

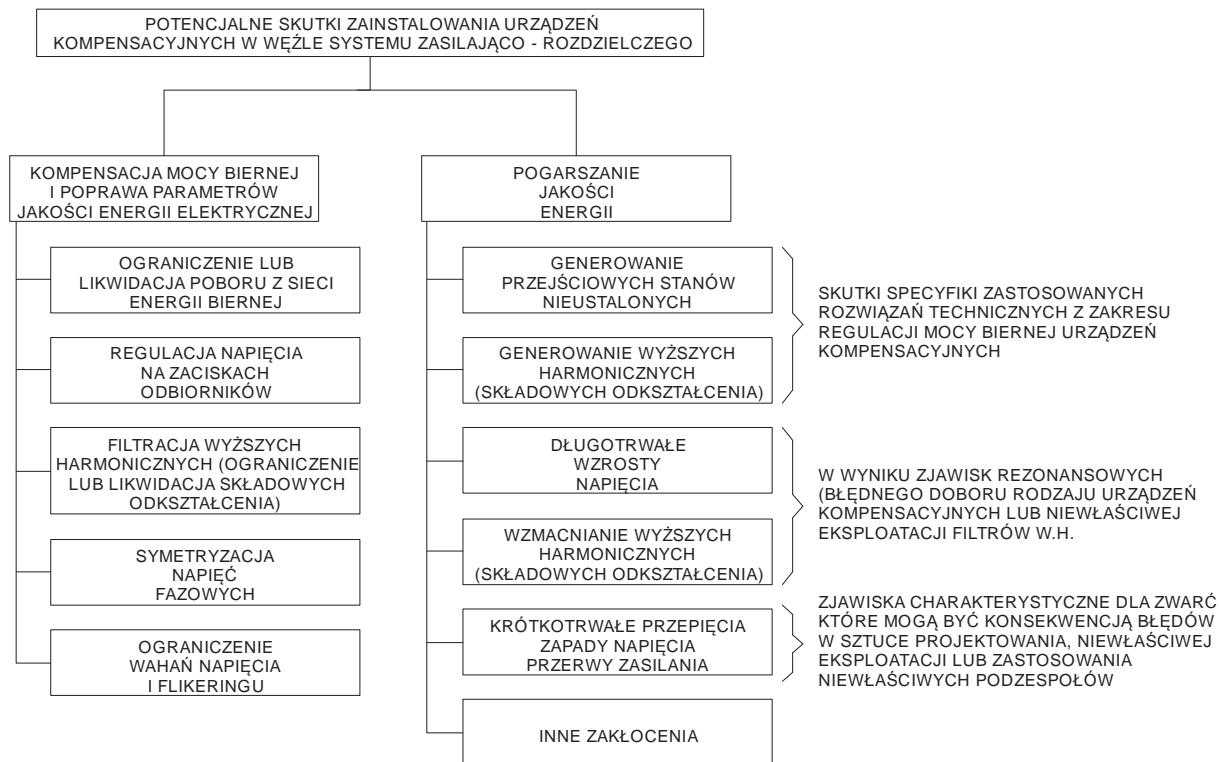
dr inż. Krzysztof Matyjasek
mgr inż. Łukasz Matyjasek

WYBRANE ZAGADNIENIA Z ZAKRESU WYBORU RODZAJU URZĄDZEŃ DO KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ NA BAZIE KONDENSATORÓW ENERGETYCZNYCH. PREZENTACJA KONKRETNYCH ROZWIĄZAŃ.

Jednym z podstawowych zadań 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:

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

Powyższe cele kompensacji mocy biernej w pełni zachowują swą aktualność, a likwidacja opłat za energię bierną w zdecydowanej większości przypadków będzie stanowiła podstawę rachunku ekonomicznego przy wyborze konkretnych rozwiązań kompensacji mocy biernej, jednakże wzrastające wymagania w zakresie jakości energii elektrycznej skłaniają do konieczności znacznie szerszego spojrzenia na te zagadnienia. Tym bardziej, że urządzenia kompensacyjne mogą zarówno poprawiać jakość energii, jak również być generatorem zakłóceń prowadzących do jej pogorszenia. W skrajnych wypadkach, baterie kondensatorów mogą powodować poważnych w skutkach zjawisk rezonansowych. Potencjalne skutki włączenia urządzeń kompensacyjnych do sieci przedstawiono w tablicy 1.



Tablica 1. Możliwe konsekwencje zainstalowania urządzeń kompensacyjnych

Mając na uwadze możliwość wystąpienia niekorzystnych zjawisk, w procesie projektowania instalacji kompensacyjnej i wyboru rodzaju urządzeń kompensacyjnych należy uwzględnić szereg czynników i uwarunkowań, do których należą m.in.:

- podstawowe parametry znamionowe sieci (napięcie, częstotliwość), ich wartości w warunkach eksploatacyjnych,
- zapotrzebowanie na moc bierną indukcyjną z uwzględnieniem celu kompensacji,
- dynamika zmian obciążenia,
- występowanie wyższych harmonicznych prądu i napięcia i związana z tym możliwość wystąpienia zjawisk rezonansowych,
- warunki zwarciove w przewidywanym miejscu zainstalowania kompensatora,
- warunki klimatyczne i lokalowe.

Prąd pobierany przez zespół odbiorników zawierających źródła wyższych harmonicznych, wg. teorii Harashima, można opisać formułą:

$$i_0(t) = B_1 \sin \omega t + C_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\omega t) \quad (1)$$

1. Składowa czynna prądu obciążenia

2. Składowa bierna prądu obciążenia

3. Składowe odkształcenia (wyższych harmonicznych) prądu obciążenia

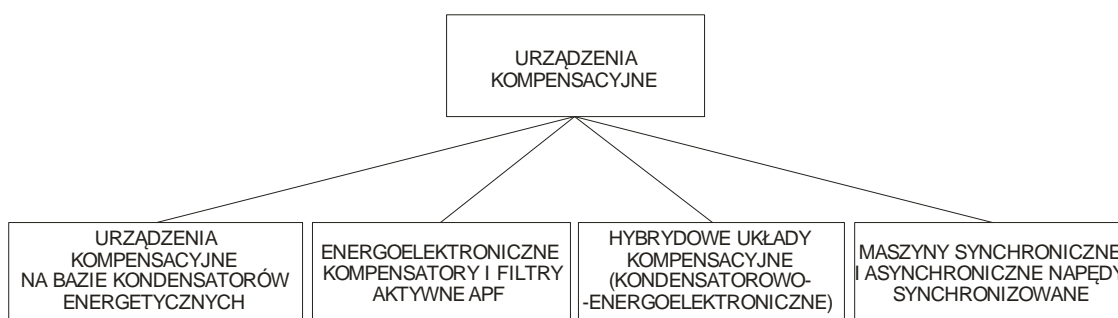
Celem nowoczesnych i idealnych urządzeń kompensacji mocy biernej winna być likwidacja lub radykalne ograniczenie trzech ostatnich powyższego zapisu,

oznaczonych w opisie numerami 2 i 3. W praktyce oznacza to konieczność zainstalowania źródeł energii pojemnościowej o odpowiedniej mocy (kompensacja składnika nr 2) oraz filtrów wyższych harmonicznych (kompensacja składnika nr 3). Ponieważ amplitudy B_1 , C_1 , B_n oraz C_n są najczęściej wartościami zmiennymi w czasie, w przypadku niektórych odbiorników o bardzo dużej dynamice zmian obciążenia, systemy kompensacji mocy biernej muszą być wyposażone w regulatory, sterowniki lub inne urządzenia (np. energoelektroniczne) pozwalające na dostosowanie chwilowej mocy źródeł energii pojemnościowej do chwilowego zapotrzebowania na tą moc.

W praktyce, uwzględniając aspekt ekonomiczny, celem kompensacji jest utrzymanie zadanej (większej niż zero) wartości tangensa kąta przesunięcia fazowego w określonych przedziałach czasowych (od 20ms do miesiąca rozliczeniowego).

Zdecydowany wyjątek stanowią piece łukowe, dla których realizacja kompensacji mocy biernej przez nadążną likwidację składników nr 2 i 3 w formule (1) prowadzi do znaczących efektów ekonomicznych (zmniejszenie zużycia elektrod, wymurówki, energii elektrycznej na tonę wytapianej stali), jak również ograniczenie wahań napięcia i uzyskania wymaganego poziomu współczynnika flikeringu.

Aktualnie stosowane urządzenia kompensacyjne można podzielić generalnie w następujący sposób:



W praktyce, najszerzej stosowane są urządzenia kompensacyjne na bazie kondensatorów. Udział mocy kompensowanej przez pozostałe rodzaje maszyn i urządzeń można szacować w Polsce na ok. 1 ÷ 1,5%. Z uwagi na duże straty mocy czynnej (wynoszące od 80kW do 120kW na 1MVar pozyskanej mocy biernej), coraz częściej odstępuje się od kompensacji mocy biernej maszynami synchronicznymi (silnikami przewzbudzonymi i kompensatorami).

O szerokim zastosowaniu kondensatorów energetycznych zdecydowały aspekty ekonomiczne.

Z drugiej strony, instalowanie kondensatorów wiąże się z szeregiem niebezpieczeństw, które winny być eliminowane poprzez wybór właściwego rodzaju urządzeń i projektowania instalacji kompensacyjnej zgodnie z zasadami sztuki inżynierskiej, obowiązującymi normami i przepisami oraz wiedzą wynikającą z doświadczenia.

Prawidłowo dobrane i zaprojektowane instalacje kompensacyjne w pełni zagwarantują wszystkie zadania określone w tabelicy 1 i przez formułę (1) w zakresie poprawy jakości energii elektrycznej i kompensacji mocy biernej.

Zasadniczy podział urządzeń kompensacyjnych bazujących na kondensatorach przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Podział urządzeń kompensacyjnych w których źródłem mocy biernej pojemnościowej są kondensatory energetyczne

Lp.	Kryterium podziału	Rodzaj urządzenia kompensacyjnego
1.	Napięcie zasilające	<ul style="list-style-type: none"> - niskich napięć: do 1kV - średnich napięć: do 30kV - wysokich napięć: do 110kV - najwyższych napięć: powyżej 110kV
2.	Częstotliwość	<ul style="list-style-type: none"> - o częstotliwości sieciowej (50Hz lub 60Hz) - o wyższych częstotliwościach niż sieciowa (np. do pieców indukcyjnych)
3.	Ze względu na ilość faz	<ul style="list-style-type: none"> - jednofazowe - trójfazowe
4.	Sposób regulacji – dostosowania mocy instalacji do zapotrzebowania sieci na moc bierną pojemnościową	<ul style="list-style-type: none"> - nieregulowane - załączane ręcznie - automatycznie załączane - automatycznie regulowane - regulacja stopniowa poprzez zastosowanie łączników tyrystorowych – systemy TSC - regulacja bezstopniowa <ul style="list-style-type: none"> - systemy SVC - systemy STATCOM
5.	Ochrona przed wyższymi harmonicznymi	<ul style="list-style-type: none"> - bez dławików - filtry odstrojone (baterie z dławikami w układzie ochronnym) - pasywne filtry wyższych harmonicznymi
6.	Warunki środowiskowe (miejsce zainstalowania)	<ul style="list-style-type: none"> - napowietrzne - wewnętrzne - wewnątrzono-napowietrzne
7.	Specjalne uwarunkowania środowiskowe	<ul style="list-style-type: none"> - specjalne wymagania klimatyczne (bardzo wysokie lub bardzo niskie temperatury, wysoka wilgotność, itp.) - wysokość ponad 1000m n.p.m. - podziemia kopalń - wysokie zapylenie - wyliewy chemiczne

Kondensatory energetyczne produkowane są jako jednostki niskich napięć oraz średnich napięć o napięciach znamionowych zazwyczaj nie przekraczających 12kV. W obu przypadkach mamy do dyspozycji jednostki jedno- i trójfazowe.

Jednostki kondensatorowe zazwyczaj nie są stosowane pojedynczo (za wyjątkiem niektórych form kompensacji indywidualnej). Zazwyczaj zabudowane są one w formie baterii kondensatorów.

Przykładowe baterie niskich napięć przedstawiono na fot. 1.



Fot. 1. Baterie kondensatorów niskich napięć ELMA energia

W przypadku baterii średnich napięć do 12kV, wykorzystywane są kondensatory trójfazowe (fot. 2) lub jednofazowe skojarzone w układ pojedynczej lub podwójnej gwiazdy (fot. 3).

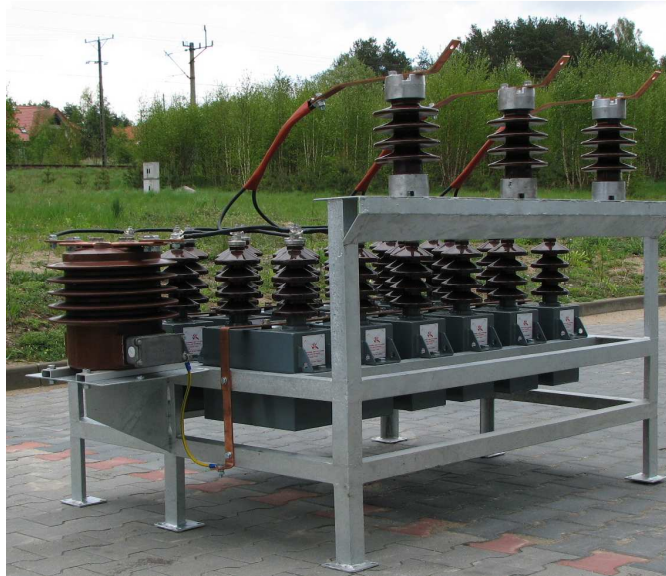


Fot. 2. Bateria kondensatorów BSCR-3 z trójfazowymi kondensatorami 6,3kV. Realizacja ELMA energia w ZG Lubin KGHM „Polska Miedź”



Fot. 3. Bateria kondensatorów 1,2MVar/6,3kV w układzie podwójnej gwiazdy z zabezpieczeniem zero-prądowym od zwarć wewnętrznych w ZGH Bolesław. Realizacja ELMA energia

Baterie kondensatorów o napięciu znamionowym od 12 do 21kV realizowane są z wykorzystaniem kondensatorów jednofazowych, zazwyczaj skojarzonych w układzie podwójnej gwiazdy bez wymogu dodatkowej izolacji (fot. 4).



Fot. 4. Bateria kondensatorów 1200kVar, 15,75kV w układzie podwójnej gwiazdy. Produkcja ELMA energia

Dla wyższych napięć i dużych mocy należy stosować baterie o określonej ilości grup szeregowych kondensatorów i określonej ilości jednostek równoległych w grupie (fot. 5, 6). Instalacje te, celem uzyskania właściwego poziomu izolacji względem ziemi, wymagają stosowania dodatkowych izolatorów.

Ponadto, aby zagwarantować pracę kondensatorów w warunkach znamionowych z punktu widzenia wytrzymałości izolacji, w bateriach tych stosuje się kondensatory z jednym izolatorem.



Fot. 5. Bateria kondensatorów 46MVar/38,5kV w Hucie „CELSA” Ostrowiec Św. Realizacja ELMA energia



Fot. 6. Wnętrzowa instalacja 35MVar/42kV w Hucie CMC Zawiercie. Realizacja ELMA energia

W zdecydowanej większości przypadków, urządzenia kompensacyjne wykonywane są jako trójfazowe. Dla takich odbiorów energii elektrycznej jak:

- zgrzewarki punktowe i liniowe (fot. 7),
- stacje prostownikowe trakcji elektrycznej (fot. 8),
- piece indukcyjne,

instalacje wykonywane są jako jednofazowe.



Fot. 7. Jednofazowy kompensator nadążny 400V do zgrzewarek. Produkcja ELMA energia (eksport do Indii)



Fot. 8. Jednofazowy filtr 3-ciej harmonicznej 6,3kV dla podstacji trakcyjnej. Produkcja ELMA energia (eksport do UK)

Baterie kondensatorów mogą być nieregulowane (włączone na stałe do sieci lub załączane wraz z kompensowanym odbiornikiem), załączane ręcznie lub automatycznie. Decyzję w sprawie wyboru rodzaju regulacji podejmuje zazwyczaj użytkownik instalacji. Należy zwrócić uwagę na fakt, że urządzenia automatyczne, przy rozwiniętym systemie telemechaniki i monitoringu, mogą być znacznie tańsze w eksploatacji niż baterie załączane ręcznie. Koszty inwestycyjne związane z wprowadzaniem regulacji automatycznej zwracają się w okresie od 1 do 3 miesięcy przy założeniu, że do nadzoru wartości $\text{tg}\phi$ wyznaczona jest jedna osoba. W przypadku odbiorów, sekcji stacji zasilających oraz stacji zasilających obciążonych praktycznie stałą mocą w określonych porach dnia i dniach tygodnia, regulacja ręczna może być w pełni uzasadniona.



Fot. 9. Nieregulowana bateria kondensatorów 6,3kV. Eksport „ELMA energia” do Singapuru



Fot. 10. Automatycznie regulowane baterie kondensatorów ACR 6,3kV w KWK Bogdanka. Realizacja „ELMA energia”

W przypadku odbiorów szybkodziennych, stosowane są dynamiczne systemy kompensacji nadążnej:

- systemy regulacji stopniowej TSC, w których rolę aparatury łączeniowej pełnią łączniki tyrystorowe,
- systemy SVC, składające się z włączonych na stałe do sieci baterii kondensatorów FC w układzie filtrów wyższych harmonicznych, oraz sterowanych tyrystorami dławików mocy TCR,
- systemy STATCOM.

Istotnym elementem decydującym o wyborze rodzaju zastosowanego urządzenia kompensacyjnego jest obecność w sieci wyższych harmonicznych prądu i napięcia oraz możliwość wystąpienia zjawisk rezonansowych w obwodzie: pojemność baterii kondensatorów – indukcyjność układu zasilającego. Szczególnie jest to ważne w przypadku baterii kondensatorów regulowanych automatycznie, których moc, w zależności od wykonania, może osiągać kilka lub nawet kilkanaście poziomów.

W przypadku, gdy wyeliminowana została możliwość wystąpienia zjawisk rezonansowych, a poziom wyższych harmonicznych nie spowoduje przeciążenia kondensatorów, instaluje się urządzenia kompensacyjne bez dławików. W przeciwnym wypadku, należy zastosować szeregowo 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 wyższych, 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 baterii przyjmowała wartość poniżej częstotliwości najniższej zarejestrowanej harmonicznej. 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). Filtry odstrojone stosuje się najczęściej w automatycznie regulowanych bateriach wieloczęstotliwościowych.

W pasywnych filtrach wyższych harmonicznych, częstotliwość rezonansowa zbliżona jest maksymalnie (z dokładnością na jaką pozwala tolerancja parametrów zastosowanych elementów LC) do częstotliwości filtrowanej harmonicznej. Najczęściej układ kompensacyjno-filtracyjny składa się z kilku filtrów pasywnych. W przypadku, gdy wyższe harmoniczne generowane są przez prostownik 6-cio pulsowy, układ kompensacyjny może obejmować filtry 5h, 7h, 11h, 13h.



Fot. 11. Odstrojony filtr 5-tej harmonicznej 6,3kV. Realizacja „ELMA energia” w Hucie Miedzi Głogów



Fot. 12. Filtr pasywny 3-tej harmonicznej 30kV. Realizacja „ELMA energia” w Hucie „Celsa” Ostrowiec Św.

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

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

Innym ważnym aspektem przy wyborze rodzaju urządzeń kompensacyjnych są warunki lokalowe. Zazwyczaj, przy lokalizacji urządzeń kompensacyjnych stara się wykorzystać istniejące pomieszczenia rozdzielni. W przypadku gdy jest to niemożliwe (szczególnie w przypadku baterii średnich, wysokich i najwyższych napięć), mogą one być wykonane jako napowietrzne lub wewnątrz-napowietrzne (np. człony kondensatorowe w wykonaniu napowietrzonym, pola regulacyjne w wykonaniu wewnętrznym).

Osobnym kryterium są specjalne uwarunkowania środowiskowe. Wykonania przewidują zastosowania dla bardzo wysokich lub bardzo niskich temperatur otoczenia, dla wysokości instalacji ponad 1000m n.p.m., dla podziemi kopalń (fot. 2), dla środowisk o wysokim stopniu zanieczyszczenia czy zapylenia.



Fot. 13. Bateria 5MVar/33kV dla specjalnych wymagań środowiskowych: klimat tropikalny, z daszkiem osłony od słońca i osłonami przed ptakami, montowana na słupach. Realizacja „ELMA energia” przed wysyłką do klienta.