# Skuteczna kompensacja mocy biernej

Polska wersja materiału Bajog electronic z uwagami redakcyjnymi.

Materiał archiwalny. Opisane przypadki, ceny, prognozy i odniesienia do norm dotyczą czasu powstania źródła. Nie stanowią aktualnej specyfikacji wszystkich produktów.

## Zarządzanie energią i jakością sieci

Gerd Bajog, dyrektor zarządzający i właściciel Bajog electronic GmbH, Pilsting.

Przedsiębiorstwo ocenia się nie tylko przez obrót, rentowność i zarządzanie jakością, ale również przez jego wpływ na środowisko. Oszczędzanie energii i optymalizacja sieci należą do ważnych zadań zarządzania.

Mimo starań dostawców jakość energii zależy od wielu czynników. Autor wiąże znaczący udział odbiorników nieliniowych, takich jak prostowniki i przemienniki, z harmonicznymi o częstotliwościach będących wielokrotnościami składowej podstawowej. W źródle wskazano udział około 15%; nie jest to uniwersalny próg występowania harmonicznych.

Obciążenia indukcyjne i pojemnościowe zwiększają moc pozorną potrzebną do przesyłania określonej mocy czynnej. Autor przywołuje wymagania dotyczące harmonicznych i migotania światła, zapisane w źródle jako EN 61 003 część 2 i 3. Zapis numeru jest nieprecyzyjny; nie należy go używać jako pełnej identyfikacji normy.

Programy środowiskowe i rosnące koszty energii skłaniają do świadomego zarządzania poborem. Dostawcy energii mogą wymagać kompensacji po przekroczeniu uzgodnionych parametrów i naliczać dodatkowe opłaty.

## Czy moc bierna jest bezużyteczna?

Moc bierna opisuje wymianę energii, która nie jest bezpośrednio przekształcana w pracę użyteczną. W cewce energia jest gromadzona w polu magnetycznym, a w kondensatorze w elektrycznym, po czym zwracana do obwodu.

Dla idealnej cewki w odpowiedniej części okresu energia jest magazynowana, a w kolejnych 90 stopniach okresu wraca do sieci. W modelu sinusoidalnym wymiana energii zachodzi z podwójną częstotliwością sieci. Odbiornik mocy czynnej przekształca energię w inne użyteczne formy.

Dla przebiegów sinusoidalnych współczynnik cos φ jest cosinusem kąta przesunięcia pomiędzy napięciem a prądem. Im bliższy jedności, tym większa część mocy pozornej odpowiada mocy czynnej. Przy przebiegach odkształconych całkowity współczynnik mocy wymaga także uwzględnienia harmonicznych.

Prąd bierny dodatkowo obciąża generatory, transformatory i przewody, zwiększa spadki napięcia oraz straty cieplne. Przedsiębiorstwa energetyczne określają dopuszczalne warunki rozliczeń i mogą naliczać opłaty za ich przekroczenie.

## Zapotrzebowanie na moc bierną

Do odbiorników wymagających mocy biernej należą silniki asynchroniczne, transformatory, przekształtniki sterowane i piece indukcyjne. W transformatorze część zapotrzebowania jest związana z magnesowaniem rdzenia. Dobre właściwości współczesnych blach ograniczają tę składową. Reaktancja rozproszenia sprawia jednak, że zapotrzebowanie przy pełnym obciążeniu może według autora być dwa do czterech razy większe niż na biegu jałowym.

Przekształtniki sterowane pobierają moc bierną związaną z magnesowaniem transformatora oraz komutacją zależną od obciążenia. Prąd wynikający z tej wymiany nakłada się na prąd związany z przesyłaniem energii czynnej.

Przykład autora: przesyłanie 400 kW w sieci trójfazowej przy 380 V i cos φ = 1 wymaga około 600 A. Przy tej samej mocy czynnej i cos φ = 0,5 potrzeba około 1200 A. Wartości są zaokrąglone. Większy prąd silniej obciąża urządzenia i linie.

Źródło wskazuje, że zapewnienie dodatkowej mocy pozornej wymaga odpowiednich zasobów wytwórczych i zwiększa koszty. Straty cieplne w przewodach i transformatorach rosną z kwadratem prądu, a większy prąd zwiększa też spadki napięcia.

## Kompensacja kondensatorami i rezonanse

Zamiast przesyłać moc bierną przez całą sieć, można dostarczać ją lokalnie z kondensatorów. Baterie umieszcza się możliwie blisko największych odbiorników indukcyjnych. Zmniejszenie przesunięcia fazowego poprawia cos φ.

Impedancja sieci i bateria kondensatorów tworzą obwód mogący wejść w rezonans równoległy. Przy określonych harmonicznych wzrost impedancji powoduje większe napięcie harmoniczne i prądy między siecią a kondensatorami. Skutkiem może być przeciążenie lub uszkodzenie instalacji.

Jednym z rozwiązań jest dołączenie dławika szeregowo z kondensatorem. Odpowiedni dobór przesuwa rezonans w bezpieczniejszy obszar. Artykuł omawia też strojenie obwodów do krytycznych harmonicznych na podstawie analizy sieci. Bateria dławikowana i filtr strojony pełnią odmienne zadania; dobór wymaga obliczeń dla konkretnej instalacji.

## Budowa układu kompensacji

Układy kompensacji występują w różnych wykonaniach i mocach. Mikroprocesorowy regulator mierzy przesunięcie napięcia i prądu, porównuje je z zadanym współczynnikiem mocy i wyznacza stopnie baterii, które należy załączyć.

Pomiar jednej fazy może być wystarczający w układzie trójfazowym o odpowiedniej symetrii lub niewielkiej asymetrii. W źródle wskazano wybór fazy o najmniej korzystnym współczynniku. Przy zmiennej asymetrii zaleca się osobną ocenę i kompensację poszczególnych faz.

Człon wykonawczy realizuje polecenia regulatora i dołącza baterię do sieci. W wersjach tradycyjnych stosuje się styczniki. Przy częstym przełączaniu lub dużej liczbie małych stopni styki szybko się zużywają. Tyrystory i triaki eliminują mechaniczne zużycie styków oraz związane z łukiem koszty obsługi.

Moc baterii dobiera się do wymaganej kompensacji. Wiele trójfazowych sekcji kondensatorów, połączonych w trójkąt, umożliwia stopniowanie mocy. Samoregenerujące kondensatory MKP wyposażono w rezystory rozładowcze. Gdy wymagane jest szybkie ponowne załączanie, stosuje się elementy przyspieszające

rozładowanie, określone w źródle jako dławiki rozładowcze. Napięcie przed kolejnym załączeniem musi odpowiadać wymaganiom elementów łączeniowych.

Regulator, człon wykonawczy i bateria mogą być zintegrowane w szafie lub wykonane jako rozwiązanie dostosowane do zamówienia. Autor opisuje urządzenia do 500 kvar oraz warianty centralnej kompensacji do 50 kvar z 32 stopniami, przeznaczone do precyzyjnego i szybkiego dopasowania.

## Załączanie bez niepożądanych zaburzeń

Bajog opisuje układy tyrystorowe ograniczające udary prądowe, niestabilność sieci i przeciążenia kondensatorów. Przy łączeniu stycznikowym prąd szczytowy może być ograniczony głównie impedancją obwodu; w źródle przywołano przepięcia ponad 1600 V.

Odpowiednio sterowane załączanie przy zminimalizowanej różnicy napięć ogranicza udary i łuk. Autor wskazuje zmniejszenie ryzyka przekompensowania i przepięć, brak rezystancji styków oraz małe zużycie. Wspomina możliwość zastosowania w obszarach zagrożonych wybuchem; takie zastosowanie wymaga właściwego wykonania i dokumentacji konkretnego urządzenia.

Podany przykładowy zakres regulacji to 0-200 kvar w czasie od 5 do 60 sekund, zależnie od ustawienia.

Indukcyjności i pojemności tworzą złożony obwód rezonansowy. Autor przywołuje przepięcia ponad 1300 V i próbę, w której impuls 2 kV o czasie 20 µs pomiędzy fazą a N/PE doprowadził do lokalnych wartości ±5 kV.

Wyładowania atmosferyczne, załączanie, wyłączanie i stany awaryjne mogą przez oddziaływanie zwrotne uszkadzać układy elektroniczne, filtry sterowane i baterie kompensacyjne. Producent wskazuje odpowiednie zabezpieczenie jako sposób ograniczenia tego ryzyka i zapewnienia prawidłowego ponownego uruchomienia regulatora po zaburzeniu.

Artykuł odsyła do materiałów Bajog o uszkodzeniach X2/Y2 i parametrach badań elementów pasywnych.

## Źródło i kontakt

Bajog electronic GmbH. Dokument źródłowy: DT_05_Compensation_new.pdf.

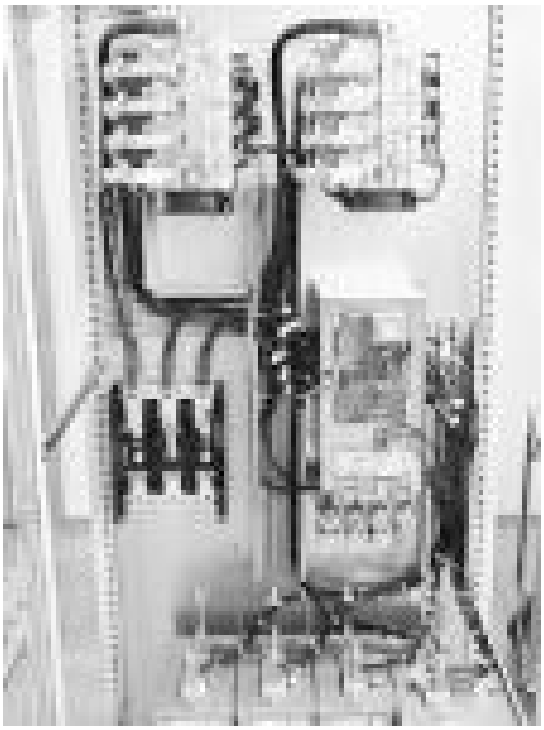
Polskie opracowanie: Maschek Polska. Pytania o dobór rozwiązań: s.stepa@maschekpolska.pl, tel. +48 663 365 904. www.maschekpolska.pl

## Ilustracje i pomiary źródłowe

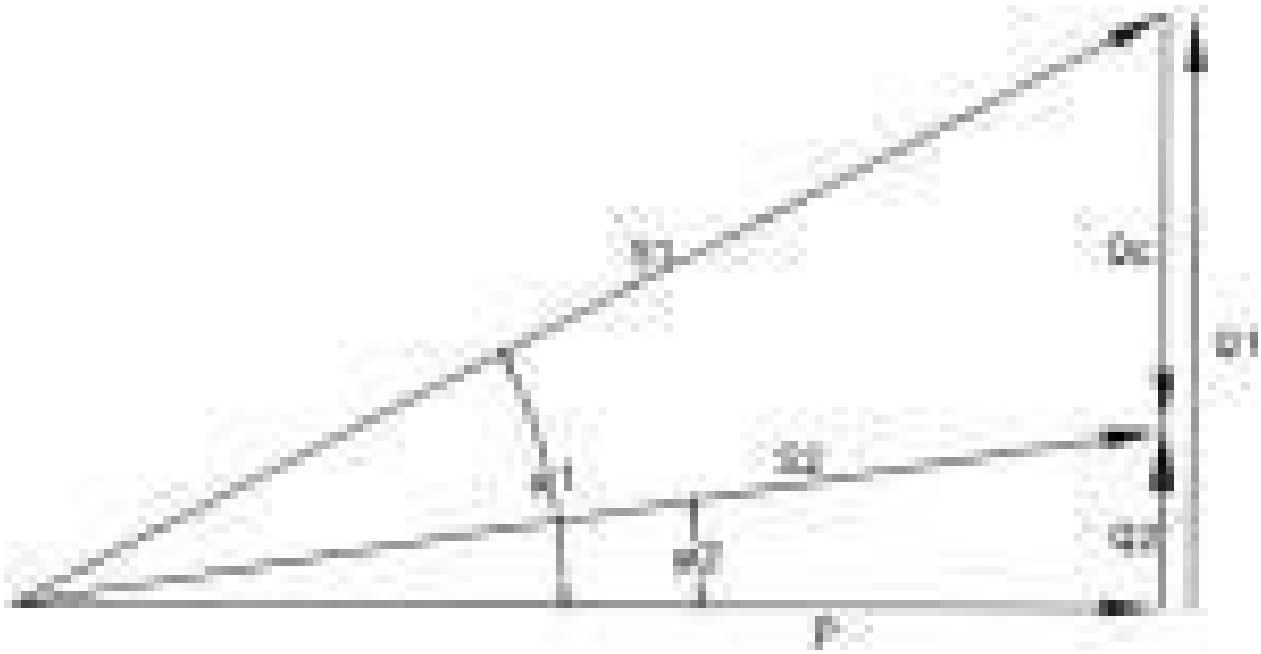
Ilustracje pochodzą z materiału producenta. Zachowano oryginalne ślady pomiarowe i oznaczenia przyrządów; polskie objaśnienia znajdują się pod ilustracjami.



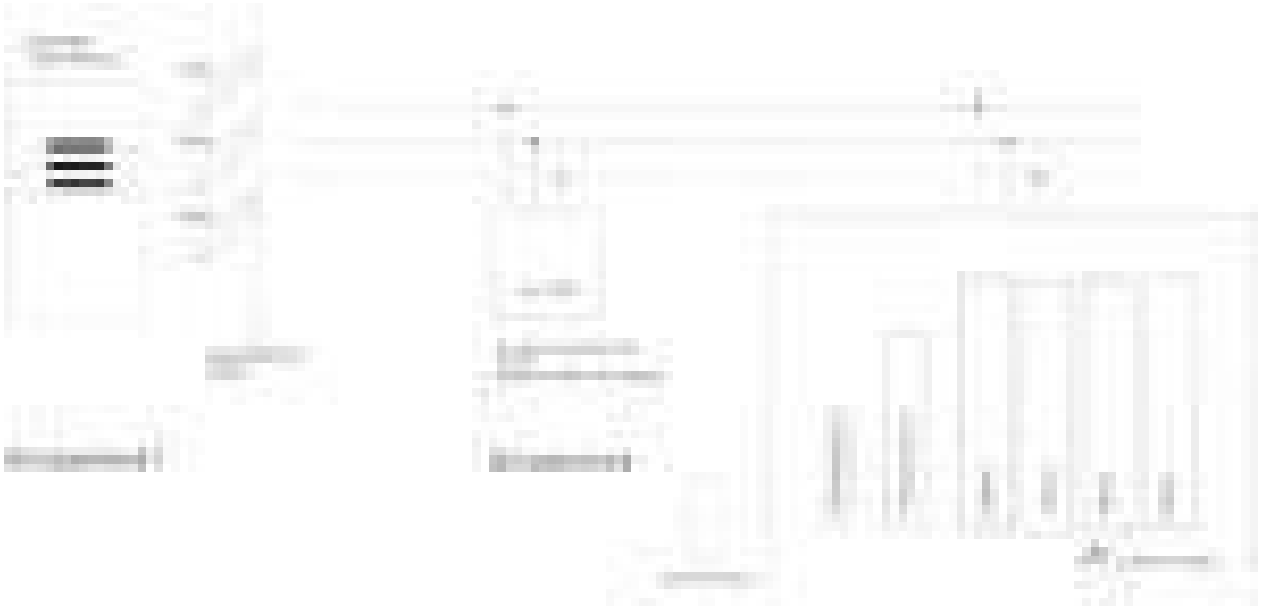
Przykładowe zespoły kompensacyjne.



Układ kompensacji zintegrowany w szafie.



Trójkąt mocy i określanie wymaganej kompensacji ze zmiany kąta przesunięcia. P - moc czynna; Q - bierna; S - pozorna; Qc - moc kompensacyjna.



Ilustracja zasady kompensacji mocy biernej z materiału producenta.