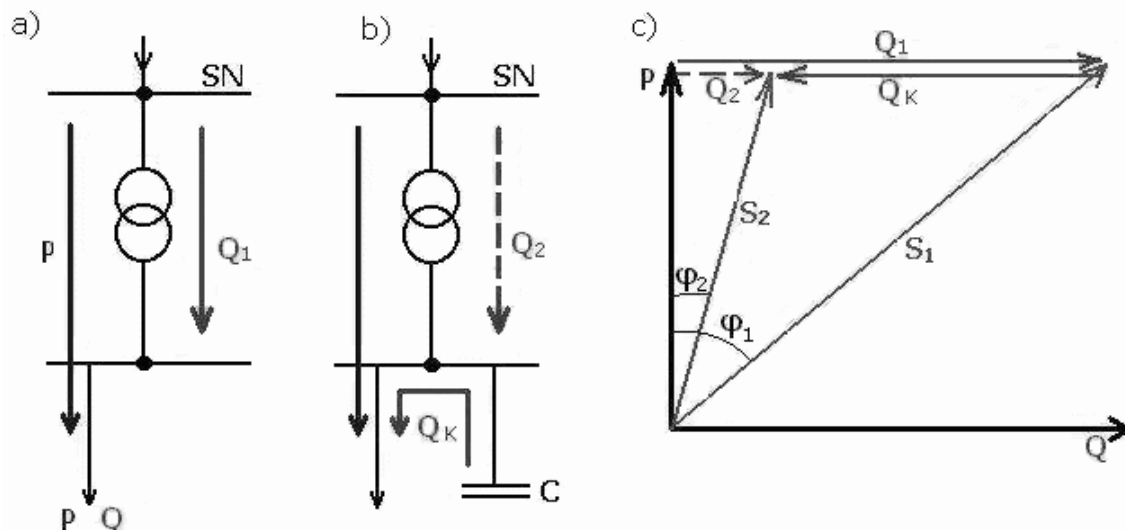


## WYBRANE ZAGADNIENIA KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ

### 1. INFORMACJE WSTĘPNE.

Jednym z podstawowych zadań przemysłowych służb elektroenergetycznych, jest właściwa gospodarka mocą i energią bierną rozumianą nie tylko jako zagadnienie poprawy współczynnika (kompensacji mocy biernej), ale uwzględniającą też aspekty jakości energii.

Kompensacja mocy biernej składowej podstawowej prądu (50Hz) polega na dołączeniu źródła energii biernej pojemnościowej w pobliżu odbiorników pobierających energię bierną indukcyjną, takich jak silniki asynchroniczne, transformatory itp. (rys.1)



**Rys. 1.** Kompensacja mocy biernej Q: a, b) szkice przedstawiające zasadę kompensacji; c) wykres wektorowy mocy Q, moc bierna przed kompensacją  $Q_2$  po kompensacji  $Q_K$  - moc bierna skompensowana, P - moc czynna

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

1. Składowa czynna prądu obciążenia

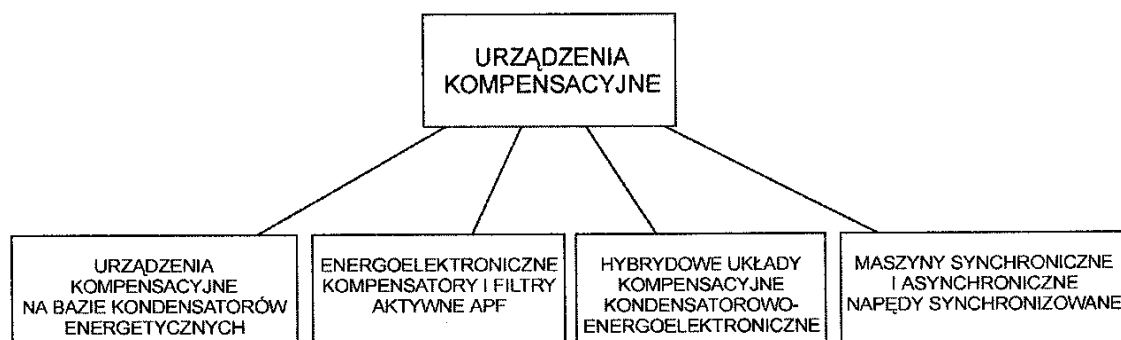
2. Składowa bierna prądu obciążenia

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.

## 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:

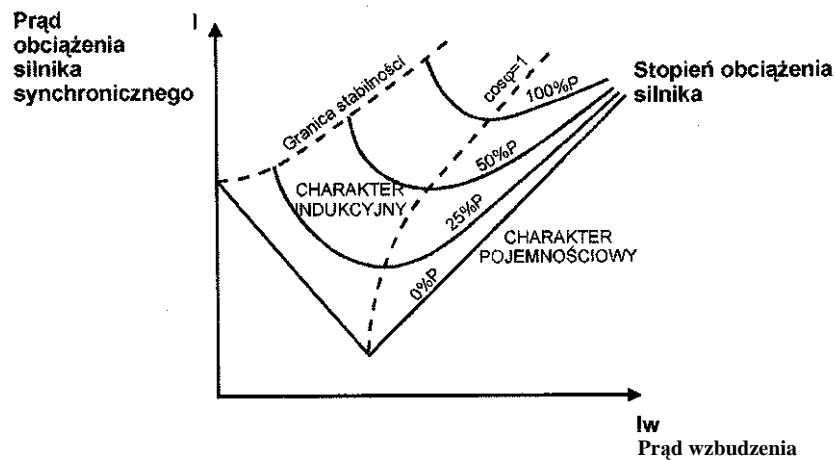
- likwidację składowej biernej prądu odbiorników,
- likwidację wyższych harmonicznym prądu (w wysokim stopniu)
- symetryzację obciążenia.

Dzięki aktywnym filtrom szeregowym możemy uzyskać nadążną:

- filtrację wyższych harmonicznym 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 harmonicznym 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. 2)



Rys.2. Krzywe V silnika synchronicznego

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku maszyn synchronicznych nie występują zagrożenia występowaniem groźnych zjawisk rezonansowych.

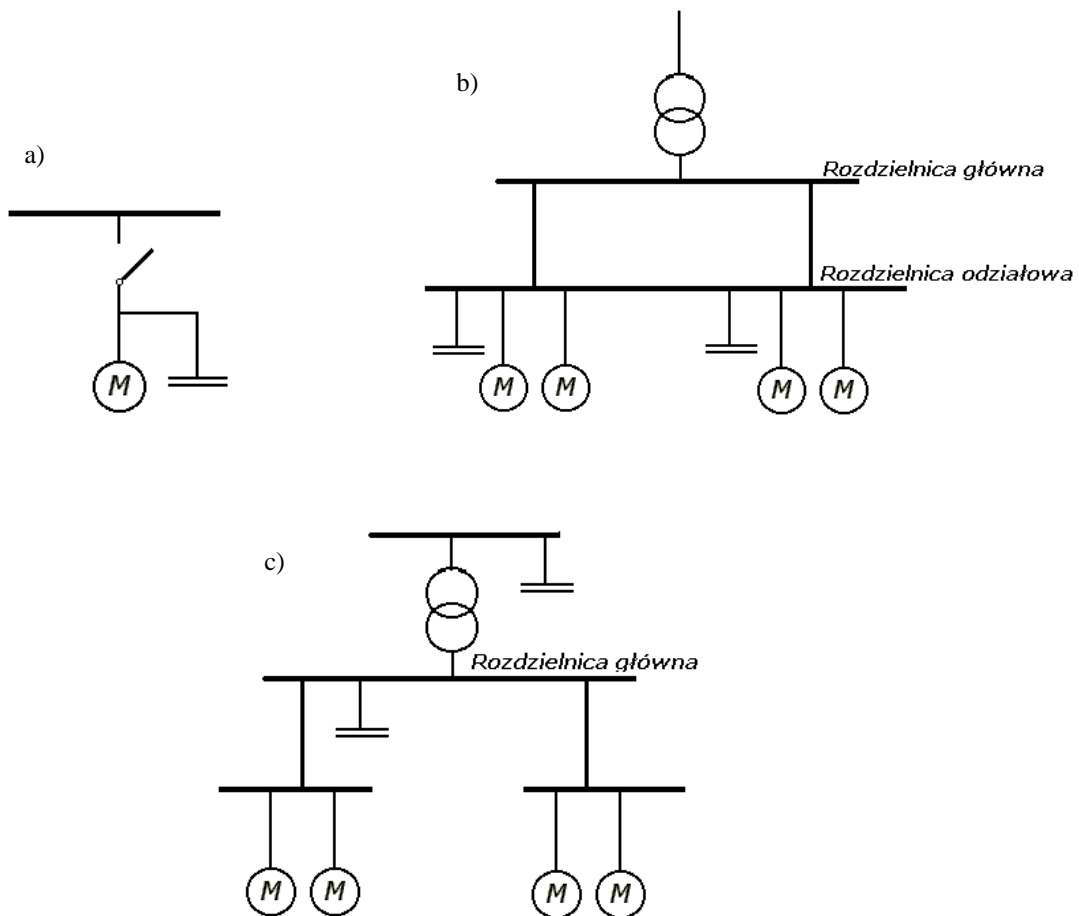
Jednakże pozyskiwanie energii biernej przy wykorzystywaniu napędów synchronicznych wiąże się ze stosunkowo wysokimi stratami mocy czynnej. Straty te mogą osiągnąć poziom od 80kW do 120kW na 1MVar mocy biernej pojemnościowej.

Ze względu na efekty ekonomiczne oraz niewątpliwe walory eksploatacyjne, do których można zaliczyć:

- minimalne straty mocy czynnej (od 0,1 do 0,4W/kVar),
- stosunkowo małe gabaryty,
- możliwość zastosowania w urządzeniach o złożonych wymaganiach (kompensacja nadążna, symetryzacja napięć fazowych, filtracja wyższych harmoniczných),
- możliwość budowy instalacji na najwyższe napięcie,
- możliwość przystosowania instalacji kompensacyjnych opartych na kondensatorach energetycznych do skrajnych warunków klimatycznych (m.in. temperatura pracy od -40°C do +55°C),
- brak części ruchomych (poza łącznikami stykowymi),
- minimalne wymagania w zakresie konserwacji i napraw,
- duża żywotność nowoczesnych kondensatorów i ich odporności na skutki stanów nieustalonych oraz długotrwałe odstępstwa od znamionowych parametrów zasilania,
- łatwość montażu i wymiany,
- stosowanie w nowoczesnych kondensatorach materiałów biodegradalnych i nieszkodliwych ekologicznie.

W dalszych rozważaniach uwzględniono instalacje oparte na kondensatorach energetycznych. Dotyczy to zarówno urządzeń niskich, jak i średnich napięć.

### 3. SPOSOBY KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ URZADZENIAMI NA BAZIE BATERII KONDENSATORÓW.



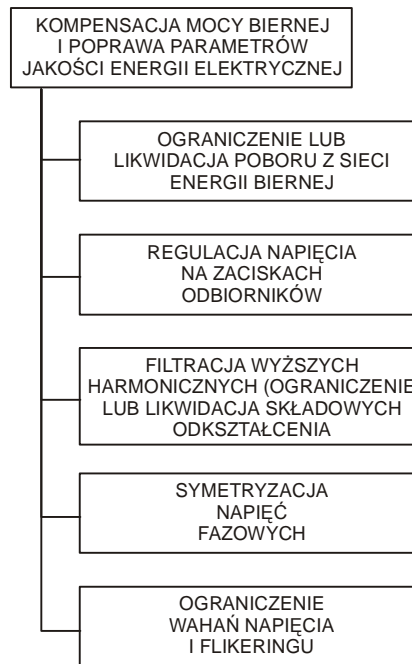
**Rys. 3.** Rodzaje kompensacji mocy biernej a) – indywidualna, b) – grupowa, c) – centralna.

### 4. EFEKTY KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ URZADZENIAMI KONDENSATOROWYMI.

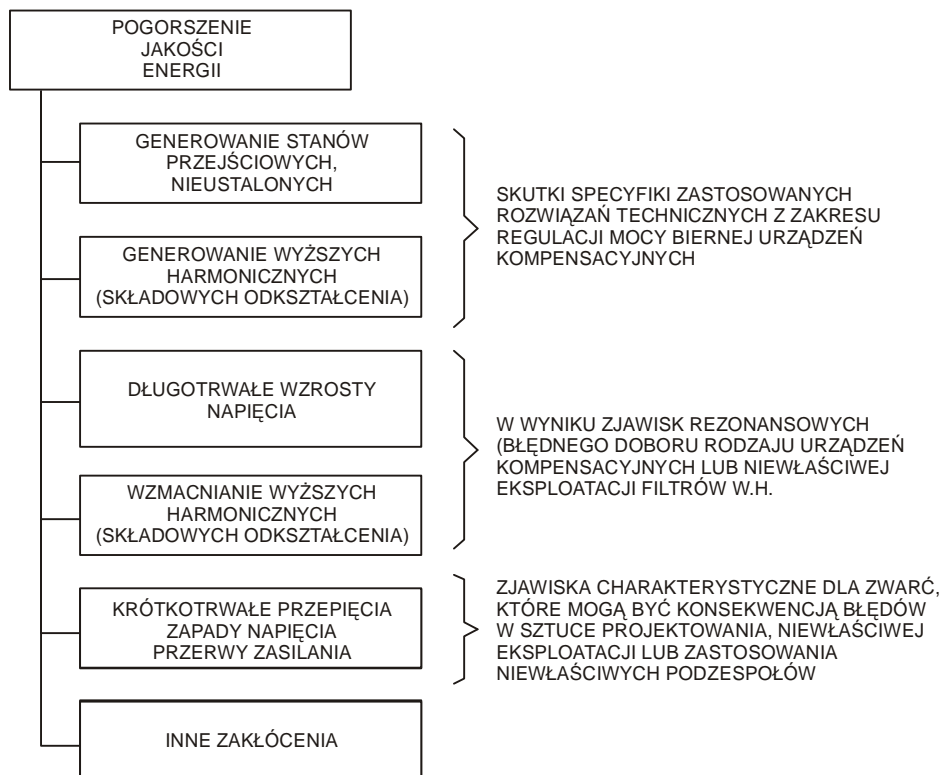
Dzięki właściwie dobranym urządzeniom do kompensacji mocy biernej można uzyskać nie tylko pożądane skutki w zakresie likwidacji opłat za energię bierną pobraną i oddaną, ale również inne efekty ekonomiczne oraz poprawę parametrów jakościowych energii elektrycznej (tablica 1)

Jednocześnie należy pamiętać, że zainstalowanie niewłaściwych kompensatorów, bez wcześniejszej analizy zjawisk rezonansowych, czy z zastosowaniem niewłaściwego wyposażenia może być przyczyną wielu groźnych zjawisk (tablica 2). Konsekwencją mogą być bardzo poważne awarie aparatów i urządzeń układu zasilająco- rozdzielczego oraz urządzeń kompensacyjnych.

Tablica 1. Możliwe efekty kompensacji mocy biernej dla właściwie dobranych urządzeń kompensacyjnych.



**Tablica 2.** Potencjalne negatywne skutki będące konsekwencją włączenia do sieci niewłaściwie dobranych urządzeń kompensacyjnych.



## 5. PRACA BATERII KONDENSATORÓW W OBECNOŚCI WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PRĄDU I NAPIĘCIA.

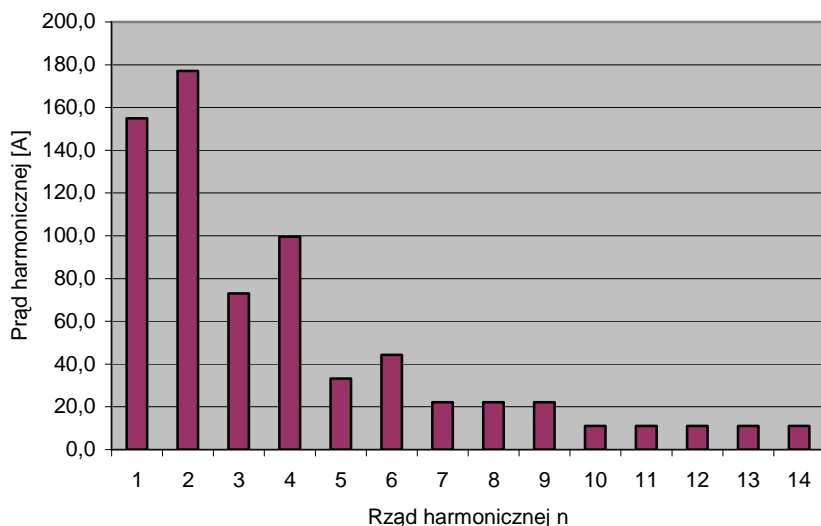
### 5.1. Źródła wyższych harmoniczných prądu i napięcia

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 harmoniczných. Do innych odbiorników nieliniowych, generujących wyższe harmoniczne należy 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.

Odbiorniki nieliniowe generują spektrum wyższych harmoniczných obejmujące od kilku do kilkudziesięciu wyższych harmoniczných. Przykładowo, na rys. 4 przedstawiono spektrum w.h. prądów generowanych przez piec łukowy 120Mg/30kV.



**Rys. 4** Spektrum w.h. prądów generowanych przez piec łukowy 120Mg/30kV.

W przypadku przekształtników tyrystorowych zasilanych z prostownika 6-cio pulsowego znaczącymi będą:

5h, 7h, 11h, 13h, 17h, 19h, ...

a dla prostownika 12-to pulsowego:

11h, 13h, 23h, 25h, ...

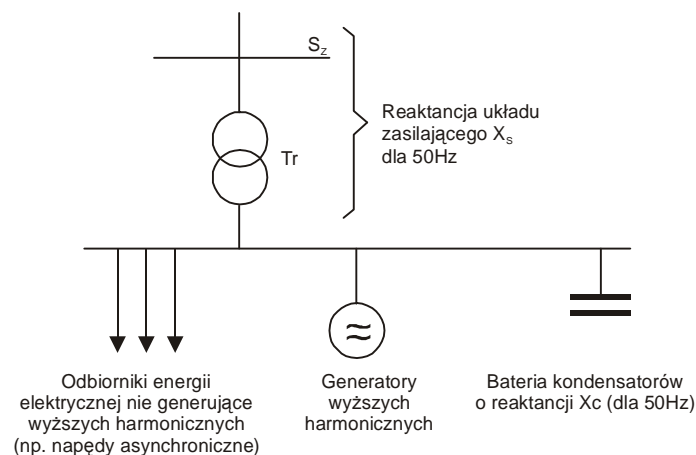
Zgrzewarki i spawarki 1- fazowe generują spektrum zbliżone rzędami wyższych harmonicznym do pieca łukowego.

## 5.2 Zjawiska rezonansowe w przypadku pracy kondensatorowych urządzeń kompensacyjnych w środowisku napięć i prądów odkształconych

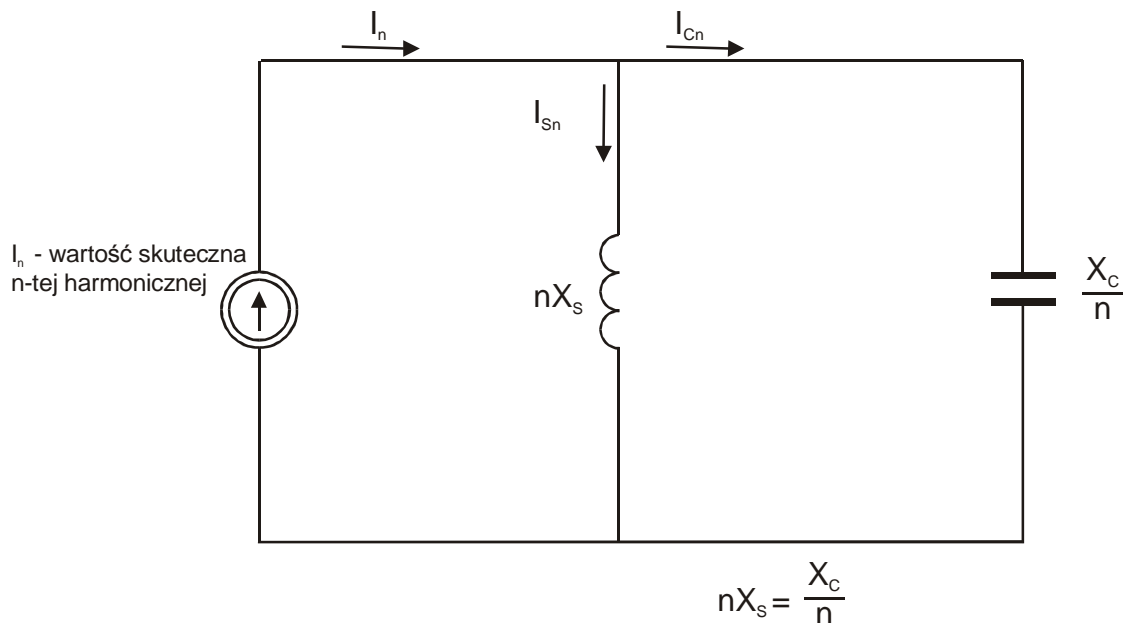
W założonych obwodach o reaktancji indukcyjno- pojemnościowej, na które składają się elementy indukcyjne sieci rozdzielczej lub zasilająco - rozdzielczej oraz pojemnościowe związane z zainstalowanymi kondensatorami do kompensacji mocy biernej, w przypadku występowania wyższych harmonicznym prądu i napięcia (odkształceń liniowych) mogą wystąpić zjawiska rezonansowe, których skutkiem będzie:

- wzrost zawartości wyższych harmonicznym powyżej wartości normatywnych,
- wzrost napięcia na szynach zbiorczych do wartości uniemożliwiającej zasilanie odbiorników energii elektrycznej (zadziałanie zabezpieczeń nadnapięciowych),
- praca kondensatorów w stanie permanentnego przeciążenia lub uniemożliwienie ich pracy wskutek zadziałania zabezpieczeń nadmiarowo- prądowych.

Jednym z najbardziej niebezpiecznych, zagrażających zarówno samej instalacji kompensacyjnej jak również aparaturze rozdzielczej w miejscu zainstalowania baterii jest rezonans równoległy (rezonans prądów). Zjawisko to występuje, gdy dla jednej harmonicznym (lub kilku w przypadku baterii wielostopniowych) reaktancja sieci przyjmuje wartość równą lub zbliżoną do reaktancji baterii kondensatorów. Uproszczony schemat takiego przypadku (z pominięciem elementów rezystancyjnych) przedstawiono na rys. 3, a schemat zastępczy dla n-tej harmonicznym występującej w prądzie i napięciu na (rys. 4)



Rys. 3. Przykładowy, prosty schemat układu zasilającego ze źródłem wyższych harmonicznym prądu i napięcia



Rys.4. Schemat zastępczy układu zasilającego z rys.3 dla n-tej harmonicznej (z pominięciem elementów rezystancyjnych)

Reaktancję zastępczą baterii kondensatorów i sieci względem źródła prądu n-tej harmonicznej możemy zapisać:

$$X_{wn} = \frac{X_s X_c}{nX_s - \frac{X_c}{n}}, \quad (1)$$

gdzie: oznaczenia jak na rys. 4.

W przypadku idealnego rezonansu równoległego zachodzi dla n-tej harmonicznej równość:

$$nX_s = \frac{X_c}{n} \quad (2)$$

Stąd mianownik wyrażenia (1) na reaktancje wypadkową osiąga wartość zerową, a tym samym reaktancja wypadkowa  $X_{wn}$  osiąga teoretycznie wartości nieskończenie duże. Dla wydatku  $I_n$  źródła prądowego, niezależnego od obciążenia, na zaciskach baterii (szynach zbiorczych) napięcie wzrasta teoretycznie do nieskończenie dużej wartości. To napięcie wymusi nieskończona wartość prądu  $I_{sn}$  obciążającego sieć (wzmocnienie n-tej harmonicznej).

W układach praktycznych elementy rezystancyjne oraz brak idealnej równości w zapisie równania (2) sprawiają, że prądy i napięcia towarzyszące rezonansowi osiągają wartości skończone, lecz na tyle wysokie aby uważać je za bardzo groźne.

### 5.3 Ocena możliwości pracy baterii kondensatorów w obecności wyższych harmonicznych prądów i napięć

Występowanie w układzie zasilająco-rozdzielczym odbiorników nieliniowych i przekształtników tyrystorowych stanowiących generator wyższych harmonicznych



prądu nie oznacza konieczności stosowania baterii kondensatorów z dławikami rezonansowymi, co wiąże się ze wzrostem kosztów zakupu instalacji kompensacyjnej o 30% do 60%. Ponadto, w przypadku instalacji z dławikami wzrosną koszty eksploatacyjne wynikające ze strat mocy czynnej w dławiku, które kształtują się na poziomie 2÷8kW/MVar, podczas gdy w bateriach bez dławików wynoszą one 0,15÷0,40kW/MVar.

O możliwości zastosowania baterii kondensatorów bez dławików rezonansowych decyduje analiza możliwości wystąpienia zjawisk rezonansowych w obwodzie: reaktancja indukcyjna układu zasilającego-reaktancja pojemnościowa baterii.

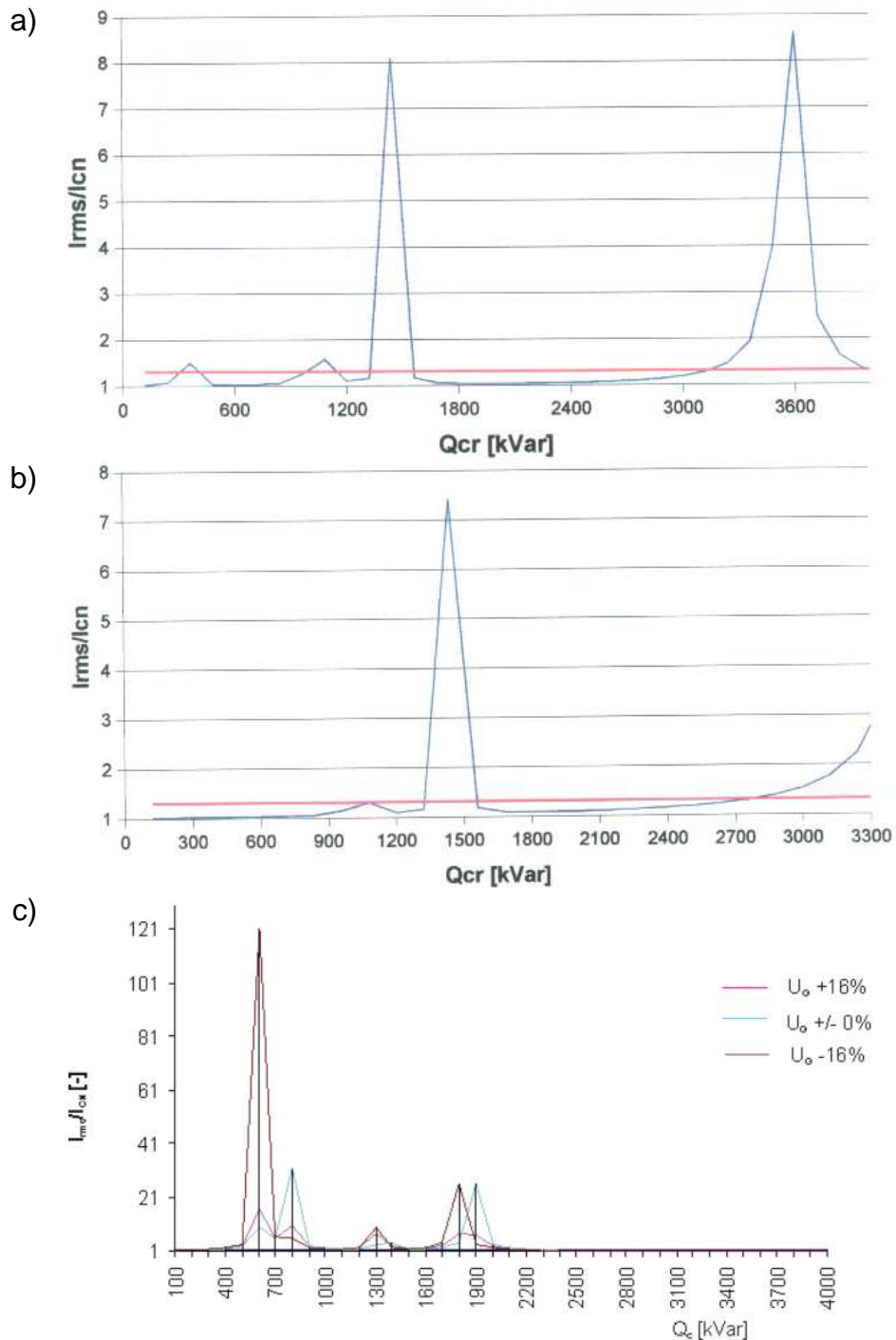
Podstawowym kryterium możliwości pracy baterii kondensatorów w obecności wyższych harmonicznym jest sumaryczny prąd obciążenia baterii kondensatorów, który nie może przekroczyć wartości  $1,3I_{CN}$  (prądu znamionowego kondensatorów).

Taka analiza musi uwzględniać:

- wszystkie znaczące źródła wyższych harmonicznym występujące w sieci (spektrum wyższych harmonicznym prądu lub napięcia),
- wszystkie możliwe konfiguracje układu zasilającego i ich parametry reaktancyjne i rezystancyjne (kierunki zasilania, odczepy transformatorów zasilających),
- wszystkie możliwe poziomy mocy załączonych urządzeń kompensacyjnych,
- inne urządzenia kompensacyjne.

Firma ELMA energia posiada oryginalne, własne oprogramowanie komputerowe pozwalające na modelowanie układów zasilająco-rozdzielczych z bateriami kondensatorów i pełną analizę zjawisk rezonansowych.

Przykładowe wyniki dla trzech obiektów przemysłowych ( $U_N= 6,3kV$ ) zostały przedstawione w formie graficznej na (rys. 8)



**Rys. 8.** Stosunek prądu  $I_{rms}$  obciążenia baterii do prądu znamionowego baterii  $I_{CN}$  dla konkretnych obiektów przemysłowych o napięciu rozdziału energii  $U_N = 6,3kV$ : a), b) – cementownia; c) – huta miedzi dla trzech odczepów transformatora zasilającego

Z zaprezentowanych wykresów wynika, że istnieją „obszary” mocy znamionowych baterii kondensatorów dla których zjawiska rezonansowe nie występują i, uwzględniając wszystkie wcześniej wyszczególnione warunki skutecznej analizy, można wyznaczyć moce baterii bez dławików szeregowych, które można załączyć do sieci z wyższymi harmonicznymi. Zastosowanie instalacji „kompensacyjnych bez dławików rezonansowych będzie możliwe, jeżeli „obszary” mocy baterii

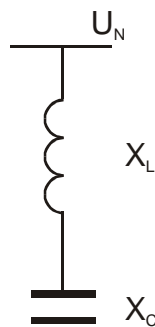
kondensatorów spełniających warunek  $I_{rms} < 1,3I_{cn}$  pokrywają się z zapotrzebowaniem na moc bierną pojemnościową zarówno co do mocy całkowitej instalacji, jak i stopni regulacji dla instalacji wielostopniowych, w tym automatycznie regulowanych.

Znacznie prostszy jest dobór baterii o stałej mocy znamionowej. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku rozpatrywanej cementowni (rys.8a i b) bez problemu można zainstalować automatycznie regulowaną baterię złożoną z członów o mocach: 600kVar, 1200kVAR i 2400kVar (szereg regulacyjny 1:2:4). Daje to łączną moc 4,2MVar, stopień regulacji 0,6MVar i 7 możliwych poziomów mocy bez ryzyka zagrożeń zjawiskami rezonansowymi.

W przypadku huty (rys. 8 c), taka instalacją, pod warunkiem, że nie występują inne konfiguracje układu zasilającego, może być automatycznie regulowana bateria o mocach członów 1200kVar i 2400kVar.

#### 5.4 OCHRONA BATERII KONDENSATORÓW PRZED ZJAWISKAMI REZONANSOWYMI

Zjawiskom rezonansowym możemy skutecznie zapobiec włączając szeregowo z kondensatorami właściwie dobrany dławik, zwany zgodnie z PN-EN60289 dławikiem strojeniowym lub filtracyjnym (rys.6).



**Rys. 6.** Bateria kondensatorów z szeregowym dławikiem strojeniowym (filtr pasywny 2-giego rzędu).

Ponieważ reaktancja indukcyjna jest wprost proporcjonalna do częstotliwości:

$$X_L = \omega L \quad (3)$$

a pojemnościowa odwrotnie proporcjonalna:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (4)$$

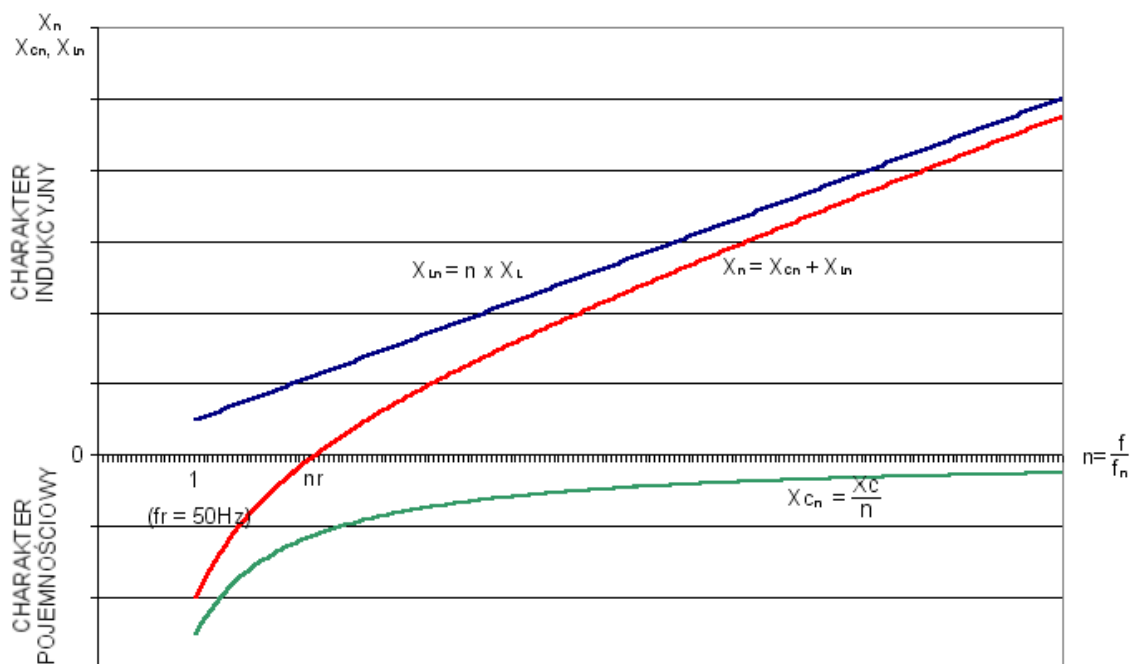
parametry LC możemy tak dobrać, że dla pewnej częstotliwości charakterystycznej obie wartości reaktancji będą sobie równe, a wypadkowa reaktancja układu bateria-dławik będzie równa zeru. Dla tej częstotliwości, zwanej częstotliwością rezonansową własną  $f_r$  ( $n_r$ ), zachodzi szeregowy rezonans napięć. Określa ją zależność:

$$f_r = f_N \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (5),$$

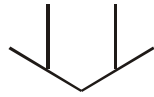
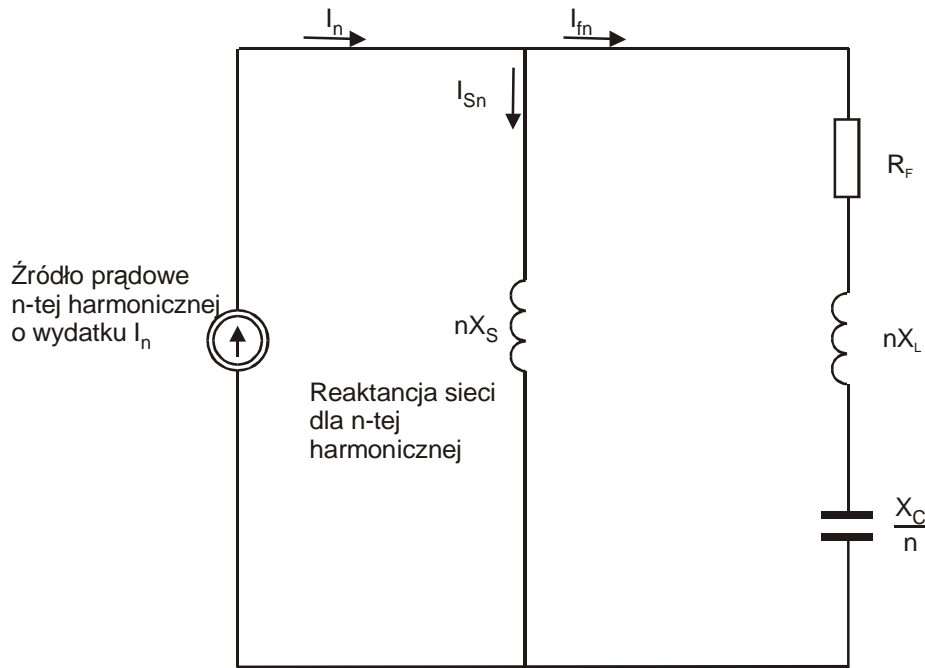
a przy wykorzystaniu pojęcia rzędu częstotliwości:

$$n_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (6).$$

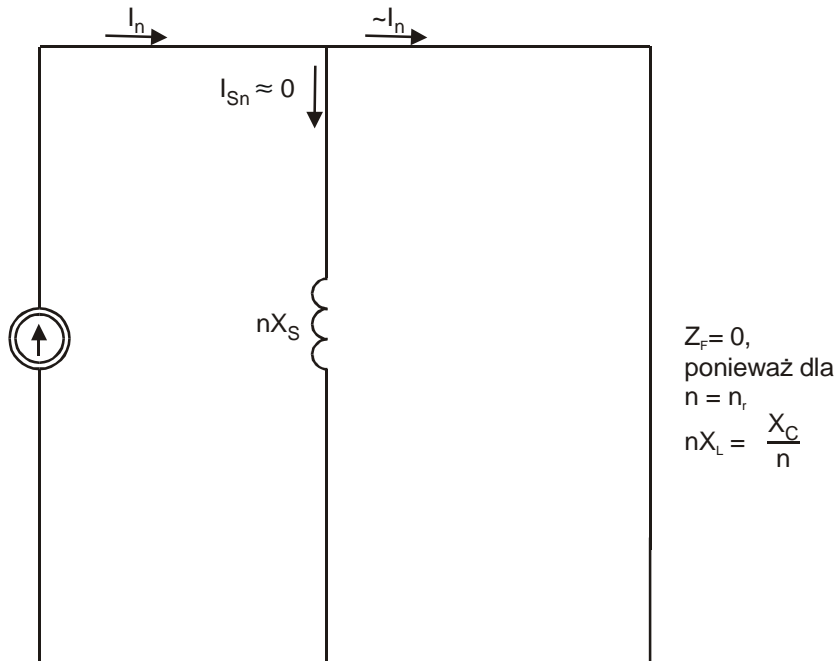
Charakterystyki częstotliwościowe dwójnika LC z rys. 6 przedstawiono na (rys. 7)



Dla częstotliwości o wartościach poniżej rezonansowej  $f_r$  ( $n_r$ ), w tym podstawowej 50Hz, dwójnik posiada charakter pojemnościowy i pełni funkcję kompensatora mocy biernej indukcyjnej. Po przekroczeniu wartości  $f_r$ , dla wyższych harmonicznych charakter kompensatora pasywnego LC zmienia się na indukcyjny. Ponieważ indukcyjność z indukcyjnością nie może tworzyć obwodów rezonansowych, taka bateria może pracować bezpiecznie pomimo występowania wyższych harmonicznych prądu i napięcia. Jeżeli częstotliwość rezonansowa własna  $f_r$  pokrywa się z częstotliwością (rzędem częstotliwości) jednej z występujących w sieci wyższych harmonicznych, wówczas mamy do czynienia z pasywnym filtrem tej harmonicznej. Schematy zastępcze sieci i filtra LC dla  $n$ -tej harmonicznej przedstawiono na (rys. 8)



$$n = n_r, nX_L - \frac{X_C}{n} = 0, R_F \approx 0$$



**Rys. 8.** Schemat zastępczy sieci i filtra LC dla n-tej filtrowanej harmonicznej. Zasady filtracji przy wykorzystaniu filtrów pasywnych.

Ponieważ dla rozpatrywanego przypadku filtru, dla danej wyższej harmonicznej impedancja dwójnika LC jest w przybliżeniu równa zero, zgodnie z prawami elektrotechniki, cały prąd tej harmonicznej przepływnie przez filtr, odciążając sieć. Tym samym również spadek napięcia dla rzędu filtrowanej harmonicznej na impedancji systemu zasilająco-rozdzielczego jest zbliżony do zera (nie występuje w napięciu na szynach zbiorczych filtrowana wyższa harmoniczna napięcia).

Jeżeli zasadniczym celem stosowania dławików szeregowych jest ochrona baterii przed zjawiskami rezonansowymi, co praktycznie występuje w zdecydowanej większości przypadków instalacji kompensacyjnych automatycznie regulowanych, częstotliwość rezonansowa własna przyjmuje wartości mniejsze niż najniższa częstotliwość wyższej harmonicznej występującej w sieci. W stosowanej terminologii możemy wówczas mówić o bateriach z dławikami ochronnymi lub pasywnych filtrach odstrojonych.

Przykładowo, jeżeli w sieciach najniższą występującą wyższą harmoniczną jest 5-ta (250Hz), częstotliwość rezonansowa dwójnika LC w wykonaniu ochronnym zazwyczaj zawiera się w przedziale od 170 do 210Hz.

O wyborze konkretnej wartości częstotliwości rezonansowej własnej dwójnika LC 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.

Instalacje z dławikami ochronnymi pełnią również funkcję filtru, z reguły dominującej wyższej harmonicznej, a rzędu najniższego w występującym spektrum. Oczywiście, skuteczność filtracji, wskutek odstrojenia filtr, będzie na znacznie niższym poziomie niż w przypadku filtru klasycznego. Z reguły waha się w granicach od 20% do 60%. Taka instalacja spełnia również pozytywną rolę w odniesieniu do harmonicznych wyższych rzędów. Należy brać jednak pod uwagę fakt, że im wyższy rząd harmonicznej, tym skuteczność filtracji jest mniejsza.

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.

## **6. 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,
- wewnątrzono-napowietrznym,
- do specjalnych warunków środowiskowych (np. do podziemi kopalń, do montażu na statkach, do pomieszczeń zapylnych, itp.).

O wyborze rozwiązań napowietrznych lub wewnątrzono-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.

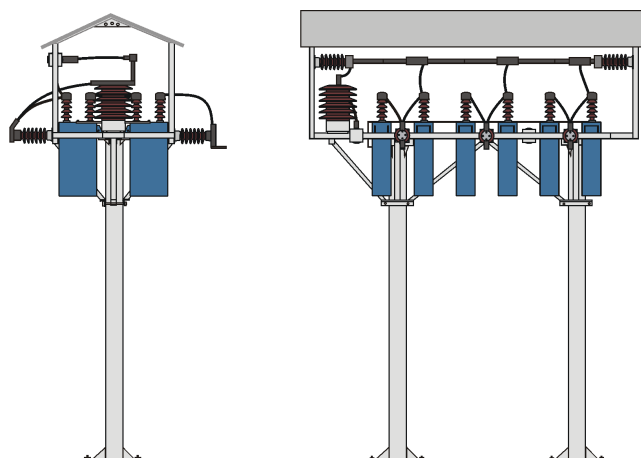




Fot. 3. Napowietrzna, nasłupowa bateria kondensatorów 15kV (ELMA energia)



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 harmonicznycy 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 harmonicznycy.

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

Filtry odstrojone stosuje się najczęściej w automatycznie regulowanych bateriach wielocłonowych. W pasywnych filtrach wyższych harmonicznycy, 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 węźle 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 och 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 SF<sub>6</sub>,
- dla kompensatorów WN – wyłączniki próżniowe lub z izolacją SF<sub>6</sub>.

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.

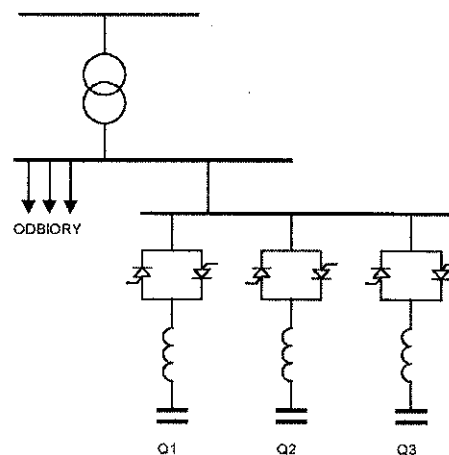
W kompensatorach quasi-nadążnych (czas reakcji układu kompensacyjnego od 1 do 3 sekund) właściwy efekt uzyskuje się najczęściej poprzez wprowadzenie do baterii z łącznikami stykowymi układów szybkiego rozładowania baterii kondensatorów. W bateriach nn są to najczęściej dodatkowe rezystory dołączane do 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;

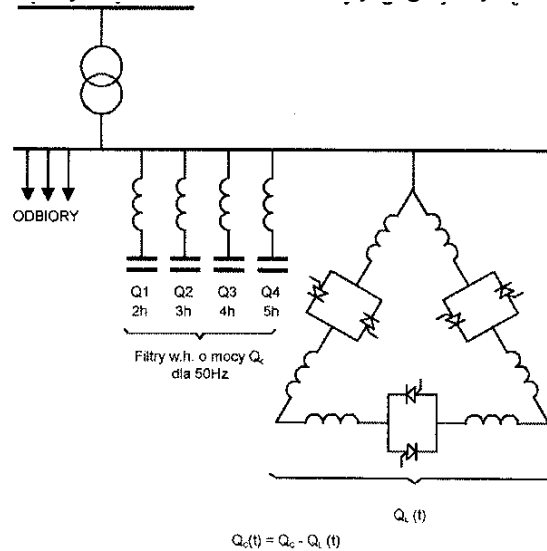
- jedno- lub wielocłonowe kompensatory z regulacją skokową (TSC),
- systemy regulacji bezstopniowej SVC.

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 harmonicznnych, 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. Eksport do Turcji.

## 7. WYBRANE ZAGADNIENIA DOBORU URZĄDZEŃ KOMPENSACYJNYCH

### 7.1 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.

## 7.2 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).

**7.3 W oparciu o analizę należy ustalić konieczność stosowania baterii z dławikami rezonansowymi.**

#### **7.4 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 zlecniodawcy.

#### **8. 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 (przeeglądy, naprawy).

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