



NOWOCZESNA KOMPENSACJA MOCY BIERNEJ I WYŻSZYCH HARMONICZNYCH Z WYKORZYSTANIEM KOMPENSATORÓW DYNAMICZNYCH STATCOM I EFA

Bogdan Bałkowski / C&T Elmech

Współczesne systemy energetyczne często borykają się z problematyką niskiej jakości energii oraz zbyt małej efektywności energetycznej, dla której jednym z istotnych zagadnień jest kompensacja wyższych harmonicznych oraz mocy biernej. Choć ten problem z punktu widzenia technicznego nie jest nowy, to jednak jego skala stale rośnie, czyniąc go coraz bardziej ważnym, a skutki złej jakości energii oraz niskiej efektywności energetycznej coraz bardziej dotkliwymi. Zbyt niska jakość energii i efektywności energetycznej nie jest przy tym jedynie problemem krajowym. Problem ten ma wręcz charakter globalny, do którego rządy wielu krajów, w tym UE, odnoszą się bardzo poważnie. W Polsce efektywność energetyczna gospodarki jest jednak aż dwa razy niższa od średniej europejskiej. W tym świetle szczególnego znaczenia nabiera ustawa promująca i wspierająca uzyskanie oszczędności w końcowym wykorzystaniu energii¹. Ta ustawa, która ma wejść w życie z początkiem roku 2011, jest wypełnieniem postanowień dyrektywy 2006/32/WE Parlamentu i Rady Europejskiej, a jej zasadniczym celem jest uzyskanie 9% oszczędności energii do roku 2016. Tak więc do problematyki jakości energii dołącza również problematyka efektywności wykorzystania energii. W tak zmieniającym się otoczeniu gospodarczym (przy wzroście cen energii) firma C&T Elmech proponuje kompleksowe spojrzenie na zagadnienia kompensacji wyższych harmonicznych i mocy biernej oraz adekwatne do tego nowe rozwiązania.

W tym kontekście warto porównać możliwości techniczne urządzeń filtracyjnych i kompensacyjnych, konwencjonalnych pochodzących z pierwszej połowy XX stulecia oraz nowych, zapoczątkowanych na przełomie XX i XXI wieku z wykorzystaniem postępów energoelektroniki, aczkolwiek już wielokrotnie sprawdzonych w przemyśle. Ograniczymy się przy tym tylko do rozwiązań na niskie i średnie napięcie, czyli skierowanych do przemysłowego odbiorcy, spośród których do rozwiązań klasycznych zaliczamy, w szczególności, baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej oraz filtry pasywne do selektywnej kompensacji wyższych harmonicznych.

Baterie kondensatorów można podzielić ze względu na sposób przyłączenia do systemu energetycznego:

- za pomocą łączników mechanicznych – styczników
- za pomocą łączników statycznych – tyrystorów.

Pierwsza bateria kondensatorów z łącznikami mechanicznymi została zastosowana w 1914 roku, zaś pierwsze rozwiązania statyczne pojawiły się dopiero w roku 1971. W obu tych rozwiązaniach łączniki służą do przyłączenia w sposób ON/OFF baterii kondensatorów, zwanych stopniami kompensacji. Z tego względu taka kompensacja ma charakter schodkowy, a jej precyzja jest zależna od wartości stopnia kompensacji. Tak więc od rodzaju zastosowanego łącznika, jak i wielkości stopnia kompensacji, zależy większość cech użytkowych tego typu rozwiązań.

Układy z łącznikami mechanicznymi można stosować do systemów energetycznych z wolnozmiennym obciążeniem, przy czym przy załączaniu poszczególnych stopni występują zazwyczaj znaczne udary prądowe i niesymetrie chwilowe. Te zjawiska są też najczęściej rejestrowane w układach zabezpieczeń rozdzielnic. Z tych powodów oraz uwzględniając możliwość osiągnięcia większej dynamiki przełączania baterii kondensatorów, znacznie korzystniejsze jest zastosowanie układów z łącznikami tyrystorowymi i nowoczesnymi sterownikami procesorowymi. Te układy, pozbawione wad związanych z łącznikami mechanicznymi, są też najczęściej stosowane do nadążnej kompensacji mocy biernej. Mają jednak swoje własne ograniczenia wynikające choćby ze

1 Z projektem ustawy wraz z uzasadnieniem można zapoznać się na stronie <http://bip.mg.gov.pl/node/11629>.

Streszczenie

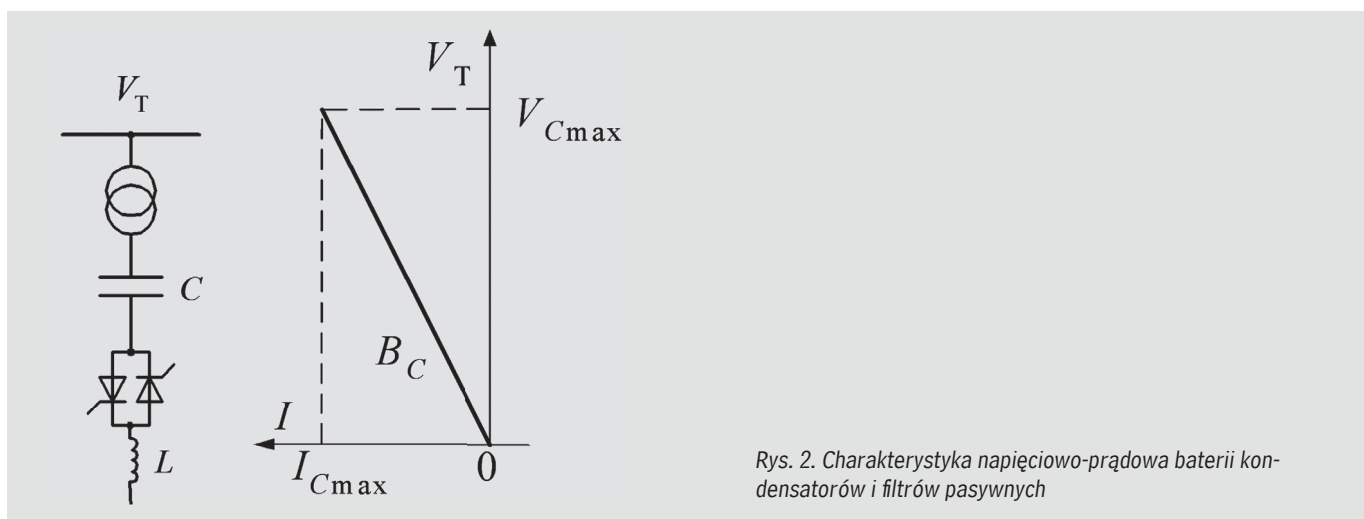
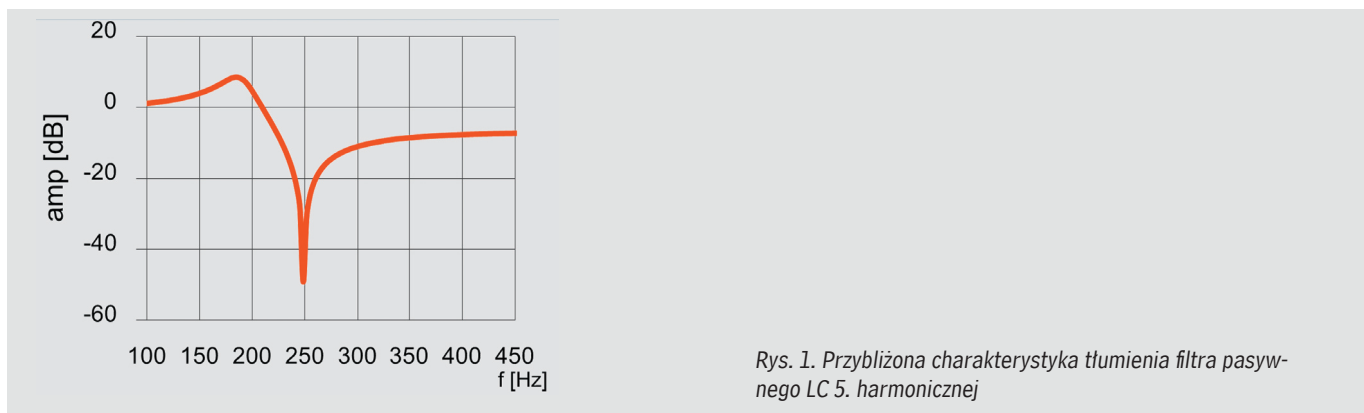
W niniejszym artykule poruszone jest zagadnienie kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznych, przy zastosowaniu klasycznych układów opartych na bateriach kondensatorów i nowoczesnych energoelektronicznych, dynamicznych układów typu STATCOM i EFA. Autor, po-

równując ich wady i zalety, jednoznacznie opowiada się za nowoczesnymi, dynamicznymi rozwiązaniami, wskazując ich przewagę i przydatność w staraniach o poprawę jakości i efektywności wykorzystania energii elektrycznej.

względnie niskiego napięcia przebicia półprzewodników. W związku z tym przyłączane są bezpośrednio do sieci energetycznej o napięciu zazwyczaj nie wyższym niż 690 V lub za pośrednictwem transformatora dopasowującego do sieci o wyższych napięciach. Dostępne są już również rozwiązania bezpośrednio przyłączane do systemów energetycznych o napięciu do 17 kV, ale ich ceny stanowią poważną ekonomiczną barierę. Baterie kondensatorów są wrażliwe na harmoniczne napięcia występujące w sieci energetycznej, w związku z tym zabezpiecza się je dławikami, odstrajając od niepożądanych częstotliwości. Można również tę cechę wykorzystać do zestrojenia z wybraną częstotliwością harmoniczną w celu jej kompensowania.

Filtry pasywne LC są układami niesterowanymi, załączanymi przez operatora, o budowie zbieżnej do baterii kondensatorów z łącznikami mechanicznymi. Ponadto te filtry są na ogół jednostopniowe i na stałe włączone bezpośrednio do systemu energetycznego. Dobór ich elementów L i C wynika przy tym z wymaganej mocy i częstotliwości kompensowanej harmonicznej. Filtry LC cechuje również zdolność kompensacji mocy biernej, ponieważ dla harmonicznej podstawowej (50 Hz) filtr jest „widziany” przez sieć jako pojemność. Gdy wymagana jest filtracja kilku harmonicznych jednocześnie, instalowanych jest kilka filtrów pasywnych LC, każdy dostrojony do innej wymaganej częstotliwości rezonansowej (filtracji).

Jak widać z powyższego opisu, baterie kondensatorów oraz filtry pasywne bazują na tych samych elementach L i C. W związku z tym mają również wiele wspólnych cech, zarówno wad, jak i zalet.



Analizując charakterystykę przedstawioną na rys. 2 oraz właściwości pasywnych układów kompensacyjnych i filtrujących opartych na elementach LC, można wyciągnąć następujące wnioski:

- Moc układu kompensacji jest zależna od kwadratu wahań napięcia sieci energetycznej². W związku z tym przykładowa zmiana napięcia o 10% spowoduje 21-proc. zmianę mocy biernej nieregulowanej baterii kompensacyjnej. To może też spowodować przekompensowanie obciążenia, powodując dalszy wzrost

² Wielkość mocy generowanej przez baterię kondensatorów jest wyrażona wzorem $Q = U^2 \omega C$.

- napięcia w punkcie przyłączenia układu kompensacji do sieci energetycznej. Ten mechanizm, przy zastosowaniu nieregulowanej baterii kompensacyjnej lub kompensatora o zbyt małej dynamice, może doprowadzić do niestabilności sieci energetycznej, w tym do powstania niekontrolowanego rezonansu
- Wzrost napięcia w sieci energetycznej powoduje wzrost prądu baterii kondensatorów kompensacyjnych, co w skrajnych przypadkach, w szczególności w obecności odkształceń napięcia sieci, może doprowadzić do ich przeciążenia
 - Charakterystyka filtra pasywnego przedstawiona na rys. 1 wskazuje, że dla częstotliwości wyższych od częstotliwości rezonansowej (tłumionej) filtr pasywny LC zachowuje zdolności tłumienia, natomiast dla częstotliwości niższych filtr ten jest „widziany” przez sieć jako pojemność, co może wzmacniać niestabilność sieci w tym zakresie częstotliwości
 - Układy filtrów pasywnych wyższych harmonicznych są na ogół projektowane na wybrane częstotliwości harmoniczne, charakterystyczne dla danego odbioru. Analizując rys. 3, widzimy jednakże, że widmo harmonicznych może być zmienne przy zachowaniu niemal stałej wartości THD. Stwarza to dodatkowe utrudnienie w prawidłowym doborze elementów pasywnych układów kompensacji. Jest to również częstym powodem zaniżania szacunków dla wymaganej mocy i ilości kompensowanych harmonicznych i jest jedną z przyczyn nieskutecznego działania filtracyjnego oraz przegrzewania się układów pasywnych. Z podobnych względów niewskazane jest także zastosowanie prostych filtrów pasywnych w przypadku możliwości wystąpienia znaczących składowych interharmonicznych
 - Włączenie na stałe filtrów pasywnych przy zmienności obciążenia prowadzi do nielubianego przez energetykę przekompensowania, co z kolei, jak już wspomniano, stwarza warunki do wystąpienia rezonansów.

Ponadto, w klasycznych układach kompensacji, ze względów technicznych i bezpieczeństwa, rzadko występuje możliwość osiągnięcia wyższego współczynnika mocy niż $tg\phi = 0,3$. Jest to ok. 10% energii, za którą płacimy, a nie wykorzystujemy jej użytecznie, ponieważ jest to energia bierna. Obecnie, w świetle obowiązujących przepisów, nie ma takiego wymogu. Warto jednak zwrócić uwagę na nowe przepisy o efektywności energetycznej, które stwarzają korzystne warunki do działań związanych z dalszym zmniejszaniem współczynnika $tg\phi$.



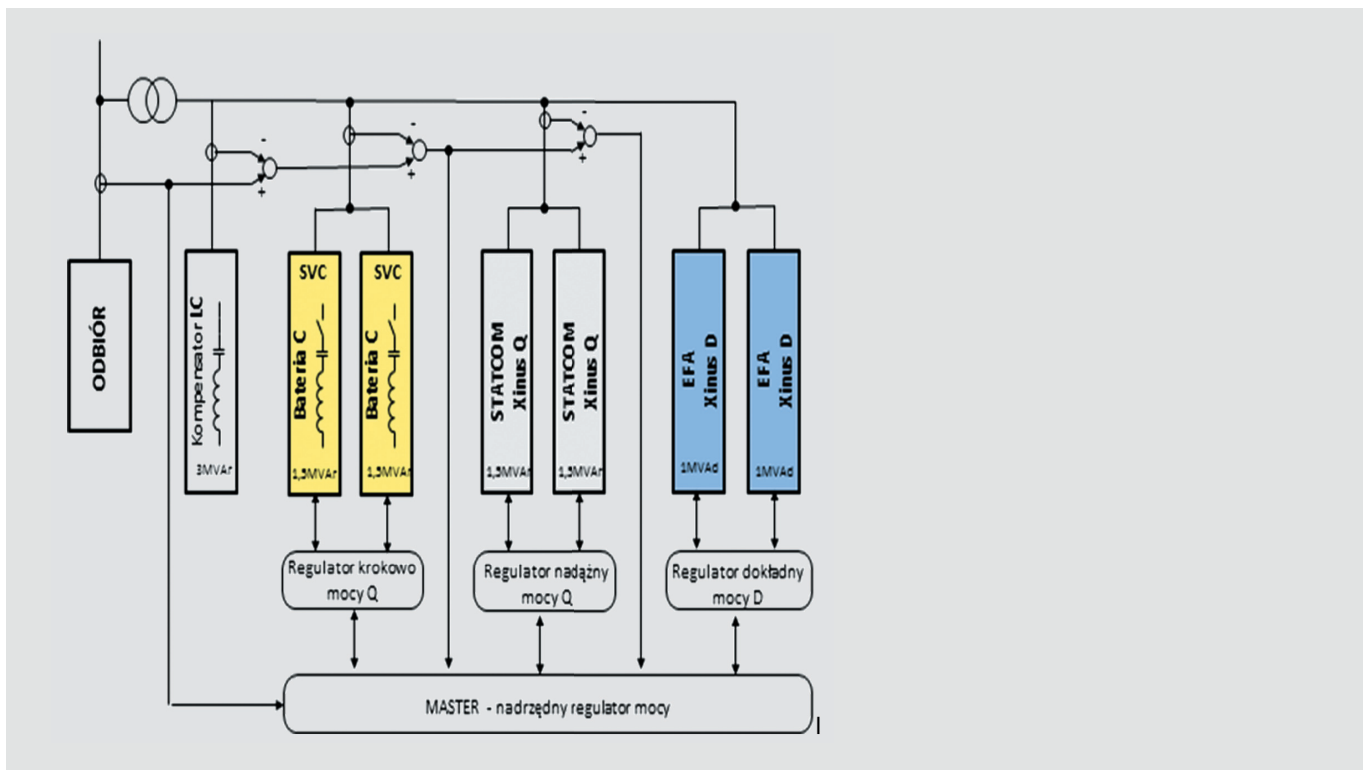
Rys. 3. Rysunek obrazuje przykładową zmienność widma WH napięcia, zależną od kąta wysterowania 6-pulsowego przekształtnika tyrystorowego

Czy należy rozumieć, że przedstawiona krytyka klasycznych układów kompensacji zmierza do ich wyeliminowania?

Ależ wcale nie. Zdaniem autora należy połączyć klasyczne układy kompensacyjno-filtrujące oraz układy aktywne w rozwiązania hybrydowe, łącząc przy tym najlepsze cechy obu rozwiązań, tj. eliminując ich wady i eksponując zalety. Rozwiązania hybrydowe, pozwalające na istotną poprawę jakości energii i jej efektywniejsze wykorzystanie, cechuje jednocześnie optymalna relacja ceny instalowanego rozwiązania do osiąganego efektu.

Na rys. 4 przedstawiona jest koncepcja połączenia w jednym układzie kompensacji zalet wynikających z niskiej ceny kompensatorów LC i SVC, skompensowania ich wad i dalszego wzbogacenia o zalety kompensatorów dynamicznych STATCOM (STATic COMPensator) i EFA (Energetyczny Filtr Aktywny), w tym w szczególności odpowiednio układów typu Xinus Q i Xinus D, produkowanych przez firmę C&T Elmech.

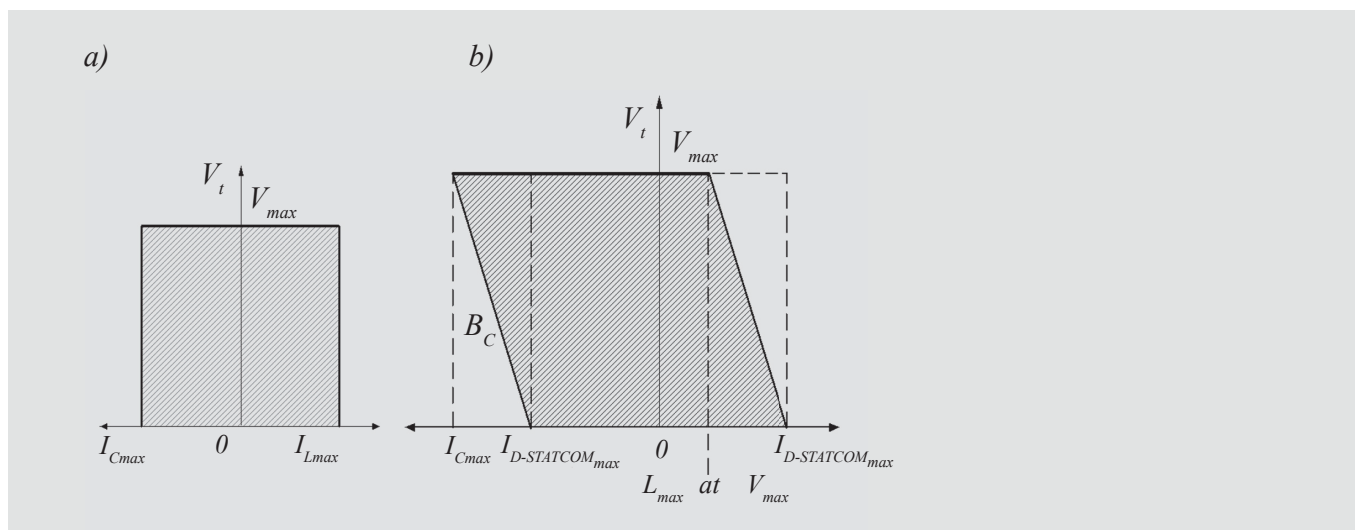
W omawianej koncepcji zastosowano kompensator LC na stałe przyłączony do sieci energetycznej, który w chwilach braku obciążenia jest kompensowany przez STATCOM, pozwalający na generację mocy biernej indukcyjnej i pojemnościowej oraz symetryzację obciążenia. Nadążna bateria kondensatorów SVC jest skwantyfikowanym źródłem mocy biernej pojemnościowej, która pozwala na zgrubną regulację mocy biernej, natomiast układ STATCOM zapewnia płynność regulacji oraz wysoką dynamikę układu kompensacji w zakresie jednego stopnia regulacji kompensatora SVC.



Rys. 4. Koncepcja układu kompensacji wykorzystującego klasyczne układy kompensacji z dynamicznymi typu Xinus Q i Xinus D

Współpraca powyższych trzech elementów układu kompensacji pozwala na konfigurację w pełni regulowanego źródła mocy biernej o optymalnym koszcie, wysokiej dynamice, szybkości działania, płynności i odporności na stany przejściowe występujące w sieci energetycznej i z możliwością dokładnej filtracji harmonicznego prądu odbioru.

Na rys. 5a przedstawiono charakterystykę wyjściową typowego układu STATCOM. Widać z niej, że generowany prąd kompensujący jest zupełnie odporny na wahania napięcia, a generowana moc bierna jest w pełni kontrolowana. To spostrzeżenie przyda nam się w analizie uproszczonej charakterystyki układu hybrydowego (rys. 5b). Jak widać, proponowana konfiguracja nabrała cech zarówno układów klasycznych, jak i aktywnych. Kompensator hybrydowy, nie tracąc zdolności do autokorekty generacji mocy biernej, umożliwia generację tej mocy o wartości maksymalnej dwukrotnie większej niż sam układ STATCOM.



Rys. 5. a) Porównanie charakterystyk IU samego STATCOM oraz b) w konfiguracji z klasycznymi układami typu SVC i kompensatora LC

Kolejnym elementem systemu kompensacji jest energetyczny filtr aktywny względnie niedużej mocy typu Xinus D. Ten filtr umożliwia dokładną i dynamiczną filtrację (kompensacji) wyższych harmonicznych prądu odbioru, niezależnie od jego składu widmowego oraz parametrów zasilającej sieci energetycznej. Filtr aktywny Xinus D może przy tym wspomagać działanie układu STATCOM, tj. dodatkowo kompensować moc bierną oraz symetryzować obciążenie w zakresie swojego zapasu mocy.

Zastosowania proponowanego rozwiązania hybrydowego to przede wszystkim:

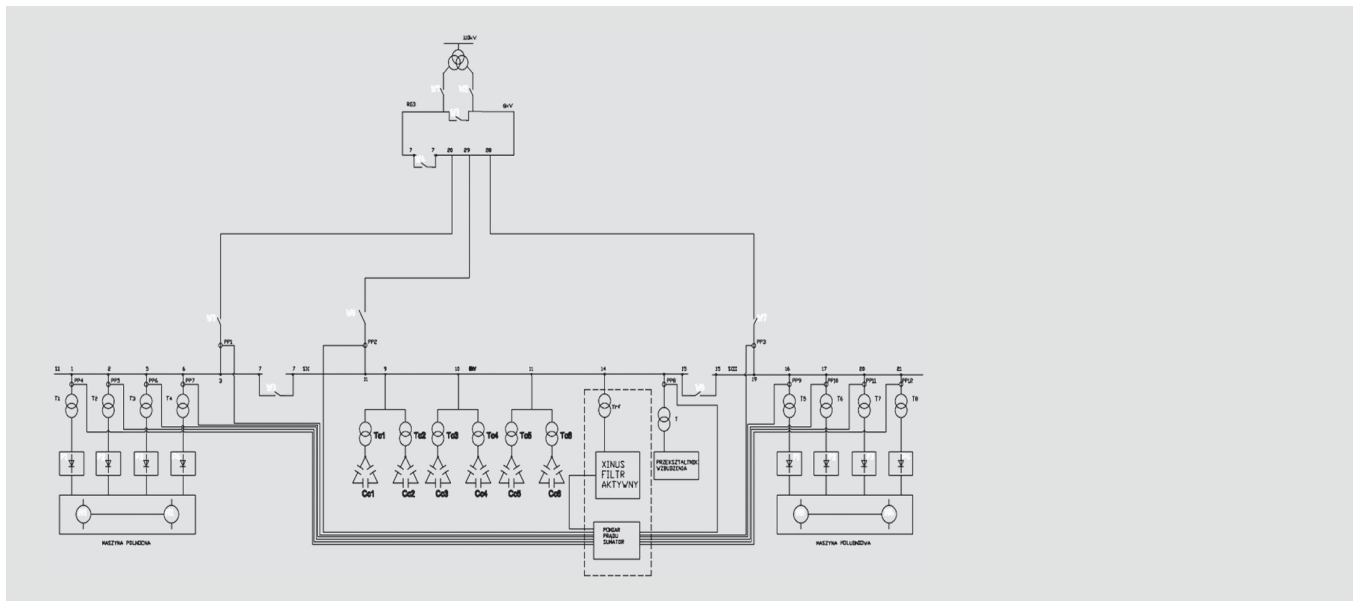
- Poprawa jakości energii, w tym zagwarantowanie systemowi energetycznemu wysokiego współczynnika mocy
- Efektywna stabilizacja napięcia, w tym redukcja zjawiska migotania (flickera)
- Symetryzacja obciążenia oraz aktywna kompensacja wyższych harmonicznych
- Poprawa efektywności energetycznej linii dystrybucyjnych (rozdzielczych)
- Poprawa zdolności przesyłowej systemu, w tym poprawa stabilności systemu energetycznego (tłumienie oscylacji).

Tab. 1. Porównanie podstawowych cech układu klasycznego i hybrydowego

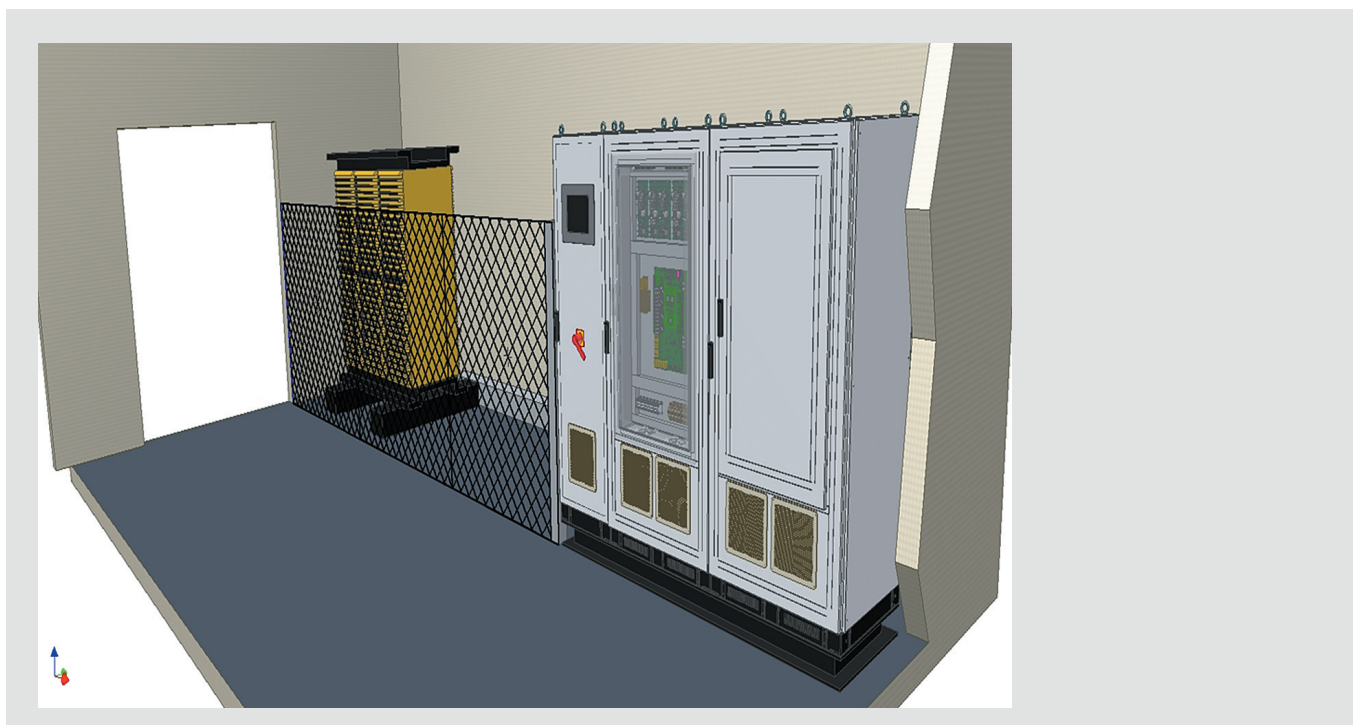
Cecha	klasyczny	hybrydowy
Czas reakcji układu na wahania mocy biernej	20 ÷ 200 ms	0,25 ÷ 0,5 ms
Odporność na wahania napięcia w sieci	brak	pełna
Reakcja na zaburzenia	możliwość wystąpienia rezonansu	pełna odporność
Zdolność do generowania mocy poj. i ind.	pojemnościowa	pojemnościowa i indukcyjna
Filtracja harmonicznych	ograniczona, selektywna	pełna przy zmieniającym się widmie
Symetryzacja obciążenia	brak	pełna
Redukcja flickera (migotania)	słaba	skuteczna

Omawiana koncepcja nie jest jedynie czysto teoretyczną dyskusją na temat istniejących możliwości. Wszak nie pracuje jeszcze w Polsce system o takiej konfiguracji, ale warto spojrzeć na realizowany obecnie przez firmę C&T Elmech układ kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznych na głównej maszynie wyciągowej w kopalni KWK Ziemowit. C&T Elmech jako jedyna firma w Polsce wykonała kompensację bardzo niespokojnego

odbioru, jakim jest układ napędowy maszyny wyciągowej. Zebrane doświadczenia posłużą jej w realizacji układu kompensacji w kolejnej maszynie. Tym razem inżynierowie C&T Elmech zamierzają doprowadzić do współdziałania klasycznego układu nadążnej kompensacji typu SVC z zaletami energetycznego filtra aktywnego typu Xinus D. Wykorzystanie wysokiej dynamiki filtra aktywnego i zdolności do kompensacji mocy biernej do celów dokompensowania układu jest właśnie przykładem częściowej realizacji omawianej koncepcji. Rys. 6 przedstawia schemat ideowy realizowanego projektu³, a rys. 7 w przedstawia wizualizację nowo projektowanego filtra aktywnego o mocy 2 MVAd.



Rys. 6. Układ zasilania maszyn wyciągowych północnej i południowej wraz z układem kompensacji. Łączna moc odbiorów $S_{max} = 19 \text{ MVA}$, $S_{sr} = 11 \text{ MVA}$, nadążna bateria kondensatorów o mocy $Q_{bat} = 6 \text{ MVAr}$ (stopień 1 MVAR), energetyczny filtr aktywny Xinus D o mocy $D = 2 \text{ MVAd}$



Rys. 7. Wizualizacja filtra aktywnego o mocy 2 MVAd wraz z transformatorem dopasowującym 6 kV/1,1 kV

3 Elektroinfo: nr 12/2007 – Filtry aktywne Xinus; nr 9/2010 (87) – Kompensacja mocy biernej i wyższych harmonicznym prądów w sieciach SN z wykorzystaniem układów hybrydowych opartych na nowych rozwiązaniach filtrów aktywnych XINUS.

Będzie to pierwsza tego typu realizacja w Polsce i wszyscy z zainteresowaniem będziemy czekać na wyniki tego projektu. Na rys. 8 przedstawiono połowę pracującego układu kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznych firmy C&T Elmech, zastosowanego na maszynie wyciągowej S 1.2 w kopalni węgla kamiennego LW Bogdanka.



Rys. 8. Widok pracującego układu filtra aktywnego Xinus D-IMVAd i baterii kondensatorów o mocy 1 MVar