

dr inż. Krzysztof Matyjasek
ELMA capacitors, Olsztyn

Urządzenia do kompensacji mocy biernej w środowisku napięć i prądów okształconych.

1. Informacje wstępne

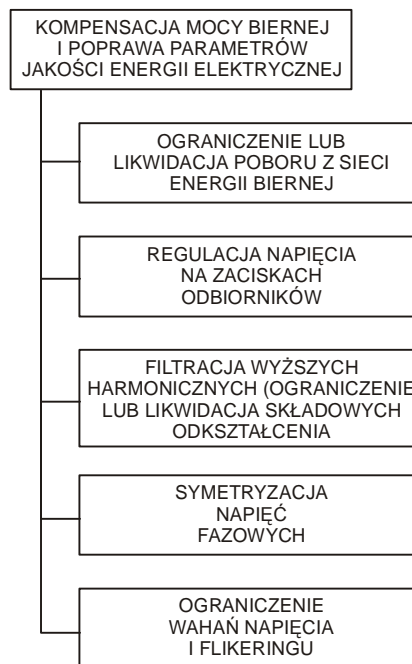
Jednym z podstawowych zadań przemysłowych służb elektroenergetycznych jest właściwa gospodarka energią bierną często, w znaczeniu bardzo wąskim, określana jako poprawa współczynnika mocy. W tradycyjnym, powszechnym jeszcze kilka lat temu, ujęciu zagadnienia gospodarki mocą bierną (kompensacji mocy biernej) obejmowały takie aspekty ekonomiczno-techniczne, jak:

- a) likwidacja opłat za energię bierną pobraną i oddaną,
- b) zwiększenie możliwości przesyłania mocy czynnej bez zmiany przepustowości (obciążalności prądowej) elementów układu zasilająco-rozdzielczego,
- c) minimalizacja przesyłowych strat mocy i energii (w przypadku zachowania obciążenia mocą czynną na stałym poziomie przed i po zainstalowaniu urządzeń kompensacyjnych),
- d) ograniczenie spadków napięć,
- e) polepszenie warunków rezerwowania i niezawodności układów zasilania.

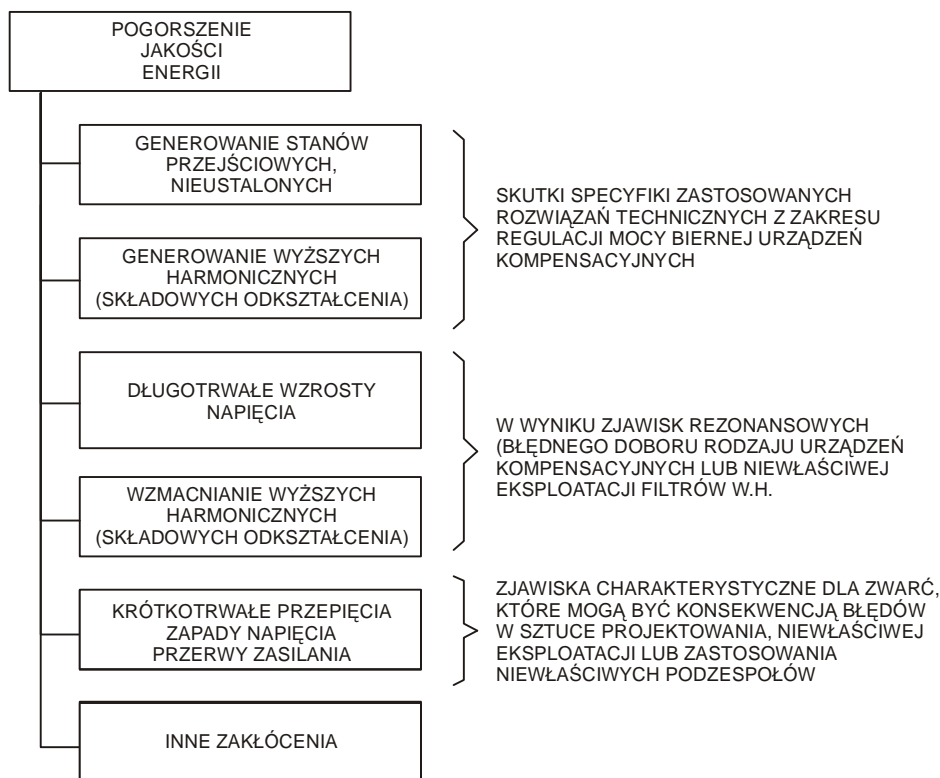
Powyższe cele kompensacji mocy biernej w pełni zachowują swą aktualność. W przypadku zdecydowanej większości odbiorców przemysłowych likwidacja opłat za energię bierną będzie stanowiła podstawę rachunku ekonomicznego przy podejmowaniu decyzji dotyczących zakupu i zainstalowania urządzeń do poprawy współczynnika mocy. Dla dystrybutorów energii elektrycznej główne znaczenie będą miały pozostałe, wyszczególnione powyżej, aspekty kompensacji mocy biernej.

Uwzględniając fakt radykalnego wzrostu wymagań w zakresie jakości energii, na zagadnienia poprawy współczynnika mocy należy spojrzeć znacznie szerzej. Tym bardziej, że włączenie urządzeń kompensacyjnych do sieci może znacząco poprawiać parametry jakościowe energii, ale w przypadku wyboru niewłaściwych rozwiązań technicznych, możemy spowodować ich pogorszenie. Potencjalne skutki zainstalowania urządzeń kompensacyjnych przedstawiono w tablicach 1 i 2.

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

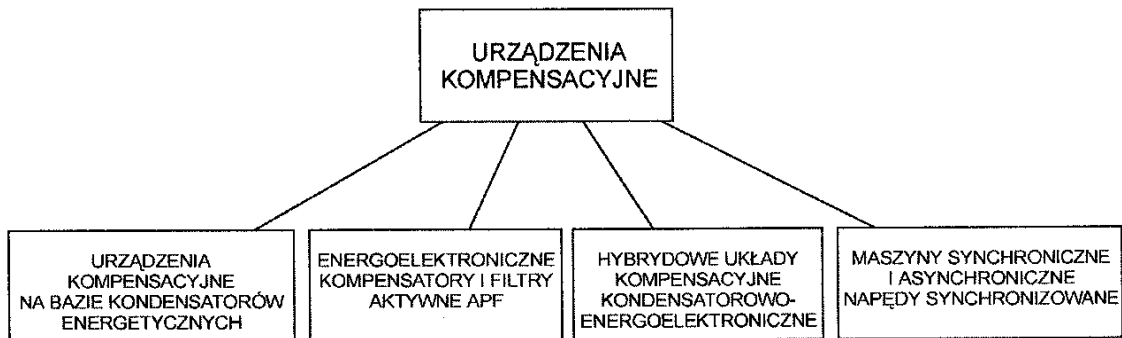


Tablica 2. Potencjalne negatywne skutki będące konsekwencją włączenia do sieci niewłaściwie dobranych urządzeń kompensacyjnych.



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 szeregowy.

Filtry APF równoległe pozwalają na nadążną:

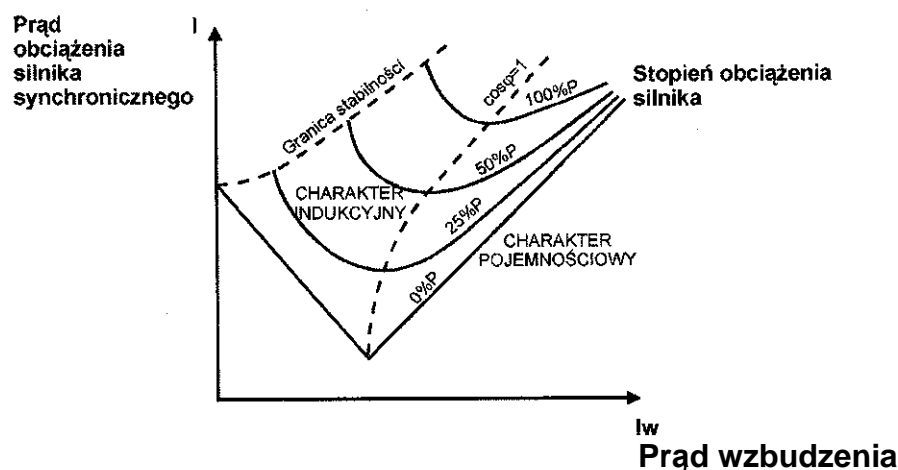
- likwidację składowej biernej prądu odbiorników,
- likwidację wyższych harmonicznym prądu (w wysokim stopniu),
- symetryzację obciążenia.

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. 1.



Rys. 1. 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 osiągać 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 napięcia,
- możliwość przystosowania instalacji kompensacyjnych opartych na kondensatorach energetycznych do skrajnych warunków klimatycznych (m.in. temperatura pracy od -40°C do $+55^{\circ}\text{C}$),
- brak części ruchomych (poza łącznikami stykowymi),
- minimalne wymagania w zakresie konserwacji i napraw,
- duża żywotność nowoczesnych kondensatorów i ich odporność na skutki stanów nieustalonych oraz długotrwałe odstępstwa od znamionowych parametrów zasilania,
- łatwość montażu i wymiany,
- stosowanie w nowoczesnych kondensatorach materiałów biodegralnych i nieszkodliwych ekologicznie,

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

3. Źródła wyższych harmoniczných prądu i napięcia

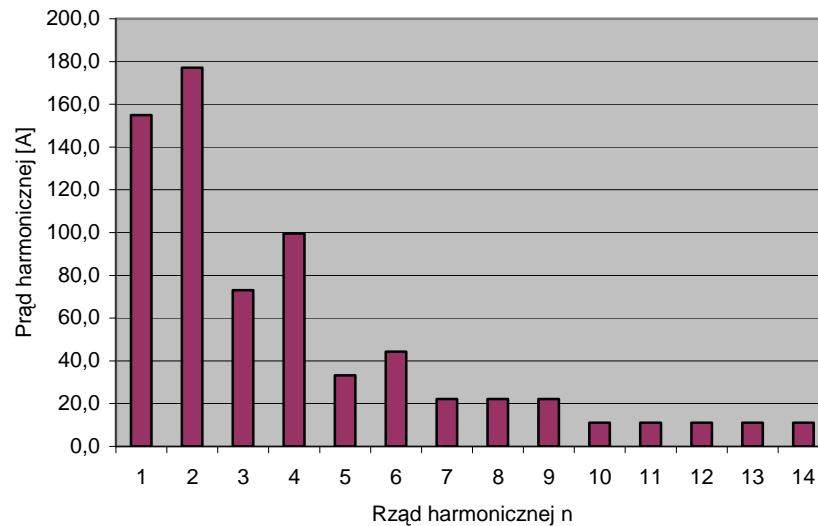
Dynamiczny rozwój energoelektroniki i związane z tym szerokie stosowanie w przemyśle nieliniowych przekształtników (stacje prostownikowe trakcji elektrycznej, regulowane napędy elektryczne, technika grzewcza) wiąże się z generowaniem w sieci wyższych harmoniczných. Do innych odbiorników nieliniowych,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

Odbiorniki nieliniowe generują spektrum wyższych harmonicznych obejmujące od kilku do kilkudziesięciu wyższych harmonicznych. Przykładowo, na rys. 2 przedstawiono spektrum w.h. prądów generowanych przez piec łukowy 120Mg/30kV.



Rys. 2 Spektrum w.h. prądów generowanych przez piec łukowy 120Mg/30kV.

W przypadku przekształtników tyrystorowych zasilanych z prostownika 6-cio pulsowego znaczącymi harmonicznymi 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 harmonicznych do pieca łukowego.

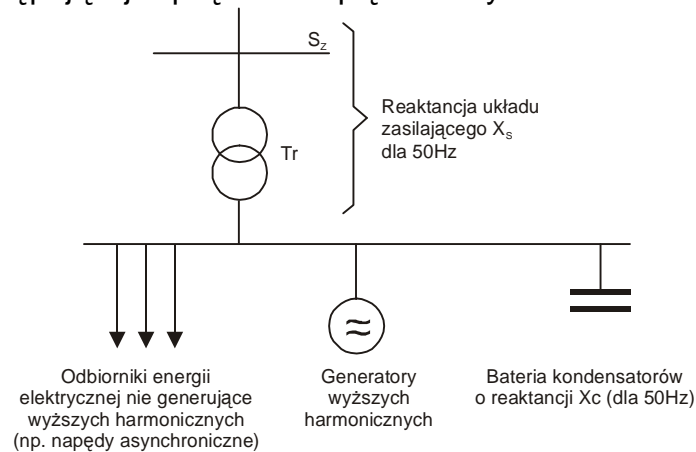
4. Zjawiska rezonansowe w przypadku pracy kondensatorowych urządzeń kompensacyjnych w środowisku napięć i prądów odkształconych

W złożonych 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 harmonicznych prądu i napięcia (odkształceń liniowych) mogą wystąpić zjawiska rezonansowe, których skutkiem będzie:

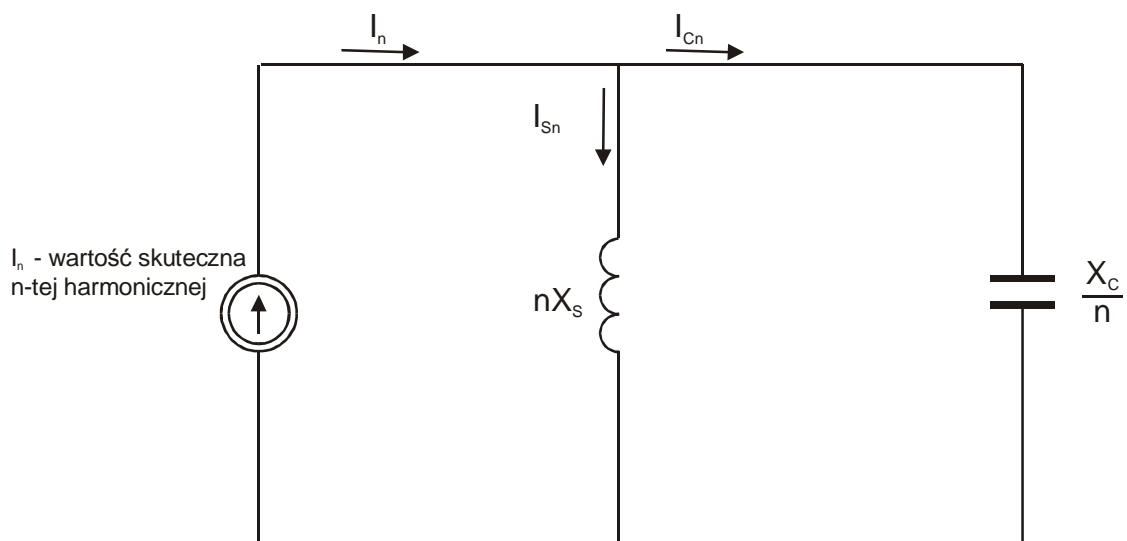
- wzrost zawartości wyższych harmonicznych powyżej wartości normatywnych,

- 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 harmonicznej (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 harmonicznej występującej w prądzie i napięciu na rys. 4.



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



$$nX_s = \frac{X_c}{n}$$

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.

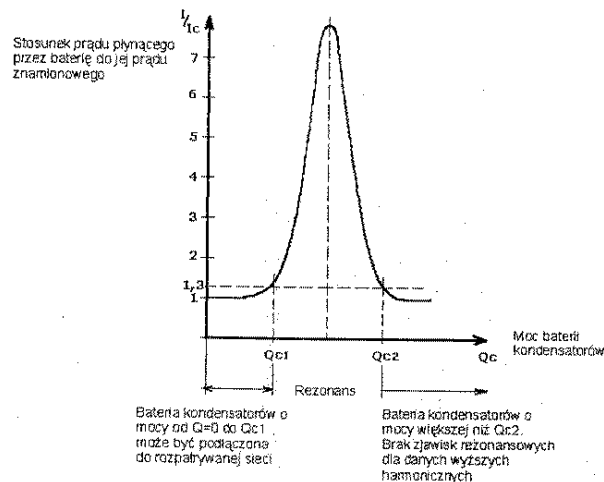
W przypadku idealnego rezonansu równoległego zachodzi dla n-tej harmoniczej równość:

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

Stąd mianownik wyrażenia (1) na reaktancję 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 nieskończoną wartość prądu I_{Sn} obciążającego sieć (wzmocnienie n-tej harmoniczej).

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.

Na rys. 5 przedstawiono przykładową zależność stopnia przeciążenia baterii kondensatorów w funkcji mocy baterii dołączonej do sieci o określonych warunkach zwarciovych (reaktancji indukcyjnej i rezystancji) wskutek wystąpienia rezonansu prądu dla konkretnej n-tej harmoniczej.

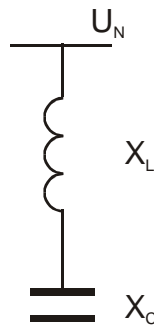


Parametry określone: S_z – moc zwarciova układu zasilająco-rozdzielczego (reaktancja X_s , rezystancja R_s); spektrum wyższych harmoniczych

Rys. 5. Stopień przeciążenia prądowego baterii kondensatorów w funkcji załączonej mocy pojemnościowej w środowisku napięć i prądów odkształconych

5. 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:

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

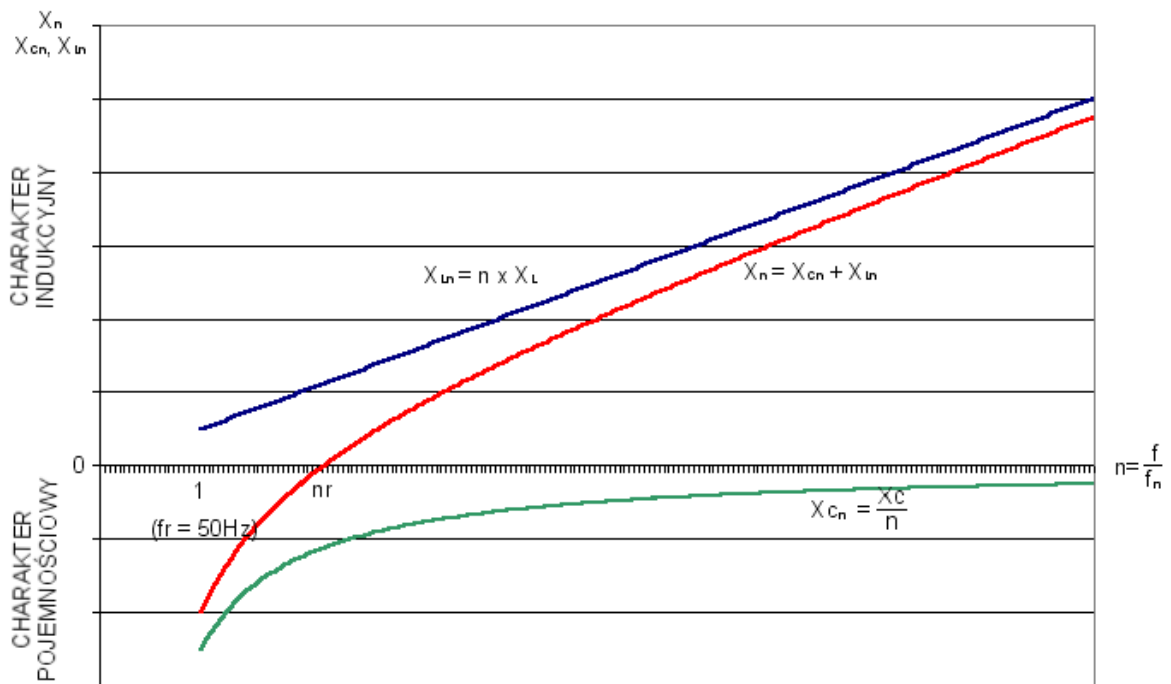
parametry LC możemy tak dobrać, że dla pewnej częstotliwości charakterystycznej obie wartości reaktancji będą sobie równe, a wypadkowa reaktancja układu bateria-dławik będzie równa zero. Dla tej częstotliwości, zwanej częstotliwością rezonansową własną f_r (n_r), zachodzi szeregowy rezonans napięć. Określa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

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

a przy wykorzystaniu pojęcia rzędu częstotliwości:

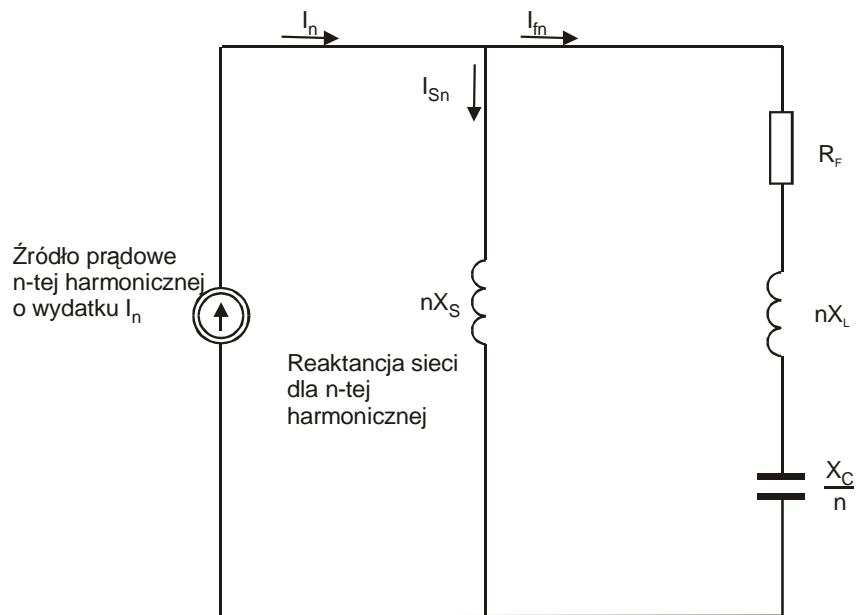
$$n_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (6).$$

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

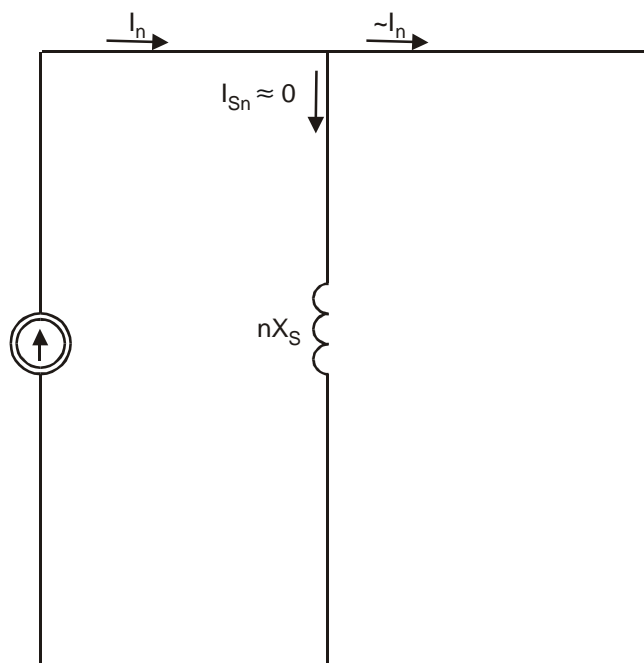


Rys.7. Charakterystyki częstotliwościowe dwójnika z szeregowymi elementami LC

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 harmonicznnych 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 harmonicznnych prądu i napięcia. Jeżeli częstotliwość rezonansowa własna f_r pokrywa się z częstotliwością (rzędem częstotliwości) jednej z występujących w sieci wyższych harmonicznnych, wówczas mamy do czynienia z pasywnym filtrem tej harmonicznnej. Schematy zastępcze sieci i filtru LC dla n -tej harmonicznnej przedstawiono na rys. 8.



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



$$Z_F = 0,$$

ponieważ dla
 $n = n_r$
 $nX_L = \frac{X_C}{n}$

Rys. 8. Schemat zastępczy sieci i filtru 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 sieci 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 filtru, 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.

6. Ocena możliwości pracy baterii kondensatorów bez dławika szeregowego w obecności wyższych harmonicznych prądu i napięcia

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.

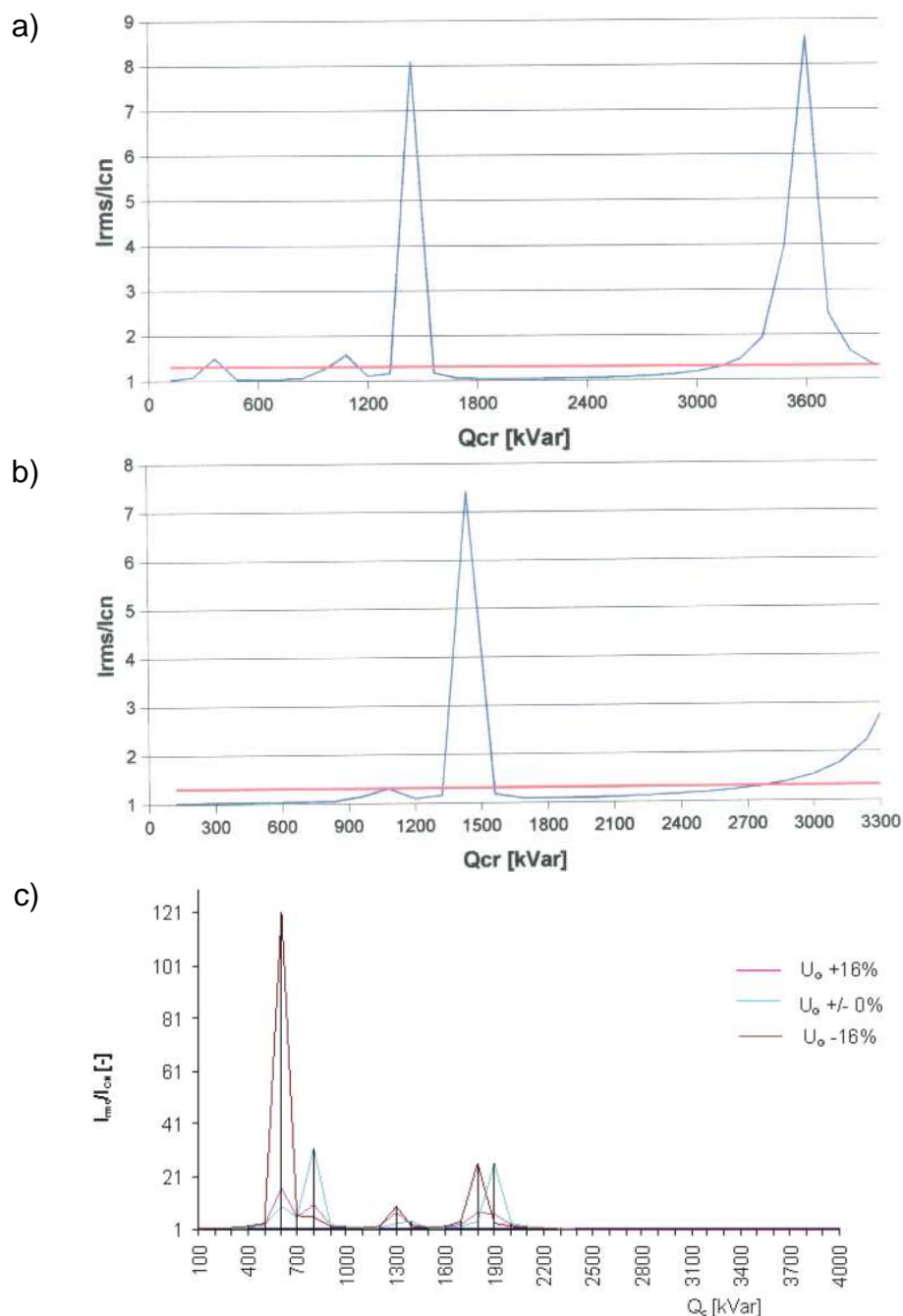
Podstawowym kryterium możliwości pracy baterii kondensatorów w obecności wyższych harmonicznych jest sumaryczny prąd obciążenia baterii kondensatorów, który nie może przekroczyć wartości $1,3I_{CN}$ (prądu znamionowego kondensatorów).

Taka analiza musi uwzględniać:

- wszystkie znaczące źródła wyższych harmonicznych występujące w sieci (spektrum wyższych harmonicznych 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 ($U_N = 6,3\text{kV}$) 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 $U_N = 6,3\text{kV}$: 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. 8 a 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), taką instalacją, pod warunkiem że nie występują inne konfiguracje układu zasilającego, może być automatycznie regulowana bateria o mocach członów 1200kVar i 2400kVar.

7. Klasyfikacja kondensatorowych urządzeń do kompensacji mocy biernej przystosowanych do pracy w środowisku napięć i prądów odkształconych. Przykłady rozwiązań.

Klasyfikacji urządzeń kompensacyjnych z dławikami rezonansowymi należy dokonać w oparciu o szereg istotnych kryteriów.

Ze względu na wysokość napięcia:

- niskich napięć: do 1kV
- średnich napięć: do 60kV
- wysokich napięć: powyżej 60kV



Foto 1. Automatycznie regulowana bateria niskich napięć KMD720R 400V z dławikami (filtry odstrojone) $f_r = 189\text{Hz}$. Produkcja firmy ELMA energia. Eksport do Holandii.



Foto 2. Filtry odstrojone średnich napięć 6,3kV ($f_r = 189\text{Hz}$). Realizacja firmy ELMA energia w Hucie Głogów S.A.

Z punktu widzenia sposobu zasilania:

- jednofazowe,
- trójfazowe.



Foto 3. Jednofazowy kompensator nadążny 400V do zgrzewarek punktowych i liniowych. Produkcja ELMA energia (eksport do Indii)

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

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

O wyborze rozwiązań napowietrznych lub wewnątrz-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.



Foto 4. Napowietrzna, nasłupowa bateria kondensatorów 15kV. Produkcja ELMA energia



Foto 5. Automatycznie regulowana bateria BSCR-3 6,3kV dopuszczona do podziemi kopalń. Produkcja ELMA energia

Częstotliwości rezonansowe własne instalacji kompensacyjnych, zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami, pozwalają podzielić przedmiotowe urządzenia na:

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

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.

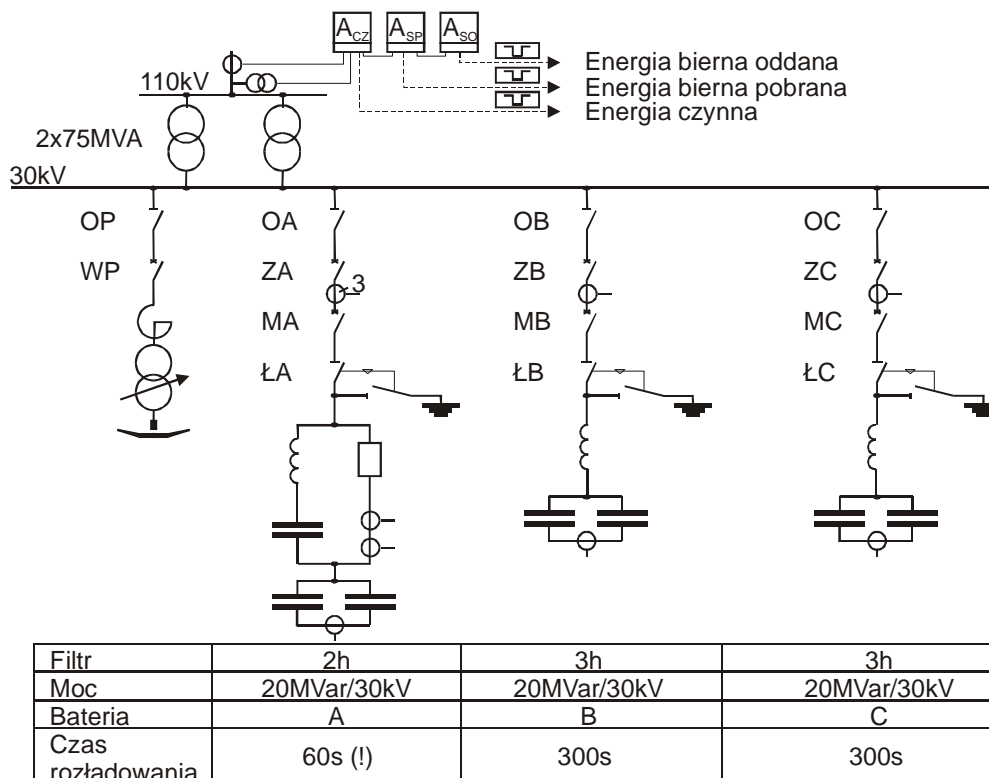
W nowoczesnych automatycznie regulowanych bateriach, do sterowania ich pracą wykorzystuje się mikroprocesorowe sterowniki, pełniące wiele funkcji (np. pomiary, zabezpieczenia, alarmy) i współpracujące z łącznikami stykowymi lub bezstykowymi.

O wyborze konkretnego urządzenia decydują przede wszystkim dynamika zmian obciążenia oraz rachunek ekonomiczny.

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.

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. Na rysunku 9 przedstawiono schemat automatycznie regulowanej baterii kondensatorów o łącznej mocy 60MVar/30kV. Baterię stanowią: filtr 2-giej harmonicznej typu „C” z rezystorami tłumiącymi oraz dwa filtry 2-giej harmonicznej. Widok instalacji – Foto 6.



Rys. 9 . Schemat automatycznie regulowanej baterii kondensatorów o łącznej mocy 60MVar/30kV.



Filtr typu „C” 2-giej harmonicznej z rezystorami tłumiącymi. Zdjęcie w trakcie prac



montażowych.

Filtry 3-ciej harmonicznej wysokiego napięcia (42kV – 2x35MVar) pieca łukowego w Hucie Ostrowiec S.A.

Foto 6. Automatycznie regulowany zespół filtrów do kompensacji mocy biernej pieca łukowego 120Mg, 30kV. Łączna moc zainstalowana kondensatorów 116,2MVar. Realizacja ELMA energia.

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.

W kompensatorach quasi-nadażnych (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 średnich i wysokich napięć, w zależności od mocy baterii, są to przekładniki napięciowe lub transformatory energetyczne. Celem uzyskania przebiegu tłumionego

aperiodycznego należy zagwarantować odpowiednie obciążenie obwodów wtórnych tych urządzeń.



Foto 7. Transformator 63kVA/30kV do szybkiego rozładowania baterii głównej filtra C 2-giej harmonicznej w Hucie Celsa. Moc baterii 33MVar/38,48kV. Realizacja ELMA energia

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

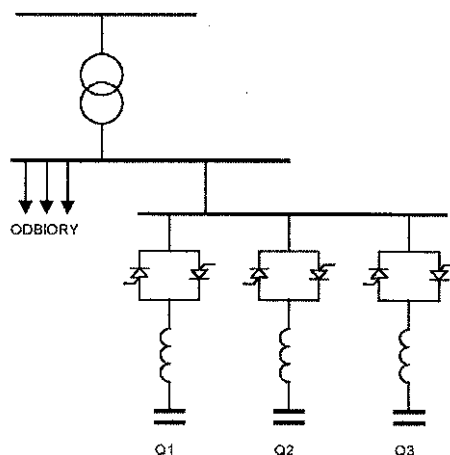
- jedno- lub wielocłonowe kompensatory z regulacją skokową (TSC),
- systemy regulacji bezstopniowej SVC.



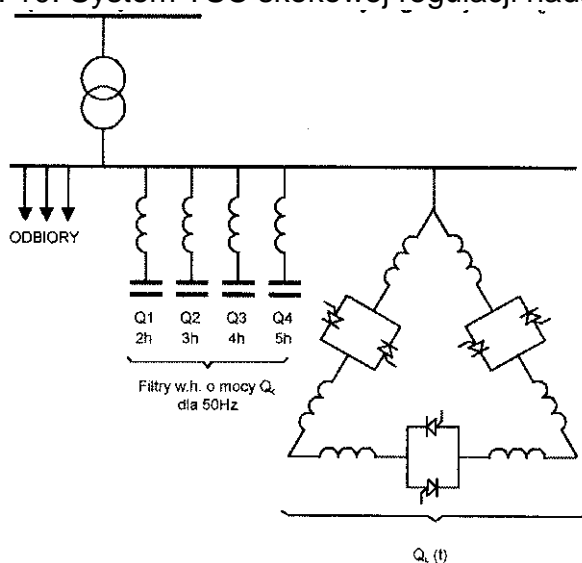
Foto 8. Bateria KMT-3...D (z dławikami rezonansowymi) 400V w systemie TSC. Produkcja ELMA energia

W kompensatorach nadążnych stosowane są tylko i wyłącznie łączniki bezstykowe, najczęściej tyrystorowe. Takie rozwiązania nie tylko gwarantują dużą szybkość reakcji układu kompensacji, ale również brak stanów nieustalonych. Kompensatory TSC z regulacją skokową (rys. 9) wyposażone są w określoną ilość członów załączanych łącznikami tyrystorowymi.

W systemach SVC (rys. 10) baterie kondensatorów, najczęściej w układzie filtrów wyższych harmonicznyc, 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 w obwodzie indukcyjności roboczych (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. 10. System TSC skokowej regulacji nadążnej



Rys. 11. System SVC kompensacji nadążnej

8. Podsumowanie

Poprzez prawidłowy wybór i dobór urządzeń kompensacyjnych możemy nie tylko zlikwidować opłaty za energię bierną, lecz również wydatnie poprawić parametry jakościowe energii elektrycznej. Szczególnie ostrożnie należy postępować w przypadku projektowania instalacji kondensatorowych mających pracować w środowisku napięć odkształconych. Stosując szeregowe dławiki rezonansowe, kosztem wzrostu nakładów inwestycyjnych oraz zwiększonych strat mocy czynnej, możemy skutecznie zapobiegać występowaniu zjawisk rezonansowych oraz ograniczać wartości skuteczne wyższych harmonicznyc w układzie zasilającym.