło energii (np. ogniwo paliwowe, lub źródło prądu przemiennego przyłączone przez układ prostownikowy) w celu zwiększenia możliwości regulacyjnych i niezawodności układu zasilania. Przez zastosowanie odpowiedniego układu łączników możliwa jest modyfikacja konfiguracji układu. Źródło może oddawać nadwyżki mocy do sieci zasilającej lub, w przypadku awarii zasilania z sieci, pracować w układzie wyspowym zapewniając ciągłość zasilania odbiorów priorytetowych (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowa struktura O-CSJ

W praktyce stosuje się rozmaite metody sterowania parametrami przebiegu wyjściowego przeksztalników pracujących jako DSTATCOM lub DVR. Najczęściej stosowane są regulatory PID, sterowanie histeretyczne (*hysteretic control*), sterowanie wektorem przestrzennym (*space vector control*), sterowanie tłumione (metoda śledzenia prawie dokładnego, ang. *deadbeat control*), itd. Metody te mają swoje zalety i ograniczenia. Sterowanie z wykorzystaniem PID oraz sterowanie histeretyczne są stosunkowo łatwe w realizacji, lecz taki rodzaj sterowania jest trudny do zoptymalizowania. Z kolei technika sterowania w oparciu o wektor przestrzenny jest skomplikowana w realizacji. Technika sterowania *deadbeat* charakteryzuje się słabą odpornością na zakłócenia a ponadto efekt sterowania zależy od dokładności określenia parametrów w przestrzeni stanu [8].

Ważny aspekt praktyczny, poruszany także w wielu publikacjach, stanowi wybór środków prewencyjnych w kontekście ekonomicznym [1]. Na przykład w odniesieniu do zapadów napięcia rozpatruje się problem minimalizacji kosztów związanych z tymi zdarzeniami za pomocą dedykowanych urządzeń FACTS. Określenie kosztów powstałych w następstwie zapa-

dów napięcia jest niezwykle trudne, bowiem koszty te zależą od wielu czynników m.in. takich, jak: struktura sieci, warunki eksploatacyjne, sposoby eliminacji zakłóceń (np. zwarć), struktura i rodzaje odbiorów sieciowych, a także wrażliwość poszczególnych odbiorów na zapady, ponadto wyniki estymacji kosztów zależą od zastosowanej metody obliczeń. Według [5] koszty zapadów kształtują się na poziomie od kilkuset € na zdarzenie, a w przypadku zaawansowanych technologicznie gałęzi przemysłu dochodzą nawet do kilkuset tysięcy €.

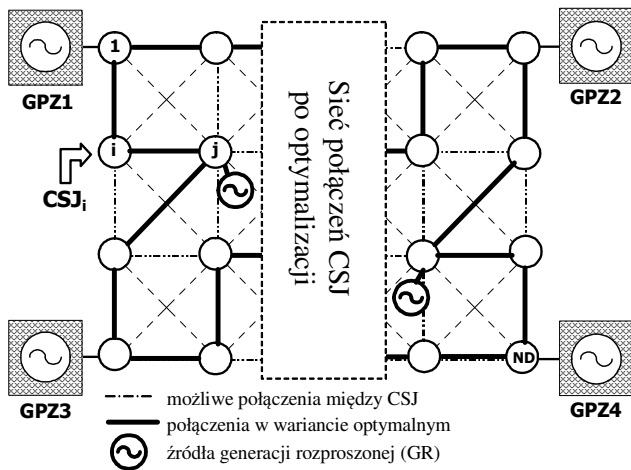
Koszty urządzeń zaradczych – np. FACTS – są obecnie dosyć wysokie. Składają się na nie: koszty inwestycyjne, w których dominują koszty elementów półprzewodnikowych i obwodów magnetycznych (ok. 70%) oraz koszty montażu (ok. 20%), a także koszty eksploatacyjne. Dla przykładu koszty kompensatora STATCOM szacowane są (w zależności od źródła danych) na poziomie od 40 \$/kvar do 65 \$/kvar, podczas kiedy koszty kompensatora SVC są o ok. połowę mniejsze, a regulatora DVR ok. dwukrotnie wyższe (tzn. ok. 100 \$/kvar). Zwraca się jednak uwagę, że koszty układów bardziej zaawansowanych technologicznie (np. STATCOM, DVR) będą maleć, m.in. w wyniku stosowania coraz lepszych elementów energetycznych (m.in. tyrystorów typu ETO) [5].

Inwestycje w elektroenergetyce podlegają obowiązującym standardom w zakresie analiz efektywności. Do oceny ekonomicznej zaleca się stosowanie rozmaitych wskaźników [9]. Zysk wynikający z zastosowania środków prewencji zapadów może być określony na podstawie analizy finansowej, przy zastosowaniu takich narzędzi, jak np.: prosty okres zwrotu nakładów inwestycyjnych (*Simple Payback*), wartość bieżąca netto (*Net Present Value*), koszty cyklu życia (*Life Cycle Costs*) oraz wewnętrzna stopa zwrotu (*Internal Rate of Return*). Wobec tego, że zagadnienia te wykraczają poza zakres niniejszej publikacji, nie będą dalej rozpatrywane.

### 3. OPTIMALNA STRUKTURA SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ Z CSJ

Jednym z podstawowych problemów realizacji tzw. elastycznych układów zasilania (EUZ) [12] jest określenie optymalnej struktury połączeń CSJ, stanowiących węzły sieci zasilającej obszar o wysokim stopniu zurbanizowania z wieloma odbiorami o zróżnicowanych potrzebach w zakresie jakości dostarczanej im energii, przy uwzględnieniu najistotniejszych kryteriów efektywnej pracy sieci w warunkach normalnych i awaryjnych. Na etapie planowania celem obliczeń optymalizacyjnych jest określenie struktury połączeń pomiędzy CSJ oraz wytypowanie węzłów do lokalizacji źródeł GR przy zminimalizowaniu su-

my ważonej całkowitego kosztu inwestycyjnego oraz kosztów dystrybucji (strat) przy założeniu limitu dopuszczalnej przeciążalności połączeń liniowych. Graficzną reprezentację tego zagadnienia pokazano na rysunku 2. Dla matematycznego sformułowania problemu przyjmuje się m.in., że znana jest lokalizacja i moc zainstalowana w poszczególnych CSJ oraz całkowite koszty realizacji połączeń liniowych i instalacji źródeł [6].



Rys. 2. Uogólniona struktura sieci z CSJ dla przykładowych lokalizacji źródeł

Działania operatorskie mogą być wspomagane rozwiązaniem następującego zadania optymalizacyjnego:

$$FC_{OP} = \beta D'_{str} + \delta \left( \sum_{r=1}^{FLT} p_r D_p^{rt} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

przy następujących ograniczeniach:

– osiągalne moce źródeł GR dane są jako zbiór:

$$X_n \in \{x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^i, \dots, x_n^L\} \quad (n = 1, \dots, ND) \quad (2)$$

– oczekiwane przeciążenia linii spełniają warunek:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^{FLT} \frac{1}{T} p_r D_p^{rt} \leq \varepsilon \cdot \quad (3)$$

Ponadto musi istnieć możliwość zasilania dowolnego węzła  $n$  dla dowolnego przypadku awaryjnego  $r$ , tzn.  $\exists R_{sn}^r$ .

$D_p^{rt}$  oznacza sumaryczne przeciążenie linii w sytuacji zakłócenia  $r$  dla grafiku obciążenia  $t$ :

$$D_p^{rt} = \sum_{m=1}^{BR} P_{pm}^{rt}, \quad (4)$$

przy czym w oparciu o grafik przyjmuje się:

$$P_{pm}^{rt} = \begin{cases} P_{pm}^{rt} - \bar{P}_m & \text{dla } P_{pm}^{rt} > \bar{P}_m \\ 0 & \text{dla } \underline{P}_m \leq P_{pm}^{rt} \leq \bar{P}_m \\ \underline{P}_m - P_{pm}^{rt} & \text{dla } P_{pm}^{rt} < \underline{P}_m \end{cases}$$

Z kolei  $p_r$  oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia zakłócenia  $r$  zgodnie z zależnością:

$$p_r = q_{k1} \cdot q_{k2} \cdot \dots \cdot q_{km} \cdot (1 - q_{km+1}) (1 - q_{km+2}) \cdot \dots \cdot (1 - q_{kn}). \quad (5)$$

Przyjęto następujące oznaczenia:

$ND$  – całkowita liczba CSJ (por. rys. 2),

$BR$  – całkowita liczba możliwych połączeń liniowych,

$x_n^i$  –  $i$ -ta dostępna moc źródła GR dla  $n$ -tego CSJ,

$T$  – liczba rozpatrywanych grafików obciążeń,

$FLT$  – liczba wyłączeń wywołanych zakłóceniem,

$D'_{str}$  – starty dystrybucji dla grafiku obciążenia  $t$ ,

$\varepsilon$  – graniczne, oczekiwane przeciążenie linii,

$\alpha, \beta$  – współczynniki wagowe,

$\delta$  – współczynnik kary za naruszenie ograniczenia.

Zakłada się także, że znane są równania rozptylowe dla każdego  $r$ . Przeciążenia są redukowane przez regulację mocy wyjściowych źródeł i/lub zmianę połączeń liniowych w sieci w oparciu o OPF i algorytm optymalizacyjny *tabu search* [6]. W wyniku realizacji algorytmów optymalizacyjnych uzyskuje się struktury połączeń CSJ w każdym, rozpatrywanym przypadku silnie zależne od przyjętych założeń, a zwłaszcza od lokalizacji i mocy źródeł (istniejących i planowanych) oraz warunków brzegowych i ograniczeń.

Zatem zadaniem operatorskim jest monitorowanie i sterowanie przepływami mocy pomiędzy poszczególnymi CSJ w celu ich optymalizacji z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego. Ponadto realizowane jest wspomaganie procesu sterowania autonomicznego i rozproszonego, w którym każde CSJ określa optymalny w danych warunkach tryb działania w oparciu o informacje z najbliższego otoczenia – dotyczy to np. regulacji napięcia i mocy biernej.

#### 4. FUNKCJE STEROWANIA POZIOMAMI NAPIĘĆ I MOCĄ BIERNĄ W CSJ

Jednym z możliwych podejść w zakresie sterowania rozproszonego jest zastosowanie teorii systemów wieloagentowych (ISW) [7], które koncentrują się na poszczególnych modułach wykonujących podzadania. Każde z nich jest przydzielone suwerennemu autonomicznemu programowi (agentowi). Rozproszenie agentów może mieć charakter przestrzenny (np. grupy modułów sterujących) lub funkcjonalny, kiedy programy-eksperti rozwiązują określone problemy w różnych środowiskach programowych. ISW cechuje szybkie rozwiązywanie problemów wynikające z rozproszenia i niewielkiej ilości najistotniejszych informacji wymienianych pomiędzy poszczególnymi agentami, których adaptacyjność do poszczególnych typów problemów jest rezultatem ich rozproszenia oraz zdolności uczenia się. Każdy obiekt jest przyporządkowany agentowi, który ma możliwość autono-

micznego działania w zakresie rozpoznania i zmiany stanu obiektu i może komunikować się jedynie ze swoimi sąsiadami. Liczba i rodzaj danych pozyskiwanych przez agenta z dedykowanego mu obiektu powinny zostać zminimalizowane tak, aby zapewnić odpowiednią szybkość przetwarzania [10].

Ważnym problemem sterowania jest zapewnienie stabilności napięciowej na poziomie każdego CSJ. Poszczególne centra można traktować jako połączone mikrosystemy, pomiędzy którymi zachodzi wymiana energii według schematu przedstawionego na rys. 3. Przy założeniu, że napięcia odniesienia dla sąsiadujących centrów wynoszą odpowiednio  $CSJ_i \rightarrow U_{iodn}$ ,  $CSJ_j \rightarrow U_{jiodn}$  można określić moc bierną odniesienia w punkcie wspólnego połączenia (PP), który stanowi elektryczny środek linii (o impedancji  $Z_{ij}=R_{ij}+jX_{ij}$ ) łączącej sąsiadujące mikrosystemy, a do  $CSJ_i$  doprowadzana jest moc o składowych  $P_{jid}$ ,  $Q_{jid}$  [11]:

$$Q_{jiodn} = \frac{U_i^2(U_{jiodn}^2 - U_{iodn}^2) - R_{ij}[2P_{jid}U_i^2 + R_{ij}(P_{jid}^2 + Q_{jid}^2)]}{2X_{ij}U_i^2} \quad (6)$$

W oparciu o pomiar  $U_i$  można określić moc bierną:

$$Q_{ji} = Q_{jid} + \frac{X_{ij}(P_{jid}^2 + Q_{jid}^2)}{2U_i^2} \quad (7)$$

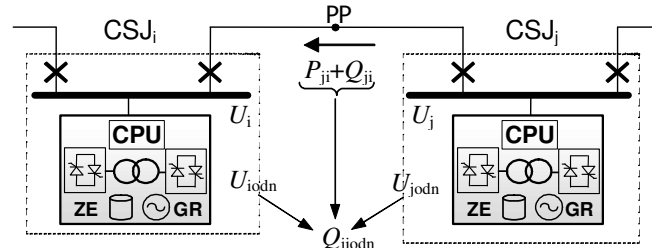
Jeżeli znana jest moc  $Q_{ji}$  oraz zależność mocy biernej od napięcia w  $CSJ_i$ , która pozwala określić współczynnik podatności napięciowej  $K_i$ , to można wyznaczyć wartość mocy biernej do skompensowania w i-tym CSJ:

$$Q_{Ri} = \sum_j (Q_{ji} - Q_{jiodn}) + K_i(U_i - U_{iodn}), \quad K_i = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} \quad (8)$$

W celu ograniczenia mocy  $Q_{Ri}$  steruje się odpowiednio lokalnymi źródłami mocy biernej, a przy braku wystarczającego zapasu mocy regulacja wspomagana jest przez system wieloagentowy, który koryguje napięcia odniesienia w granicach dopuszczalnych z uwagi na stabilność napięciową. Sterowanie optymalne mocą bierną może być oparte na minimalizacji wskaźnika jakości sterowania o postaci:

$$\min FC_Q = \frac{1}{2} \sum_{CSJ_i} \{ [K_i(U_i - U_{iodn})]^2 + [(Q_i - Q_{iodn})]^2 \} \quad (9)$$

Schemat działania polega na tym, że agent  $CSJ_i$  wysyła komunikat o zmianie napięcia odniesienia lub o zadaniu zmiany napięcia odniesienia w sąsiednich CSJ, kiedy napięcie  $U_{iodn}$  osiąga wartość dopuszczalną. Działania są kontynuowane aż do spełnienia warunku (9).



Rys. 3. Centra sterowania jako mikrosystemy

W sytuacji, kiedy takie działanie nie zapewnia utrzymania napięcia w zadanych granicach (np. CSJ<sub>i</sub> osiągnie dolną granicę regulacji a CSJ<sub>j</sub> pracuje przy górnej granicy napięcia odniesienia) poprawna praca układu jest możliwa przez zmianę położenia przełącznika zaczepek transformatora w stacji rozdzielczej i/lub zmianę topologii sieci (por. p. 3) [6].

## 5. POPRAWA JAKOŚCI NAPIĘCIA – WYBRANE PRZYKŁADY

W badaniach symulacyjnych rozpatrzono m.in. zagadnienie optymalnego sterowania w trybie kompensacji równoległej (DSATCOM) i szeregowej (DVR) – por. rys. 1 – w zakresie kompensacji mocy biernej i ograniczania skutków zapadów napięcia. Funkcja celu uwzględnia zadany przebieg odpowiedzi regulatora po skokowej zmianie sygnału wejściowego, odpowiadającej zmianie napięcia w węzle przyłączenia. Celem optymalizacji może być też uzyskanie możliwie krótkiego czasu regulacji przy możliwie niewielkim przeregulowaniu. Podstawą dalszych rozważań jest wskaźnik jakości sterowania [8]:

$$Q_s = \int_0^{t_r} f_o(x, u, t) dt, \quad (10)$$

przy czym:  $t_r$  jest czasem trwania procesu,  $x$  wektorem stanu a  $u$  wektorem sterowań.

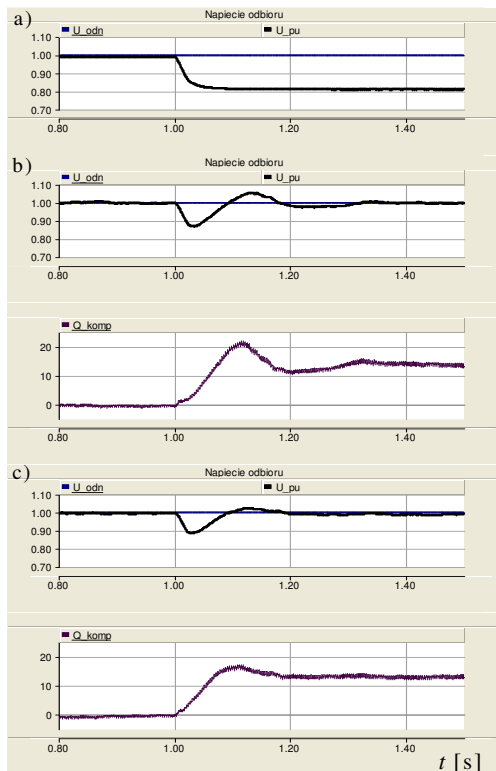
Do oceny jakości regulacji wykorzystano kryterium ISE (*Integrated Squared Error*) polegające na minimalizacji całkowitego wskaźnika (10). Przykładowo dla kompensatora DSTATCOM funkcja celu może uwzględniać parametry regulatora napięcia wyjściowego ( $K_I$  i  $T_I$ ) oraz pętli regulacji napięcia stałego ( $K_{IDC}$  i  $T_{IDC}$ ) [11]:

$$FC_U(K_I, T_I, K_{IDC}, T_{IDC}) = \int_{t_0}^T [(U_1 - U_{1odn})^2] dt \quad (12)$$

Początkowe parametry regulacji przyjęto zgodnie z metodą Zieglera-Nicholsa (ZN), a parametry optymalne uzyskano z wykorzystaniem simpleks nieliniowej metody Nelder-Meada (NM) [12]. Modele sieci, kompensatorów oraz pozostałych elementów strony pierwotnej i wtórnej układu zrealizowano w programie PSCAD/EMTDC [3, 11, 12]. Dla potrzeb badań symulacyjnych opracowano model układu

elektroenergetycznego pozwalający na symulacje zapadów napięcia wywołanych takimi czynnikami, jak: zwarcia w sieci (na różnych poziomach sieci przesyłowej i rozdzielczej), załączanie dużych odbiorców oraz załączanie transformatorów.

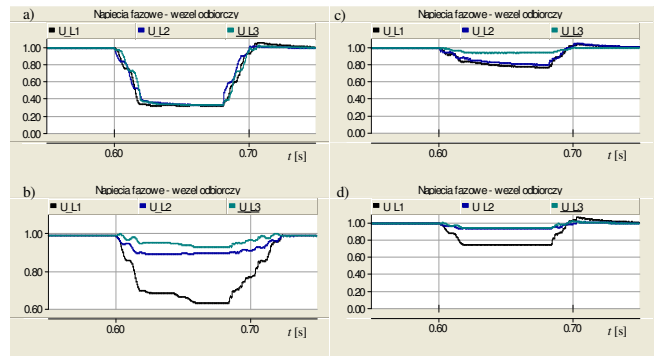
Na rys. 4 pokazano przykładowe wyniki symulacji działania kondycjonera DSTATCOM w trybie kompensacji mocy biernej oraz wywołanego deficytem mocy obniżenia napięcia w węźle odbiorczym.



Rys. 4. Kompensacja deficytu mocy biernej za pomocą DSTATCOM, napięcie w węźle odbiorczym (p.u.) oraz moc bierna dostarczana przez kompensator (kvar): a) bez kompensacji, b) z kompensacją - nastawy ZN, c) z kompensacją - nastawy zoptymalizowane (NM)

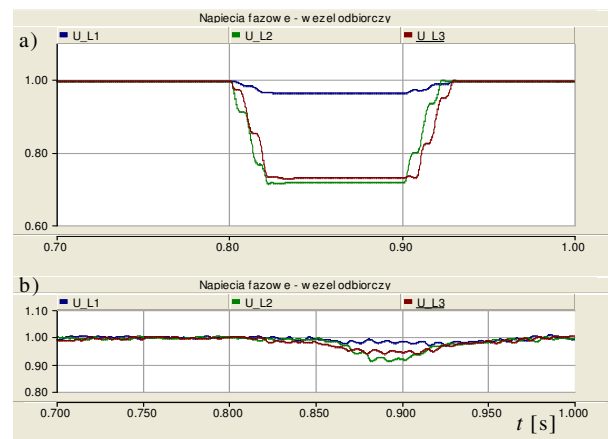
Na rys. 5. przedstawiono wybrane wyniki symulacji zapadów napięcia w węźle odbiorczym (nN) powstałych w wyniku zwarcia niesymetrycznych w sieci 110 kV oraz w sieci przesyłowej 220 kV i 400 kV.

Zapady połączone z asymetrią napięć można skutecznie skompensować za pomocą kondycjonera DVR o niezależnym sterowaniu dla każdej fazy, przy czym wyższe harmoniczne generowane przez układ przekształtnikowy można wytłumić się za pomocą pasywnego filtra bocznikowego przyłączonego do sieci za kondycjonerem – po stronie odbiorców. Na rysunku 6 zilustrowano działanie kondycjonera DVR podczas zwarcia dwufazowego z ziemią w sieci zasilającej powodującego zapad napięcia w węźle odbiorczym.



Rys. 5. Zmiany napięcia (p.u.) w węźle odbiorczym (nN) podczas zwarcia w sieci zasilającej, zwarcia w sieci 110 kV: a) trójfazowe b) jednofazowe; zwarcia dwufazowe: c) w sieci 220 kV, d) w sieci 400 kV

W oparciu o ISE zoptymalizowano wartości wzmocnienia w pętli regulacji napięć fazowych kondycjonera dodawanych do napięć w węźle sieci (rys. 1).



Rys. 6. Działanie kondycjonera DVR podczas zapadu napięcia w węźle odbiorczym; napięcia fazowe (p.u.): a) kondycjoner wyłączony, b) kondycjoner załączony

Wyniki symulacji pokazują sytuację, w której za pomocą kondycjonera DVR można osiągnąć istotną poprawę profilu napięcia w węźle odbiorczym umożliwiającą pracę odbiorców wrażliwych na zapady napięcia podczas zakłóceń w sieci zasilającej.

## 6. UWAGI KOŃCOWE

Realizacja opisanej w artykule koncepcji układu zasilania opartego na CSJ uwarunkowana jest upowszechnieniem innowacyjnych technologii elektroenergetycznych i informatycznych, obejmując m.in. takie aspekty jak: skoordynowane aktywne sterowanie (obszarowe) zamiast dotychczas stosowanej koncepcji odrębnego sterowania w ramach każdego pola zasilającego; zastosowania układów energoelektronicznych wspomagających pracę sieci; sieci teleinformatyczne o znacznym stopniu rozproszenia i wysokich parametrach technicznych; interpretacja danych w oparciu o metody tzw. sztucznej inteligencji – np. metodę systemów wieloagentowych. Proponowa-

ne rozwiązanie może stanowić istotny środek poprawy jakości zasilania m in. w zakresie: prewencji zapadów napięcia, kompensacji mocy biernej i eliminacji wyższych harmonicznych a, przy uwzględnieniu lokalnego źródła GR, także w zakresie poprawy ciągłości zasilania. Uzyskane wyniki badań pokazują znaczną skuteczność takich rozwiązań jak kondycjoner DSTATCOM oraz DVR w zakresie prewencji zapadów napięcia, deficytów mocy biernej i elimina-

cji harmonicznych. Zagadnienia techniczne w opisywanym zakresie są dość dobrze rozpoznane i stopniowo realizowane (por. np. [4]). Główną przeszkodę w upowszechnieniu tego typu rozwiązań stanowią ich wysokie koszty. Skłoniło to autora do zamieszczenia kilku uwag odnoszących się do zagadnień ekonomicznych dotyczących inwestycji zapewniających poprawę jakości zasilania (np. układy FACTS).

## LITERATURA

- [1] Baghini A., Bua F.: Investment Analysis for PQ Solutions. Power Quality Applications Guide, May 2007, <http://www.cda.org.uk>.
- [2] Bollen M., Gu I.: Signal Processing of Power Quality Disturbances, John Wiley & Sons, 2006.
- [3] EMTDC: Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation – User’s Guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada, 2003.
- [4] Ghosh A., Ledwich G.: Compensation of Distribution System Voltage using DVR, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002, pp. 1030-1036.
- [5] Milanovic J., Zhang Y.: Global Minimization of Financial Losses Due to Voltage Sags with FACTS Based Devices, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 1, January 2010, pp. 298-306.
- [6] Nara K., Omi H., Mishima Y.: Optimal configuration of new power delivery system for customized Power supply services, Proceedings of 14th PSCC, Session 19, paper 5, Sevilla 2002.
- [7] Rehtanz C. (Editor): Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power system Control and Operation, Baden, Schweiz, Springer Verlag, 2003.
- [8] Rumatowski K., Królikowski A., Kasiński A.: Optymalizacja układów sterowania, WNT, Warszawa, 1984.
- [9] Skorek J., Kalina J.: Gazowe układy kogeneracyjne, WNT, Warszawa, 2005.
- [10] Witek B.: Nowoczesne struktury zasilania odbiorców energii elektrycznej na wymaganym poziomie jakości, Energetyka, nr 10/2007, s. 712-718.
- [11] Witek B.: Rynkowo zorientowane, elastyczne układy zasilania oparte na centrach sterowania jakością energii elektrycznej, Rynek Energii, Nr 2(87), 2010, s. 159-164.
- [12] Witek B.: Wybrane zagadnienia optymalizacyjne w układach elektroenergetycznych z generacją rozproszoną i elementami FACTS, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Nr 8/2010, s. 113-118.