

Podręcznik kompensacji mocy biernej

Peter Riese

Opracowanie polskie: Jean Mueller Polska



Informacje - Tabele - Wzory
Wszystko o kompensacji mocy biernej dla
projektantów i użytkowników

Systemy kompensacji mocy biernej **FRAKO** w znacznym stopniu przyczyniają się do efektywności energetycznej i redukcji emisji CO₂ i dlatego są niezbędne w nowoczesnym zasilaniu w energię elektryczną.

Systemy kompensacyjne zwracają się w okresie krótszym niż rok do trzech lat przy obecnych standardowych taryfach zakładów energetycznych. Po tym czasie system kompensacyjny generuje zyski dla Państwa firmy miesiąc po miesiącu. Dlatego jest to szczególnie ekonomiczne, gdy systemy kompensacyjne mają długi przewidywany okres żywotności. Im dłużej pracują tym większe korzyści dla firmy! Systemy kompensacyjne **FRAKO** - a w szczególności stosowane tam kondensatory mocy - charakteryzują się wieloletnią żywotnością.

Kondensatory mocy **FRAKO** zawierają potrójne zabezpieczenie:

- Samoregenerująca się folia kondensatora dla ochrony przed gwałtownym wzrostem napięcia
- Segmentowa folia kondensatorów zapewnia najwyższe bezpieczeństwo eksploatacji
- Urządzenie zabezpieczające przed przeciążeniem bezpiecznie odłącza kondensator od sieci zasilającej w przypadku poważnego przeciążenia lub po zakończeniu okresu użytkowania.

Udział wyższych harmonicznych w naszych sieciach publicznych stale rośnie. Istotnym tego powodem są liczne zasilacze w komputerach PC, telewizorach, ECG i podobnych urządzeniach. Na podstawie dziesięcioleci doświadczeń w zakresie pomiarów sieci i planowania projektów systemów kompensacyjnych w trudnych warunkach nasi inżynierowie chętnie podejmą się analizy i oceny specyficznej sytuacji w Państwa firmie. Państwo we własnym zakresie dokonacie wyboru systemu kompensacji mocy biernej, który spełnia lokalne warunki. Pomoże przy tym parametr dużej obciążalności naszych kondensatorów mocy.

- Przeciążenie długotrwale do 2,7x prądu znamionowego (Heavy Duty)
- Wartości szczytowe prądu rozruchowego: do 450-krotności prądu znamionowego
- Temperatura otoczenia: do 65°C
- Żywotność: do 200 000 godzin
- do 100 000 operacji rocznie.

FRAKO posiada certyfikaty ISO 9001, ISO 14001 i ISO 50001. Jakość wytwarzanych produktów jest od wielu lat rejestrowana i dokumentowana w produkcji i w eksploatacji. Do oceny jakości stosowane są wewnętrzne **normy produktowe FRAKO**, które zawierają znacznie wyższe wymagania niż norma EN 60831. Tylko w ten sposób producent może trwale deklarować najwyższą jakość. Przy wytwarzaniu naszych produktów, ale także pod koniec ich cyklu eksploatacji, zwracamy szczególną uwagę na ochronę zasobów, efektywność energetyczną i ochronę środowiska.

Jakość naszych produktów i wiedza o ich zastosowaniu są podstawą ich optymalnego wykorzystania przez naszych klientów. Zadaniem niniejszego podręcznika skierowanego do czytelnika zainteresowanego omawianą w nim tematyką jest udokumentowanie podstaw technicznych, naszej filozofii produkcji i przyświecających nam celów. Powinien on zapewnić Państwu podstawową wiedzę w zakresie doboru, instalacji i zastosowania naszych systemów kompensacji mocy biernej.

Teningen, marzec 2012 r



Peter Herbst, Dyrektor Zarządzający
FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH

Spis treści

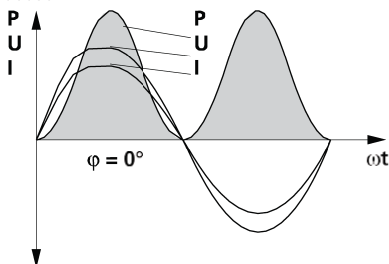
Podstawy	4
Moc czynna/moc czynna i bierna	4
Moc bierna/moc pozorna/współczynnik mocy ($\cos \varphi$)	5
Dlaczego stosuje się kompensację?	6
Rodzaje kompensacji	7
Kompensacja indywidualna	7
Kompensacja grupowa	7
Kompensacja centralna	8
Kompensacja mieszana	8
Określenie wymaganej mocy kondensatora	9
Taryfy opłat za energię elektryczną/wstępny kosztorys	9
Określenie wymaganej mocy kondensatora poprzez pomiar	10
Pomiar z rejestratorem mocy czynnej i biernej	11
Obliczenia na podstawie rachunku za energię elektryczną	13
Wdrożenia	14
Indywidualna/grupowa kompensacja lamp wyładowczych	14
Indywidualna kompensacja transformatorów/silników	16
Systemy regulacji mocy biernej	20
Współczynniki mocy	21
Kondensatory mocy	21
Regulatory mocy biernej	23
Instalacja	27
Przekładnik prądowy	27
Bezpieczniki i kable	28
Stopień ochrony	30
Wzory obliczeniowe dla kondensatorów	31
Składowe harmoniczne	32
Czym są składowe harmoniczne?	32
Jak powstają składowe harmoniczne?	34
Kiedy może wystąpić niebezpieczny rezonans sieciowy?	36
Wpływ konfiguracji sieci	37
Napięcie i obciążalność prądowa bezdławikowych systemów kompensacyjnych	37
Planowanie projektów w sieciach z wyższymi harmonicznymi	38
Środki zapobiegające powstawaniu rezonansów	39
Graniczne wartości składowych harmonicznych	40
Projektowanie w sieciach z systemami kontroli częstotliwości akustycznych	41
Wpływ bezdławikowych systemów kompensacji	42
Wpływ dławikowych systemów kompensacji	43
Wersje dławikowych systemów kompensacji	44
Monitorowanie systemów kompensacji w trakcie eksploatacji	45
Aktywne filtry składowych harmonicznych	46
Zasada działania aktywnego filtra wyższych harmonicznych	47
Zastosowanie	47
"Działania" zapobiegające składowym harmonicznym	48

Zanim przejdziemy do bardziej szczegółowego planowania projektów systemów kompensacji mocy biernej, należy odświeżyć podstawową wiedzę z zakresu elektrotechniki.

Moc czynna

Przy czysto rezystancyjnym obciążeniu, bez komponentów indukcyjnych lub pojemnościowych, np. w systemie ogrzewania elektrycznego, punkty przejścia krzywych napięcia i prądu przez 0 pokrywają się (Rys. 1). Napięcie i prąd są w "fazie". Z iloczynu chwilowych wartości napięcia

(U) i prądu (I) można obliczyć krzywą mocy (P). Ma dwukrotnie większą częstotliwość sieci i jest w pełni w zakresie dodatnim, ponieważ iloczyn dwóch liczb ujemnych jest również dodatni.



W naszym przypadku:

$$(-U) \cdot (-I) = (+P).$$

"Moc czynna to część mocy przekształconej w postać nieelektryczną (np. ciepło, światło, moc mechaniczna) i zarejestrowana przez licznik".

Dla obciążeń czysto rezystancyjnych oblicza się je z iloczynu skutecznych wartości napięcia [U] i prądu [I]:

$$P = U \cdot I$$

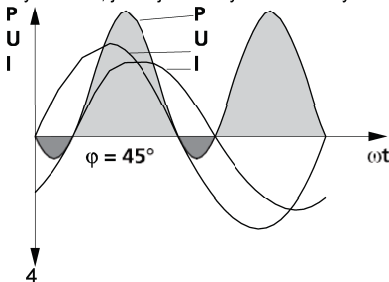
$$[W] [V] [A]$$

Rys. 1: Napięcie, prąd i moc przy czystym obciążeniu rezystancyjnym ($\varphi = 0^\circ$)

Moc czynna i bierna

W praktyce zwykle nie występuje czysto rezystancyjne obciążenie, ale dochodzi dodatkowy element indukcyjny. Dotyczy to wszystkich obciążeń, które do działania wymagają pola magnetycznego, np. silników asynchronicznych z urządzeniami rozruchowymi, transformatorów etc. Przetwornice mocy wymagają również mocy biernej do komutacji. Prąd używany do wytwarzania i odwracania pola magnetycznego nie jest zużywany, ale oscyluje tam i z powrotem pomiędzy generatorem a odbiorcą jako prąd bierny.

Jak pokazano na rys. 2, punkty przejścia napięcia i prądu przez 0 nie pokrywają się już ze sobą. Nastąpiło przesunięcie fazowe. Przy obciążeniu indukcyjnym prąd jest opóźniony względem napięcia, przy obciążeniu pojemnościowym wypredza napięcie. Jeżeli teraz oblicza się chwilowe wartości mocy według (U) - (I) = (P), wartości ujemne są zawsze uzyskiwane, jeżeli jeden z tych dwóch czynników staje się ujemny.



Jako przykład wybrano przesunięcie fazowe $\varphi = 45^\circ$. Odpowiada to indukcyjnemu $\cos \varphi$ 0,707. Krzywa mocy jest częściowo ujemna. W tym przypadku moc czynna obliczana jest ze wzoru:

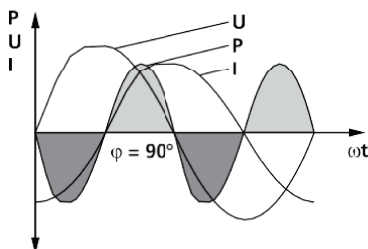
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$[W] [V] [A]$$

Rys. 2: Napięcie, prąd i moc przy obciążeniu rezystancyjnym i indukcyjnym ($\varphi = 45^\circ$)

Moc bierna

Indukcyjna moc bierna występuje w silnikach i transformatorach w trybie biegu jałowego, z wyjątkiem strat liniowych, strat przemagnesowania i ewentualnie strat wynikających z tarcia. Można mówić o prawie czysto pojemnościowej mocy biernej kondensatorów mocy FRAKO, ponieważ mają one bardzo niskie straty ($< 0,05\%$)



Rys. 3: Napięcie, prąd i moc przy czystym obciążeniu indukcyjnym ($\varphi = 90^\circ$)

Jeśli krzywe napięcia i prądu są przesunięte względem siebie o 90° , krzywa mocy jest w połowie dodatnia a w połowie ujemna (Rys. 3) Moc czynna wynosi 0, ponieważ powierzchnie dodatnie i ujemne znoszą się nawzajem.

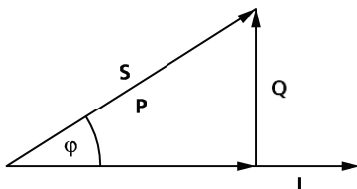
"Moc bierna to moc, która oscyluje pomiędzy generatorem a odbiorcą w cyklu częstotliwości sieci zasilającej w celu wytworzenia bądź zmniejszenia pola magnetycznego lub elektrycznego".

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

[Var] [V] [A]

Moc pozorna

Moc pozorna ma decydujące znaczenie dla obliczeń w sieci elektrycznej. Generatory, transformatory, rozdzielnice, bezpieczniki i przekroje linii muszą być zwymiarowane pod kątem występującej mocy pozornej.



Rys. 4: Trójkąt mocy

"Moc pozorna jest iloczynem napięcia i prądu uzyskiwanego bez uwzględniania przesunięcia fazowego".

$$S = U \cdot I$$

[VA] [V] [A]

Moc pozorna wynika z geometrycznej sumy mocy czynnej i biernej:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

[VA] [W] [var]

Współczynnik mocy ($\cos \varphi$ oraz $\tan \varphi$)

Cosinus ($\cos$) kąta przesunięcia fazowego (φ) pomiędzy prądem i napięciem pozwala na prostą konwersję elementów czynnych i pozornych dla mocy, napięcia i prądu. W praktyce termin "współczynnik mocy" stał się już powszechny.

Dla maszyn elektrycznych współczynnik mocy obowiązujący przy pełnym obciążeniu jest zazwyczaj podany na tabliczce znamionowej.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{[W]}{[VA]}$$

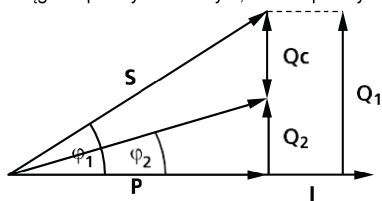
Tangens ($\tan$) kąta przesunięcia fazowego (φ) umożliwia prostą konwersję jednostek czynnych i biernych.

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{[var]}{[W]}$$

Cosinus i tangens tworzą następującą zależność:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \quad \text{lub:} \quad \tan \varphi = \frac{1}{\cos \varphi} - 1$$

Ponieważ sieć elektryczna musi być zaprojektowana pod kątem mocy pozornej, dokłada się starań, aby utrzymać ją na jak najniższym poziomie. Jeśli kondensatory dołącza się odbiorcom równolegle, prąd bierny oscyluje pomiędzy kondensatorem a obciążeniem. Pozostała część sieci nie podlega już żadnym dodatkowym obciążeniom. Jeżeli kompensacja osiąga współczynnik mocy 1, w sieci przesyłany jest tylko prąd czynny.



Moc bierna Q_C zużywana przez kondensator wynika z różnicy pomiędzy indukcyjną mocą bierną Q_1 przed kompensacją i Q_2 po kompensacji, tzn. jest:
 $Q_C = Q_1 - Q_2$.

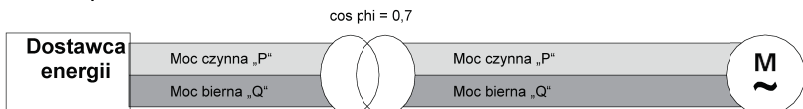
$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

[Var] [W]

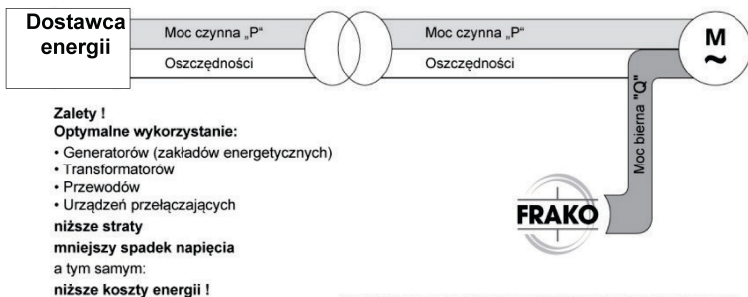
Rys.5: Schemat mocy z kompensacją

Dlaczego stosuje się kompensację?

Prąd bierny oscylujący w obu kierunkach pomiędzy generatorem (elektrownią) a odbiorcą jest zamieniany w sieci na ciepło. Tym samym generatory, transformatory, kable i urządzenia łączeniowe są dodatkowo obciążone. Występują straty i spadki napięcia. Przy wysokim udziale prądu biernego zainstalowane przekroje poprzeczne nie mogą być w pełni wykorzystane do przesyłu energii lub muszą mieć większe wymiary. Z punktu widzenia zakładów energetycznych (operatorów sieci przesyłowych) koszty inwestycji i utrzymania sieci przesyłowej wzrastają, gdy współczynnik mocy jest niski. Tymi dodatkowymi kosztami obciążany jest sprawca tej sytuacji a konkretnie odbiorca prądu o słabym współczynniku mocy. Dlatego instaluje się obok licznika energii czynnej także i ten, który mierzy energię bierną.



Rys.6: Moc czynna i bierna w sieci przesyłowej: bez kompensacji

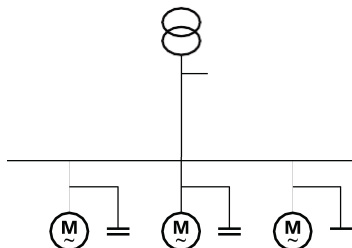


Rys.7: Moc czynna i bierna w sieci przesyłowej z kompensacją

// Rodzaje kompensacji

Kompensacja indywidualna

W najprostszym przypadku do każdego odbiornika indukcyjnego równolegle podłączony jest kondensator o odpowiedniej pojemności. Zapewnia to pełne odciążenie przewodów, w tym przewodu zasilającego użytkownika. W tym celu przyjmuje się, że kondensator jest używany tylko w okresie, w którym dana maszyna jest w eksploatacji. Ponadto, nie zawsze jest łatwo umieścić kondensatory bezpośrednio przy maszynach, które mają być kompensowane (problemy z przestrzenią, koszty montażu).



Rys.8: Przykład kompensacji indywidualnej

Zastosowanie:

- do kompensacji mocy biernej transformatorów biegu jałowego
- do napędów pracujących w trybie ciągłym
- do napędów z krótkimi lub długimi przewodami zasilającymi

Zalety:

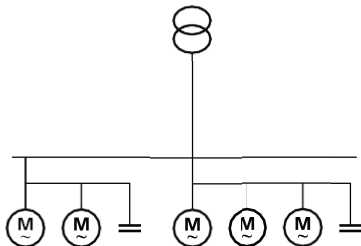
- sieć wewnętrzna jest w pełni odciążona od prądu biernego
- niski koszt na jednostkę [kVar]

Wady:

- kompensacja jest rozłożona na całą eksploatację
- duży nakład pracy związany z instalacją
- wymagana jest ogólnie większa moc kondensatora, ponieważ współczynnik równocześnieści jest brany pod uwagę

Kompensacja grupowa

Maszyny, które są zawsze załączone razem, mogą być zgrupowane i kompensowane razem. Zamiast kilku małych kondensatorów instalowany jest jeden kondensator lub bateria o odpowiednich parametrach.



Rys.9: Przykład kompensacji grupowej

Zastosowanie:

- dla kilku odbiorów indukcyjnych, jeżeli są one zawsze eksploatowane razem

Zalety:

- podobne jak w przypadku kompensacji indywidualnej, ale bardziej ekonomiczne

Wady:

- mogą być używane tylko przez grupy użytkowników, którzy zawsze działają w jednym czasie

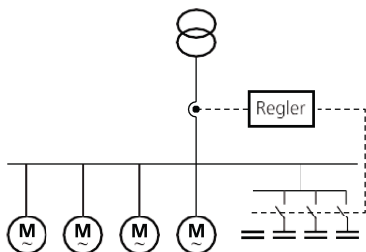
Kompensacja centralna

Cała kompensacja odbywa się w centralnym punkcie baterii, np. w głównej rozdzielni nn. Obejmuje to całe zapotrzebowanie na moc bierną. Moc baterii jest podzielona na kilka stopni przełączania i dostosowana do warunków obciążenia.

Obecnie podejście to jest wdrażane w większości przypadków. Centralnie umieszczona kompensacja może być łatwo monitorowana. Nowoczesne regulatory mocy biernej umożliwiają ciągłe monitorowanie stanu przełączania, $\cos \varphi$ oraz prądów czynnego i biernego, jak również składowych harmonicznym występujących w sieci. Zwykle wystarcza mniejsza moc całkowita kondensatorów, ponieważ w konstrukcji można uwzględnić współczynnik jednoczesności pracy całej baterii. Zainstalowana moc kondensatora jest lepiej wykorzystana. Jednakże prąd bierny nie odciąża samej sieci wewnętrznej, co nie stanowi mankamentu przy wystarczającym przekroju poprzecznym.

Zastosowanie:

- sieć wewnątrz-zakładowa



Rys.10: Przykład kompensacji centralnej

Zalety:

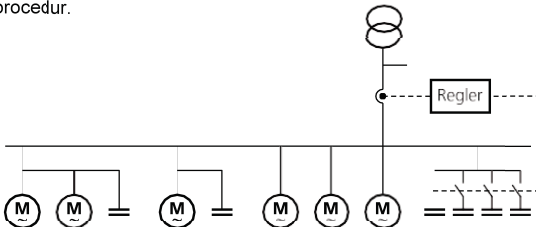
- przejrzysta koncepcja
- dobre wykorzystanie zainstalowanej mocy kondensatora
- w większości przypadków łatwiejsza instalacja
- mniejsza moc kondensatora, z uwagi na współczynnik jednoczesności
- bardziej opłacalne w przypadku sieci zawierających wyższe harmoniczne, ponieważ systemy są kompensowane dławikami

Wady:

- sieć wewnętrzna nie jest odciążana
- dodatkowe koszty związane z automatyczną regulacją

Kompensacja mieszana

Z ekonomicznego punktu widzenia często korzystne jest połączenie trzech opisanych powyżej procedur.



Rys.11: Przykład mieszanej kompensacji

Określenie wymaganej mocy kondensatora

Taryfy opłat za energię elektryczną

Co do zasady, stałe taryfy zakładu energetycznego mają zastosowanie do mniejszych odbiorców energii elektrycznej, podczas gdy specjalne/indywidualne umowy zawierane są z dużymi odbiorcami.

W przypadku większości kontraktów koszty energii elektrycznej składają się z wielu komponentów:

- Moc [kW] - mierzona licznikiem maksymalnym, np. maksymalna miesięczna średnia z 15 minut.
- Energia czynna [kWh] - mierzona za pomocą licznika prądu czynnego, w większości stawki dzienne i nocne oddzielnie.
- Energia bierna [kVarh] - mierzona licznikiem prądu biernego, niektóre taryfy dzienne i nocne są oddzielne.

W przypadku taryf cenowych koszty energii biernej są zazwyczaj obliczane tylko wtedy, gdy przekracza ona 50% uzyskanej energii czynnej. Odpowiada to współczynnikowi mocy $\cos \varphi = 0,9$. Nie ma wymogu, aby wartość nigdy nie spadła poniżej 0,9. Jako podstawę przyjmuje się współczynnik mocy w średniej miesięcznej. W niektórych zakładach energetycznych wymagane są również inne współczynniki mocy, np. 0,85 lub 0,95.

W przypadku innych taryf moc nie jest obliczana w [kW], lecz w [kVA]. Koszty energii biernej są następnie wliczane w cenę usługi. W celu optymalnej redukcji kosztów należy w tym przypadku przyjąć współczynnik mocy $\cos \varphi = 1$. Ogólnie rzecz biorąc, można założyć, że przy prawidłowo zwymiarowanej kompensacji można całkowicie zaoszczędzić koszty poniesione na energię bierną.

Przybliżony szacunek

Poniżej podano dokładne informacje na temat tego, w jaki sposób można określić wymaganą moc kondensatora. Czasami jednak pożądane jest, aby wcześniej znać rząd wielkości. Mogą wystąpić również sytuacje, w których dokładnie obliczono, ale nie ma pewności, czy gdzieś wkradł się błąd w założeniach. Wówczas, poprzez oszacowanie można następnie sprawdzić na ile obliczony wynik mieści się w tym zakresie.

Konsument/odbiorca	Moc kondensatora
→ silniki o kompensacji indywidualnej	→ 35 - 40% mocy znamionowej silnika
→ transformatory c kompensacji indywidualnej	→ 2.5% mocy transformatora → 5% dla starszych transformatorów
→ kompensacja centralna	→ 25 - 33% mocy transformatora przy docelowym $\cos \varphi = 0,9$ → 40 - 50% mocy transformatora przy docelowym $\cos \varphi = 1$

Tabela 1: Wartości szacunkowe dla wymaganej mocy kondensatora

Sporządzenie listy konsumentów/odbiorców

Przy budowie nowego zakładu lub nowej sekcji zakładu wymagane jest wstępne oszacowanie. Bardziej precyzyjny obraz zapewni lista konsumentów/odbiorców przewidzianych do przyłączenia oraz ich danych elektrycznych, z uwzględnieniem współczynnika jednoczesności. W przypadku wątpliwości, kompensacja powinna być zawsze planowana i realizowana w taki sposób, aby późniejsza modyfikacja była możliwa bez większego wysiłku. Przewody zasilające lub gniazda bezpiecznikowe do kompensacji powinny być zaprojektowane z myślą o rozbudowie, dodatkowo należy zapewnić rezerwę miejsca na dodatkowe moduły kondensatorów.

Określenie wymaganej mocy kondensatora poprzez pomiar

Pomiar natężenia prądu i współczynnika mocy

Amperomierze i mierniki współczynnika mocy są często instalowane w rozdzielnicach głównej. Równie dobrze mogą być używane przyrządy pomiarowe cęgowo. Pomiary wykonywane są w głównym przewodzie zasilającym (np. zasilanie z transformatora) lub w przewodzie zasilającym urządzenia kompensowanego. Jednoczesny pomiar napięcia sieciowego poprawia dokładność obliczeń. Można również po prostu założyć wartość napięcia znamionowego (np. 380 lub 400V).

Moc czynną P można obliczyć na podstawie zmierzonych wartości napięcia U , prądu pozornego I_s i współczynnika mocy:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3}$$

[kW] [V]

Po określeniu pożądanej docelowej wartości $\cos \varphi$, moc kondensatora można obliczyć za pomocą poniższego wzoru. Łatwiej jest jednak przyjąć współczynnik " f " z tabeli 2 (patrz strona 13) i pomnożyć go przez obliczoną moc czynną.

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi - \frac{\tan \varphi}{\cos \varphi})$$

[Var] [W]

lub:

$$Q_c = P \cdot f$$

[Var] [W]

Przykład:

- Wartość prądu pozornego I_s : 248A
- Współczynnik mocy $\cos \varphi$ rzeczyw.: 0,86
- Wymagany $\cos \varphi$: 0,92
- Napięcie U : 397V

Obliczenia:

$$P = \sqrt{3} \cdot 397 \cdot 248 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3}$$

$$P = 146,6 \text{ kW}$$

Zaczerpnij z tabeli 2:

Współczynnik " f " = 0,17

Wymagana moc kondensatora:

$$Q_c = 146,6 \cdot 0,17 = \underline{24,9 \text{ kVar}}$$

Uwaga:

Pomiar, jak opisano powyżej, będzie oczywiście dawał tylko wartości chwilowe. Współczynniki obciążenia mogą się znacznie różnić w zależności od pory dnia i pory roku. Pomiar powinien być zatem przeprowadzony przez osobę wykwalifikowaną znającą cykl pracy urządzeń. Należy wykonać kilka pomiarów i upewnić się, że obciążenia, które mają być skompensowane są cały czas włączone. Zmierzone wartości należy również szybko odczytywać - w miarę możliwości wszystkie urządzenia jednocześnie - tak aby nagle wahania obciążenia nie fałszowały wyniku.

Pomiar z rejestratorem mocy czynnej i biernej

Bardziej wiarygodne wyniki można osiągnąć za pomocą urządzeń pomiarowych z opcją zapisu. Wartości mogą być rejestrowane w dłuższym okresie czasu. Moc kondensatora jest obliczana w następujący sposób

Q_C = wymagana moc kondensatora

Q_L = zmierzona moc bierna

P = zmierzona moc czynna

$$Q_C = Q_L - (P \cdot \tan \varphi_2)$$

[Var] [Var] [W]

$\tan \varphi_2$ = pożądanemu $\cos \varphi$ odpowiadający $\tan \varphi$

(można zaczerpnąć z tabeli 2, np dla $\cos \varphi = 0,92$ odpowiadający $\tan \varphi = 0,43$)

Pomiar przez odczyt z liczników

Liczniki prądu czynnego i biernego są odczytywane na początku pracy. 8 godzin później oba liczniki są ponownie odczytywane. W przypadku przerwy pomiędzy odczytami, czas 8 godzin musi zostać przedłużony o czas przerwy.

BZ1 = odczyt licznika prądu biernego, odczyt początkowy

BZ2 = Odczyt licznika prądu biernego, odczyt końcowy

WZ1 = odczyt licznika prądu czynnego,

odczyt początkowy WZ2 = odczyt licznika

prądu czynnego, odczyt końcowy

$$BZ_2 - BZ_1 = \tan \varphi$$

$$WZ_2 - WZ_1$$

Przy wartości $\tan \varphi$ obliczonej w ten sposób i docelowym $\cos \varphi$, współczynnik "f" odczytywany jest z tabeli 2.

"k" jest relacją przełożenia licznik-przekładnik prądowy. Wynikiem tego jest wymagana moc kondensatora:

$$Q_C = \frac{(WZ_2 - WZ_1) \cdot k}{8} \cdot f$$

Przykład:

Odnótowano następujące odczyty licznika:

- Licznik prądu czynnego (WZ1) ... 115,3
(WZ2) ... 124,6
- Licznik prądu biernego (BZ1) ... 311,2
(BZ2) ... 321,2

Liczniki pracują z przekładnikami prądowymi 150/5A, dlatego należy wziąć pod uwagę współczynnik przekładnika prądowego $k = 30$.

Obliczenia:

$$\frac{321,2 - 311,2}{8}$$

$$\tan \varphi = \frac{124,6 - 115,3}{8} = 1,08$$

Dla docelowego $\cos \varphi = 0,92$, współczynnik "f" jest odczytywany z 0,55.

Moc kondensatora wynosi:

$$Q_C = \frac{(124,6 - 115,3) \cdot 30 \cdot 0,65}{8} = 22,67 \text{ kVar}$$

Tabela 2: Współczynnik „f” ($f = \tan \varphi$ rzeczyw. - $\tan \varphi$ wymagany)

aktualny $\tan \varphi$	$\cos \varphi$	docelowy wymagany $\cos \varphi$				← indukcyjnie (i) →			← pojemnościowo (c) →			
		0,80i	0,85i	0,90i	0,92i	0,95i	0,98i	1,00	0,98c	0,95c	0,92c	0,90c
3,18 ↔ 0,30		2,43	2,56	2,70	2,75	2,85	2,98	3,18	3,38	3,51	3,61	3,66
2,96 ↔ 0,32		2,21	2,34	2,48	2,53	2,63	2,76	2,96	3,16	3,29	3,39	3,45
2,77 ↔ 0,34		2,02	2,15	2,28	2,34	2,44	2,56	2,77	2,97	3,09	3,19	3,25
2,59 ↔ 0,36		1,84	1,97	2,11	2,17	2,26	2,39	2,59	2,79	2,92	3,02	3,08
2,43 ↔ 0,38		1,68	1,81	1,95	2,01	2,11	2,23	2,43	2,64	2,76	2,86	2,92
2,29 ↔ 0,40		1,54	1,67	1,81	1,87	1,96	2,09	2,29	2,49	2,62	2,72	2,78
2,16 ↔ 0,42		1,41	1,54	1,68	1,73	1,83	1,96	2,16	2,36	2,49	2,59	2,65
2,04 ↔ 0,44		1,29	1,42	1,56	1,61	1,71	1,84	2,04	2,24	2,37	2,47	2,53
1,93 ↔ 0,46		1,18	1,31	1,45	1,50	1,60	1,73	1,93	2,13	2,26	2,36	2,41
1,83 ↔ 0,48		1,08	1,21	1,34	1,40	1,50	1,62	1,83	2,03	2,16	2,25	2,31
1,73 ↔ 0,50		0,98	1,11	1,25	1,31	1,40	1,53	1,73	1,94	2,06	2,16	2,22
1,64 ↔ 0,52		0,89	1,02	1,16	1,22	1,31	1,44	1,64	1,85	1,97	2,07	2,13
1,56 ↔ 0,54		0,81	0,94	1,07	1,13	1,23	1,36	1,56	1,76	1,89	1,98	2,04
1,48 ↔ 0,56		0,73	0,86	1,00	1,05	1,15	1,28	1,48	1,68	1,81	1,91	1,96
1,40 ↔ 0,58		0,65	0,78	0,92	0,98	1,08	1,20	1,40	1,61	1,73	1,83	1,89
1,33 ↔ 0,60		0,58	0,71	0,85	0,91	1,00	1,13	1,33	1,54	1,66	1,76	1,82
1,27 ↔ 0,62		0,52	0,65	0,78	0,84	0,94	1,06	1,27	1,47	1,59	1,69	1,75
1,20 ↔ 0,64		0,45	0,58	0,72	0,77	0,87	1,00	1,20	1,40	1,53	1,63	1,68
1,14 ↔ 0,66		0,39	0,52	0,65	0,71	0,81	0,94	1,14	1,34	1,47	1,56	1,62
1,08 ↔ 0,68		0,33	0,46	0,59	0,65	0,75	0,88	1,08	1,28	1,41	1,50	1,56
1,02 ↔ 0,70		0,27	0,40	0,54	0,59	0,69	0,82	1,02	1,22	1,35	1,45	1,50
0,99 ↔ 0,71		0,24	0,37	0,51	0,57	0,66	0,79	0,99	1,19	1,32	1,42	1,48
0,96 ↔ 0,72		0,21	0,34	0,48	0,54	0,64	0,76	0,96	1,17	1,29	1,39	1,45
0,94 ↔ 0,73		0,19	0,32	0,45	0,51	0,61	0,73	0,94	1,14	1,26	1,36	1,42
0,91 ↔ 0,74		0,16	0,29	0,42	0,48	0,58	0,71	0,91	1,11	1,24	1,33	1,39
0,88 ↔ 0,75		0,13	0,26	0,40	0,46	0,55	0,68	0,88	1,08	1,21	1,31	1,37
0,86 ↔ 0,76		0,11	0,24	0,37	0,43	0,53	0,65	0,86	1,06	1,18	1,28	1,34
0,83 ↔ 0,77		0,08	0,21	0,34	0,40	0,50	0,63	0,83	1,03	1,16	1,25	1,31
0,80 ↔ 0,78		0,05	0,18	0,32	0,38	0,47	0,60	0,80	1,01	1,13	1,23	1,29
0,78 ↔ 0,79		0,03	0,16	0,29	0,35	0,45	0,57	0,78	0,98	1,10	1,20	1,26
0,75 ↔ 0,80	-	0,13	0,27	0,32	0,42	0,55	0,75	0,95	1,08	1,18	1,23	
0,72 ↔ 0,81	-	0,10	0,24	0,30	0,40	0,52	0,72	0,93	1,05	1,15	1,21	
0,70 ↔ 0,82	-	0,08	0,21	0,27	0,37	0,49	0,70	0,90	1,03	1,12	1,18	
0,67 ↔ 0,83	-	0,05	0,19	0,25	0,34	0,47	0,67	0,88	1,00	1,10	1,16	
0,65 ↔ 0,84	-	0,03	0,16	0,22	0,32	0,44	0,65	0,85	0,97	1,07	1,13	
0,62 ↔ 0,85	-	-	0,14	0,19	0,29	0,42	0,62	0,82	0,95	1,05	1,10	
0,59 ↔ 0,86	-	-	0,11	0,17	0,26	0,39	0,59	0,80	0,92	1,02	1,08	
0,57 ↔ 0,87	-	-	0,08	0,14	0,24	0,36	0,57	0,77	0,90	0,99	1,05	
0,54 ↔ 0,88	-	-	0,06	0,11	0,21	0,34	0,54	0,74	0,87	0,97	1,02	
0,51 ↔ 0,89	-	-	0,03	0,09	0,18	0,31	0,51	0,72	0,84	0,94	1,00	
0,48 ↔ 0,90	-	-	-	0,06	0,16	0,28	0,48	0,69	0,81	0,91	0,97	
0,46 ↔ 0,91	-	-	-	0,03	0,13	0,25	0,46	0,66	0,78	0,88	0,94	
0,43 ↔ 0,92	-	-	-	-	0,10	0,22	0,43	0,63	0,75	0,85	0,91	
0,40 ↔ 0,93	-	-	-	-	0,07	0,19	0,40	0,60	0,72	0,82	0,88	
0,36 ↔ 0,94	-	-	-	-	0,03	0,16	0,36	0,57	0,69	0,79	0,85	
0,33 ↔ 0,95	-	-	-	-	-	0,13	0,33	0,53	0,66	0,75	0,81	
0,29 ↔ 0,96	-	-	-	-	-	0,09	0,29	0,49	0,62	0,72	0,78	
0,25 ↔ 0,97	-	-	-	-	-	0,05	0,25	0,45	0,58	0,68	0,73	
0,20 ↔ 0,98	-	-	-	-	-	-	0,20	0,41	0,53	0,63	0,69	
0,14 ↔ 0,99	-	-	-	-	-	-	0,14	0,35	0,47	0,57	0,63	
0,00 ↔ 1,00	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,33	0,43	0,48	

Obliczenia na podstawie rachunku za energię elektryczną

Moc kondensatora można stosunkowo łatwo i z dużą dokładnością określić na podstawie miesięcznego rachunku za energię elektryczną od zakładu energetycznego. Jeżeli zużycie energii elektrycznej jest stałe przez cały rok, jako podstawę można wykorzystać rozliczenie roczne lub miesięczne (ale nie dokładnie to, w którym przypada na okres urlopowy w trakcie którego firma nie pracuje). Jeśli występują wahania sezonowe, należy oczywiście wybrać fakturę z głównego czasu pracy. Jeśli taryfy dzienne i nocne (DT i NT) są mierzone oddzielnie, do obliczeń zwykle wykorzystuje się wartości DT. Można założyć, że moc kondensatora jest wystarczająca do pokrycia przypadającego na okres nocy prądu biernego. Jednak w szczególnych przypadkach, w których energia elektryczna zużywana jest głównie w porze nocnej, nie wolno zaniedbywać wartości NT.

Taryfa cen roboczych energii

W przypadku taryfy obejmującej ceny robocze energii oddzielnie fakturowana jest

- Moc zapewniona (udostępniona)
- Energia czynna
- Energia bierna.

W większości umów udział energii biernej dla 50% energii czynnej pozostaje bez naliczania. Tylko to, co wykracza poza ten pułap, musi być uregulowane. Odpowiada to w przybliżeniu $\cos \varphi$ 0,9. Zaleca się jednak stosowanie nieco wyższej wartości do obliczeń, np. 0,92, w celu uzyskania pewnej rezerwy mocy dla mocy kondensatora.

Przykład obliczeń, wartości z rachunku za energię elektryczną:

- Moc czynna 99 kW
- Energia czynna (DT) 17820 kWh
- Energia bierna (DT) 19245 kVarh

$$\tan \varphi = \frac{\text{Energia bierna (DT)}}{\text{Energia czynna (DT)}} = \frac{19245 \text{ kVarh}}{17820} = 1,08$$

Rzeczywistą wartość dla $\cos \varphi$ można teraz pobrać z tabeli 2. Dla obliczonego $\tan \varphi$ z 1,08 wynika $\cos \varphi_1$ z 0,68.

Dla **docelowego $\cos \varphi_2 = 0,92$** w tabeli 2 odczytywany jest współczynnik „f” wynoszący **0,65**. Wymagana moc kondensatora obliczana jest z:

Moc czynna x współczynnik „f”

$$99 \text{ kW} \cdot 0,65 = 64,35 \text{ kvar}$$

W tym przypadku należy wybrać moc kondensatora 75 kvar. W celu uwzględnienia ewentualnego zwiększenia eksploatacji można również wybrać nieco wyższą moc wyjściową (np. 100 kvar)

Taryfa bazująca na kosztach mocy

W tym przypadku zakład energetyczny jako podstawę do naliczania opłat stosuje maksymalną wartość mocy przypadającą na okres jednego miesiąca. Jeżeli nie jest obliczana moc czynna, ale moc pozorna, zaleca się zaprojektowanie mocy kondensatora dla docelowego współczynnika $\cos \varphi$ wynoszącego 1.

Przykład obliczeń, wartości z rachunku za energię elektryczną:

- Moc czynna maksymalna 104 kW
- $\cos \varphi_1$ 0,62

$$\frac{\text{Moc czynna maksymalna}}{\cos \varphi} = \frac{104 \text{ kW}}{0,62} = 168 \text{ kVA}$$

Dla wartości rzeczywistej $\cos \varphi_1=0,62$ i wartości docelowej $\cos \varphi_2 = 1$, tabela 2 przedstawia współczynnik „f” równy 1,27.

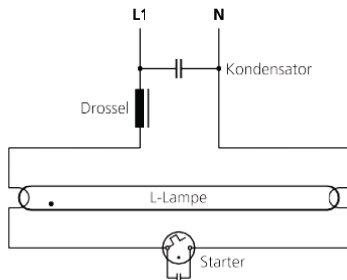
Wymagana moc kondensatora obliczana jest z:

$$\text{Moc czynna} \times \text{współczynnik „f”} = 104 \text{ kW} \cdot 1,27 = 132,08 \text{ kvar}$$

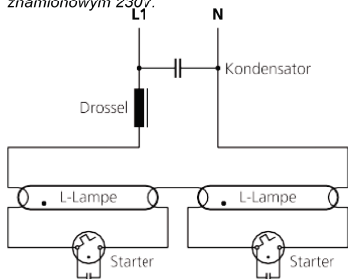
Odpowiednia do tego celu jest bateria kondensatorów o mocy 150 do 175kVar sterowana regulatorem.

Zastosowania

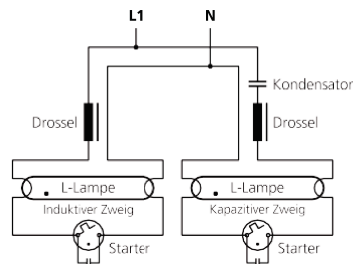
Indywidualna kompensacja lamp wyładowczych



Rys.12: Pojedynczy obwód, kondensator jest podłączony równolegle do lampy, np. LPM (kondensator równoległy) o napięciu znamionowym 230V.



Rys.13: Połączenie szeregowe (połączenie tandemowe), kondensator jest podłączony równolegle do lamp, np. LPM o napięciu znamionowym 230V.



Rys.14: Połączenie typu Duo, kondensator jest podłączony szeregowo z lampami, np. LPMI (kondensator szeregowy)

Lampy wyładowcze muszą być zasilane statecznikami ograniczającymi prąd. Transformatory rozproszeniowe są stosowane głównie do niskociśnieniowych lamp sodowych, wszystkie pozostałe lampy wyładowcze są wyposażone w dławiki jako stateczniki. Dzięki temu cos ϕ dla dławików wynosi $\sim 0,5$ i około $0,3$ dla transformatorów rozproszeniowych. **Stateczniki elektryczne do świetlówek nie wymagają żadnej kompensacji.**

Ważne: Ze względu na nieliniowy pobór prądu należy spodziewać się problemów wynikających z oscylacji wyższych harmonicznych, szczególnie w przypadku dużej liczby lamp (patrz temat składowe harmoniczne).

Kondensatory jednofazowe mogą być łączone równolegle lub szeregowo w celu kompensacji stateczników indukcyjnych.

W przypadku **indywidualnego połączenia** z jedną lampą i **szeregowego połączenia** dwóch lamp (połączenie tandemowe), kondensator jest podłączony **równolegle** z lampą, napięcie znamionowe kondensatora (230 V) jest równe napięciu sieciowemu.

Ważne: Sieciowe kondensatory równoległe tworzą obwód oscylujący z biernymi impedancjami sieciowymi. Może to wzmocnić drgania wyższych harmonicznych i zniszczyć urządzenia sterujące częstotliwością akustyczną (patrz oddzielny temat).

Szczególnie ekonomiczny **obwód podwójnego łączenia** wymaga tylko jednego kondensatora na dwie lampy. Jedno odgałęzienie jest pozostawione jako indukcyjne, podczas gdy drugie jest kompensowane pojemnościowo. Kondensator musi być zaprojektowany na wyższe napięcie znamionowe (450 V) ze względu na wzrost napięcia spowodowany **szeregowym podłączeniem** indukcyjności i pojemności.

Zakłócenia wywołane rezonansem, takie jak w przypadku kondensatorów połączonych równoległe, nie występują. Ponadto poprawia się ogólnie pulsacja poszczególnych lamp i unika się efektów stroboskopowych możliwych podczas eksploatacji obracających się (części) maszyn.

Z tego powodu zalecane jest połączenie szeregowo kondensatora i statecznika (dławika).

Tabela doboru dla lamp wyładowczych

Tabela przedstawia odpowiedni kondensator dla każdego typu lampy.

Ważne: do stateczników o niskiej stratności stosowane są kondensatory szeregowo o mniejszych pojemnościach niż podane w tabeli. Wartości mogą się różnić w zależności od producenta lampy. Decydująca jest zawsze wartość pojemności podana na dławiku.

Najczęściej spotykane kondensatory szeregowo do stateczników o niskich stratach:

18 W	2,7 µF / 480 V	
36 W	3,4 µF / 450 V	3,5 µF / 450 V
58 W	5,3 µF / 450 V	5,4 µF / 450 V

Moc lamp w [W]	Kon. równ. Poj. w [µF]	Kon. szereg. Poj. w [µF]
-------------------	------------------------------	--------------------------------

Jarzeniówki

4 do	16 2,0 / 230 V	-
18 do 20	4,5 / 230 V	2,9 / 450 V
36 do 40	4,5 / 230 V	3,6 / 450 V
58 do 65	7,0 / 230 V	5,7 / 450 V

Lampy metalohalogenkowe

35	6,0 / 230 V	-
70	12,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
250	32,0 / 230 V	-
400	35,0 / 230 V	-
1000	85,0 / 230 V	-
2000	60,0 / 380 V	-
3500	100,0 / 380 V	-

Moc lamp w [W]	Kon. równ. Poj. w [µF]	Kon. szereg. Poj. w [µF]
-------------------	------------------------------	--------------------------------

Lampy rtęciowe wysokoprężne

50	7,0 / 230 V	
80	8,0 / 230 V	-
125	10,0 / 230 V	-
250	18,0 / 230 V	-
400	25,0 / 230 V	-
700	40,0 / 230 V	-
1000	60,0 / 380 V	-

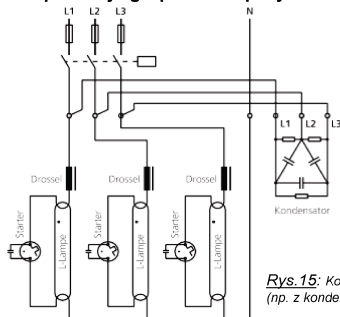
Lampy sodowe niskoprężne

18	5,0 / 230 V	
35	20,0 / 230 V	-
55	20,0 / 230 V	-
90	25,0 / 230 V	-
135	45,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
180	40,0 / 230 V	-

Lampy sodowe wysokoprężne

50	8,0 / 230 V	
70	12,0 / 230 V	-
100	12,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
250	32,0 / 230 V	-
400	50,0 / 230 V	-
1000	100,0 / 230 V	-

Kompensacja grupowa lamp wyładowczych



Jeżeli kilka lamp wyładowczych jest załączanych jednocześnie, można zastosować wspólny trójfazowy kondensator grupowy o napięciu znamionowym 440 V z symetrycznym rozdziałem.

Moc kondensatora:

$$Q_C = n \cdot C \cdot 0,015$$

Q_C = moc kondensatora w kVar

n = liczba lamp, podzielona na trzy fazy

C = pojemność równoległa na 1 lampę w [µF]

Przykład: 24 świetlówki po 58 W każda

$$24 \cdot 7 \mu F \cdot 0,015 = 2,52 \text{ kVar}$$

Rys. 15: Kompensacja grupowa kilku trójfazowych dzielonych lamp wyładowczych (np. z kondensatorem mocy LKT z akcesoriami).

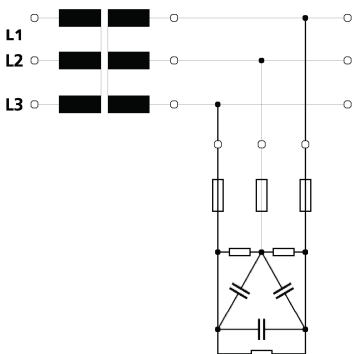
Indywidualna kompensacja transformatorów

Wytyczne zakładów energetycznych dotyczące dopuszczalnej wielkości kondensatorów podłączonych na stałe do transformatora różnią się w zależności od regionu. Dlatego zaleca się skonsultowanie się z odpowiednim rejonem energetycznym przed zainstalowaniem takiej kompensacji. Transformatory o nowoczesnej konstrukcji posiadają płyty rdzeniowe, które do ponownego namagnesowania wymagają małej mocy. Jeśli moc kondensatora jest zbyt duża, może dojść do wzrostu napięcia podczas pracy jałowej.

Dobrze nadają się baterie kondensatorów wyposażone w rozłącznik bezpiecznikowy. Przy podłączaniu kondensatorów z rozłącznikami bezpiecznikowymi bezpośrednio do zacisków transformatora należy pamiętać, że przewód zasilający kondensator musi być zaprojektowany dla pełnej mocy zwarciowej.

Moc znamionowa transformatora [kVA]	Moc kondensatora [kVar]
100 – 160	2,5
200 – 250	5,0
315 – 400	7,5
500 – 630	12,5
800	15,0
1000	20,0
1250	25,0
1600	35,0
2000	40,0

Tabela 3: Wartości orientacyjne dla indywidualnej kompensacji transformatorów zgodnie z VDEW



Rys.16: Przykład stałej kompensacji transformatora

Bateria kondensatorów może być podłączona bezpośrednio do zacisków transformatora. Przewód zasilający kondensator musi być zaprojektowany na pełną moc zwarciową.

Ważne: Rozłączniki bezpiecznikowe pracują przy obciążeniu czysto pojemnościowym. Aby uniknąć powstania łuku elektrycznego nigdy nie należy ich rozłączać pod obciążeniem.

Jeśli ma być możliwe odłączenie kondensatora nawet przy włączonym transformatorze, należy zastosować kondensator mocy z wyłącznikiem automatycznym.

Indywidualna kompensacja silników

Moc kondensatora powinna odpowiadać około 90% mocy pozornej silnika na biegu jałowym.

Wymagana moc kondensatora:

$$Q_c = 0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I_0$$

[Var] [V] [A]

I_0 = prąd biegu jałowego silnika

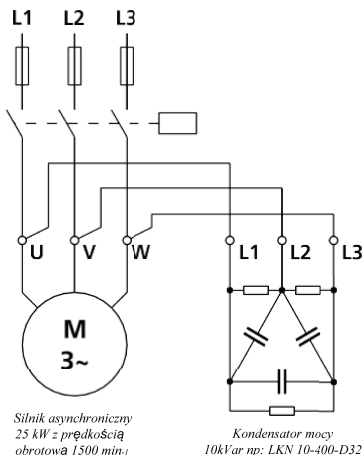
W ten sposób przy pełnym obciążeniu osiągany jest współczynnik mocy wynoszący około 0,9, a przy biegu jałowym 0,95 - 0,98. Zgodnie z zaleceniami VDEW, wartości orientacyjne w tabeli 4 dotyczą silników asynchronicznych z 1500 [obr/min]. Dla silników z 1000 min-1 wartość w tabeli powinna być zwiększona o 5%, dla silników z 750 [obr/min] o 15%.

Moc znamionowa silnika [w kW]	Moc kondensatora [w kVar]
1 do 1,9	0,5
2 do 2,9	1,0
3 do 3,9	1,5
4 do 4,9	2,0
5 do 5,9	2,5
6 do 7,9	3,0
8 do 10,9	4,0
11 do 13,9	5,0
14 do 17,9	6,0
18 do 21,9	7,5
22 do 29,9	10,0
30 do 39,9	ok. 40% mocy silnika
od 40	ok. 35% mocy silnika

Tabela 4: Wartości orientacyjne dla indywidualnej kompensacji silników zgodnie z VDEW

Ważne: W przypadku maszyn kompensowanych indywidualnie, gdzie kondensator jest bezpośrednio podłączony do zacisków silnika, moc kondensatora nie może być nigdy zbyt wysoka. Jest to szczególnie ważne, gdy maszyna posiada duże koła zamachowe i nadal pracuje po wyłączeniu. Kondensator równoległy może pobudzić maszynę jako generator i mogą wystąpić niebezpieczne przepięcia. Może dojść do uszkodzenia zarówno kondensatora, jak i silnika.

W najprostszym przypadku kondensator jest podłączony bezpośrednio do zacisków silnika. Nie ma potrzeby stosowania specjalnego bezpiecznika dla kondensatora, ponieważ bezpiecznik silnika chroni również kondensator. W przypadku zainstalowania wyłącznika silnikowego zaleca się skorygowanie prądu zadziałania do niższej wartości.



Rys.17: Przykład stałej kompensacji silnika

Zredukowany prąd zadziałania:

$$I_{th} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \cdot I_N$$

I_{th} = nastawiony
prąd zadziałania [w A]

I_N = prąd znamionowy
silnika wg. tabliczki znamionowej

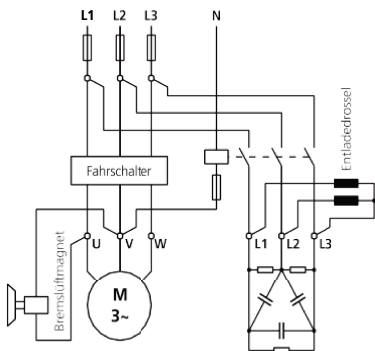
w [A] $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_{zg}$ zgodnie z

tabliczką znamionową

$\cos \varphi_2 = \cos \varphi$ z kompensacją (ok. 0,95)

Ze względu na niską rezystancję uzwojenia silnika, kondensator rozładowuje się bezpośrednio, rezystory rozładowcze nie są wymagane.

Indywidualna kompensacja wind i urządzeń dźwigowych



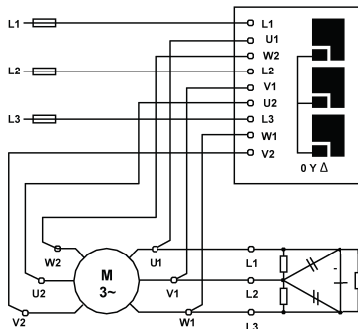
Rys.18: Silnik windy z własnym stycznikiem kondensatorowymi urządzeniem do szybkiego rozładowania

Windy i wciągarki współpracują z urządzeniami bezpieczeństwa, np. z magnesem zwalniającym hamulec, który w przypadku awarii zasilania szybko go uruchamia. Kondensator podłączony równolegle do silnika może spowolnić lub całkowicie uniemożliwić wyhamowanie urządzenia ze względu na pozostałą w nim energię. Dlatego kondensatory mogą być instalowane tylko **przed urządzeniami łącznikowymi**. Dla kondensatora należy zastosować oddzielny stycznik z urządzeniem do szybkiego rozładowania. Szybkie rozładowanie może być realizowane albo przez dławik podłączony bezpośrednio do kondensatora lub przez rezystory rozładowcze przełączane za pomocą stycznika.

Blokada po stronie sterowania musi zapobiegać ponownemu załączeniu kondensatora przed upływem czasu rozładowania.

Ze względu na częstotliwość przełączania i związane z tym zużycie stycznika zaleca się stosowanie stopni kondensatorów z przełącznikami elektronicznymi. Kondensatory są załączane i wyłączane przy przejściu przez 0, dzięki czemu można realizować czasy reakcji w zakresie milisekund.

Przełącznik gwiazda-trójkąt



Przy zastosowaniu trójfazowych kondensatorów mocy należy wybrać ręcznie obsługiwane przełączniki gwiazda-trójkąt w wersji przeznaczonej do przełączania silników z indywidualną kompensacją.

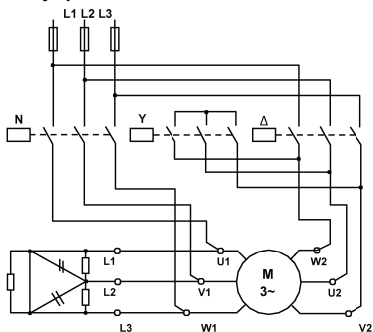
Mostki kontaktowe muszą być zaprojektowane w taki sposób, aby podczas przełączania z gwiazdy na trójkąt **nie** występowały krótkie przerwy.

Powoduje to powstanie zbyt dużych prądów przeładowania które mogą spowodować uszkodzenie zarówno kondensatora jak i przełącznika.

Jeśli przełącznik znajduje się w pozycji zerowej (wyłączony), mostek gwiazdy nie może być zamknięty, aby kondensator nie był zwarty.

*Rys.19: Ręcznie obsługiwany przełącznik gwiazda-trójkąt
Wersja specjalna dla silników z indywidualną kompensacją*

Kombinacje styczników gwiazda-trójkąt



*Rys.20: Pojedynczo skompensowany silnik
ze stycznikiem gwiazda-trójkąt*

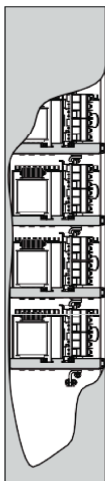
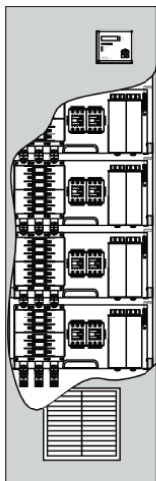
W przypadku kombinacji stycznika gwiazda-trójkąt, tak jak w przypadku przełączników gwiazda-trójkąt, należy zapewnić, aby podczas przełączania nie występowały krótkie przerwy, tzn. stycznik sieciowy musi pozostać załączony. Gdy silnik jest wyłączony, mostek do układu gwiazdy musi być otwarty. Kondensator może być podłączony do wyjścia stycznika sieciowego lub do zacisków U1

- V1 - W1 silnika, ale nie do zacisków W2 - U2 - V2, gdzie byłby zwarty przez mostek do układu gwiazdy.

Ważne: Moc kondensatora nigdy nie może być zbyt wysoka. Jest to szczególnie ważne, gdy maszyna posiada duże koła zamachowe i nadal pracuje po wyłączeniu. Kondensator równoległy może pobudzić maszynę jako generator i mogą wystąpić niebezpieczne przepięcia. Może dojść do uszkodzenia zarówno kondensatora, jak i silnika. Z tego powodu przy rozruchu gwiazda-trójkąt należy unikać sytuacji, w której mostek do układu gwiazdy pozostaje zamknięty, w stanie rozłączonym. Jeśli maszyna jest wzbudzana jako generator w układzie gwiazdy, należy spodziewać się nawet wyższych napięć niż w połączeniu w układzie trójkąt.

Systemy regulacji mocy biernej

Systemy regulacji mocy biernej składają się z następujących elementów:



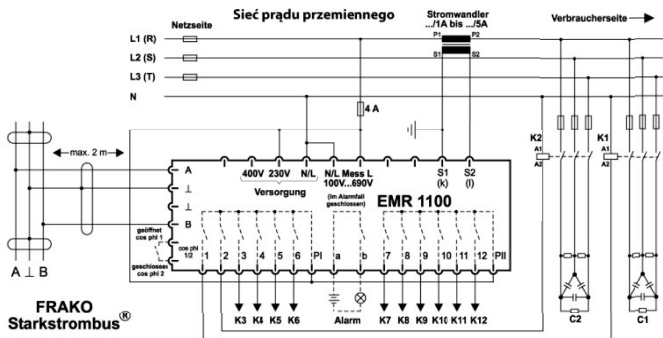
- regulator mocy biernej
- stopnie kondensatorów uruchamiane przez stycznik lub przełącznik elektroniczny
- dławiki filtrujące, jeśli to konieczne
- w razie potrzeby eliminatory szeregowo częstotliwości akustycznych
- wkładki bezpiecznikowe
- dla systemów dławikowych z wentylatorem filtrującym sterowanym termostatem

Komponenty mogą być montowane na płycie montażowej lub jeśli wymagana jest rozbudowa w technologii modułowej, w szafie rozdzielczej.

System sterowania mocą bierną jest stosowany w sieciach o stale zmieniającym się zapotrzebowaniu na moc bierną. Moc kondensatora jest podzielona na kilka stopni przełączania i dostosowana do obciążenia przez automatyczny sterownik mocy biernej za pomocą styczników lub przełączników elektronicznych.

Centralnie umieszczona kompensacja może być łatwo monitorowana. Nowoczesne regulatory mocy biernej pozwalają na ciągłe monitorowanie stanu przełączania, $\cos \varphi$ oraz prądów czynnego i biernego, jak również składowych harmonicznym zawartych w sieci.

W większości przypadków wystarcza mniejsza moc całkowita kondensatorów, ponieważ w konstrukcji można uwzględnić współczynnik jednoczesności całego układu. Zainstalowana moc kondensatorów jest wykorzystana optymalnie.



Rys. 22: Przykład przełączania systemu sterowania mocą bierną

Charakterystyka działania

Kondensatory mocy

Kondensatory firmy **FRAKO** serii LKT nie zawierają związków PCB. Posiadają dielektryk samoregenerujący się. Jeśli w wyniku przeciążenia lub przepięcia dochodzi do przebicia, wówczas zwój ulega samoczynnej regeneracji. Dodatkowo, jako dodatkowy środek bezpieczeństwa, każdy kondensator posiada niezawodnie działający wewnętrzny bezpiecznik, który reaguje na wzrost ciśnienia wewnątrz obudowy.

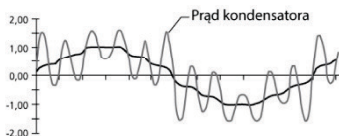
Trzy główne aspekty istotne dla prawidłowej pracy kondensatorów mocy w sieciach energetycznych:

- **wysoka obciążalność,**
- **wysoka oczekiwana długość eksploatacji oraz**
- **wysokie bezpieczeństwo** w przypadku przeciążenia

Kondensatory mocy są komponentami o bardzo wysokiej gęstości mocy. **Obecnie w 1l objętości zawiera się około 16 kVar mocy biernej!** Osiąga się to dzięki bardzo niskiemu współczynnikowi strat i wysokiemu wykorzystaniu dielektryka. W celu osiągnięcia długiej żywotności, częściowe wyładowania (wyładowania elektryczne wewnątrz dielektryka) muszą być tłumione.

Obciążalność prądowa

W sieciach obciążonych wyższymi harmonicznymi, należy liczyć się przy wystąpieniu rezonansu z przepięciami i przede wszystkim z dużym obciążeniem prądowym.



Jeżeli np. w sieci występuje 11. harmoniczna przy 8% napięcia znamionowego sieci, wartość skuteczna napięcia sieciowego wzrasta tylko o około 0,3%, ale prąd w kondensatorach odpowiada już 1,33-krotności jego prądu znamionowego. Dlatego też wysoka obciążalność prądowa jest parametrem ważniejszym od obciążalności napięciowej.

Przy napięciu sieciowym 400V, firma **FRAKO** używa wyłącznie kondensatorów mocy o napięciu znamionowym co najmniej 440V. Ich dopuszczalna obciążalność prądowa wynosi

- do 2,2-krotności prądu znamionowego w sposób ciągły oraz
- do 300-krotności prądu znamionowego przy krótkotrwałych skokach prądu.

Obciążalność napięciowa

Kondensatory mocy firmy **FRAKO** wytrzymują przepięcia zgodnie z EN 60831-1 i -2 oraz IEC 831-1 i -2 wg tabeli:

Napięcie znamionowe	300 V	400 V	440 V	480 V	525 V	615 V
8 h dziennie	330 V	440 V	484 V	528 V	578 V	677 V
30 min dziennie	345 V	460 V	506 V	552 V	604 V	707 V
5 min dziennie	360 V	480 V	528 V	576 V	630 V	738 V
1 min dziennie	390 V	520 V	572 V	624 V	683 V	800 V

Żywotność

Przebiecia, podwyższona temperatura i składowe harmoniczne skracają oczekiwany okres użytkowania. Tylko przestrzeganie najsurowszych wymagań przy produkcji i jakości użytych materiałów zapobiega pogorszeniu współczynnika strat, a tym samym zmniejszeniu wytrzymałości dielektrycznej i obciążalności prądowej. Ciągłe próby napięciowe w bardzo trudnych warunkach testowych (1,5-krotność napięcia znamionowego, temperatura otoczenia 60°C, wysokie obciążenie wyższymi harmonicznymi) są stale przeprowadzane przy użyciu kondensatorów z bieżącej produkcji. Strata pojemności jest znacznie poniżej 1%, wskaźnik awaryjności jest znikomy, a współczynniki strat pozostają stabilne na bardzo niskim poziomie.

Szacowaną żywotność naszych kondensatorów mocy LKT oceniamy na 100.000 do 170.000 godzin pracy w zależności od typoszeregu.

Bezpieczeństwo po zakończeniu okresu użytkowania

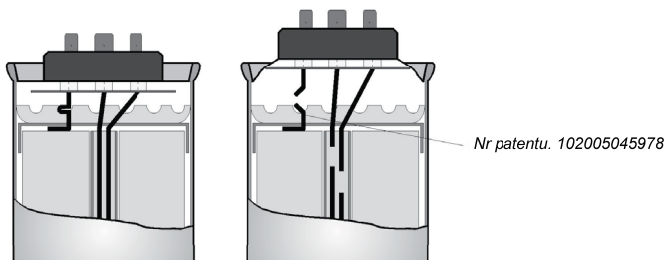
Oczywiście uwzględnia to również fakt, że w przypadku przeciążenia kondensatora i po upływie przewidywanej jego żywotności, nie ma zagrożenia dla systemów i obsługi. Takie bezpieczeństwo mogą zapewnić jedynie nowoczesne kondensatory mocy z odłącznikiem, który:

- reaguje na wzrost ciśnienia wewnątrz obudowy kondensatora
- odłącza kondensator od sieci elektrycznej
- zapobiega zniszczeniu obudowy

Ze względu na wysoką gęstość mocy nowoczesnych kondensatorów, firma **FRAKO** wykorzystuje najbardziej złożony i efektywny odłącznik automatyczny, kołnierzową pokrywę membranową.

Aluminiowa obudowa i pokrywa są razem zawalcowane i klejone elastycznym materiałem uszczelniającym. Kołnierzowa pokrywa membranowa bezpiecznie utrzymuje część łączącą w prawidłowym położeniu podczas normalnej pracy. Przy nadciśnieniu ok. 3 barów wewnątrz kondensatora pokrywa wybrzusza się na zewnątrz i osiąga skok około 10 mm znacznie poniżej zakresu ciśnienia krytycznego! W większości przypadków przewody przyłączeniowe są odłączane od sieci w sposób bezpieczny i bez zapłonu wstecznego przy skoku już ok. 5 mm. Funkcja ta jest monitorowana w firmie **FRAKO** w testach typu i regularnych testach losowych. Warunki badania są określone w normie EN 60831-2.

Kondensatory mocy firmy **FRAKO** oferują zatem wysokie bezpieczeństwo w przypadku przeciążenia i po zakończeniu okresu użytkowania!



Rys. 23: Rysunek przedstawia funkcję bezpiecznika nadciśnieniowego na kondensatorze mocy firmy **FRAKO**.

Regulator mocy biernej



Sterowane mikroprocesorowe regulatory mocy biernej EMR 1100, EMR 1100 S i RM 9606

firmy **FRAKO** rozwiązują złożone zadania, które wykraczają daleko poza czystą kontrolę mocy biernej do wstępnie wybranego wstępnie docelowego $\cos \phi$. Innowacyjna charakterystyka sterowania rozwiązuje wszystkie wymagania nowoczesnych sieci przemysłowych i sprawia, że sterowniki te mają uniwersalne zastosowanie.

Należy podkreślić wysoką dokładność i czułość, nawet w sieciach z wyższymi harmonicznymi, jak również kontrolę ciągłego lub sporadycznego sprzężenia zwrotnego w sieciach z własną generacją energii.

Wszystkie elementy systemu kompensacji są precyzyjnie obsługiwane przez te sterowniki i zabezpieczone przed przeciążeniem. Wydłuża to znacznie żywotność systemu

Rys.24: Regulator mocy biernej EMR 1100

Szczegółowa charakterystyka:

- **Precyzyjny pomiar $\cos \phi$ nawet w sieciach o wysokich harmonicznym od 0,02 A do 5 A w obwodzie pomiarowym.**

Poprzez dokładny pomiar współczynnika mocy składowej podstawowej, nawet przy bardzo małych prądach pomiarowych, można regulować $\cos \phi$ bardzo precyzyjnie

- **Zachowanie żądanej wartości $\cos \phi$ jako wartości minimalnej przy jednoczesnym uniknięciu przekompensowania przy niskim obciążeniu.**

Tą przeciwną cechą regulacji uzyskuje się dzięki opatentowanej charakterystyce sterowania. Zapewnia to kompensację wybranego współczynnika mocy przy normalnym obciążeniu sieciowym oraz uniknięcie często problematycznego przekompensowania w warunkach niskiego obciążenia.

- **Pomiar i monitorowanie wyższych harmonicznych w sieciach niskiego napięcia (5., 7., 11. i 13. harmoniczna).** Dzięki temu monitorowaniu operator będzie stale poinformowany o jakości sieci i w odpowiednim czasie otrzyma powiadomienia o przekroczeniu wartości granicznych. Umożliwia to podjęcie odpowiednich środków na wczesnym etapie w celu przeciwdziałania pojawiającym się zakłóceniom w funkcjonowaniu sieci i zakłóceniom w funkcjonowaniu konsumentów/odbiorców.

- **Rozłączenie przy przekroczeniu mocy umownej w układach bezdławikowych**

Funkcja ta służy jako zabezpieczenie przeciążeniowe dla bezdławikowych systemów kompensacji i chroni cały układ elektryczny przed rezonansem. Wyłączenie następuje, gdy ustawiona wartość graniczna zostanie przekroczona przez okres dłuższy niż 75 sekund. Rozłączenie działa zatem szybciej niż wkładka bezpiecznikowa, która dzięki wysokiej obciążalności prądowej kondensatorów może zapewnić jedynie zabezpieczenie przeciwzwarcowe.

- **Czas opóźnienia regulacji w funkcji zapotrzebowania na moc.**

Silne zmiany obciążenia są kompensowane szybko, niskie zmiany obciążenia są kompensowane wolniej. Zapewnia to, że tylko całkowicie rozładowane baterie kondensatorów (poszczególne stopnie) są podłączone do sieci. Celowe, odpowiednie dołączanie zapotrzebowania na moc przy możliwie najniższych operacjach przełączania - Sterowanie obwodem dla wszystkich równoważnych stopni.

- Taka kombinowana regulacja prowadzi do możliwie jak najmniejszej liczby operacji przełączania, a co za tym idzie do pracy z niskim zużyciem i dłuższej żywotności komponentów kompensacyjnych.
- Jednocześnie unika się krytycznych konstelacji sieciowych poprzez - w przeciwieństwie do klasycznej metody krokowej - szybkie i konkretne dostosowanie mocy kondensatora do zapotrzebowania w przypadku dużych zmian obciążenia.
- W przypadku regulacji w celu zmniejszenia obciążenia, zapobiega się przekompensowaniu transformatorów niedociążonych.
- W sieciach z wyższymi harmonicznymi, „zasysanie wyższych harmonicznych” przez układ filtracyjny jest zagwarantowane w możliwie najkrótszym czasie. To zaś zapobiega przekroczeniu dopuszczalnego poziomu harmonicznych przy dużych zmianach obciążenia przetwornicy mocy.

■ **Zadziałanie przy napięciu zerowym i prądzie zerowym.**

Ten obwód bezpieczeństwa odłącza system kompensacji od sieci w przypadku przerwy w obwodzie pomiaru napięcia lub prądu. Zapobiega to np.: natychmiastowemu przełączeniu systemu na nieobciążony transformator z całą mocą po krótkotrwałej przerwie w dostawie napięcia. Po przywróceniu napięcia regulator ponownie włącza stopnie kondensatora zgodnie z zapotrzebowaniem mocy.

■ **Regulacja mocy biernej z równoległym wytwarzaniem energii elektrycznej w sieci własnej z zasilaniem rezerwowym w energię czynną.**

W tym celu regulatory są wyposażone w czterokwadrantowy moduł pomiarowy. Dodatkowo można ustawić różne charakterystyki sterowania i zasilania rezerwowego w energię czynną. Gwarantuje to brak przekompensowania przy pobieraniu mocy i brak prądu biernego przy zasilaniu rezerwowym. Tylko ta kombinowana cecha regulacji zapewnia, że podczas dłuższego zasilania rezerwowego nie powstają koszty mocy biernej.

■ **Stałe stopnie dla kompensacji niezależnej od obciążenia .**

Można zdefiniować stopnie, które nie są zintegrowane z procesem sterowania, ale pozostają włączone na stałe tak długo, jak długo jest zasilany regulator. Wszystkie funkcje bezpieczeństwa, takie jak zadziałanie przy zerowym napięciu i zerowym prądzie, jak również przy przeciążeniu, są skuteczne dla zaprogramowanych stałych stopni.

■ **Dwa oddzielne programy regulacji, przełączane za pomocą zewnętrznego styku .**

Dwa programy sterujące mogą być obsługiwane z różnymi ustawieniami $\cos \varphi$ i można je zaprogramować z różnymi charakterystykami sterowania. Spełnia to wymagania zakładów energetycznych, np. w zakresie większych kompensacji w ciągu dnia i niższych kompensacji w nocy.

Uruchomienie i obsługa

■ Automatyczna adaptacja do sieci i urządzenia kompensowanego.

Upraszcza to znacznie uruchomienie, ponieważ jest ono wykonywane przez sam regulator. To od instalatora zależy, w którym zewnętrznym przewodzie zamontowany jest przekładnik prądowy i z jaką biegunowością przekładnik jest podłączony do regulatora mocy biernej. Układ faz i kierunek przepływu prądu są określane przez regulator podczas procesu kalibracji. Jednocześnie mierzona jest moc podłączonych stopni kondensatora, a nieużywane styki sterujące regulatora są wyłączone.

W przypadku wystąpienia błędów instalacyjnych regulator dostarcza szczegółowych informacji o tym, czego brakuje do poprawnego działania.

Jeśli moc systemu kompensacji zostanie zwiększona, należy powtórzyć procedurę pomiarową tak, aby nowo dodane stopnie kondensatora były natychmiast zintegrowane z procesem sterowania. Jeśli tak się nie stanie, regulator rozpoznaje to sam po kilku dniach i automatycznie integruje odpowiednie stopnie.

I odwrotnie, jeśli wykryje uszkodzony stopień podczas pracy wyciąga je z procesu regulacji i zaznacza.

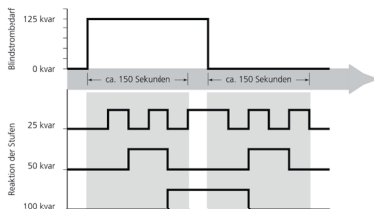
■ Informacje i komunikaty .

Wszystkie zmierzone wartości przez regulator mogą być wyświetlane na wyświetlaczu. Podczas eksploatacji wyświetlacz pokazuje rzeczywisty $\cos \varphi$ w miejscu zainstalowania przekładnika. Wyświetlacz można przełączyć na następujące wartości pomiarowe:

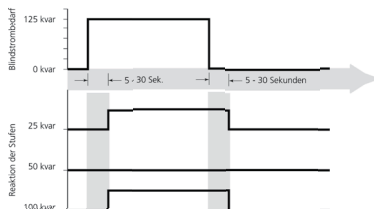
- prąd pozorny, czynny i bierny mierzonego przewodu zewnętrznego
- względny poziom wyższych harmonicznych 5-, 7-, 11- i 13-tej harmonicznej, w odniesieniu do przyłożonego napięcia pomiarowego
- na wyświetlaczu można wyświetlić maksymalne przekroczone wartości graniczne prądu, wyższych harmonicznych i $\cos \varphi$.

■ Zliczanie i wyświetlanie cykli przełączania każdego styku sterującego i komunikat, jeżeli osiągnięta została określona wartość graniczna .

Przy przełączaniu obciążeń pojemnościowych styczniki narażone są na duże obciążenia. Odbijane styki przełączające prowadzą do wysokich prądów ładowania w kondensatorach i dużego zużycia styku przełączającego. Terminowa wymiana styczników może znacznie wydłużyć żywotność systemu kompensacyjnego. Regulator mocy biernej sygnalizuje optymalny czas na wymianę stycznika i w ten sposób ogranicza koszty. W celu konserwacji zapobiegawczej operator może wywołać liczbę cykli przełączania zgromadzonych do tej pory dla każdego etapu na wyświetlaczu.



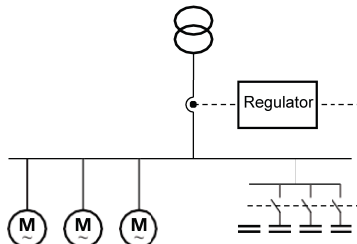
Rys. 25: Metoda sterowania klasycznym regulatorem mocy biernej metodą krokową



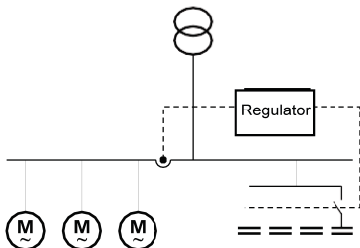
Rys. 26: Metody sterowania nowoczesnymi regulatorami mocy biernej FRAKO RM 9606, EMR 1100 S i EMR 1100

Odczyty, komunikaty i alarmy	Komunikat	Odczyt	Styk alarmowy
Rzeczywiste $\cos \varphi$	Odczyt	Wyświetlacz	
Prąd pozorny, czynny, prąd bierny (wartość rzeczywista)	Odczyt	Wyświetlacz	
Składowe harmoniczne (5.,7.,11.,13.harmoniczna)	Odczyt	Wyświetlacz	
Składowe harmoniczne (5.,7.,11.,13.Harmoniczne)	Alarm	Wyświetlacz / LED	zwierny
Przeciążenie (regulowane od 1,05 I_N do 3,0 I_N)	Alarm	Wyświetlacz / LED	zwierny
Rzeczywiste $\cos \varphi$ poza ch-yką regulacji z wyświetlaniem brakującej mocy kondensatora	Alarm	Wyświetlacz / LED	zwierny (wyłączalny)
Liczba cykli przełączania na styk sterujący	Odczyt	Wyświetlacz	
Przekroczone ilości graniczne cykli przełączania	Alarm	Wyświetlacz / LED	zwierny
Brak napięcia pomiarowego	Alarm	Wyświetlacz	zamyka
Brak prądu pomiarowego	Komunikat	Wyświetlacz	
Regulator nie rejestruje przy żadnym kontakcie sterującym mocy kondensatora	Alarm	Wyświetlacz	zwierny
Aktywacja			
Stopnie kondensatorów	Odczyt	LED	
Brak napięcia roboczego			zwierny

Przekładnik prądowy

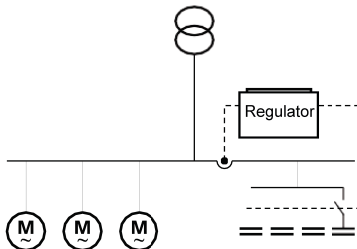


Rys. 27: Prawidłowo zainstalowany przekładnik prądowy, mierzy prąd odbiornika i kondensatora



Rys. 28: Błędnie! Przekładnik mierzy tylko prąd odbiornika, system włącza się, ale nie wyłącza ponownie.

Regulator mocy biernej sygnalizuje "C = 0" (brak możliwości pomiaru prądu kondensatora)!



Rys. 29: Błędnie! Przekładnik mierzy tylko prąd kondensatora, system nie włącza się. Regulator mocy biernej sygnalizuje "I = 0" (brak prądu w obwodzie przekładnika)!

Do pracy układów kompensacji mocy biernej wymagany jest przekładnik prądowy. **Nie** wchodzi on w zakres dostawy, ale może być dostarczony po uzgodnieniu wymagań klienta. Prąd pierwotny przekładnika zależy od poboru prądu przez odbiorcę. Konstrukcja zależy od maksymalnego obciążenia prądowego lub podłączonego obciążenia transformatora. Regulator mocy biernej jest zasilany przekładnikiem prądowym o przekładni .../1 do .../5 A mocy 5 VA, kl. 3. Jeżeli amperomierze są połączone szeregowo z regulatorem, należy zastosować przekładnik o odpowiednio większej mocy. Własny pobór prądu w torze prądowym regulatora wynosi ok. 1,8 VA przy prądzie znamionowym przekładnika 5 A.

Jeżeli na tym samym przekładniku mają pracować inne przyrządy pomiarowe, należy to uwzględnić przy wyborze jego mocy.

Straty występują również w przewodach przekładników prądowych, co należy również uwzględnić przy większych odległościach pomiędzy przekładnikiem a regulatorem mocy biernej.

Straty mocy w przewodach

Cu przekładników prądowych

z prądem wtórnym 5A:

Przekrój w mm ²	Straty mocy na 1 m [VA] Żyłą podwójną
2,5	0,36
4,0	0,22
6,0	0,15
10,0	0,09

Ważne: Przekładnik prądowy musi być zainstalowany na dowolnym przewodzie zewnętrznym w taki sposób, aby przepływał przez niego cały prąd obciążenia, który ma być skompensowany, oraz prąd kondensatora (patrz zdjęcia obok). Zacisk P1 (K) znajduje się po stronie zasilania, zacisk P2 (L) po stronie odbiornika.

Uwaga: W przypadku przerywania ścieżki prądowej występują przepięcia, które mogą zniszczyć przekładnik. Przed otwarciem obwodu przekładnika należy zewrzeć zaciski S1 (k) i S2 (l).

Bezpieczniki i kable

Podczas wykonywania prac instalacyjnych należy przestrzegać przepisów VDE 0100, VDE 0105, ogólnych dyrektyw VDEW oraz warunków przyłączenia właściwego zakładu energetycznego. Zgodnie z VDE 0560 część 46, kondensatory muszą być przystosowane do pracy przy prądzie długotrwałym równym 1,3-krotności prądu "który płynie przy sinusoidalnym napięciu znamionowym i częstotliwości znamionowej". Biorąc pod uwagę tolerancję pojemności $1,1 \times C_n$, maksymalny dopuszczalny prąd może osiągnąć wartości do $1,38 \times I_n$. Przy wymiarowaniu bezpieczników i przekrojów przewodów należy wziąć pod uwagę możliwość przeciążenia i wysoki prąd rozruchowy kondensatorów.

Ważne: Kondensatory mocy firmy **FRAKO** oferują obciążalność prądową do $2,7 \times I_n$.

Tabela 5: Bezpieczniki i przekroje przewodów wg VDE0298 Część 4, typ instalacji C

Moc w [kVar]	400 V/50 Hz				525 V/50 Hz				690 V/50 Hz			
	Prąd Wkładka topikowa w A		Przekrój w mm ²		Prąd Wkładka topikowa w A		Przekrój w mm ²		Prąd Wkładka topikowa w A		Przekrój w mm ²	
2,5	3,6	10	4 x 1,5		2,7	10	4 x 1,5		2,1	10	4 x 1,5	
5	7,2	10	4 x 1,5		5,5	10	4 x 1,5		4,2	10	4 x 1,5	
6,25	9,0	16	4 x 2,5		6,9	10	4 x 1,5		5,2	10	4 x 1,5	
7,5	10,8	16	4 x 2,5		8,2	16	4 x 2,5		6,3	10	4 x 1,5	
10	14,4	20	4 x 2,5		11,0	16	4 x 2,5		8,4	16	4 x 2,5	
12,5	18,0	25	4 x 4		13,7	20	4 x 2,5		10,5	16	4 x 2,5	
15	21,7	35	4 x 6		16,5	25	4 x 4		12,6	20	4 x 2,5	
17,5	25,3	35	4 x 6		19,2	35	4 x 6		14,6	25	4 x 4	
20	28,9	50	4 x 10		22,0	35	4 x 6		16,7	25	4 x 4	
25	36,1	50	4 x 10		27,5	50	4 x 10		20,9	35	4 x 6	
27,5	39,7	63	4 x 16		30,2	50	4 x 10		23,0	35	4 x 6	
30	43,3	63	4 x 16		33,0	50	4 x 10		25,1	35	4 x 6	
31,25	45,1	63	4 x 16		34,4	50	4 x 10		26,1	50	4 x 10	
37,5	54,1	80	3 x 25/16		41,2	63	4 x 16		31,4	50	4 x 10	
40	57,7	80	3 x 25/16		44,0	63	4 x 16		33,5	50	4 x 10	
43,75	63,1	100	3 x 35/16		48,1	80	3 x 25/16		36,6	63	4 x 16	
45	65,0	100	3 x 35/16		49,5	80	3 x 25/16		37,7	63	4 x 16	
50	72,2	100	3 x 35/16		55,0	80	3 x 25/16		41,8	63	4 x 16	
52,5	75,8	125	3 x 50/25		57,7	80	3 x 25/16		43,9	63	4 x 16	
60	86,6	125	3 x 50/25		66,0	100	3 x 35/16		50,2	80	3 x 25/16	
62,5	90,2	125	3 x 50/25		68,7	100	3 x 35/16		52,3	80	3 x 25/16	
67,5	97,4	160	3 x 70/35		74,2	125	3 x 50/25		56,5	80	3 x 25/16	
68,75	99,2	160	3 x 70/35		75,6	125	3 x 50/25		57,5	80	3 x 25/16	
75	108,3	160	3 x 70/35		82,5	125	3 x 50/25		62,8	100	3 x 35/16	
87,5	126,3	200	3 x 95/50		96,2	160	3 x 70/35		73,2	125	3 x 50/25	
93,75	135,3	200	3 x 95/50		103,1	160	3 x 70/35		78,4	125	3 x 50/25	
100	144,3	200	3 x 95/50		110,0	160	3 x 70/35		83,7	125	3 x 50/25	
112,5	162,4	250	3 x 120/70		123,7	200	3 x 95/50		94,1	160	3 x 70/35	
125	180,4	250	3 x 120/70		137,5	200	3 x 95/50		104,6	160	3 x 70/35	
150	216,5	315	3 x 185/95		165,0	250	3 x 120/70		125,5	200	3 x 95/50	
175	252,6	400	2x 3 x 95/50		192,5	315	3 x 185/95		146,4	250	3 x 120/70	
200	288,7	400	2x 3 x 95/50		219,9	315	3 x 185/95		167,3	250	3 x 120/70	
225	324,8	500	2x 3 x 120/70		247,4	400	2x 3 x 95/50		188,3	315	3 x 185/95	
250	360,8	500	2x 3 x 120/70		274,9	400	2x 3 x 95/50		209,2	315	3 x 185/95	
275	396,9	630	2x 3 x 185/95		302,4	500	2x 3 x 120/70		230,1	400	2x 3 x 95/50	
300	433,0	630	2x 3 x 185/95		329,9	500	2x 3 x 120/70		251,0	400	2x 3 x 95/50	
350	505,2	800	2x 3 x 240/120		384,9	630	2x 3 x 185/95		292,9	500	2x 3 x 120/70	
375	541,3	800	2x 3 x 240/120		412,4	630	2x 3 x 185/95		313,8	500	2x 3 x 120/70	
400	577,4	800	2x 3 x 240/120		439,9	630	2x 3 x 185/95		334,7	500	2x 3 x 120/70	
500	721,7	1000	3x 3 x 185/95		549,9	800	2x 3 x 240/120		418,4	630	2x 3 x 185/95	

Tabela 6: Średnica zewnętrzna kabli i przewodów

Przekrój przewodu w mm ²	NYM Ø w mm	NYY Ø w mm	NYCY/NYCWY Ø w mm	H05VV-F Ø w mm	H07RN-F Ø w mm
2 x 1,5	9,0	11,0	12,0	10,5	11,5
2 x 2,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
3 x 1,5	10,0	11,0	13,0	11,0	12,5
3 x 2,5	11,0	13,0	14,0	13,0	14,5
3 x 4,0	12,5	15,0	16,0	-	16,0
3 x 6,0	14,0	16,0	17,0	-	20,0
3 x 10,0	17,0	19,0	18,0	-	25,5
3 x 16,0	20,0	21,0	21,0	-	29,0
4 x 1,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
4 x 2,5	12,0	14,0	15,0	14,0	15,5
4 x 4,0	14,0	16,0	17,0	-	18,0
4 x 6,0	15,0	17,0	18,0	-	22,0
4 x 10,0	18,0	20,0	20,0	-	28,0
4 x 16,0	23,0	23,0	23,0	-	32,0
4 x 25,0	27,5	27,0	28,0	-	37,0
4 x 35,0	31,0	30,0	29,0	-	42,0
4 x 50,0	-	35,0	34,0	-	48,0
4 x 70,0	-	40,0	37,0	-	54,0
4 x 95,0	-	45,0	42,0	-	60,0
4 x 120,0	-	50,0	47,0	-	-
4 x 150,0	-	53,0	52,0	-	-
4 x 185,0	-	60,0	60,0	-	-
4 x 240,0	-	71,0	70,0	-	-
5 x 1,5	11,0	13,5	15,0	13,5	15,0
5 x 2,5	13,0	15,0	17,0	15,5	17,0
5 x 4,0	15,0	16,5	18,0	-	19,0
5 x 6,0	18,0	19,0	20,0	-	24,0
5 x 10,0	20,0	21,0	-	-	30,0
5 x 16,0	24,0	23,0	-	35,0	-
7 x 1,5	-	13,5	-	-	-
10 x 1,5	-	17,0	-	-	-
12 x 1,5	-	17,5	-	-	-
14 x 1,5	-	18,0	-	-	-
16 x 1,5	-	19,0	-	-	-
24 x 1,5	-	23,0	-	-	-

NYM Przewód płaszczowy

NYY Kabel z płaszczem z tworzywa sztucznego

NYCY Kabel z koncentrycznym przewodem i płaszczem z tworzywa sztucznego

NYCWY Kabel z koncentrycznym, falistym przewodem i płaszczem z tworzywa sztucznego

H05VV-F Przewód w izolacji gumowej (NLH, NMH)

H07RN-F Przewód w ciężkiej izolacji gumowej (NSH)

Tabela 7: Wprowadzenie kabla za pomocą dławika kablowego

Gwint metryczny	Pg	Zewnętrzna średnica kabla w mm	Otwór przelotowy
M 16 x 1,5	11	6,5 - 10.5	19,0
-	13,5	8,0 - 12.5	21,0
M 20 x 1,5	16	10,0 - 15.0	23,0
M 25 x 1,5	21	12,0 - 20.0	29,0
M 32 x 1,5	29	19,0 - 26.5	38,0
M 40 x 1,5	36	29,0 - 34.0	48,0
-	42	34,0 - 41.0	55,0
M 50 x 1,5	48	40,0 - 45.0	60,0

Stopień ochrony

Do oznaczenia stopnia ochrony zgodnie z normą EN 60529 używa się dwóch liter i cyfr. IP oznacza "International Protection". Najczęstsze skróty:

Tabela 8: Znaczenie skrótów dla stopni ochrony

Stopień ochrony	Ochrona przed dotykiem	Ochrona przed ciałami obcymi (stałymi)	Ochrona przed wodą
IP 00	brak	brak	brak
IP 10	przed przypadkowym lub niezamierzonym kontaktem	powyżej 50 mm średnicy	brak
IP 20	palcami i przedmiotami o długości maks. 80 mm	powyżej 12,5 mm średnicy	brak
IP 30	z narzędziami i drutami o grubości > 2,5 mm	powyżej 2,5 mm średnicy	brak
IP 31	z narzędziami i drutami o grubości > 2,5 mm	powyżej 2,5 mm średnicy	przed pionowo opadającą wodą
IP 40	z drutami lub taśmami o grubości > 1 mm	powyżej 1 mm średnicy	brak
IP 41	z drutami lub taśmami o grubości > 1 mm	powyżej 1 mm średnicy	przed pionowo opadającą wodą
IP 42	z drutami lub taśmami o grubości > 1 mm	powyżej 1 mm średnicy	przed kapiącą wodą, przy przechyle urządzeń do 15° w stosunku do pionu
IP 43	z drutami lub taśmami o grubości > 1 mm	powyżej 1 mm średnicy	Przed deszczem padającym pod kątem 60° w stosunku do pionu
IP 54	pełna ochrona	Ochrona przed pyłem	przed rozbryzgami wody ze wszystkich kierunków
IP 65	pełna ochrona	Pyłoszczelność	przed strumieniem wody ze wszystkich kierunków

 U = napięcie w [V] I = prąd w [A] f_n = częstotliwość sieci w [Hz] f_r = częstotliwość rezonansowa w [Hz] p = współczynnik tłumienia w [%] Q_C = moc kondensatora w [Var] C = pojemność w F (Farad) P = moc czynna w [W] S = moc pozorna w [VA] Q = moc bierna w [Var]

// Wzory obliczeniowe dla kondensatora

Moc kondensatora
jednofazowego

$$Q_c = C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Przykład: 83 μ F przy 400V/50 Hz
 $0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 4.172 \text{ Var} = 4,17 \text{ kVar}$

Moc kondensatora
przy połączeniu
w trójkąt

$$Q_c = C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Przykład: 3 x 33,2 μ F przy 400V/50 Hz
 $3 \cdot 0,0000332 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 5 \text{ kVar}$

Moc kondensatora
przy połączeniu w gwiazdę

$$Q_c = C \cdot (U / \sqrt{3})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Przykład: 3 x 33,2 μ F przy 400V/50 Hz
 $3 \cdot 0,0000332 \cdot 231^2 \cdot 314,16 = 1,67 \text{ kVar}$

Prąd
kondensatora

$$I = \frac{Q}{U \cdot \sqrt{3}} \quad \text{lub:} \quad Q_c = I \cdot U \cdot \sqrt{3}$$

Przykład: 25kvar przy 400V
 $25.000 / (400 \cdot 1,73) = 36 \text{ A}$

Szeregowa częstotliwość
rezonansowa (f_r)
i współczynnik tłumienia
(p)

$$f_r = f_n \cdot \sqrt{\frac{I}{p}} \quad \text{lub:} \quad p = \left(\frac{f_n}{f_r} \right)^2$$

Przykład: $p = 0,07$ (7% tłumienia) w
sieć 50Hz $f_r = 189 \text{ Hz}$

Efektywna moc
kondensatora
trójfazowego
z dławikiem

$$Q_c = \frac{C \cdot 3 \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1 - p}$$

Przykład: 3 x 332 μ F przy 400V/50Hz
przy $p = 7\%$ tłumienia
 $0,000332 \cdot 3 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 1 - 0,07 = 53,8 \text{ kVar}$

Współczynnik
mocy i zależność
między $\cos \varphi$
i $\tan \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{lub:} \quad \cos \varphi = S \sqrt{\frac{I}{I + \tan \varphi_2}} \quad \text{lub:} \quad \cos \varphi = \sqrt{\frac{I}{I + \left(\frac{Q}{P} \right)^2}}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad \text{lub:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\cos \varphi_2} - I} \quad \text{lub:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\left(\frac{P}{S} \right)^2} - I}$$

// Składowe harmoniczne

Czym są wyższe harmoniczne?

W nowoczesnych sieciach niskiego napięcia coraz częściej można znaleźć odbiorniki pobierające z sieci prąd niesinusoidalny. Prądy te generują spadek napięcia przy impedancjach sieciowych, co zniekształca pierwotne sinusoidalne napięcie sieciowe. Według zasady Fouriera superpozycje te można podzielić na drgania zasadnicze/drgania główne/pierwsze harmoniczne (częstotliwość sieci) i drgania harmoniczne wyższe (wyższe harmoniczne). Częstotliwości oscylacji harmonicznych są całkowitą wielokrotnością podstawowych oscylacji i są oznaczone

liczbą porządkową "n" lub "v" (przykład: częstotliwość sieci = 50 Hz → 5-ta harmoniczna = 250 Hz).

Odbiornikami liniowymi są:

- odbiory czysto rezystancyjne (rezystory, żarówki)
- silniki trójfazowe
- kondensatory

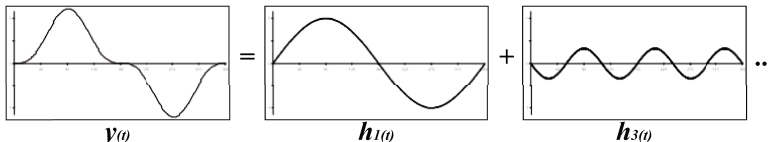
Odbiornikami nieliniowymi (generatory harmoniczne) są:

- transformatory i dławiki
- przekształtniki
- prostowniki i konwertery, szczególnie dla maszyn asynchronicznych z regulacją prędkości
- piece indukcyjne i łukowe, urządzenia spawalnicze
- zasilacze bezprzewodowe (systemy UPS)
- jednofazowe zasilacze impulsowe dla nowoczesnych odbiorników elektronicznych, takich jak telewizory, urządzenia wideo, komputery, monitory, drukarki, faksy, stateczniki elektroniczne kompaktowe, energooszczędne oprawy oświetleniowe

Każdy okresowy sygnał częstotliwości "f"(niezależny od kształtu fali) składa się z:

- składowej sinusoidalnej częstotliwości "f", zwanej składową podstawową lub "h1".
- składowych sinusoidalnych liczb całkowitych, wielokrotności częstotliwości "f", zwanych "harmonicznymi" "hn".
- i ewentualnie z komponentów DC (jeśli są dostępne).

$$y(t) = h_{1(t)} + h_{3(t)} + \dots$$



Rys.30a Podział sygnału okresowego na harmoniczne

Składowe harmoniczne można podzielić na:

- **parzyste harmoniczne** (2., 4., 6. itd.)
występują przy dużych skokach obciążenia lub błędach w przekształtnikach
- **nieparzyste harmoniczne** (3., 5., 7. itd.)

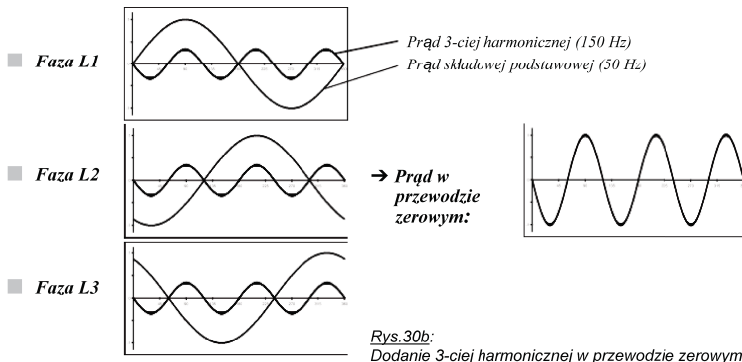
→ **harmoniczne podzielne przez 3** (3., 9., 15. itd.)

są spowodowane przez asymetryczne obciążenie i generatory jednofazowe

Np.: budynki biurowe, szpitale, producenci oprogramowania fabryki

wyposażone w spawarki

Problem: te harmoniczne sumują się w przewodzie neutralnym!



→ **harmoniczne niepodzielne przez 3** (5., 7., 11., 13. itd.)

są wytwarzane przez trójfazowe generatory harmoniczne

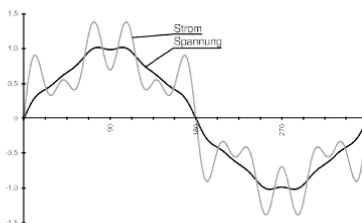
5-ta oraz 7-ma harmoniczna: przy zastosowaniu 6-impulsowych przekształtników

11-ta oraz 13-ta harmoniczna: przy zastosowaniu 12-impulsowych

przekształtników Problem: harmoniczne są przenoszone przez transformator!

Całkowity poziom zniekształceń harmonicznych (**THD**) jest geometryczną sumą wszystkich istniejących harmonicznych i jest zazwyczaj proporcjonalny do składowej podstawowej – poziom THD umożliwia szybki wgląd w jakość sieci elektrycznej.

Każda harmoniczna jest dla siebie własnym systemem z różnym ułożeniem faz! Wynikiem tego jest ogólna różnica pomiędzy $\cos \varphi$ (składowa podstawowa) i (współczynnikiem mocy PF, we wszystkich wyższych harmonicznych).

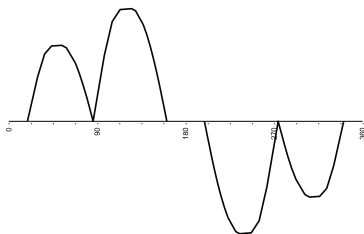


Harmoniczne są generowane nie tylko w sieciach przemysłowych, ale także w coraz większym stopniu w gospodarstwach domowych. Są to najczęściej harmoniczne nieparzyste 3, 5, 7, 9, 11-ta itd.

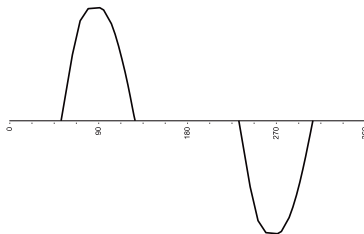
Rys 30c: Prąd i napięcie sieciowe z nałożeniem się: 5% z piątej harmonicznej, 4% siódmej harmonicznej i 2,5% jedenastej harmonicznej

Jak powstają harmoniczne?

- w sieci niskiego napięcia, zwłaszcza gdy zainstalowane są napędy sterowane.
- w każdym gospodarstwie domowym: w każdym telewizorze, komputerze i w kompaktowych energooszczędnych lampach z elektronicznym statecznikiem. Ze względu na dużą liczbę tych konsumentów i prądy zgodne w fazie generowany jest w godzinach wieczornych wysoki poziom harmonicznych w niektórych sieciach średniego napięcia.



Rys 31: Prąd sieciowy przekształtnika do maszyn asynchronicznych



Rys 32: Prąd prostownika sieciowego

Jak wysokie są składowe harmoniczne jeśli system kompensacyjny nie został jeszcze zainstalowany?

a) we własnej sieci niskiego napięcia:

w zależności od wydajności zainstalowanych przekształtników i prostowników.

Jeśli na przykład w sieci zainstalowany jest duży 6-impulsowy przekształtnik którego moc wyjściowa wynosi 50% mocy znamionowej transformatora, w wyniku czego powstają w przybliżeniu:

- 4% z 5-tej harmonicznej (250 Hz) i
- 3% z 7-ej harmonicznej (350 Hz)

Bardziej powszechne jest instalowanie w sieci kilku małych prostowników, które nie są ze sobą sprzężone. Ze względu na przesunięcia prądów fazowych poszczególnych prostowników, wynikające z tego napięcia harmoniczne są niższe.

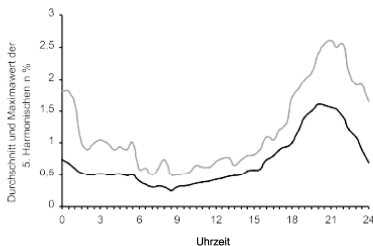
Jeśli na przykład zainstalowanych jest kilka prostowników o łącznej mocy ok. 25% mocy znamionowej transformatora, daje to w efekcie ok.

- 1 - 1,5% z 5-tej harmonicznej oraz
- 0,7 - 1% z 7-tej harmonicznej.

Są to wartości orientacyjne dla wstępnego oszacowania, czy należy zainstalować system kompensacji.

b) w sieci średniego napięcia:

W większości dzisiejszych sieci wpływ na to mają głównie generatory harmonicznych w gospodarstwach domowych (głównie telewizory), co znajduje odzwierciedlenie również w przebiegu dziennym piątej harmonicznej:



Rys. 33: Średnia i maksymalna wartość 5-tej harmonicznej.

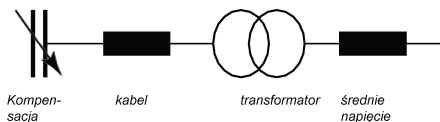
Poziom wyższych harmonicznych w sieci średniego napięcia dla zasilania miasta z udziałem przemysłu mierzony w dniach roboczych.

Średnia i maksymalna wartość serii pomiarów przeprowadzonych przez FGH w latach 1985-87. Wartości te są dziś z pewnością wyższe. Wzrost wieczorem wynika z dużej liczby telewizorów i innych nieliniowych odbiorników/ konsumentów w prywatnych gospodarstwach domowych.

W obszarach metropolitalnych na średnie napięcie w godzinach wieczornych może nakładać się od **4% 250 Hz do ok. 1,5% 350 Hz**. Wyższe od tych harmoniczne są zazwyczaj pomijalne. Poziom można przewidzieć tylko w ograniczonym zakresie!

Jaki wpływ ma kompensacja w sieci z harmonicznymi?

Bezdławikowy układ kompensacji tworzy obwód oscylacyjny z reaktywnymi impedancjami sieciowymi. Istnieje prosta reguła, która mówi o częstotliwości rezonansowej:



$$f_r = 50\text{Hz} \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}}$$

S_k = moc zwarciowa w punkcie podłączenia systemu kompensacji

Q_c = moc systemu kompensacji

Moc zwarciowa S_k w punkcie podłączenia systemu kompensacji:

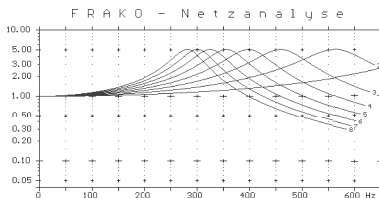
- określa się przez parametry Trafo (i_{Sn} / u_k),
- zmniejszona jest o około 10% przez impedancję sieci średniego napięcia
- może być znacznie zmniejszona dzięki długim przewodom zasilającym pomiędzy transformatorem a układem kompensacji

Przykład:

- Transformator 1000 kVA, $u_k = 6\%$
- Moc zwarciowa sieci średniego napięcia 150 MVA, $S_{k-} = 2,6 \text{ MVA}$
- Kompensacja 400 kVar, 8 stopniowa, bez dławików

Moc kondensatora (Q_c)	Częstotliwość rezonansowa (fr)
100 kvar	562 Hz
250 kvar	355 Hz
400 kvar	281 Hz

Podczas załączania poszczególnych stopni systemu kompensacji, częstotliwość rezonansowa sieci „fr” zmienia się znacznie i jest kilkakrotnie zbliżona do częstotliwości harmonicznej sieci. Jeśli rezonans własny obwodu rezonansowego jest zbliżony do istniejących harmonicznych sieci, należy spodziewać się wywołanych rezonansem wzrostów napięć harmonicznych. W pewnych okolicznościach można je pomnożyć przez współczynnik jakości sieci (w sieciach przemysłowych ok. 5-10!);



Rys. 34: Współczynnik wzmacnienia napięć harmonicznych z bezdławikową kompensacją w sieci niskiego napięcia

Kiedy mogą wystąpić niebezpieczne rezonanse sieciowe?

Na podstawie powyższego wykresu można oszacować, czy mogą wystąpić problemy rezonansowe z harmonicznymi; do tego służą proste reguły:

1.) Jeśli częstotliwość rezonansowa jest

- 10% poniżej/ powyżej składowej harmonicznej sieci, jest ona następnie **wzmacniana nawet czterokrotnie** (np. wieczorem i w nocy).
- 20% powyżej składowej harmonicznej sieci, wówczas zostaje ona istotnie **wzmocniona o współczynnik aż do 2,5**
- 30% powyżej harmonicznej sieci, wówczas zostaje ona wzmacniona w niewielkim stopniu **współczynnikiem do ok. 1.7**.

2.) W sieci bez własnych generatorów harmonicznych, ale z istotnymi składowymi harmonicznymi w sieci średniego napięcia, mogą wystąpić

- przy częstotliwości rezonansowej poniżej 400 Hz wzrosty rezonansowe siódmej harmonicznej,
- przy częstotliwości rezonansowej poniżej 300 Hz, **niebezpieczne wzrosty rezonansowe piątej harmonicznej** (250 Hz).

Jaki wpływ ma konfiguracja sieci na problem wyższych harmonicznych?

Moc zwarciowa sieci określa częstotliwość rezonansową oraz w przypadku generatorów harmonicznych w sieci własnej, poziom harmonicznych w napięciu sieciowym.

- Problemem jest zbyt mała moc zwarciowa sieci w punkcie przyłączenia układu kompensacji
- Kolejnym problemem jest silnie zmieniająca się moc zwarciowa na skutek różnych stanów łączeniowych.

Przykład:

W wielu dużych przedsiębiorstwach stacje niskiego napięcia są połączone szyną magistralną w celu zabezpieczenia dostaw energii. Sieć ta ma dużą moc zwarciową. Nawet przy wyższej mocy kompensacyjnej i wyższych obciążeniach prawie nie ma problemów harmonicznych, ponieważ częstotliwość rezonansowa jest wysoka, a prądy harmoniczne wypływają do sieci średniego napięcia przy niskim spadku napięcia. Przy odłączaniu szyny magistralnej, np.: przy pracach konserwacyjnych, moc zwarciowa znacznie maleje, częstotliwość rezonansowa może spaść poniżej 300 Hz!

Obciążalność bezdławikowych systemów kompensacyjnych

W przypadku pojawienia się rezonansu wartość skuteczna napięcia sieciowego wzrasta tylko nieznacznie, natomiast wartość skuteczna prądu kondensatora znacząco rośnie. W przypadku rezonansu z

5-tą harmoniczną może nastąpić jej wzrost do 15%, a wówczas następuje wzrost:

- wartości skutecznej napięcia sieciowego o 1%
- szczytowej wartości napięcia sieciowego o 10-15% (w zależności od układu faz)
- wartości skutecznej prądu kondensatora o 25%!

W przypadku rezonansu z 11-tą harmoniczną może nastąpić jej wzrost do 10%, a wówczas następuje wzrost:

- wartości skutecznej napięcia sieciowego o 0,5%
- szczytowej wartości napięcia sieciowego o 6-10%
- wartości skutecznej prądu kondensatora o 50%!

Dlatego wysoka obciążalność prądowa kondensatorów jest jedną z najważniejszych cech jakościowych!

Kondensatory FRAKO mogą być obciążane w sposób ciągły do 2,7-krotności prądu znamionowego (Heavy Duty) !

// Projektowanie w sieciach z wyższymi harmonicznymi

Co zrobić, jeśli rezonans jest możliwy, ale mało prawdopodobny?

Obecnie dotyczy to dziś znacznej części projektowanych urządzeń, np.:

- Brak własnych generatorów harmonicznymi w sieci, brak harmonicznymi w sieci średniego napięcia, ale częstotliwość rezonansowa poniżej 400 Hz.
- Poprzez zmianę konfiguracji sieci, np.: podczas prac konserwacyjnych, częstotliwość rezonansowa może spaść poniżej 400 Hz; w sieci średniego napięcia występują harmoniczne.
- Planuje się w późniejszym terminie wyposażenie urządzeń w przekształtniki prądowe.

Urządzenie monitorujące EMA 1101 jest niezwykle przydatne do ochrony niepodłączonego systemu przed nawet sporadycznym rezonansem. Monitoruje sieć we wszystkich 3 przewodach fazowych, wyłącza system w przypadku przekroczenia niebezpiecznego poziomu harmonicznymi i włącza go z powrotem automatycznie, jeśli poziom ten spadnie poniżej poziomu krytycznego. Maksymalne wartości, które wystąpiły pozostają jednak zachowane i mogą być odczytywane poprzez połączenie magistrali EMA 1101.

Regulator mocy biernej EMR 1100 może być również stosowany w sieciach o symetrycznych obciążeniach. Monitoruje wystąpienie rezonansu. Regulator mocy biernej EMR 1100 określa napięcia harmoniczne danej fazy i oblicza wartość prądu kondensatorów. W przypadku przekroczenia wartości granicznej urządzenie jest wyłączane i załączane ponownie, jeśli wartość ta spadnie poniżej progu.

W takich przypadkach często stosowane są systemy kompensacyjne, wyposażone w dławiki.

Projektowanie systemów kompensacyjnych w sieciach z wyższymi harmonicznymi

Najlepsze informacje na temat planowanej kompensacji do użytkowanej sieci uzyskuje się poprzez:

- Pomiar harmonicznymi napięć i prądów w ciągu kilku dni, bez kompensacji.
- Teoretyczne obliczenie rezonansu w sieci.

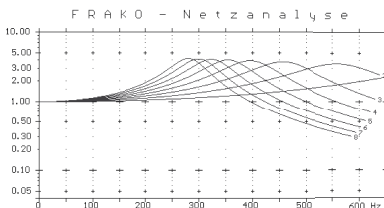
W wyniku przeprowadzonej kompensacji oczekuje się następujących poziomów kompensacji:

Przykład:

Przeciętna sieć niskiego napięcia z transformatorem 1000 kVA. Rozdzielnica jest połączona dwoma równolegle ułożonymi kablami o długości 20 m (odpowiada impedancji 10m kabla). Jako obciążenie można brać pod uwagę tylko czyste obciążenie rezystancyjne, ponieważ np. silniki asynchroniczne nie tłumią harmonicznymi. Gdy system jest w pełni włączony przy 400 kVar, piąta harmoniczna (250 Hz) zostaje wzmocniona przez współczynnik około 3. Przy 250 kVar siódma harmoniczna zostaje wzmocniona przez współczynnik około 4!

W ciągu dnia, przy wyższym tłumieniu sieci, współczynniki te są niższe, wieczorem i w weekendy współczynnik wzmocnienia siódmej harmonicznej może być wyższy.

Wartości pomiaru bez kompensacji, pomnożone przez współczynnik rezonansu z analizy sieci.



Rys 35: Wzrost napięć harmonicznymi w zależności od stopni kondensatora

Środki zapobiegające powstawaniu rezonansów

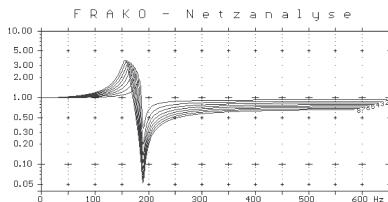
Jeżeli podczas projektowania systemu kompensacji - z uwagi na wzmocnienia harmonicznych wywołane rezonansem - można spodziewać się wyższych poziomów napięcia niż:

4,0 % z	3. harmonicznej (150 Hz)
5,0 % z	5. harmonicznej (250 Hz)
4,0 % z	7. harmonicznej (350 Hz)
3,0 % z	11. harmonicznej (550 Hz)
2,1 % z	13. harmonicznej (650 Hz)

wówczas w sieci niskiego napięcia mogą wystąpić poważne zakłócenia:

- problemy z systemami EDP i maszynami CNC
- uszkodzenie przetworników mocy lub przekształtników
- niekontrolowane zadziałanie wyłączników i bezpieczników
- wyłączenie systemów kompensacji bezdławikowych
- wzrost napięcia w sieci
- zwiększone straty prądów wirowych w transformatorach i silnikach asynchronicznych

Jeżeli poziom poszczególnych harmonicznych bez kompensacji jest większy niż 1,5% (7-ej harmonicznej i wyższych harmonicznych) lub 2% (5-ej harmonicznej) a częstotliwość rezonansowa sieci może być zbliżona do tych harmonicznych, należy oczekiwać, że te dopuszczalne wartości graniczne zostaną przekroczone przez wzmocnienie rezonansowe. Aby nie zagrażać bezpieczeństwu pracy sieci niskiego napięcia, w takich sytuacjach należy stosować wyłącznie dławikowe systemy kompensacji.



Zastosowanie dławików zmniejsza częstotliwość rezonansową do wartości poniżej 250 Hz. Wszystkie harmoniczne powyżej częstotliwości rezonansowej zostają osłabione (tłumione)

Rys.36: Tłumienie napięć harmonicznych w funkcji poszczególnych stopni baterii

Kondensator dławikowy jest szeregowym połączeniem kondensatora i dławika, którego szereg częstotliwości rezonansowej jest tak dobrany przez konstrukcję dławika, że leży poniżej 5 harmonicznej (250 Hz). Układ jest zatem indukcyjny dla wszystkich częstotliwości powyżej szeregowej częstotliwości rezonansowej, rezonans pomiędzy kondensatorami i reaktywnymi elementami impedancyjnymi w sieci nie jest już możliwy. System dławikowy odsysa część prądów harmonicznych. Aby uniknąć przeciążenia piątą harmoniczną, która jest zawsze obecna w sieci, częstotliwość rezonansowa jest zwykle ustawiona na 189 Hz i poniżej.

Tłumienie określane jest albo po częstotliwości rezonansowej dławika kondensatora albo po względnym spadku napięcia "p" na dławiku. Obie wartości są ze sobą powiązane według następującego wzoru:

$$f_r = 50 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{1}{p}}$$

na przykład: $p = 0,07$ (7%)
 $f_r = 189 \text{ Hz}$

Graniczne wartości harmonicznych

Do oceny jakości sieci w zależności od obszaru zastosowań można przywołać dużą liczbę norm. Dwie główne normy mają zastosowanie w przypadku sieci niskiego napięcia podłączonych do sieci publicznych:

- **EN 50160** "Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych" uwzględnia napięcia harmoniczne do 25. rzędu
- **EN 61000-2-2-2** "Poziomy kompatybilności zakłóceń przewodzonych niskiej częstotliwości i sygnałów przesyłanych w publicznych sieciach niskiego napięcia" Uwzględnia napięcia harmoniczne do 50. rzędu

Tabela 9: Wartości graniczne harmonicznych zgodnie z EN 50160 i EN 61000-2-2-2 (porównanie)

EN 50160 EN 61000-2-2			EN 50160 EN 61000-2-2		
parzyste harmoniczne:			nieparzyste harmoniczne:		
2. (100 Hz)	2,00%	2,00%	(podzielne przez 3)		
4. (200 Hz)	1,00%	1,00%	3. (150 Hz)	5,00%	5,00%
6. (300 Hz)	0,50%	0,50%	9. (450 Hz)	1,50%	1,50%
8. (400 Hz)	0,50%	0,50%	15. (750 Hz)	0,50%	0,40%
10. (500 Hz)	0,50%	2,50%	21. (1050 Hz)	0,50%	0,30%
12. (600 Hz)	0,50%	2,13%	27. (1350 Hz)	-	0,20%
14. (700 Hz)	0,50%	1,86%	33. (1650 Hz)	-	0,20%
16. (800 Hz)	0,50%	1,66%	39. (1950 Hz)	-	0,20%
18. (900 Hz)	0,50%	1,50%	45. (2250 Hz)	-	0,20%
20. (1000 Hz)	0,50%	1,38%	nieparzyste harmoniczne:		
22. (1100 Hz)	0,50%	1,27%	(niepodzielne przez 3)		
24. (1200 Hz)	0,50%	1,19%	5. (250 Hz)	6,00%	5,00%
26. (1300 Hz)	-	1,12%	7. (350 Hz)	5,00%	5,00%
28. (1400 Hz)	-	1,05%	11. (550 Hz)	3,50%	3,50%
30. (1500 Hz)	-	1,00%	13. (650 Hz)	3,00%	3,00%
32. (1600 Hz)	-	0,95%	17. (850 Hz)	2,00%	2,00%
34. (1700 Hz)	-	0,91%	19. (950 Hz)	1,50%	1,76%
36. (1800 Hz)	-	0,88%	23. (1150 Hz)	1,50%	1,41%
38. (1900 Hz)	-	0,84%	25. (1250 Hz)	1,50%	1,27%
40. (2000 Hz)	-	0,81%	29. (1450 Hz)	-	1,06%
42. (2100 Hz)	-	0,79%	31. (1550 Hz)	-	0,97%
44. (2200 Hz)	-	0,76%	35. (1750 Hz)	-	0,83%
46. (2300 Hz)	-	0,74%	37. (1850 Hz)	-	0,77%
48. (2400 Hz)	-	0,72%	41. (2050 Hz)	-	0,67%
50. (2500 Hz)	-	0,70%	43. (2150 Hz)	-	0,63%
Dla obu norm jednakowy: współczynnik zniekształcenia napięcia THDu: max . 8% Współczynnik zniekształcenia prądu THDi: Zalecenie, max . 20%			47. (2350 Hz)	-	0,55%
			49. (2450 Hz)	-	0,52%

Projektowanie w sieciach z urządzeniami sterującymi o częstotliwości akustycznej

Impedancja kondensatora z dławikiem przy 250 Hz jest mniejsza o współczynnik x niż impedancja kondensatora bez dławika.

Dla 5-tej harmonicznej system kompensacji z dławikami posiada:

- zachowanie obwodu przyjmującego przy $x > 1$
- zachowanie obwodu blokującego przy $x < 1$

W przypadku silniejszego zachowania obwodu przyjmującego, maksymalna dopuszczalna składowa 250Hz musi być ograniczona, aby nie przeciążyć obwodu filtrującego z dławikiem.

→ $p = 5,7\%$	$f_r = 210 \text{ Hz}$	$x = 2,4$	→ $u_{250\text{maks}} = 4\%$
→ $p = 7\%$	$f_r = 189 \text{ Hz}$	$x = 1,33$	→ $u_{250\text{maks}} = 5\%$
→ $p = 8\%$	$f_r = 177 \text{ Hz}$	$x = 1,0$	→ $u_{250\text{maks}} = 5\%$
→ $p = 14\%$	$f_r = 134 \text{ Hz}$	$x = 0,42$	→ $u_{250\text{maks}} = 5\%$

Przykład: Jeżeli 4 % piątej harmonicznej jest nakładane na napięcie sieciowe, wówczas system kompensacji dławionej odsysa piątą harmoniczną w następujący sposób:

→ przy 7%	-tłumienie:	przy 4% $\times 5$ ($=250 \text{ Hz}/50 \text{ Hz}$) $\times 1,33 = 0,27 \times I_n$
→ przy 5,7%	-tłumienie:	przy 4% $\times 5$ ($=250 \text{ Hz}/50 \text{ Hz}$) $\times 2,40 = 0,48 \times I_n$
→ przy 14%	-tłumienie:	przy 4% $\times 5$ ($=250 \text{ Hz}/50 \text{ Hz}$) $\times 0,42 = 0,08 \times I_n$

($I_n = 50 \text{ Hz}$ prąd znamionowy systemu)

Przy wyborze dławikowych systemów kompensacji należy zawsze przestrzegać poniższych wskazówek:

- Kondensatory z dławikami i bez nie mogą pracować równolegle w tej samej sieci niskiego napięcia.
- Równoległa praca układów filtrujących z różnymi współczynnikami tłumienia (p) jest możliwa, ale obciążenie obwodów filtrujących jest inne i powinno być dokładnie analizowane na wysokich poziomach.
- W przypadku galwanicznie izolowanych sieci niskiego napięcia (transformatory, nie mogą być sprzężone po stronie niskiego napięcia w zależności od wymagań jedna sieć może być kompensowana z dławikami, a druga bez dławików.
- Wybrane rozwiązanie musi spełniać wymagania danego zakładu energetycznego.

Kompensacja mocy biernej w sieciach z urządzeniami sterującymi o częstotliwości akustycznej.

Urządzenia tego typu instalowane są w sieciach zasilających zakładów energetycznych w celu np. zmiany taryf przyłączonych odbiorców. Napięcia sterujące wyższej częstotliwości (imp. częstotliwości akustycznej) nakładają się na napięcie sieci. Najczęściej są to częstotliwości w zakresie 166 do 1350Hz.

Aby nie zagrażać funkcjonowaniu takich systemów urządzenia odbiorcze nie mogą wpływać na poziom napięcia sterującego. W tym celu członkowie stowarzyszeń VDEW, VSÖ i VSE opracowali **"Zalecenia dotyczące uniknięcia niedopuszczalnego wpływu na urządzenia sterujące o częstotliwości akustycznej."**

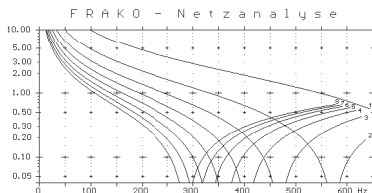
Współczynnik impedancji α^* jest stosowany do oceny sieci z zainstalowanymi systemami kompensacji.

Współczynnik impedancji α^ jest impedancją transformatora i układu kompensacji w odniesieniu do mocy przyłączeniowej Trafo.*

Przy współczynniku impedancji $\alpha^* \geq 5$ nie należy oczekiwać zakłóceń ze strony systemów sterujących o częstotliwości akustycznej.

Wpływ bezdławikowych systemów kompensacyjnych

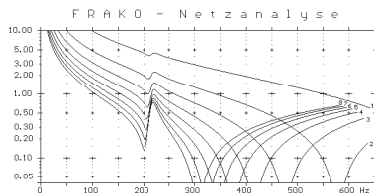
Bezdławikowy system kompensacji tworzy obwód oscylujący z reaktywnymi impedancjami sieciowymi. Częstotliwość rezonansowa „ f_r ” obwodu oscylującego zmniejsza się wraz ze wzrostem mocy kompensacyjnej. W pobliżu częstotliwości rezonansowej, impedancja obwodu rezonansowego jest bardzo niska i może znacząco osłabić poziom napięcia częstotliwości akustycznej.



Gdy system kompensacji jest w pełni załączony, współczynnik impedancji $\alpha^* \geq 5$ jest osiągany tylko dla częstotliwości sterowania okólnego 166 Hz.

Rys.37: Współczynnik impedancji α^* w zależności od podłączonych kondensatorów

Jeżeli współczynnik impedancji nie może być utrzymany, przed kompensacją należy podłączyć obwód blokady częstotliwości akust. (TFS). Obwód blokujący częstotliwość to równoległy obwód drgający składający się z dławika blokującego i kondensatora rezonansowego. Przeznaczony jest dla mocy znamionowej kompensacji i jej napięcia znamionowego. Układ blokady częstotliwości zwiększa impedancję systemu kompensacji przy częstotliwości akust. do współczynnika impedancji $\alpha^* \geq 0,5$.



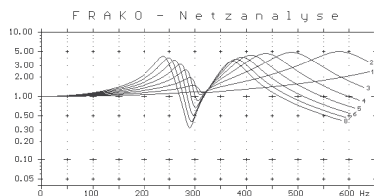
Przy włączonym systemie kompensacji, współczynnik impedancji $\alpha^* \geq 0,5$ uzyskuje się już dla częstotliwości 216,7 Hz

Rys.38: Współczynnik impedancji α^* w zależności od podłączonych kondensatorów przy wykorzystaniu z przedwzmacniacza częstotliwości akust. dla obwodu blokującego częstotliwość 216,67 Hz

Krytyczne częstotliwości sterowania w zakresie od 270 do 425 Hz

Częstotliwości rezonansowe systemu kompensacji są zmieniane przez poprzedzający układ blokady częstotliwości akust.. W szczególności, bezdławikowy system kompensacji posiada drugą szeregową częstotliwość rezonansową poniżej zablokowanej częstotliwości sterowania okólnego. W zakresie częstotliwości akust. od 270 do 425 Hz może wystąpić niebezpieczny, wywołany rezonans wzrost harmonicznych.

W takich przypadkach stosuje się następujące zasady



Rys. 39: Wzmocnienie harmonicznych przy stosowaniu bezdławikowej kompensacji z układem blokady częstotliwości audio dla 316,7Hz

Jeżeli obwody blokujące częstotliwość akust. w zakresie częstotliwości od 270 Hz do 425 Hz są łączone przed systemami bezdławikowymi kompensacyjnymi, wzmocniony rezonans jest możliwy w bezpośrednim sąsiedztwie 5-tej i 7-ej harmonicznej. Aby uniknąć przeciążenia obwodu blokady częstotliwości akust. oraz późniejszej kompensacji, poziom 5-tej harmonicznej (250 Hz) i 7-ej harmonicznej (350 Hz) nie może przekraczać 1% nominalnego napięcia sieciowego. Na wyższych poziomach należy zainstalować dławikowe systemy kompensacji.

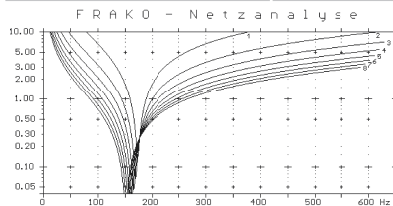
Wpływ dławikowych systemów kompensacji

Dławiki w systemach kompensacyjnych redukują częstotliwość rezonansową do wartości poniżej 250 Hz, co na początku zostało opisane bardziej szczegółowo. Wszystkie harmoniczne powyżej częstotliwości rezonansowej dławienia nie są już wzmacniane, ale tłumione.

W zależności od wykonania można bezpiecznie zablokować częstotliwości sterowania, nawet bez obwodu blokady częstotliwości akustycznych przy zastosowaniu systemów kompensacji z dławikami.

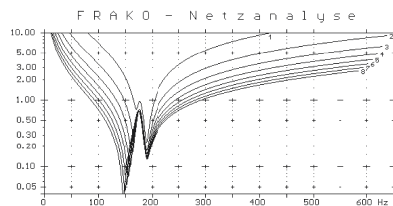
Ze względu na najwyższą niezawodność działania systemów kompensacyjnych oraz bezzakłóceniovą transmisję sygnałów sterowania ZE, zalecamy następujące warianty dla stopnia kompensacji (stosunek mocy transformatora do mocy kompensacyjnej) do 50%:

Częstotliwość sterowania ZE (Hz)	Wykonanie (stopień tłumienia)
166 do 183,3 190 do 210	p = 7% (fr = 189 Hz) z obwodem blok. częstotliwość akust. p = 8% (fr = 177 Hz) z obwodem blokującym częstotliwość akust.
Najbardziej ekonomiczne wersje: ≥ 166 ≥ 216,67 ≥ 228	p = 14% (fr = 134 Hz) bez obwodu blokującego częstotliwość akust. p = 8% (fr = 177 Hz) bez obwodu blokującego częstotliwość akust. p = 7% (fr = 189 Hz) bez obwodu blokującego częstotliwość akust.



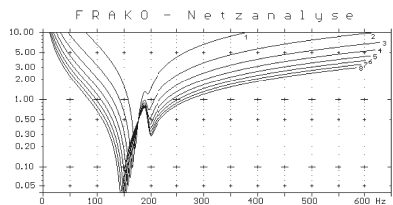
Dla częstotliwości $\geq 216,7$ Hz osiąga się współczynnik impedancji $\alpha^* \geq 0,5$ nawet bez układu blokującego częstot. akust.

Rys.40: Przykład 1 Współczynnik impedancji α^* w zależności od podłączonych kondensatorów, tłumienie 8%



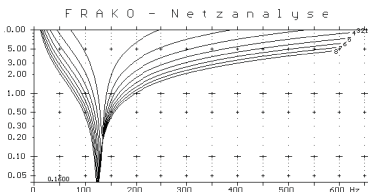
Przy częstotliwości 175 Hz współczynnik impedancji $\alpha^* \geq 0,5$ jest osiągany na wszystkich stopniach.

Rys.41: Przykład 2 Współczynnik impedancji α^* w zależności od podłączonych kondensatorów, tłumienie 7% i blokadą częstotliwości audio dla 175 Hz



Również w tym przypadku współczynnik impedancji $\alpha^* \geq 0,5$ jest niezawodnie osiągany przy 190 Hz na wszystkich stopniach.

Rys.42: Przykład 3 Współczynnik impedancji α^* w zależności od podłączonych kondensatorów, tłumienie 8% i układ blokady częstotliwości akust dla częstotliwości 190 Hz



Dla wszystkich częstotliwości ≥ 166 Hz (wszystkie popularne częstotliwości sterowania) współczynnik impedancji $\alpha^* \geq 0,5$ osiągnięty jest na wszystkich stopniach!

Rys. 43: Przykład 4

Współczynnik impedancji α^* w zależności od załączonych kondensatorów, tłumienie z 14 %.

Zalecenia te opierają się na kilkuletnim doświadczeniu praktycznym i odpowiadają zaleceniom z 1993 roku "Zalecenia dotyczące unikania niedopuszczalnego wpływu na system sterowania częstotliwości akustycznych" opracowany przez członków VDEW, VSÖ i VSE.

Wersje dławikowych systemów kompensacji

1.) Współczynnik tłumienia 7 i 8%:

Systemy kompensacyjne z 7% tłumieniem sprawdziły się w większości zastosowań przemysłowych. Częstotliwość rezonansowa ma wartość optymalną, aby redukować harmoniczne przemysłowe (głównie 5-tą i 7-mą) i jednocześnie uniknąć przeciążenia. Idealne rozwiązanie dla prawie symetrycznie obciążonych sieci przemysłowych o normalnych poziomach harmonicznych i częstotliwości sterowania powyżej 228 Hz!

Tłumienie 8% jest wariantem dla sieci z częstotliwością 216,67 Hz.

2.) Współczynnik tłumienia 12,5 do 14%:

Wersje z tłumieniem od 12,5 do 14% nadają się również do sieci o częstotliwościach sterowania okrężnego od 166 do 210 Hz bez obwodu blokującego częstotliwość akustyczną. Wady tego wariantu polegają z jednej strony na wyższych kosztach wymaganych dławików i kondensatorów, a z drugiej strony na stosunkowo niskim efekcie tłumienia na harmonicznych przemysłowych. W sieciach niskiego napięcia o wysokim poziomie 5-tej harmonicznej (zwłaszcza dla systemów > 200 kvar), należy raczej stosować układy z 7% lub 8% tłumieniem. Wyjątek stanowią sieci niskiego napięcia o bardzo wysokim poziomie 3-ciej harmonicznej (150 Hz). Trzecia harmoniczna jest zwykle generowana przez sieć niskiego napięcia o wysokim asymetrycznym obciążeniu (np. praca odbiorników jednofazowych, takich jak zgrzewarki/spawarki, systemy UPS lub duża liczba lamp ze statecznikami elektronicznymi oraz zasilaczy do komputerów i innych urządzeń biurowych). Wysokie poziomy 3-ciej harmonicznej często występują w kompleksach biurowych, bankach, szpitalach, domach towarowych itp. Aby uniknąć rezonansów na tej częstotliwości, należy w takich przypadkach stosować tłumienie poniżej 150 Hz. Do tego celu najlepiej nadaje się wersja 14% wersje z tłumieniem 7 lub 8% nie mogą być stosowane w tych przypadkach.

3.) Współczynnik tłumienia 5 do 5,67%

Konstrukcja ta jest zwykle stosowana ze względu na zwiększony udział harmonicznych. Jeżeli jednak sieć średniego napięcia dostarcza wysoki poziom harmonicznych, nie należy stosować współczynnika tłumienia 5 do 5,67%

(aby uniknąć przeciążeń) należy wybrać wersję z $p = 7\%$. Przy bardzo ekstremalnych poziomach harmonicznych można również projektować specjalne obwody filtrujące.

4.) *Tłumienie kombinowane:*

Ten wariant systemów kompensacji bazuje na poziomach filtrowania różnych częstotliwości rezonansowych (zwykle 12,5/14% i 5/5,67%). Liczba i moc znamionowa stopni obwodu filtrującego jest tak dobrana, aby stosunek mocy wynosił około 1:1, czyli tyle samo. Dławiki kombinowane mogą być stosowane w sieciach o częstotliwościach sterowania w zakresie od 166 do 190 Hz jako prostszy wariant zamiast systemów dławikowych z układami blokującymi częstotliwości akustycznych.

Należy wziąć pod uwagę trzy istotne wady w kompensacji kombinowanej:

- aby zachować współczynnik blokady, unika się zasady przełączania obwodów w systemach sterowanych.
- Efekt tłumienia harmonicznych jest mniejszy niż w przypadku systemów dławikowych z układami blokującymi częstotliwość akustyczną.
- Jedna połowa systemu ma niski efekt tłumienia, druga połowa działa jak obwód filtra 210 lub 223 Hz jak obwód ssący. Jeśli zawartość harmonicznych jest wysoka w sieci średniego napięcia lub we własnej sieci, jedna połowa stopni obwodu filtra jest zawsze w pełni obciążona termicznie, podczas gdy druga połowa nie jest. Te współczynniki obciążenia w naturalny sposób wpływają na żywotność. Z tego powodu tłumienie kombinowane jest zalecane aby uniknąć rezonansu i dostępna jest częstotliwość w zakresie 166 a 183 Hz. Spodziewany jest niski udział harmonicznych w napięciu - 3%.

Bardziej zaawansowanym technicznie rozwiązaniem jest tłumienie $p=14\%$. Oscylacje harmoniczne są blokowane równomiernie na wszystkich stopniach i można w pełni wykorzystać wszystkie zalety techniczne sterowania nowoczesnymi regulatorami mocy biernej.

Monitorowanie działających systemów kompensacji

Równie ważne jak projektowanie jest późniejsze monitorowanie i konserwacja systemów. Po uruchomieniu układu kompensacji, często się o tym aspekcie zapomina. Części wykonawcze styczników kondensatorów dozoruje się tylko wówczas, gdy wystąpiły kłopotliwe efekty awarii. **Przy przełączaniu obciążeń pojemnościowych styczniki narażone są na duże obciążenia.** Ruchome styki przełączające prowadzą do wysokich prądów ładowania w kondensatorach i szybko się zużywają. Terminowa wymiana styczników znacznie wydłuża żywotność systemu kompensacyjnego. W celu uzyskania **bieżących** informacji o zużyciu styczników, w nowoczesnych sterownikach mocy biernej takich jak RM 9606, EMR 1100 S i EMR 1100 zintegrowano **licznik cykli przełączania**. Regulator mocy biernej wskazuje optymalny czas wymiany stycznika i tym samym oszczędza koszty. W celu konserwacji prewencyjnej operator może wywołać na wyświetlaczu liczbę cykli przełączania dla każdego z poszczególnych etapów, które do tej pory były wyświetlane na wyświetlaczu.

Również ze względu na zmiany warunków w sieci mogą wystąpić zakłócenia w całym systemie niskiego napięcia. Celem monitorowania sieci jest wykrycie takich usterek na wczesnym etapie. **Urządzenia monitorujące sieć serii EM-PQ** oferują możliwość wczesnego ostrzegania przed awarią systemów lub komponentów systemu. Wszystkie istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa zmienne pomiarowe w sieciach średniego i niskiego napięcia, temperatury wrażliwych komponentów instalacji, jak również zużytej energii czynnej i biernej są rejestrowane, analizowane, monitorowane i raportowane.

Filtry aktywne wyższych harmonicznych

Co jeśli zawartość wyższych harmonicznych jest wysoka, ale zapotrzebowanie na moc bierną jest niskie?

W zasadzie istnieje kilka rozwiązań ograniczających prądy harmoniczne w takich przypadkach, które są spowodowane zastosowaniem obciążeń generujących harmoniczne.

Znane środki obejmują w szczególności zastosowanie

- kilku filtrów pasywnych lub
- grupowanie obciążeń silnie nieliniowych i wrażliwych w osobne grupy i zasilanie każdej grupy osobnym transformatorem

Rozwiązania te mają jednak dwie zasadnicze wady:

- Poprawa stanu sieci jest możliwa tylko w przypadku konkretnej instalacji, a przy każdej jej rozbudowie początkowe założenia mogą stać się nieaktualne
- Praktyczne wdrożenie tych rozwiązań jest często bardzo trudne w istniejących instalacjach.

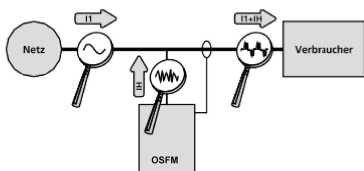
Często zbyt wysokie poziomy harmonicznych występują z powodu stosowania w sieciach o obciążeniach harmonicznych kondensatorów bez dławików

Najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem w tym zakresie jest stosowanie wysoko-wydajnych systemów filtrujących **FRAKO**. W przypadku problemów ze:

- zbyt wysokimi poziomami 3-ej, 9-ej i 15-ej harmonicznej i wynikającym z tego wysokim prądem w przewodzie neutralnym lub
 - wymaganiem kompensacji w celu utrzymania prądu harmonicznego doprowadzanego z powrotem do sieci średniego napięcia poniżej określonej wartości granicznej lub
 - w przypadku niskiego zapotrzebowania na moc bierną i wysokich prądów harmonicznych, np. ze względu na duży udział asynchronicznych maszyn sterowanych przekształtnikowo,
- optymalnym rozwiązaniem jest filtr harmoniczny OSFM lub połączenie systemu obwodów filtracyjnych **FRAKO** z aktywnym filtrem harmonicznych.

Decydującą zaletą aktywnego filtra harmonicznego jest fakt, że kompensacja zakłóceń w sieci pozostaje skuteczna nawet przy późniejszej rozbudowie instalacji. Dzięki elastyczności aktywnych filtrów **FRAKO** rozmiar nominalny można łatwo dobrać do zadanych wymagań. Dodatkowe potrzeby związane z rozbudową instalacji można zaspokoić w dowolnym momencie poprzez dodanie kolejnych komponentów.

Zasada działania aktywnego filtra składowych harmonicznych



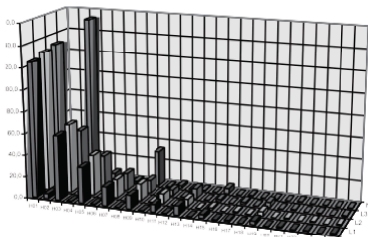
I_1 = prąd składowej podstawowej

I_H = prąd harmoniczny

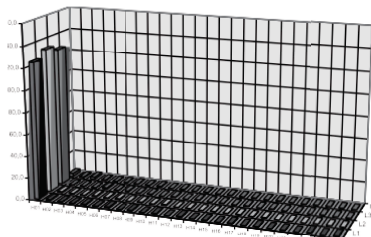
Rys. 44: Zasada działania filtra aktywnego typoszerzeg OSFM

Filtr aktywny, podłączony równolegle do generatora harmonicznych, analizuje prąd harmoniczny generowany przez obciążenia nieliniowe i dostarcza prąd kompensacji odwrotnej fazy, albo całe spektrum 2-25 harmonicznych, albo specjalnie dobrane harmoniczne. Powoduje to, że całkowicie

zneutralizowane są odpowiednie prądy harmoniczne w punkcie przyłączeniowym. Kombinacja filtra harmonicznego i odbiornika jest traktowana przez sieć jako całkowite obciążenie liniowe pochłaniające prąd sinusoidalny. Instalacja jest bardzo prosta. Należy zapewnić układ 3-faz z przewodem zerowym lub bez, a przekładniki prądowe muszą być zainstalowane w przewodach zasilających obciążen nieliniowych.



Rys.45: Pomiar harmoniczných bez filtra



Rys.46: Pomiar harmoniczných z filtrem

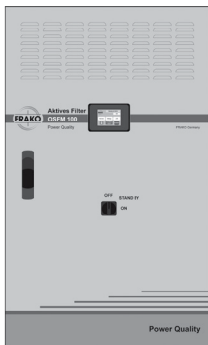
Zastosowanie:

Typowe zastosowania to

- Sieci niskonapięciowe z dużą liczbą przemienników częstotliwości, w których wymagane jest zasilanie tylko ograniczonych prądów harmoniczných z powrotem do nałożonej sieci, np. za pomocą długich linii do obiektów oddalonych.
- Nowoczesne napędy przekształtnikowe z wysokim sprzężeniem zwrotnym harmonicznym, ale o niskim zapotrzebowaniu na moc bierną. W sieci niskiego napięcia z transformatorem 1000 kVA i zastosowaniem wielu mniejszych silników asynchronicznych zdecydowanie wymagany jest system sterowania mocą bierną o mocy znamionowej 400 kVar. Przy zastosowaniu nowoczesnych przemienników częstotliwości zapotrzebowanie wynosi nadal około 100 kVar.
- Sieci niskiego napięcia z wysokim udziałem 3-ciej harmonicznej z dużą ilością odbiorników 1-faz. Te niskonapięciowe sieci charakteryzuje wyjątkowo wysoki prąd w przewodzie neutralnym, który powinien być zbliżony do wartości 0 A przy w symetrycznie rozłożonym obciążeniu rezystancyjnym. Ze względu na obciążenie elektroniczne, oprócz możliwych asymetrii obciążeń rezystancyjnych, prądy harmoniczne trzech faz w przewodzie zerowym sumują się, ponieważ harmoniczne 3, 9 i 15-rzędu na trzech fazach mają to samo położenie fazowe. W rezultacie otrzymujemy prąd zerowy, który może być większy niż prąd fazowy i przeciąża przewód zerowy, który nie jest do tego przeznaczony.

// "Działania" zapobiegające składowym harmonicznym

Aktualnie nie ma możliwości zminimalizowania harmonicznym w sieciach energetycznych po rozsądnych kosztach. W większości przypadków podejmowane są próby ich eliminacji lub tłumienia na urządzeniu generującym za pomocą elementów pasywnych. Dla każdej harmonicznym należy jednak zastosować skoordynowany układ składający się z dławików i kondensatorów w celu zmniejszenia niepożądanych skutków. Za pomocą aktywnego filtra harmonicznym można skutecznie rozwiązać problem.



Rys.47: Aktywny filtr składowych harmonicznym typu OSFM

Wszystkie całkowite wielokrotności drgań podstawowych nazywane są drganiami harmonicznymi wyższymi lub harmonicznymi. W większości przypadków dana harmoniczna jest poprzedzona odpowiednią liczbą porządkową "n". W oparciu o częstotliwość napięcia sieciowego 50 Hz, piąta harmoniczna ma częstotliwość 250 Hz. Podstawą tej prezentacji jest matematyczne twierdzenie, że każda powtarzająca się w sposób ciągły forma oscylacji może być podzielona na wiele całkowitych czystych sinusoidalnych oscylacji. Harmoniczne występują podczas pracy obciążeń (odbiorników) o niesinusoidalnym poborze prądu. Kształt tej krzywej określa liczbę i amplitudę harmonicznym. Im większe odchylenie od sinusoidy, tym więcej harmonicznym jest wprowadzanych z powrotem do sieci przez konsumenta/odbiorcę i tym większa amplituda pojedynczych harmonicznym. Rozbiór przebiegu fali jest przeprowadzany przez tzw. analizę Fouriera, w której każdej harmonicznym przypisana jest odpowiednia liczba porządkowa i amplituda.

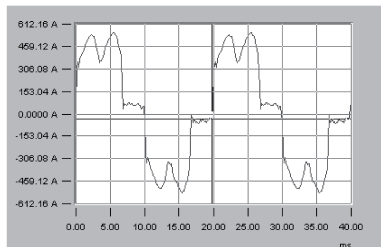
Prostą metodą określania poszczególnych harmonicznym jest pomiar amperomierzem cęgowym, który może wyświetlić harmoniczne z mierzonego sygnału. W ten sposób można w danym momencie przedstawić tylko jedną harmoniczną, ale stosunkowo szybko i łatwo można uzyskać przybliżony przegląd amplitud poszczególnych harmonicznym. Istnieje wiele skutków, które wskazują na obecność harmonicznym: komputery ulegają awariom, pojawiają się błędy dysku twardego, migoczą ekrany, przegrzanie przewodu zerowego (N), następuje uszkodzenie systemów kompensacyjnych lub w innych komponentach systemu zauważalna jest korozja.

Zasada działania aktywnego filtra harmonicznym

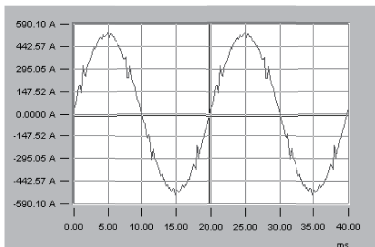
Podstawową ideą stosowania filtra harmonicznym OSFM jest aktywna kompensacja. Po pierwsze, przekładnik mierzy natężenie prądu pobieranego przez odbiorcę. Jednostka sterująca OSFM analizuje następnie ten prąd pod kątem amplitudy i harmonicznym, a następnie zasilą system prądem, który dokładnie odpowiada prądowi odbiorcy pod względem amplitudy i liczby porządkowej poszczególnych harmonicznym. Jednakże przebieg fazowy prądu zasilającego jest przesunięty o 180° względem przebiegu prądu odbiorcy. W ten sposób prądy harmonicznym znoszą się nawzajem a sieć zasilająca dostarcza składową podstawową i nie jest

obciążona harmonicznymi. Dużą zaletą filtra aktywnego w porównaniu z tradycyjną techniką jest elastyczne dopasowanie mocy kompensacji. W zależności od potrzeb filtr może dostarczać więcej lub mniej prądu kompensacyjnego.

Nawet w przypadku przeciążenia filtr nie wyłącza się, tylko silnie ogranicza prąd. Oznacza to, że filtr generuje swój maksymalny prąd i w ten sposób kompensuje dużą część harmonicznymi. Interakcje z innymi komponentami systemu, takimi jak dławiki kompensacyjne mocy bierniej lub systemy UPS są w ten sposób zredukowane do bezkrytycznego minimum. Możliwe jest łatwe rozbudowanie lub połączenie kilku filtrów. Jeśli warunki pracy lub warunki sieciowe ulegną zmianie, filtr automatycznie dostosowuje się do swoich znamionowych parametrów roboczych.



Rys. 48: Aktualny przebieg prądu bez filtra OSFM



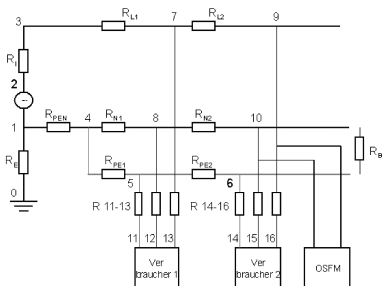
Rys. 49: Aktualny przebieg prądu z filtrem OSFM

Jakość istniejącej instalacji elektrycznej

Profesjonalnie wykonana instalacja elektryczna ma podstawowe znaczenie dla funkcji kompensacji. Zarówno rodzaj sieci, jak i jej wykonanie może nie tylko pogorszyć efektywność filtra OSFM, ale może również sprzyjać lub nawet powodować zakłócenia w dostawie energii. Każda instalacja elektryczna ma swój początek w uziemieniu. Funkcjonalny i poprawnie wykonany system uziemienia jest podstawą każdego systemu zasilania w energię. Jeśli jest on wadliwie wykonany wówczas przeniesienia napięcia, zakłócenia elektromagnetyczne i wreszcie harmoniczne znajdują idealne warunki do nieograniczonego rozprzestrzeniania się. Głównym zadaniem uziemienia jest zapewnienie, że w przypadku awarii nie zostanie wygenerowane niebezpieczne napięcie dotykowe i że prąd może płynąć bez przeszkód do ziemi. Tylko wtedy zapewnione jest zadziałanie zabezpieczenia nadprądowego w określonym czasie. Ponadto system uziemiający powinien utrzymywać różne zasoby operacyjne na możliwie najniższym poziomie i wyrównywać ewentualne różnice potencjałów

Ścisłe oddzielenie N od PE

Jeżeli funkcja ta zostanie zakłócona, np.: z powodu przepływu prądów roboczych w przewodzie PE, wokół przewodów ochronnych i wyrównawczych tworzy się pole elektromagnetyczne, które może prowadzić do znacznych zakłóceń. Ponieważ takie pola tworzą się również np.: w ekranach przewodów sieci danych, zakłócenia mogą prowadzić do utraty tych danych. Połączenie przewodu PE z innymi systemami przewodzącymi, takimi jak systemy wodne, gazowe lub grzewcze, powoduje dodatkowe prądy robocze dla tych elementów systemu. Konsekwencją jest pojawienie się napięcia i korozja.



Rys. 50: Przykładowa prezentacja symulowanego systemu 1-faz.

zgodnie z powyższymi kryteriami. Niestety obecnie obowiązujące przepisy (2001) nie nakazują obowiązkowego rozdzielania N od PE. Istnieją tylko zalecenia, szczególnie z branży IT i telekomunikacyjnej oraz stowarzyszenia ubezpieczycieli majątkowych, dotyczące stosowania okablowania 5-przewodowego. Oczywiście nie można uniknąć prądów filtrujących w przewodzie PE. Ze względu na dyrektywę EMC, zarówno zakład, jak i projektant urządzeń znajdują się obecnie w dylemacie technicznym. Z jednej strony, urządzenia i systemy powinny wprowadzać jak najmniej zakłóceń do sieci, z drugiej strony muszą pracować bez zakłóceń, a generowane prądy zakłócające powinny być rozpraszane. W większości przypadków rozładowanie to odbywa się poprzez kondensatory filtracyjne bezpośrednio przy przewodzie ochronnym. W przypadku urządzeń podłączonych na stałe może być również rozładowanie przez przewód neutralny; nie jest to możliwe przy obciążeniach wtykowych z wtyczkami z uziemieniem, ponieważ wtyczkę można obracać o 180° .

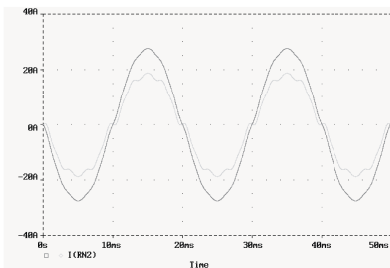
Przykład

Konwencjonalny komputer PC z zasilaczem 250 W ma prąd upływowy o wartości około 1 mA. Składa się on ze składowej podstawowej 50 Hz i różnych harmonicznych. Prądy upływowe powodują zanieczyszczenie przewodu PE, ale na ogół nie są krytyczne dla bezpieczeństwa pracy instalacji. 100 komputerów ma odpowiednio prąd upływowy około 0,1 A. Zakładając rezystancję PE około 1 Ω , daje to spadek napięcia o 0,1 V. Zazwyczaj cały system przewodów ochronnych ma niską impedancję. (Kabel o przekroju 10 mm² ma rezystancję 0,0012 Ω lub $1,2 \times 10^{-3} \Omega$ na metr). W systemie o znamionowym prądzie odbiornika 100 A, prąd 3 ciej harmonicznej może mieć wartość 40 A powodując spadek napięcia co najmniej 40 V.

Jest to klasyczny przypadek zastosowania dla Aktywnego Filtra OSFM. Kompensacja obciążeń generujących duże prądy harmoniczne odciąża liniowy system harmonicznych i chroni inne obciążenia przed skutkami ich działania. Działa to jednak tylko wtedy gdy przewody N i PE są rozdzielone. Doświadczenie praktyczne pokazało, że stosowanie filtra OSFM umożliwia zmniejszenie harmonicznych z ponad 30% do około 5%. I to dla użytkowników, z silnie odkształconym przebiegiem prądowym i peakami prądowymi

Dlatego też podstawowym wymogiem nowoczesnego systemu zasilania jest rozdzielanie przewodów N i PE oraz ich właściwa izolacja.

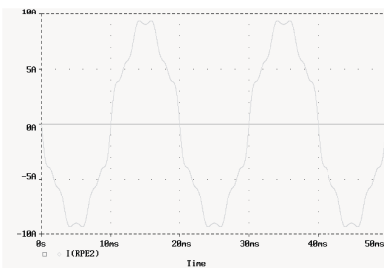
W jednym konkretnym przypadku harmoniczne zakłócały działanie telefonów i powodowały migotanie ekranów. Pomiar harmonicznych wykazał silny udział trzeciej harmonicznej do 35% prądu nominalnego, jednak nie tylko w przewodzie N, ale przede wszystkim w przewodzie PE. Zanim w takim przypadku będzie można podjąć działania w celu kompensacji, konieczne jest zoptymalizowanie systemu przewodów



Exit Add_trace Remove_trace X_axis V_axis Plot_control Display_control
Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config.colors

Rys. 51:

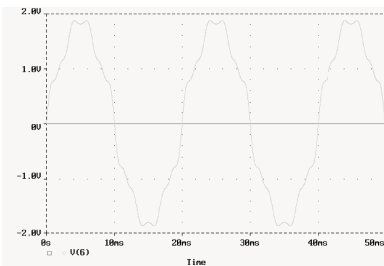
Prąd w R_{N2} bez i z rezystorem mostkowym R_s



Exit Add_trace Remove_trace X_axis V_axis Plot_control Display_control
Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config.colors

Rys. 52:

Prąd w R_{PE2} bez i z rezystorem mostkowym R_s



Exit Add_trace Remove_trace X_axis V_axis Plot_control Display_control
Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config.colors

Rys. 53: Napięcie w PE w odbiorniku 2 mierzone do masy

Symulacja różnych warunków sieciowych może wyjaśnić wpływ na zawartość harmoniczných. Dla uproszczenia prezentacji wystarczy

jednofazowa sieć z przewodami N i PE. System jest obciążony dwoma użytkownikami, przy czym pierwszy z nich wprowadza harmoniczne do systemu zasilania, drugi nie generuje składowych harmoniczných lub są one kompensowane przez filtr CSFM. W idealnym przypadku obciążenie przewodów PE składa się tylko z prądów filtrujących użytkownika, które są spowodowane np. przez przełączanie zasilaczy lub filtrów sieciowych.

Oczywiście, harmoniczne są również wprowadzane do przewodu PE przez te filtry. W celu przeprowadzenia symulacji tak praktycznie, jak to możliwe, odpowiednie amplitudy i liczby porządkowe harmoniczných zostały pobrane z analizatora sieci.

Kształt krzywej prądu odpowiada prawie istniejącej charakterystyce obciążonego systemu zasilania. Pomimo obciążenia harmonicznymi prąd upływu filtra znajduje się w zakresie [mA] i dlatego tylko w niewielkim stopniu zakłóca funkcjonowanie przewodu PE. Jeżeli oddzielenie N od PE zostanie zniesione, z powodu np.: zmostkowania szyn N i PE w podrozdzielnicy;

wówczas w przewodzie PE popłynie prąd roboczy. Ponieważ N i PE są połączone równolegle, prądy są dzielone odwrotnie proporcjonalnie do stosunku rezystancji.

Połączenie biegunów N i PE, powoduje powstanie potencjałów napięciowych a poprzez to pola elektromagnetycznego na ekranach żył przewodów, armaturze, rurach wodnych, grzewczych i gazowych. Wszystkie metalowe elementy bucowlane mogą zatem stać się źródłem zakłóceń. Przewód ochronny jest w tym momencie obciążony prądami roszoczymi i podniesiony do potencjału w stosunku do uziemienia. W zależności od prądu i rezystancji mogą występować napięcia w zakresie do 100 V.

Ze względu na obciążenie przewodu ochronnego prądami harmonicznymi, natężenie prądu może znacznie wzrosnąć powyżej rzeczywistego prądu znamionowego odbiornika. Poza zakłóceniami eksploatacyjnymi, przewody PE/N narażone są również na zbyt duży wzrost temperatury mogący spowodować ich uszkodzenie. Logicznie rzecz biorąc, przebieg napięcia w przewodzie PE podąża za przebiegiem prądu, dzięki czemu przewód PE może wykazać potencjał względem ziemi i przestać pełnić swoją funkcję.

Podsumowanie

Skutecznym środkiem do zmniejszenia harmonicznymi i ich wpływu na zasilanie jest zastosowanie aktywnych filtrów harmonicznymi. Równie ważna jest jednak poprawnie wykonana instalacja elektryczna. W praktyce konieczne jest zatem mierzenie prądów w przewodzie ochronnym. Pomiar ten umożliwia natychmiastowe wykrycie niedopuszczalnych zjawisk. Z drugiej strony, lokalizacja wykonanych w nadmiarze punktów połączeń N i PE jest bardziej złożona. Wymaga to precyzyjnej wiedzy na temat prowadzenia kabli i układu budynków. Tylko dzięki przestrzeganiu powyższych wytycznych można osiągnąć niezawodność systemu zasilania i poprawić jakość napięcia.

Kompensacja mocy biernej

Najwyższa gęstość
mocy w najmniejszej
przestrzeni



Jakość zasilania

Rejestracja, dokumentacja i ocena
parametrów elektrycznych.
Poprawa jakości sieci.



Monitorowanie kosztów energii

Nadzór nad kosztami,
przejrzystość danych
finansowych



Systemy zarządzania energią

Optymalizacja, przełączanie w
czasie, zapis danych, wizualizacja
procesów

