

Kompleksowe podejście do kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznych z wykorzystaniem kompensatorów dynamicznych STATCOM i EFA typu Xinus

W powszechnym rozumieniu, gospodarka mocą bierną jest odrębnym zagadnieniem od problematyki jakości i efektywności energetycznej. Przedstawione w niniejszym artykule rozwiązanie hybrydowego układu kompensacji, wykorzystującego klasyczne rozwiązania we współpracy z układami dynamicznymi, nie tylko wskazuje na możliwość ich wzajemnego uzupełniania się, ale też stwarza jakościowo nowe możliwości kompleksowego podejścia do zagadnień kompensacji w skali instalacji, a nawet zakładu. Korzyścią takich rozwiązań jest elastyczne gospodarowanie mocą układu kompensacji w celu eliminacji czynników pogarszających jakość energii oraz w celu zwiększenia efektywności gospodarowania energią elektryczną, co przekłada się na korzyści finansowe zakładu.

1. WSTĘP

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 stają się coraz bardziej dotkliwymi. Zbyt niska jakość energii i efektywność energetyczna 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 świetle tego, szczególnego znaczenia nabiera ustawa promująca i wspierająca uzyskanie oszczędności energii [1] na polu końcowego wykorzystania energii. Ta ustawa, która została uchwalona przez sejm 4 marca 2011 r., jest wypełnieniem postanowień dyrektywy 2006/32/WE Parlamentu i Rady Europejskiej, a jej zasadniczym celem jest uzyskanie 9% oszczędności energii do

roku 2016. Zmienia ona w zasadniczy sposób dotychczasowe podejście do rozliczania zakładu przemysłowego z utrzymania parametrów jakościowych energii w punkcie przyłączeniowym zakładu, stwarzając korzystne warunki do budowy zintegrowanego, centralnego systemu zarządzanego mocą bierną i parametrów jakościowych energii poprzez oddziaływanie na poziomie poszczególnych instalacji i większych odbiorów. Takie podejście do zarządzania z poziomu centralnego pracą poszczególnych układów kompensacji staje się o wiele łatwiejsze i efektywniejsze przez wprowadzenie, obok rozwiązań klasycznych, omawianych poniżej układów dynamicznych. Zagadnienia to jest o tyle interesujące, że pozwala ono na 10%-12% obniżenie zużycia energii w skali zakładu przez modernizację istniejących już w zakładzie instalacji kompensacji mocy biernej. Nakłady finansowe na ten cel będzie można refinansować (w myśl działania ustawy przez uzyskanie praw do emisji białych certyfikatów). W myśl ustawy (art. 17 punkt 5), ograniczenie przepływu mocy biernej i strat w sieciach przesyłowych i transformatorach jest zaliczane do kluczowych obszarów działań proefektywnościowych. Ważne jest również, że koszty związane z taką modernizacją mogą się zwrócić w czasie od ¾ do 1½ roku, a korzyści mierzone są w skali co najmniej 10 lat.

2. KOMPLEKSOWA KOMPENSACJA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH I MOCY BIERNEJ

W zmieniającym się otoczeniu gospodarczym, przy wzroście cen energii należy kompleksowo spojrzeć na zagadnienia kompensacji wyższych harmonicznym i mocy biernej, oraz przyjąć adekwatne do tego nowe rozwiązania.

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

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

- a) za pomocą łączników mechanicznych – styczników,
- b) za pomocą łączników statycznych – tyrystorów.

Pierwsza bateria kondensatorów z łącznikami mechanicznymi została zastosowana w 1914 r. za pierwsze rozwiązania statyczne pojawiły się dopiero w 1971 r. 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 wielkość cech użytkowych tego typu rozwiązań.

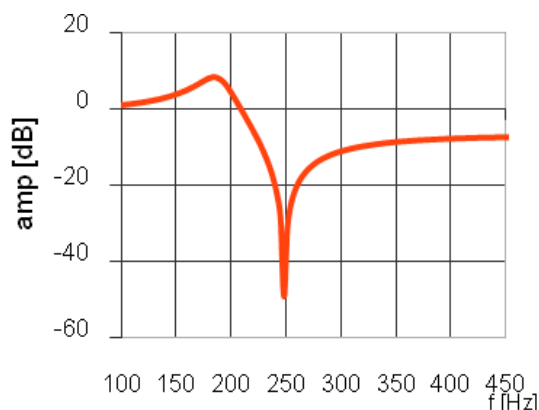
Układy z łącznikami mechanicznymi można stosować do systemów energetycznych z wolnozmiennym obciążeniem, przy czym przy załączaniu poszczególnych stopni występują zazwyczaj znaczne udary prądowe oraz niesymetrie chwilowe. Te zjawiska są też najczęściej rejestrowane w układach zabezpieczeń rozdzielnic. 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 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. Są również już dostępne 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.

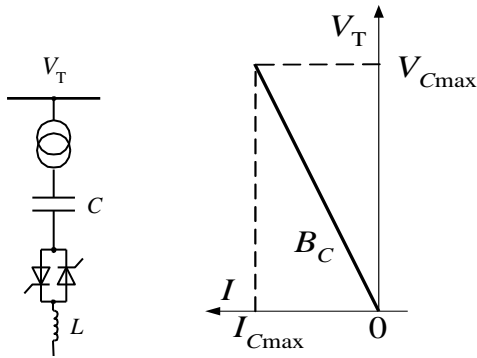
Filtry pasywne LC są układami niesterowanymi załączanymi przez operatora, o budowie zbieżnej do baterii kondensatorów z łącznikami mechanicznymi. Ponadto, filtry te są na ogół jednostopniowe i na stałe włączone bezpośrednio do systemu energetycznego. Dobór ich elementów L i C wynika przy tym z wymaganej mocy i częstotliwości kompensowanej harmonicznym (Rys. 1). Filtry LC cechuje również zdolność kompensacji mocy biernej, ponieważ dla harmonicznym podstawowej (50 Hz) filtr jest „widziany” przez sieć jako pojemność. W przypadku, gdy wymagana jest filtracja kilku harmonicznym jednocześnie, jest instalowanych 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 rysunku 2 oraz właściwości pasywnych układów kompensacyjnych i filtrujących opartych na elementach LC, można wyciągnąć następujące wnioski:



Rys. 1. Przybliżona charakterystyka tłumienia filtra pasywnego LC 5 harmonicznym

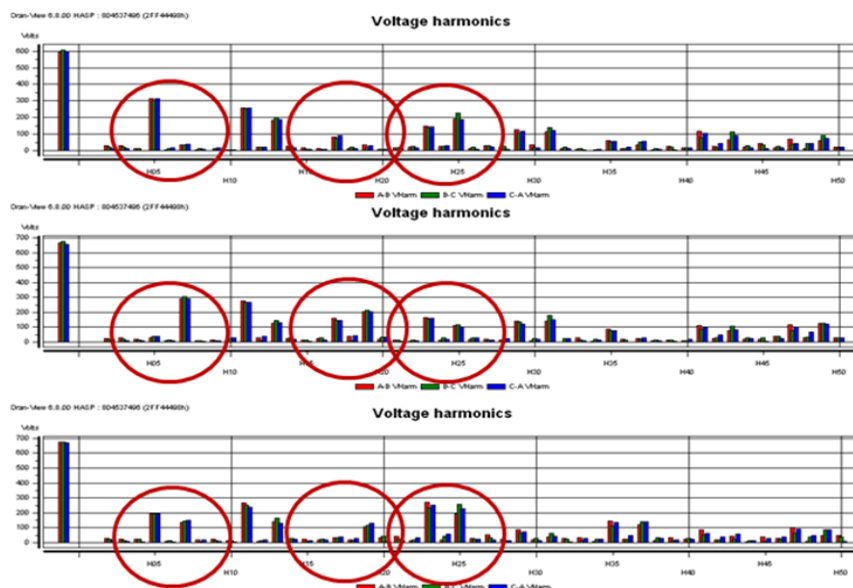


Rys. 2. Charakterystyka napięciowo prądowa baterii kondensatorów i filtrów pasywnych

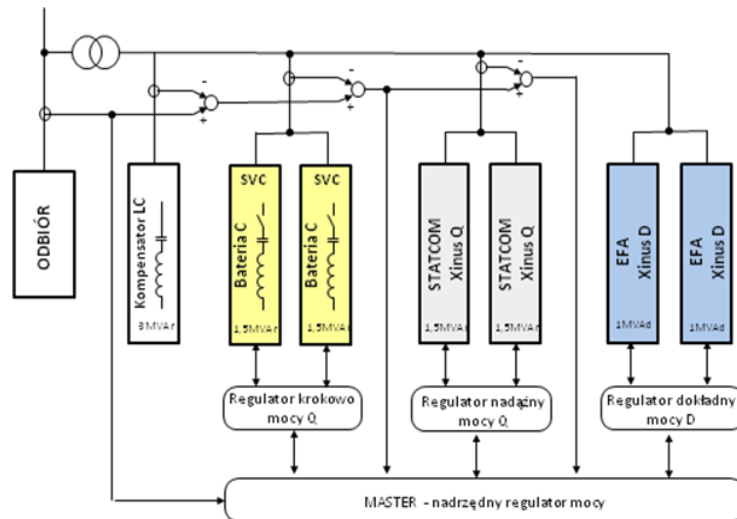
- Moc układu kompensacji jest zależna od kwadratu wahań napięcia (wielkość mocy generowanej przez baterię kondensatorów jest wyrażona wzorem $Q=U^2 \omega C$) sieci energetycznej. W związku z tym przykładowa zmiana napięcia o 10% spowoduje 21% zmianę mocy biernej nieregulowanej baterii kompensacyjnej. To może też spowodować przekompensowanie obciążenia, powodując dalszy wzrost napięcia w punkcie przyłączenia układu kompensacji do sieci energetycznej. Ten mechanizm w przypadku zastosowania 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 filtru pasywnego przedstawiona na rysunku 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 rysunek 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 zanizania 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 nieubieganego przez energetykę przekompensowania, co z kolei, jak już wspomniano, stwarza warunki dla wystąpienia rezonansów.

Ponadto, w klasycznych układach kompensacji, ze względów technicznych i bezpieczeństwa, rzadko występuje możliwość osiągnięcia wyższego współczynnika mocy niż $\text{tg } \varphi = 0,3$. Jest to ok. 10% energii, za którą należy zapłacić, a nie jest wykorzystywana użytecznie, ponieważ jest to energia bierna. Praktycznie, w chwili



Rys. 3. Przykładowa zmienność widma WH napięcia zależna od kąta wysterowania 6-pulsowego przekształtnika tyrystorowego



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

obecnej nie ma takiego wymogu w świetle obowiązujących przepisów. Warto jednak zwrócić uwagę na nowe przepisy o efektywności energetycznej, które stwarzają korzystne warunki dla działań związanych z dalszym zmniejszaniem współczynnika $\text{tg } \varphi$.

Przedstawiona powyżej krytyka klasycznych układów kompensacji nie zmierza, zdaniem autora, do ich wyeliminowania. Należy bowiem 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.

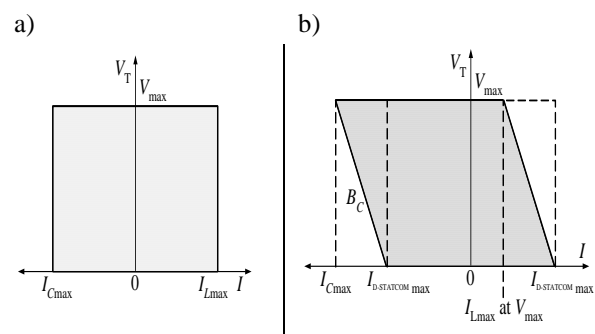
Na rysunku 4 przedstawiono koncepcję połączenia w jednym układzie kompensacji zalet wynikających z niskiej ceny kompensatorów LC i SVC, skompensowania ich wad i dalszego wzbogacenia o zalety kompensatorów dynamicznych STATCOM (STATIC COMPensator) i EFA (Energetyczny Filtr Aktywny), w tym, w szczególności odpowiednio układów typu Xinus Q i Xinus D.

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.

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 rysunku 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 jest ważne z punktu widzenia analizy 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.

Kolejnym elementem systemu kompensacji jest energetyczny filtr aktywny względnie niedużej mocy typu Xinus D. Ten filtr umożliwia dokładną i dyna-



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

Tabela 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 flicker'a (migotania)	słaba	skuteczna

miczną 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 (flicker'a),
- 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).

Porównanie podstawowych cech układu klasycznego i hybrydowego zestawiono w tabeli 1.

3. PODSUMOWANIE

Korzyści, jakie można odnieść przez zastosowanie hybrydowych rozwiązań i kompleksowe podejście do zagadnienia jakości energii, w tym kompensacji mocy biernej, w przeciwieństwie do odrębnego rozwiązywania każdego z tych problemów, wydają się oczywiste. Poprawa parametrów zasilania, poprawa jakości energii przy obniżeniu jej zużycia, współfinansowanie modernizacji przez uzyskanie świadectw efektywności energetycznej zwanych białymi certyfikatami wydają się być wystarczającymi zachętami do zastosowania nowoczesnych rozwiązań rodem z XXI wieku.

Literatura

1. Projekt ustawy o efektywności energetycznej <http://bip.mg.gov.pl/node/11629>.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

COMPLEX APPROACH TO THE REACTIVE POWER COMPENSATION AND HIGHER HARMONICS WITH THE USE OF DYNAMIC COMPENSATORS STATCOM AND XINUS-TYPE EFA

According to the common understanding, the reactive power management is separated from the issue of energy quality and efficiency. The article presents a hybrid compensation system which makes use of traditional solutions co-operating with dynamic systems. These two kinds of systems are mutually supportive and create new possibilities of a complex approach to compensation issues for a single installation or a plant. Such solutions are profitable as they enable flexible management of a compensation system power with the purpose to eliminate the factors which impair the quality of energy and to raise the efficiency of electrical energy management. These improvements bring financial profits to the plant.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ КОМПЕНСАТОРОВ STATCOM И EFA ТИПА XINUS

Обычно считается, что управление реактивной мощностью является отдельным от проблематики качества и энергетической эффективности вопросом. Представленное в настоящей статье решение гибридной схемы компенсации, использующее классические решения при совместной работе с динамическими схемами, не только указывает на возможность их взаимного дополнения, но также создает качественно новые возможности комплексного подхода к вопросам компенсации в масштабе установки, а даже предприятия. Достоинством таких решений является эластичное управление мощностью схемы компенсации с целью исключения факторов, ухудшающих качество энергии, а также повышения эффективности управления электрической энергией, что отражается в финансовых результатах предприятия.