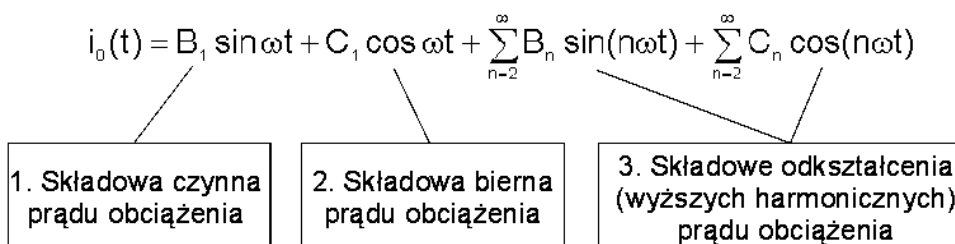


## Dobór i rodzaje urządzeń do kompensacji mocy biernej

### 1. Wprowadzenie

W rzeczywistych, zawierających źródła wyższych harmonicznych układach zasilająco-rozdzielczych prąd odbiorników można, według teorii Harashima, określić zależnością [7]:

$$i_0(t) = B_1 \sin \omega t + C_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\omega t)$$

 The diagram shows the equation above with three boxes below it. Lines connect the terms of the equation to the boxes:
 

- A line from  $B_1 \sin \omega t$  points to the first box: "1. Składowa czynna prądu obciążenia".
- A line from  $C_1 \cos \omega t$  points to the second box: "2. Składowa bierna prądu obciążenia".
- Lines from the two summation terms  $\sum_{n=2}^{\infty} B_n \sin(n\omega t)$  and  $\sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\omega t)$  point to the third box: "3. Składowe odkształcenia (wyższych harmonicznych) prądu obciążenia".

Do podstawowych wymagań stawianych nowoczesnym urządzeniom do kompensacji mocy biernej (kompensatorom) należy likwidacja lub maksymalne ograniczenie trzech ostatnich członów powyższej formuły, oznaczonych w opisie numerami 2 i 3.

Dynamiczny rozwój energoelektroniki i związane z tym szerokie stosowanie w przemyśle nieliniowych przekształtników (stacje prostownikowe trakcji elektrycznej, regulowane napędy elektryczne, technika grzewcza) wiąże się z generowaniem w sieci wyższych harmonicznych. Do innych odbiorników nieliniowych, generujących wyższe harmoniczne należy zaliczyć przede wszystkim:

- piece łukowe,
- zgrzewarki,
- spawarki.

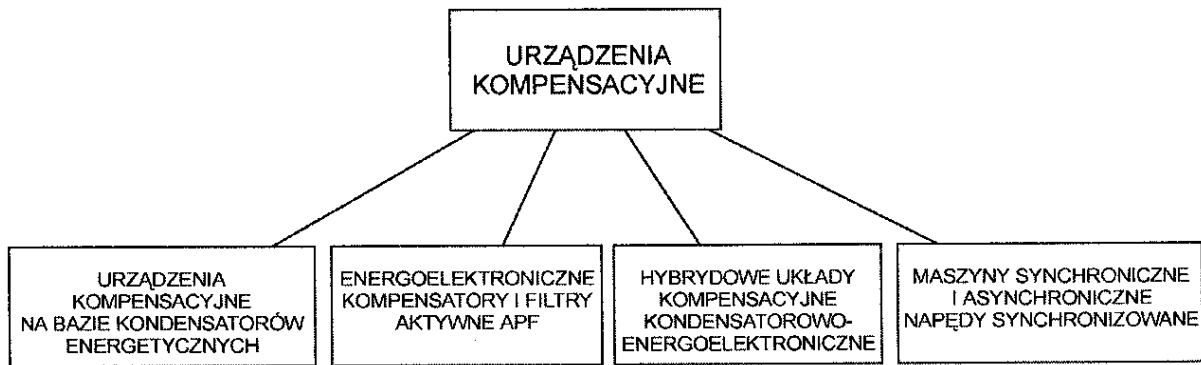
W tych przypadkach, oprócz przesyłu mocy czynnej i biernej, mamy do czynienia z przesyłaniem mocy odkształcenia przebiegów sinusoidalnych. Przesyłanie zarówno mocy biernej, jak i mocy odkształcenia wywołuje szereg ujemnych skutków, charakterystycznych dla przesyłania dużych mocy pozornych.

Postęp w technologii produkcji kondensatorów, aparatów łączeniowych, urządzeń łagodzących nieustalone stany towarzyszące procesom łączeniowym, a przede wszystkim wspomniany wcześniej postęp w zakresie energoelektroniki pozwalają na realizację urządzeń do bardzo skutecznej kompensacji mocy biernej w sensie określonym powyższym wzorem. Prócz likwidacji opłat za energię bierną (najczęściej podstawowego kryterium doboru), ograniczenia strat energii, zwiększenia przepustowości sieci zasilającej, nowoczesne urządzenia kompensacyjne mają znaczący wpływ na takie parametry jakościowe energii, jak:

- odchylenia napięcia,
- wahania napięcia,
- współczynnik niesinusoidalności prądów i napięć,
- współczynnik asymetrii prądów i napięć w układach trójfazowych (kompensatory z symetryzacją obciążenia).

## 2. Maszyny i urządzenia do kompensacji mocy biernej

Aktualnie stosowane urządzenia kompensacyjne można podzielić generalnie w następujący sposób:



Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje energoelektronicznych filtrów aktywnych APF:

- aktywne filtry równoległe,
- aktywne filtry szeregowe.

Filtry APF równoległe pozwalają na nadążną:

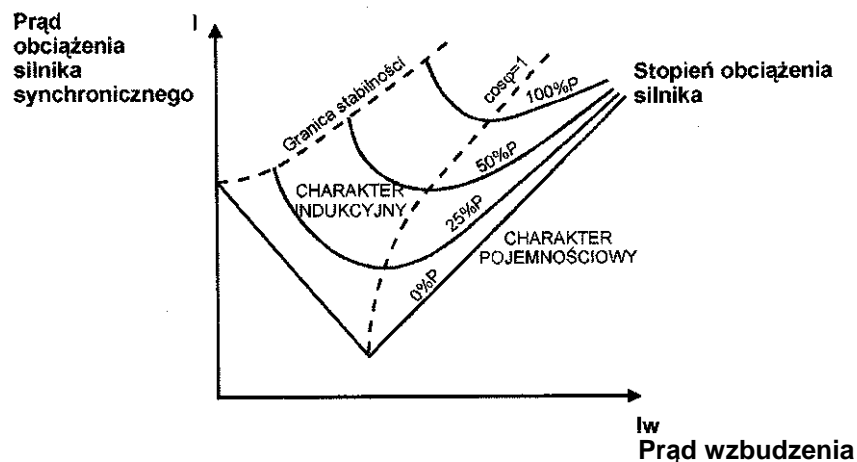
- likwidację składowej biernej prądu odbiorników,
- likwidację wyższych harmonicznych prądu (w wysokim stopniu),
- symetryzację obciążenia.

Dzięki aktywnym filtrom szeregowym możemy uzyskać nadążną:

- filtrację wyższych harmonicznych napięcia,
- symetryzację napięcia,
- kompensację reaktancji indukcyjnej układu zasilającego.

Podstawową wadą filtrów aktywnych jest ich cena. Znaczne obniżenie kosztów przy dużej skuteczności kompensacji mocy biernej i filtracji wyższych harmonicznych uzyskuje się w układach hybrydowych. Stanowią one połączenie filtrów aktywnych oraz kompensatorów LC (filtrów pasywnych) na bazie kondensatorów energetycznych.

W przypadku maszyn synchronicznych i asynchronicznych maszyn synchronizowanych wykorzystuje się zjawisko oddawania mocy biernej pojemnościowej przy odpowiednio wysokiej wartości prądu wzbudzenia (przewzbudzeniu maszyny synchronicznej). Możliwości wykorzystania silnika synchronicznego charakteryzują tzw. krzywe V, przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Krzywe V silnika synchronicznego

Należy zwrócić uwagę na fakt, że pozyskiwanie energii biernej przy wykorzystywaniu napędów synchronicznych wiąże się ze stosunkowo wysokimi stratami mocy czynnej. straty te mogą osiągać poziom 80kW na 1MVar mocy biernej pojemnościowej [6].

Jednakże w tych przypadkach, gdzie takie maszyny są zainstalowane, należy wykorzystywać je do kompensacji mocy biernej. Jeżeli maszyna synchroniczna wyposażona jest we wzbudnicę tyrystorową, można dzięki elektronicznym układom regulacji uzyskać efekt kompensacji nadążnej.

Z uwagi na obszerność poruszanych zagadnień, w niniejszym opracowaniu omówiono przede wszystkim urządzenia kompensacyjne realizowane na bazie kondensatorów elektroenergetycznych.

### 3. Kompensatory z kondensatorami energetycznymi. Klasyfikacja baterii kondensatorów.

Najbardziej rozpowszechnioną grupą kompensatorów, ze względu na liczne zalety (i pomimo wad) są kompensatory oparte na kondensatorach energetycznych, jako źródle energii biernej pojemnościowej (baterie kondensatorów).

Klasyfikacja kompensatorów kondensatorowych może być dokonywana w oparciu o wiele kryteriów [4].

Z punktu widzenia napięcia znamionowego, baterie kondensatorów dzielimy na:

- baterie niskich napięć – do 1kV,
- baterie średnich napięć – do 30kV,
- baterie wysokich napięć – do 110kV,
- baterie najwyższych napięć – powyżej 110kV.



Bateria KM o napięciu znamionowym  $U_{CN} = 400V$   
ELMA energia



Bateria kondensatorów BSDR średnich napięć 6,3kV. Produkcja firmy ELMA energia w Hucie Głogów S.A.



Bateria wysokich napięć 35MVar/42kV. Realizacja firmy ELMA energia w Hucie Ostrowiec S.A.  
Fot. 1. Przykładowe rozwiązania baterii kondensatorów niskich, średnich i wysokich napięć

Baterie kondensatorów mogą być wykonywane jako:

- jednofazowe,
- trójfazowe.

Z jednofazową kompensacją mocy biernej mamy do czynienia m.in. w przypadku takich odbiorów, jak zgrzewarki, stacje prostownikowe trakcji elektrycznej, niedokompensowane obwody oświetlenia przy użyciu lamp wyładowczych, itp.



Jednofazowy filtr 3-ciej harmonicznej o napięciu znamionowym 6,6kV do kompensacji mocy biernej stacji prostownikowej. Producent: ELMA energia. Eksport do Australii



Jednofazowy kompensator nadążny 400V do zgrzewarek punktowych i liniowych. Produkcja ELMA energia (eksport do Indii)

Fot. 2. Jednofazowe baterie kondensatorów

Uwzględniając warunki środowiskowe (miejsce zainstalowania), baterie kondensatorów można generalnie podzielić na instalacje w wykonaniu [5]:

- wewnętrznym,
- napowietrznym,
- wewnętrzo-napowietrznym,
- do specjalnych warunków środowiskowych (np. do podziemi kopalń, do montażu na statkach, do pomieszczeń zapyłonych, itp.).

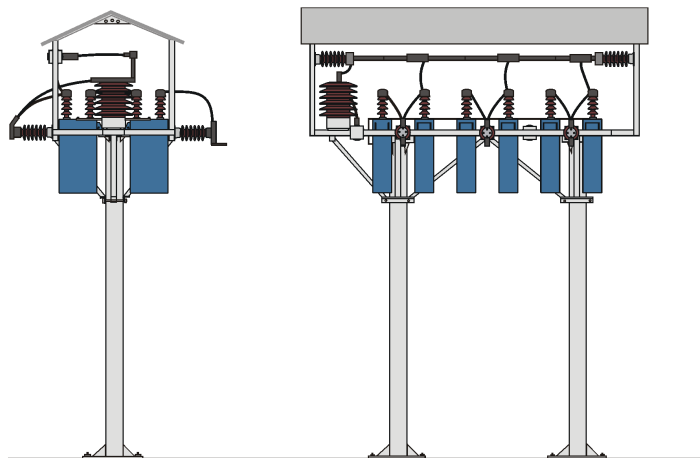
O wyborze rozwiązań napowietrznych lub wewnętrzo-napowietrznych (np. człony kondensatorowe są w wykonaniu napowietrznym, pola regulacyjne w wykonaniu wewnętrznym) często decyduje brak miejsca w istniejących rozdzielniach zakładów przemysłowych, które podjęły decyzję o zainstalowaniu lub rozbudowie układów kompensacji mocy biernej.



Fot. 3. Napowietrzna, następowa bateria kondensatorów 15kV (ELMA energia)



Fot. 4. Automatycznie regulowana bateria BSCR-3 6,3kV dopuszczona do podziemi kopalń. Produkcja ELMA energia



Fot. 5. Napowietrzna bateria 33kV z osłoną przeciwsłoneczną. Produkcja ELMA energia. Eksport do Sudanu 2002r.



Fot. 6. Automatycznie regulowana bateria 525V do podziemi kopalń.  
Produkcja ELMA energia i INOVA

Istotnym elementem decydującym o wyborze rodzaju baterii kondensatorów jest obecność w sieci wyższych harmonicznych prądu i napięcia oraz możliwość wystąpienia zjawisk rezonansowych w obwodzie: pojemność baterii kondensatorów – indukcyjność układu zasilająco-rozdzielczego.

W przypadku braku wyższych harmonicznych oraz gdy analizy wykluczają wystąpienie rezonansu, instaluje się baterie kondensatorów bez dławików. W przeciwnym razie należy włączyć szeregowe dławiki rezonansowe. Wśród baterii z dławikami możemy wyodrębnić:

- filtry odstrojone (baterie z dławikami rezonansowymi chroniącymi przed zjawiskami rezonansowymi),
- pasywne filtry wyższych harmonicznych.

Indukcyjność dławika szeregowego wraz z pojemnością baterii kondensatorów tworzą obwód rezonansowy o częstotliwości rezonansowej własnej  $f_{rw}$ . Dla częstotliwości mniejszych od  $f_{rw}$ , w tym dla częstotliwości podstawowej 50Hz, filtr posiada charakter pojemnościowy (kompensuje moc bierną indukcyjną). Dla częstotliwości powyżej wartości  $f_{rw}$ , obwód dławik-kondensatory posiada charakter indukcyjny, uniemożliwiając dla tych częstotliwości wystąpienie rezonansu w obwodzie bateria – sieć.

W filtrach odstrojonych parametry LC dobierane są tak, aby częstotliwość rezonansowa własna  $f_{rw}$  baterii przyjmowała wartość poniżej częstotliwości odpowiadającej najniższemu rzędowi zarejestrowanych w sieci wyższych harmonicznych. Przykładowo, jeżeli w sieci zarejestrowano harmoniczne: 5h, 7h, 11h, 13h... parametry L i C filtra dobierane są tak, aby uzyskać częstotliwość rezonansową w przedziale od 174Hz do 210Hz (najczęściej 189Hz).

O wyborze konkretnej wartości częstotliwości rezonansowej decyduje wiele czynników, takich jak:

- wartość skuteczna prądów wyższych harmonicznych,
- proporcje reaktancji sieci i reaktancji baterii dla rozpatrywanych harmonicznych (wykluczenie możliwości przeciążenia kondensatorów),
- napięcie znamionowe kondensatorów,
- oczekiwania odnośnie stopnia filtracji danej harmonicznej.

Filtry odstrojone stosuje się najczęściej w automatycznie regulowanych bateriach wieloczęstotliwościowych. W pasywnych filtrach wyższych harmonicznych, częstotliwość rezonansowa własna  $f_{rw}$  zbliżona jest,

maksymalnie z dokładnością na jaką pozwala tolerancja zastosowanych parametrów LC, do częstotliwości filtrowanej wyższej harmonicznej (np. dla 5-tej harmonicznej  $f_{rw} = 250\text{Hz}$ ).

Najczęściej układ kompensacyjno-filtracyjny składa się z kilku filtrów pasywnych. W przypadku, gdy wyższe harmoniczne generowane są przez prostownik 6-cio pulsowy, układ kompensacji może obejmować filtry 5h, 7h, 11h, 13h.



Automatycznie regulowana bateria KMD720R 400V (prod. ELMA energia) z dławikami (filtry odstrojone)  $f_r = 189\text{Hz}$ .  
Eksport do Holandii



Filtry odstrojone średnich napięć 6,3kV ( $f_r = 189\text{Hz}$ ) instalacji kompensacyjnej w Hucie Miedzi Głogów S.A. (realizacja ELMA energia)



Automatycznie regulowane filtry 3-ciej harmonicznej wysokiego napięcia (42kV – 2x35MVar) pieca łukowego w Hucie Ostrowiec S.A. Realizacja „pod klucz” ELMA energia [2]

Fot. 7. Baterie kondensatorów z szeregowymi dławikami rezonansowymi

Istotnym problemem z punktu widzenia skuteczności kompensacji jest dostosowanie mocy urządzeń kompensacyjnych do chwilowego zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową w danym węzle sieci zasilająco-rozdzielczej. Z tego punktu widzenia możemy wyodrębnić baterie:

- włączone do sieci na stałe (bez możliwości regulacji),
- regulowane ręcznie,
- regulowane automatycznie.

Należy podkreślić fakt, że pierwsze dwa z powyższych rozwiązań spotykane są obecnie coraz rzadziej.

W nowoczesnych bateriach automatycznie regulowanych do sterowania ich pracą wykorzystuje się mikroprocesorowe sterowniki, pełniące wiele funkcji (np. pomiary, zabezpieczenia, alarmy) i współpracujące z łącznikami stykowymi lub bezstykowymi.

O wyborze konkretnego urządzenia decyduje dynamika zmian obciążenia.

Według powyższego kryterium urządzenia kompensacyjne można podzielić na:

- przeznaczone dla obciążeń wolnozmiennych (z czasem reakcji 1 minuta dla baterii nn i 5 minut dla baterii SN i WN),
- przeznaczone do obciążeń o średnim poziomie dynamiki zmian obciążenia (czasy reakcji układu kompensacyjnego 1...3sek.) – kompensacja quasi-nadążna,
- przeznaczone do obciążeń szybkozmiennych (czas reakcji kompensatorów poniżej 40ms) – kompensacja nadążna.



Fot. 8. Automatycznie regulowana bateria kondensatorów ACR 6,3kV z systemem regulacji, blokad, pomiarów, rejestracji zdarzeń i zabezpieczeń członów ELMA NETSYSTEM. Produkcja ELMA energia.

W pierwszym przypadku, odpowiadającym większości zakładów przemysłowych i praktycznie wszystkim przypadkom kompensacji w sieciach dystrybutorów energii elektrycznej, mikroprocesorowy regulator dobiera właściwą ilość członów baterii i wysyła sygnały napięciowe do łączników stykowych (styczniki, wyłączniki) wytypowanych członów baterii. Jest to więc regulacja skokowa z określoną mocą stopnia regulacji. Ze względu na konieczność łagodzenia stanów nieustalonych, towarzyszących łączeniu pojemności, w bateriach kondensatorów stosuje się następujące aparaty:

- dla kompensatorów nn – styczniki powietrzne z rezystancjami wstępnego zwierania styków głównych,
- dla kompensatorów SN – styczniki i wyłączniki próżniowe lub z izolacją SF6,
- dla kompensatorów WN – wyłączniki próżniowe lub z izolacją SF6.

Ponadto, standardowym wyposażeniem baterii SN i WN ze stykowymi aparatami łączeniowymi są ograniczniki przepięć i cewki ograniczające prąd załączania (stosowane w bateriach bez dławików rezonansowych).

Dla baterii kondensatorów SN i WN, firma ELMA energia produkuje unikalny system zabezpieczeń i regulacji ELMA NETSYSTEM, na który składa się jednostka centralna, pełniąca funkcje regulacyjne, pomiarowe, nadzorcze nad blokadami i zabezpieczeniami członów baterii oraz zabezpieczenia (nadprądowe, zero-prądowe) poszczególnych członów.

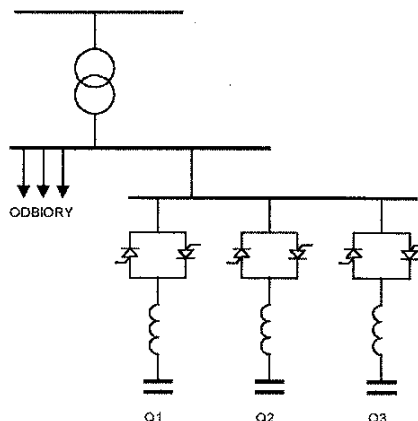
W kompensatorach quasi-nadążnych (czas reakcji układu kompensacyjnego od 1 do 3 sekund) właściwy efekt uzyskuje się najczęściej poprzez wprowadzenie do baterii z łącznikami stykowymi układów szybkiego rozładowania baterii kondensatorów. W bateriach nn są to najczęściej dodatkowo rezystory dołączane do zacisków kondensatora w momencie odłączenia członu baterii. W bateriach SN i WN efekt szybkiego rozładowania uzyskuje się poprzez zainstalowanie na zaciskach kondensatorów (na stałe) przekładników napięciowych.

Do takich odbiorów jak zgrzewarki, piece łukowe, maszyny wyciągowe kopalń, należy stosować kompensatory nadążne [1]. W tym przypadku uproszczona klasyfikacja będzie obejmowała;

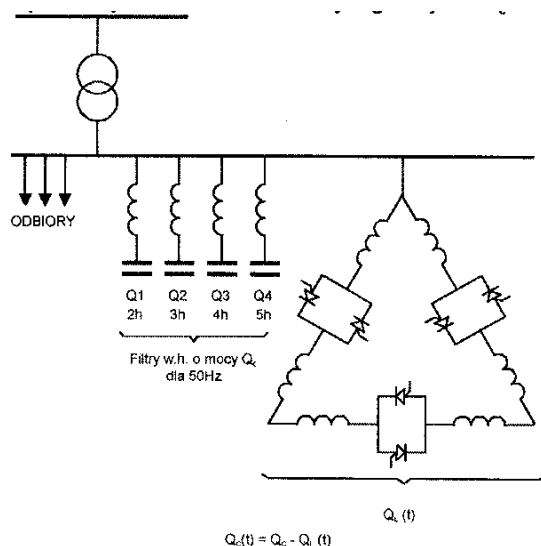
- jedno- lub wieloczłonowe kompensatory z regulacją skokową (TSC),
- systemy regulacji bezstopniowej SVC.

W kompensatorach nadążnych stosowane są tylko i wyłącznie łączniki bezstykowe, najczęściej tyrystorowe. Takie rozwiązania nie tylko gwarantują dużą szybkość reakcji układu kompensacji, a ponadto, w przypadku układów TSC, uniknięcie stanów nieustalonych. Kompensatory TSC z regulacją skokową (rys. 2.) wyposażone są w określoną ilość członów załączanych łącznikami tyrystorowymi.

W systemach SVC (rys. 3) baterie kondensatorów, najczęściej w układzie filtrów wyższych harmonicznych, włączone są na stałe do sieci. Do wspólnych szyn dołączone są dławiki robocze, których moc  $Q_L$  jest równa mocy rzeczywistej pojemnościowej  $Q_C$  układu kompensacyjnego. Sterownik, poprzez regulację kąta zapłonu łączników tyrystorowych indukcyjności roboczej (w każdej fazie indywidualnie), płynnie reguluje moc indukcyjną pobieraną przez kompensator z sieci. Różnica mocy pojemnościowej baterii kondensatorów i indukcyjnej dławika roboczego ( $Q_C - Q_L$ ) odpowiada chwilowemu zapotrzebowaniu na moc bierną pojemnościową. Systemy SVC najczęściej stosowane są przy piecach łukowych.



Rys. 2. System TSC skokowej regulacji nadążnej



Rys. 3. System SVC kompensacji nadążnej



Fot. 9. Baterie KMT-3...D (z dławikami rezonansowymi) 400V w systemie TSC. Produkcja ELMA energia



## 4. Wybrane zagadnienia doboru urządzeń kompensacyjnych

### 4.1. Ocena zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową

Oszacowanie zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową jest podstawą do projektowania układów kompensacji mocy biernej. Przy czym, można przyjąć jedno z dwóch kryteriów:

- likwidacji lub minimalizacji opłat za energię bierną,
- minimalizacji obciążeniowych strat energii i spadków napięć.

W pierwszym przypadku, w znaczny sposób można ograniczyć nakłady inwestycyjne, poprzez minimalizację mocy zastosowanych kondensatorów oraz właściwy dobór stopnia regulacji baterii automatycznie regulowanych. Wykorzystując fakt, że liczniki energii są przyrządami całkującymi, uśredniającymi pomiar w czasie, moc urządzeń kompensacyjnych może być znacznie niższa, niż maksymalne zapotrzebowanie na moc bierną pojemnościową. „Niedobór” energii pojemnościowej w okresach najwyższych obciążeń może być kompensowany jej „nadprodukcją” przy spadkach obciążeń tak, aby w okresach rozliczeniowych została zagwarantowana wymagana przez dostawcę energii wartość współczynnika mocy  $\text{tg}\phi$ . Analiza doboru parametrów baterii przy uwzględnieniu tego kryterium musi uwzględniać takie elementy, jak:

- wymagana wartość nastawy  $\text{tg}\phi$  na regulatorze (wartość powinna być odpowiednio niższa od wymaganej przez dostawcę energii elektrycznej),
- czas i stopień regulacji (dla baterii o regulacji skokowej) układu kompensacyjnego,
- przebiegi czasowe obciążenia w określonych strefach rozliczeniowych doby.

Zwiększając nakłady inwestycyjne na urządzenia kompensacyjne (kryterium drugie) i instalując odpowiednio wyższe moce baterii, możemy ograniczać koszty eksploatacyjne (koszty strat energii) oraz uzyskiwać dodatkowe efekty ekonomiczne z tytułu zwiększenia przepustowości sieci (możliwość włączenia dodatkowych odbiorników). Często istotnym problemem jest utrzymanie właściwego poziomu napięcia zasilającego, umożliwiającego normalną pracę odbiorników.

Podstawą doboru mocy urządzeń kompensacyjnych w istniejących obiektach są pomiary z uwzględnieniem istniejących źródeł energii biernej pojemnościowej. Omawiane zagadnienie znacznie komplikuje się w przypadku obiektów projektowanych. Projektanci zmuszeni są do przyjmowania określonych wskaźników, np. stopnia obciążenia projektowanych stacji transformatorowych, współczynnika jednoczesności zasilania oraz tzw. naturalnej wartości  $\text{tg}\phi$  projektowanych odbiorników energii elektrycznej.

O wyborze kryterium i poziomie skompensowania mocy biernej indukcyjnej winien decydować rachunek ekonomiczny.

### 4.2. Wybór rodzaju kompensacji mocy biernej

Do podstawowych rodzajów kompensacji mocy biernej zaliczamy kompensację:

- centralną,
- grupową,
- indywidualną.

W praktycznych rozwiązaniach, najczęściej stosowana jest kompensacja centralna, grupowa lub mieszana. Zastosowanie wyłącznie kompensacji indywidualnej, ze względu na rozproszenie odbiorników, z reguły nie gwarantuje uzyskania zadowalających rezultatów (właściwego  $\text{tg}\phi$  dla kompensowanej sieci zasilająco-rozdzielczej). Z drugiej strony, instalowanie urządzeń kompensacyjnych na zaciskach poszczególnych odbiorników gwarantuje minimalizację strat energii oraz spadków napięć. Przy wyborze miejsca zainstalowania baterii kondensatorów należy przede wszystkim uwzględnić:

- koszty urządzeń kompensacyjnych,
- wymagania eksploatacyjne (np. właściwe poziomy napięć na zaciskach odbiorników).

### 4.3. Ocena zagrożenia zjawiskami rezonansowymi

Do analizy możliwości pracy baterii bez dławików rezonansowych w obecności wyższych harmonicznych niezbędna jest znajomość parametrów układu zasilająco-rozdzielczego oraz spektrum wyższych harmonicznych prądu (co najmniej do 25-tej). Spektrum to można określić drogą pomiarów lub analiz teoretycznych. W przypadku takich odbiorów, jak piece łukowe, spektrum wyższych

harmonicznych prądu stanowiące podstawę doboru parametrów urządzeń instalacji kompensacyjnej zawsze wyznaczane jest teoretycznie.

Występowanie w układzie zasilająco-rozdzielczym odbiorników nieliniowych i przekształtników tyrystorowych stanowiących generator wyższych harmonicznych prądu nie oznacza konieczności stosowania baterii kondensatorów z dławikami rezonansowymi (dławiki rezonansowe zwiększają koszt instalacji kompensacyjnej o ok. 30% - 60%). O możliwości zastosowania baterii kondensatorów bez dławików rezonansowych decyduje analiza możliwości wystąpienia zjawisk rezonansowych w obwodzie reakcyjna indukcyjna układu zasilającego-reakcyjna pojemnościowa baterii.

Podstawowym kryterium możliwości pracy baterii kondensatorów w obecności wyższych harmonicznych prądu jest sumaryczny prąd obciążenia baterii kondensatorów, który nie może przekroczyć wartości  $1,3I_{CN}$  (prądu znamionowego kondensatorów).

Analizę należy przeprowadzić dla wszystkich możliwych stopni regulacji baterii kondensatorów.

Dla przykładu, można przytoczyć wyniki analizy (w formie graficznej) dla projektowanych automatycznie regulowanych baterii kondensatorów. W jednym zakładzie przemysłowym zaprojektowano dwie grupowe automatycznie regulowane baterie kondensatorów dla dwóch sekcji zasilających z odrębnych transformatorów.

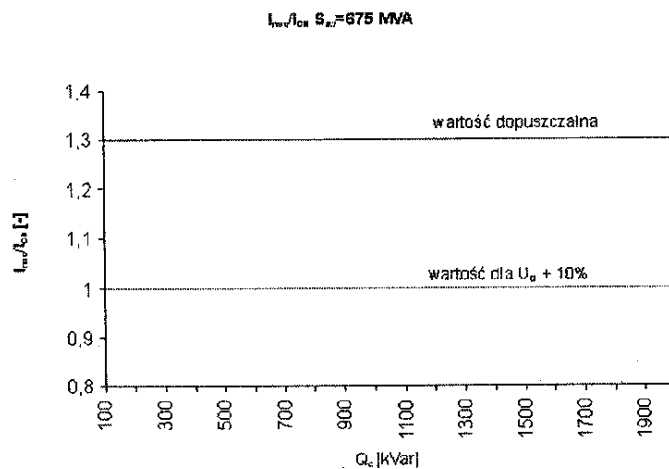
W obu sekcjach (I i II) pomiary wykazały obecność wyższych harmonicznych prądu (5-ta, 7-ma, 11-ta, 13-ta i wyższe). Wybrane wyniki analiz dla maksymalnej i minimalnej mocy zwarciowej oraz dla pracy transformatorów zasilających przy różnych odczepach regulacji napięcia przedstawiono na:

Rys. 4 – dla sekcji I układu zasilająco-rozdzielczego

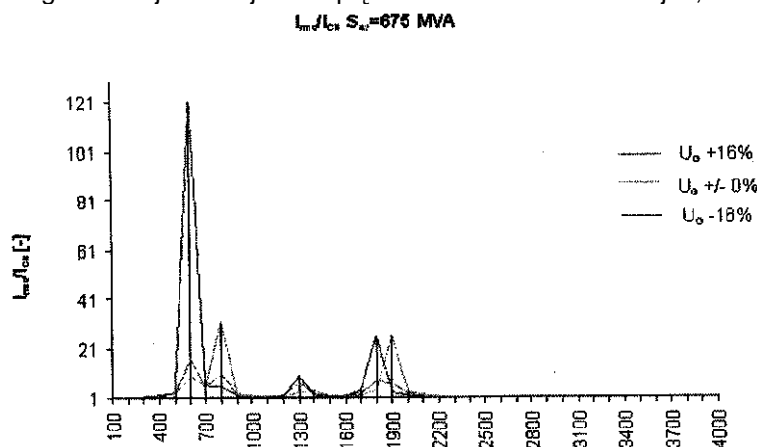
Rys. 5 – dla sekcji II układu zasilająco-rozdzielczego

Z analiz wynika, że w sekcji I można zastosować baterie kondensatorów bez dławików rezonansowych, zaś w sekcji II niezbędne są dławiki chroniące baterię przed zjawiskami rezonansowymi.

Ten układ kompensacji mocy biernej (w trakcie realizacji) wymaga zastosowania blokady uniemożliwiającej załączenie baterii sekcji I (bez dławików), gdy obie sekcje są zasilane z transformatora sekcji II, co może wystąpić w sytuacjach awaryjnych.



Rys. 4. Wpływ wyższych harmonicznych na wartość prądu baterii kondensatorów automatycznie regulowanej w sekcji I – napięcie znamionowe instalacji 6,3kV



Rys. 5. Wpływ wyższych harmonicznych na wartość prądu baterii kondensatorów automatycznie regulowanej w sekcji II – napięcie znamionowe instalacji 6,3kV

#### 4.4. Dobór urządzeń kompensacyjnych ze względu na dynamikę zmian obciążenia

O ile podjęcie decyzji odnośnie wyboru rozwiązań typowych dla obciążeń wolnozmiennych i nadążnych jest stosunkowo łatwe, tak szczególnych analiz wymaga wybór pomiędzy kompensacją quasi-nadążną a nadążną. Tym bardziej, że różnice w cenach tych urządzeń są bardzo duże. Przykładowo, analizy przeprowadzone w firmie ELMA energia wykazują, że dla kopalnianych maszyn wyciągowych pracujących w szybach o głębokości powyżej 400m można z dobrymi rezultatami stosować kompensację quasi-nadążną.

#### 4.5. Inne aspekty projektowania urządzeń kompensacyjnych

Przy projektowaniu urządzeń kompensacyjnych należy uwzględnić szereg innych czynników, takich jak:

- warunki klimatyczne (temperatura otoczenia, wilgotność, silne słoneczne promieniowanie ultrafioletowe niszczące izolację),
- wykonanie instalacji (napowietrzne, wewnętrzne) z uwzględnieniem warunków lokalowych,
- warunki zwarciove,
- bezpieczeństwo obsługi i systemy ochrony od porażeń,
- inne wymagania zleceniodawcy.

### 5. Rachunek ekonomiczny, jako podstawowe kryterium wyboru i doboru urządzeń kompensacyjnych

Optymalizacja kosztów produkcji i usług (w tym dystrybucji energii elektrycznej) niezbędna w gospodarce wolnorynkowej zmusza do pełnej analizy ekonomicznej każdego przedsięwzięcia, w tym również w zakresie kompensacji mocy biernej. W analizie tej, po stronie efektów należy uwzględnić takie elementy, jak:

- likwidacja lub ograniczenie opłat za energię bierną,
- ograniczenie strat energii czynnej,
- umożliwienie zainstalowania dodatkowych odbiorów bez wymiany kabli, transformatorów i aparatów w układzie zasilająco-rozdzielczym,
- efekty ekonomiczne z tytułu obniżenia poziomu zawartości wyższych harmonicznych,
- inne aspekty eksploatacyjne (np. podniesienie napięcia na zaciskach odbiorników) i umożliwienie pracy odbiorników energii elektrycznej w warunkach znamionowych.

Analiza nakładów winna obejmować:

- nakłady na prace studialne i wykonanie dokumentacji,
- nakłady na zakup urządzeń kompensacyjnych, ich montaż z pomiarami odbiorczymi i uruchomieniem,
- nakłady na atesty i dopuszczenia (jeżeli są wymagane),
- roczne koszty eksploatacji urządzeń kompensacyjnych:
  - własnych strat energii czynnej,
  - utrzymania urządzeń w ruchu i obsługi (przeglądy, naprawy).

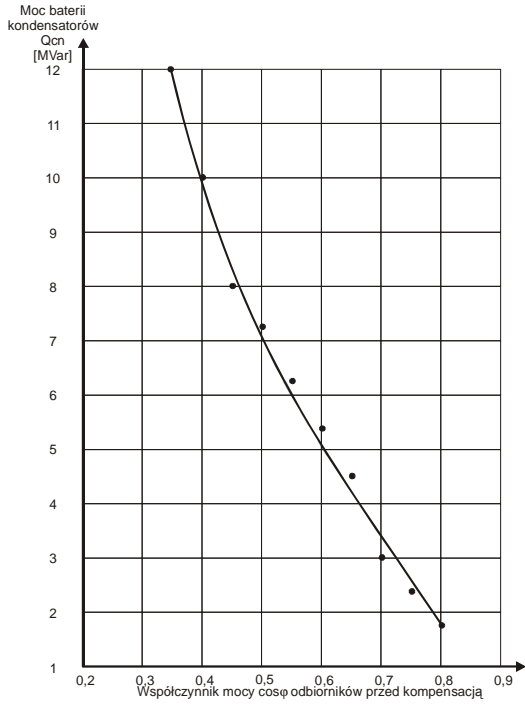
W analizie należy zwrócić uwagę na takie elementy, jak trwałość łączeniowa aparatury rozdzielczej, czy żywotność danego rodzaju kondensatorów.

### 6. Koszty automatycznie regulowanej kompensacji mocy biernej bateriami 6,3kV, dla obciążeń wolnozmiennych. Czas zwrotu nakładów na systemy kompensacji mocy biernej.

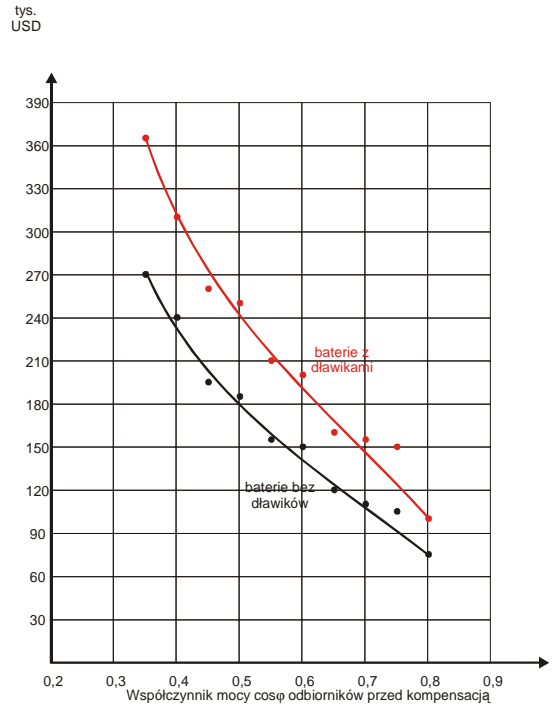
W celach poglądowych, wykonana została analiza techniczno-ekonomiczna dla grupy odbiorców o poborze mocy czynnej 5MW [1] oraz:

- zastosowaniu kryterium likwidacji opłat za energię bierną,
- rozliczeń według taryfy A23 (kopalnie),
- zastosowaniu baterii ACR (bez dławików) i ADR (z dławikami) produkcji ELMA energia,
- tzw. naturalna wartość  $\cos\phi$  przyjmuje wartości z przedziału od 0,35 do 0,8.

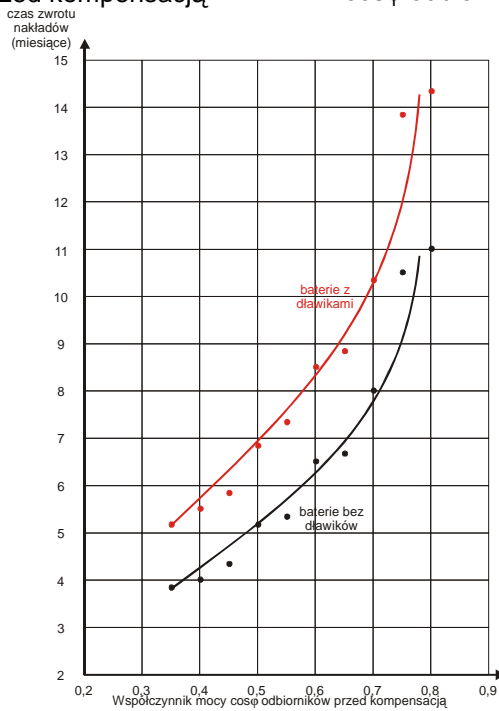
Wyniki analiz przedstawiono w formie graficznej na rys. 6, 7 i 8.



Rys.6. Moc baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej dla wymaganej wartości  $\text{tg}\phi=0,4$  w funkcji  $\text{cos}\phi$  odbiorników przed kompensacją



Rys. 7. Wymagane nakłady inwestycyjne na automatycznie regulowane baterie 6,3kV w funkcji  $\text{cos}\phi$  odbiorników przed kompensacją



Rys. 8 . Czas zwrotu nakładów finansowych na kompensację mocy biernej w funkcji  $\text{cos}\phi$  odbiorników przed kompensacją

## 7. Podsumowanie

W szerokiej gamie urządzeń kompensacyjnych możliwych do stosowania w praktyce, największe znaczenie odgrywają kompensatory oparte na kondensatorach energetycznych. Za ich stosowaniem przemawia wiele zalet, do których należy zaliczyć przede wszystkim stosunkowo niską cenę kondensatorów, małe straty własne mocy czynnej, prostą obsługę eksploatacyjną, długą żywotność, bogactwo rozwiązań technicznych czy prostą zasadę ich działania. W konkretnych, istniejących i projektowanych obiektach należy w bilansie zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową uwzględniać możliwości kompensacji przy wykorzystaniu maszyn synchronicznych. W szczególnych przypadkach, należy przewidzieć stosowanie do kompensacji mocy biernej układów energoelektronicznych. Przy wyborze konkretnego układu kompensacyjnego należy kierować się rachunkiem ekonomicznym, obejmującym okres zwrotu nakładów inwestycyjnych, który w przypadku kondensatorowych urządzeń kompensacyjnych jest bardzo krótki.

## 8. Literatura

- [1] K. Matyjasek: „Power quality for system reliability and efficiency”, Jakarta 2002
- [2] K. Matyjasek: „Najnowocześniejsze rozwiązania techniczne układów kompensacji mocy biernej”, WE nr 3/1999
- [3] K. Matyjasek: „Nadążne kompensacji mocy biernej zgrzewarek punktowych”, WE nr 5/1997
- [4] K. Matyjasek: „Wybrane problemy kompensacji mocy biernej w przemysłowych sieciach średnich napięć”, Damaszek 2002
- [5] K. Matyjasek, I. Tjahjadi: „Wybrane problemy kompensacji mocy biernej w górnictwie”, Jakarta 2003
- [6] E. Pacholski: „Kompensacja mocy biernej w przemysłowych sieciach zasilająco-rozdziałczych z napędami synchronicznymi na przykładzie KGHM Polska Miedź”, Rokosowo 2003
- [7] R. Strzelecki, H. Supronowicz: „Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000