

WYMAGANIA PROJEKTOWE, DOBÓR ORAZ SPOSOBY ZABEZPIECZEŃ DLA UKŁADÓW KOMPENSACJI W SIECIACH DYSTRYBUCYJNYCH I PRZESYŁOWYCH ZGODNIE Z NORMĄ PN-EN-60871-1

Marcin Dębek, Marek Iwanicki
P.B.W. OLMEX S. A.

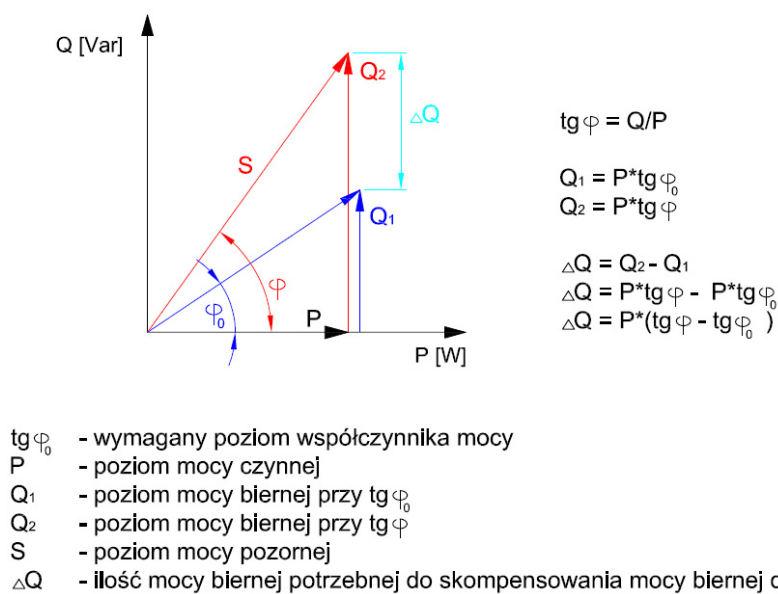
1. WSTĘP

W systemie elektroenergetycznym moc bierną kompensujemy w celu odciążenia sieci od przepływu prądów biernych, dzięki temu możemy zmniejszyć moc pozorną źródła energii.

Przesył mocy biernej dodatkowo wpływa niekorzystnie na pracę sieci, związane jest to z:

- zwiększeniem strat mocy czynnej,
- zwiększeniem spadków napięć w sieci,
- ograniczeniem możliwości przesyłu mocy czynnej,
- wzrostem nakładów inwestycyjnych na urządzenia elektroenergetyczne,
- trudnościami w pracy elementów sieci.

Kompensacja mocy biernej w sieci elektroenergetycznej polega na takim skojarzeniu odbiorników energii elektrycznej by charakter sieci odpowiadał wymaganiom w zakresie utrzymania właściwych parametrów sieci. Najogólniej rzecz ujmując, można stwierdzić, że niekorzystny współczynnik mocy, wynikający z dużego udziału odbiorów o charakterze indukcyjnym może być ograniczany (kompensowany) poprzez włączenie do sieci odbiorników o charakterze pojemnościowym. Ideę kompensacji mocy biernej w sieci elektroenergetycznej w sposób schematyczny przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy przedstawiający kompensację mocy biernej

Zbilansowanie mocy biernej ważne jest nie tylko w całym krajowym systemie elektroenergetycznym, ale także w poszczególnych obszarach i węzłach sieci.

Rozsądnym rozwiązaniem jest stosowanie baterii kondensatorów na stacjach położonych daleko od źródeł wytwórczych, gdzie nie ma możliwości regulacji mocy biernej przez elektrownie

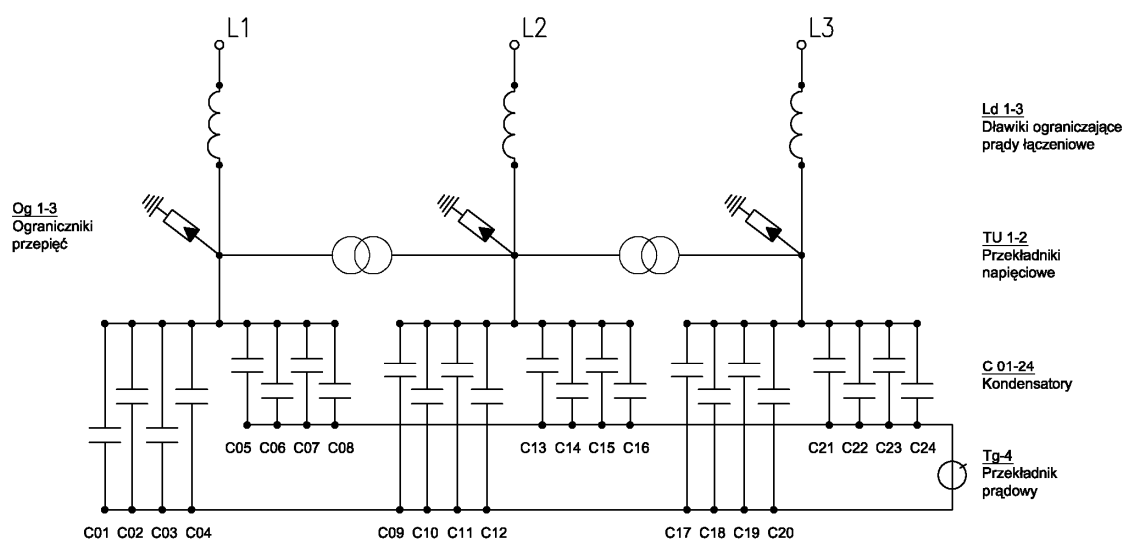
systemowe. Optymalizacja gospodarki mocą bierną wiąże się z wyznaczeniem prawidłowych mocy oraz węzłów sieci, do których powinny być przyłączone urządzenia kompensujące.

Najczęściej stosowaną formą kompensacji mocy biernej w polskim systemie są baterie kondensatorów zbudowane z jednostek kondensatorowych jednofazowych połączonych w układzie podwójnej gwiazdy (rys. 2 i 3). W sieci dystrybucyjnej takie baterie przyłączane są w stacjach 110kV/SN poprzez własne pole zasilające do rozdzielni SN.

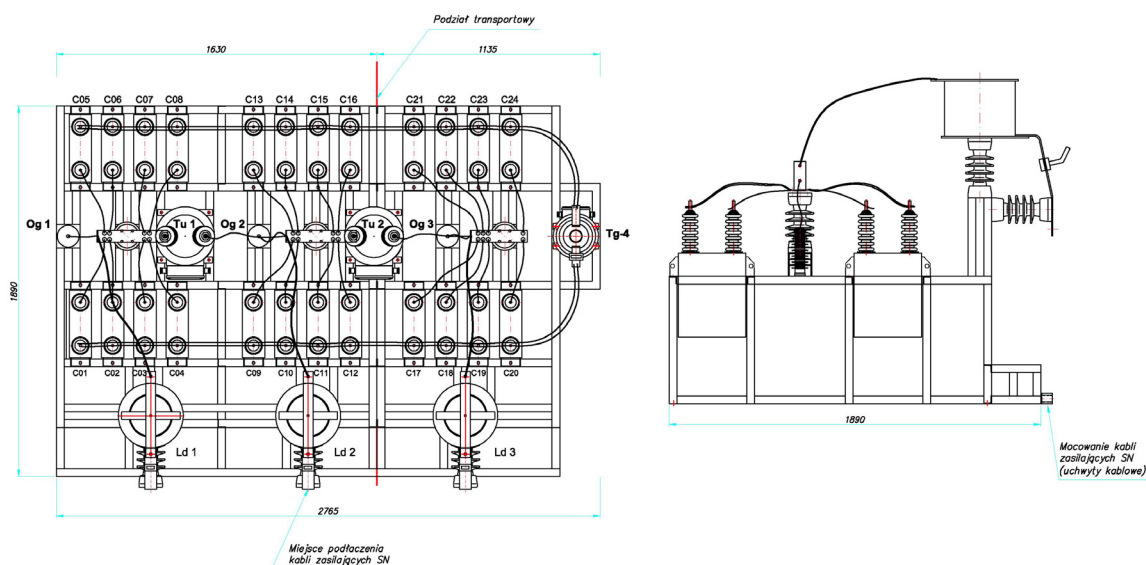
W roku 2009 firma P.B.W. Olmex S. A. zrealizowała również kompensację mocy biernej w sieci przesyłowej na napięciu 220kV bateriami o mocy 2 x 50MVar przyłączonymi do SE Plewiska oraz na napięciu 110kV bateriami o mocy 2 x 50MVar przyłączonymi do SE Mory.

Osobną grupę stanowią baterie kondensatorów średniego lub niskiego napięcia zainstalowane u odbiorców. Ich zadaniem jest poprawa współczynnika mocy w celu uzyskania tg ϕ , zgodnie z wymaganiami taryfowymi.

Dodatkowo stosuje się kompensację prądu biegu jałowego transformatora w stacjach SN/nn poprzez zainstalowanie kondensatora bezpośrednio na transformatorze po stronie niskiego napięcia.



Rys 2. Schemat ideowy baterii kondensatorów w układzie YY



Rys 3. Widok stanowiska napowietrznej baterii kondensatorów SN o mocy 2,4 MVar

2. PRACA BATERII W ŚRODOWISKU WYŻSZYCH HARMONICZNYCH

Przed doбором baterii kondensatorów należy wykonać pomiary określające poziom wyższych harmonicznnych oraz sprawdzić, czy w danym punkcie przyłączenia baterii do sieci nie ma możliwości wystąpienia rezonansu z jedną z harmonicznnych, powodującego niedopuszczalne przeciążenie kondensatorów, które może spowodować uszkodzenie baterii.

Obliczenia rezonansów można wykonać na praktycznie stosowanych wielkościach tj. moc zwarciova w danym punkcie sieci, moc transformatora czy napięcie zwarcia zgodnie z poniższymi wzorami:

$$r = \sqrt{\frac{S}{Q_n}} \quad (2.1)$$

r - rząd harmonicznnych

S - moc zwarciova w danym punkcie sieci (MVA)

Q_n - moc bierna znamionova baterii kondensatorów (MVar)

Dla baterii projektowanych bezpośrednio za transformatorem, rząd harmonicznnej rezonansowej można obliczyć ze wzoru:

$$r = 10 \times \sqrt{\frac{S_T}{u_z \times Q_n}} \quad (2.2)$$

r - rząd harmonicznnych

Q_n - moc bierna znamionova baterii kondensatorów (MVar)

S_T - moc transformatora (MVA)

u_z - napięcie zwarcia transformatora (%)

Podczas projektowania podłączenia baterii kondensatorów powyższe wzory umożliwiają dobranie takiej mocy baterii, aby wykluczyć teoretyczne wystąpienie rezonansów. W praktyce moc zwarciova w sieci nie jest stała, zmienia się w zależności od konfiguracji sieci. Należy pamiętać że zastosowanie dławików ograniczających prądy łączeniowe może wpływać na zmianę mocy zwarciovej, co może przyczynić się do zmiany częstotliwości rezonansowej. W przypadku baterii wielo członowych należy przeprowadzić obliczenia dla każdej konfiguracji mocy baterii, uwzględniając również moce baterii istniejących, jeśli takie występują.

Odstrojenie się od mocy rezonansowych może okazać się niewystarczające, jeżeli wykonane pomiary wykazują dużą zawartość wyższych harmonicznnych w sieci zasilającej lub jeśli na etapie projektowym wynika to z analizy zainstalowanych odbiorników, wtedy ryzyko przeciążenia baterii ponad dopuszczalną wartość jest bardzo wysokie. W takim przypadku należy zastosować inne środki zapobiegawcze, do których należą m.in. :

- włączenie dławika w szereg z kondensatorem,
- przeniesienie baterii do innej części systemu.

3. ELIMINACJA WYSTĘPOWANIA PRZEJŚCIOWYCH PRZECIĄŻEŃ PRĄDOWYCH

Na etapie projektowym należy sprawdzić czy nie występuje możliwość załączania baterii kondensatorów do równolegle pracującej w sieci baterii.

W przypadku gdy bateria załączana jest do innych już będących pod napięciem baterii kondensatorów mogą występować przejściowe przeciążenia prądowe o dużej amplitudzie i wysokiej częstotliwości. Przeciążenia prądowe dotyczą także baterii wielocłonowych, gdzie do członu będącego pod napięciem, dołączany jest kolejny człon baterii.

W celu obniżenia przejściowych przeciążeń prądowych do wielkości odpowiadającej kondensatorowi i jego wyposażeniu, konieczne jest załączanie kondensatorów poprzez rezystor (załączanie rezystorowe) lub przez zainstalowanie dławików w obwodzie zasilania każdej sekcji baterii.

Zaleca się, aby wartość szczytowa przeciążeń prądowych wynikająca z czynności łączeniowych była ograniczona i nie przekraczała maksymalnej wartości $100I_n$ (wartość skuteczna).

Początkową wartość szczytową prądu baterii można obliczyć ze wzoru:

$$I_s = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_c X_L}} \quad (3.1)$$

gdzie:

$$X_c = 3U^2 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \times 10^{-6} \quad (3.2)$$

- I_s - początkowa wartość szczytowa prądu baterii (A)
- U - napięcie fazowe (V)
- X_c - fazowa szeregowo reaktancja pojemnościowa (Ω)
- X_L - fazowa reaktancja indukcyjna między bateriami (Ω)
- Q_1 - moc załączonej baterii (MVar)
- Q_2 - moc baterii pracującej w sieci (MVar)



Fot 1. Widok baterii kondensatorów BKS-6 z dławikami ograniczającymi prądy łączeniowe

4. WYBRÓR NAPIĘCIA ZNAMIONOWEGO BATERII KONDENSATORÓW

Dobór odpowiedniego napięcia kondensatorów ma znaczący wpływ na niezawodność oraz trwałość jednostek kondensatorowych. Stosowania nadmiernego marginesu bezpieczeństwa przy wyborze napięcia znamionowego jednostek kondensatorowych, powoduje znaczne obniżenie ich mocy.

Zgodnie z normą zaleca się przyjęcie napięcia pracy równego napięciu znamionowemu sieci lub deklarowanemu.

Często przyjmuje się napięcie kondensatorów równe 1,05 wartości napięcia znamionowemu sieci. Należy zwrócić uwagę, że podane zasady są słuszne tylko wtedy gdy napięcie w sieci osiąga wartości wyższe, tylko w krótkich okresach czasu.

W niektórych sieciach mogą występować znaczne różnice między napięciem pracy, a napięciem znamionowym sieci.

Przyjmując maksymalne przeciążenie napięciowe kondensatorów 110%, minimalną wartość napięcia znamionowego kondensatorów można wyznaczyć ze wzoru:

$$U_{kond} = \frac{U_{max}}{1,1} \quad (4.1)$$

- U_{kond} - napięcie znamionowe kondensatorów
- U_{max} - najwyższe napięcie sieci

Umożliwi to pracę kondensatora nawet przy najwyższym napięciu sieci. Ważne jest aby przy doborze takiego napięcia, zabezpieczenie nadnapięciowe nie dopuściło do pracy baterii w czasie dłuższym niż 12h/dobę przy najwyższym napięciu sieci. Należy podkreślić, że dobór napięcia znamionowego baterii według wzoru (4.1) jest prawidłowy tylko wtedy, gdy trwale występujące napięcie sieci jest niższe od napięcia obliczonego U_{kond} .

Jeżeli ten warunek nie jest spełniony zaleca się aby napięcie znamionowe kondensatorów było, co najmniej równe napięciu trwale utrzymującego się w sieci. W takich przypadkach bezpiecznie jest zastosować wyższe napięcie kondensatorów, tak aby nie dopuszczać do przeciążenia napięciowego.

Wybór optymalnego napięcia kondensatorów zależy od wielu czynników tj. możliwość występowania przepięć przejściowych oraz warunków temperaturowych pracy baterii, które mogą mieć wpływ na dobór wyższego napięcia znamionowego. Dodatkowo przy określaniu spodziewanej wartości napięcia na zaciskach kondensatora zaleca się uwzględnić przepięcia przejściowe przy wyłączaniu baterii przez wyłączniki. Jeżeli projektuje się baterie wyposażone w dławiki wpięte szeregowo, w celu zmniejszenia efektu wywołanego wpływem harmonicznych, należy uwzględnić wzrost napięcia za dławikiem. Przy doborze napięcia kondensatorów należy również pamiętać, że kondensatory pracujące równolegle powodują trwały wzrost napięcia w sieci, w której są zainstalowane.

Wzrost napięcia w sieci po zainstalowaniu baterii oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{Q_n}{S} \quad (4.2)$$

ΔU - wzrost napięcia

U - napięcie przed podłączeniem kondensatora

S - moc zwarciorowa w danym punkcie sieci (MVA)

Q_n - moc bierna znamionowa baterii kondensatorów (MVar)

Wyboru ostatecznego napięcia jednostek kondensatorowych jest kwestią indywidualną dla każdego punktu sieci. Przed wyborem należy przeanalizować wszystkie czynniki, które mogą mieć wpływ na prawidłową pracę baterii kondensatorów.

5. WARUNKI PRACY BATERII KONDENSATORÓW

a) Temperatura otoczenia baterii

Zaleca się zwrócić uwagę zwłaszcza na górną temperaturę pracy kondensatorów, ponieważ ma ona duży wpływ na czas życia kondensatorów.

Wentylacja pomieszczeń i rozmieszczenie w nim jednostek powinny umożliwiać swobodny przepływ powietrza wokół każdej jednostki. W przypadku gdy jednostki narażone są na działanie promieni słonecznych lub promieniowanie z innej powierzchni ogrzanej do wysokiej temperatury może być konieczne zastosowanie środków zapobiegawczych w postaci:

- ochrony kondensatorów przed promieniowaniem
- zwiększenie kategorii temperaturowej
- zwiększenie napięcia znamionowego
- zastosowanie wymuszonego obiegu powietrza chłodzącego

Należy wybrać odpowiednią kategorię temperaturową dla kondensatorów zgodnie z tab. 1.

Tab. 1. Symbole literowe dla górnej granicy zakresu temperatury

Symbol	Temperatura otoczenia (°C)		
	Największa wartość	Najwyższa wartość średnia w dowolnym okresie w ciągu	
		24 h	1 rok
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

b) Przepięcia piorunowe

W przypadku baterii, które narażone są na wysokie przepięcia piorunowe zaleca się, aby były chronione przez ograniczniki przepięć, które należy zainstalować jak najbliżej kondensatorów.

- c) Specjalne warunki pracy
Projektant powinien uwzględnić szczególne warunkach eksploatacji baterii, takie jak:
- wysoka wilgotność względna
 - szybki wzrost pleśni
 - atmosfera korozyjna
 - zanieczyszczenia
 - wysokość powyżej 1000m.

6. PODSTAWOWE ZABEZPIECZENIA I BLOKADY BATERII KONDENSATORÓW SN

Baterie kondensatorów powinny być wyposażone w następujące zabezpieczenia oraz blokady:

- a) od zwarć zewnętrznych,
- b) od zwarć wewnętrznych,
- c) od przeciążeń,
- d) od zwarć doziemnych,
- e) od wzrostu temperatury w pomieszczeniu kondensatorów (dot. tylko baterii wewnętrznych),
- f) od wzrostu napięcia,
- g) od zaniku napięcia.
- h) blokada czasowa przed ponownym załączeniem nie rozładowanej baterii.

a) *Zabezpieczenie przed skutkami zwarć zewnętrznych*

Do zabezpieczeń baterii kondensatorów przed skutkami zwarć zewnętrznych należy zastosować przekaźniki działające na wyłącznik główny w torze baterii. Zabezpieczenia te nie powinny reagować na prąd załączania baterii kondensatorów. Przekaźniki należy podłączyć do przekładników prądowych znajdujących się w obwodzie głównym baterii kondensatorów lub w obwodach każdego członu baterii.

b) *Zabezpieczenie przez skutkami zwarć wewnętrznych*

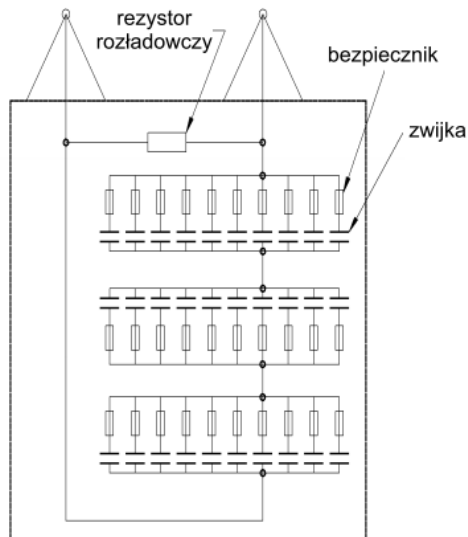
Z punktu widzenia działania zabezpieczeń bardzo ważne są zjawiska występujące przy zwarciach. Zwarcia międzyfazowe i doziemne na połączeniach oraz aparatach rozdzielczych baterii nie różnią się od zwarć tego typu występujących w innych urządzeniach elektroenergetycznych. Natomiast zwarcia wewnątrz jednostek kondensatorowych zwanymi dalej *zwarciami wewnętrznymi*, jako zjawisko specyficzne wymaga szerszego omówienia.

Najczęstszym przypadkiem uszkodzenia baterii jest zwarcie wewnętrzne, polegające na przebiciu dielektryka w zwijce kondensatorowej. Zwarcie zwijki jest w pierwszym jej stadium zwarcie łukowym. Łuk zamyka obwód RLC, w którym występuje rozładowanie energii elektrycznej nagromadzonej w zwijkach równolegle pracujących ze zwijka zwartą. Rozładowanie ma charakter oscylacyjny o dużej częstotliwości (rzędu kilku kiloherców), przy których niejednokrotnie występują przepięcia niebezpieczne dla zwijek zdrowych. Ciepło wytworzone w miejscu zwarcia powoduje stopniowe zwęglenie dielektryka i nadtopienie folii. W jednostkach mających bezpieczniki na zwijkach, zwarcie zwijki powoduje zadziałanie jej bezpiecznika i wyłączenie zwijki. Pojemność jednostki maleje, a zdrowe zwijki pracują nadal.

W kondensatorach nie wyposażonych w bezpieczniki na zwijkach, zwarcie jednej z nich prowadzi zwykle do stopniowego zniszczenia całej jednostki. Powodem tego są termiczne i chemiczne zjawiska występujące w zwartej zwijce oraz zmiana napięciowych warunków pracy zwijek zdrowych. Szkodliwe działanie cieplne jest oczywiste. Przez miejsce zwarcia płynie cały prąd jednostki kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt razy większy od prądu znamionowego zwijki. Ciepło wydzielane na rezystancji zwartej zwijki powoduje podniesienie jej temperatury. Wzrasta również temperatura pracy sąsiednich zwijek, które wskutek tego są narażone na przyspieszone starzenie dielektryka i w końcu uszkodzenie.

Zwarcie jednej zwijki bocznikuje całą grupę zwijek pracujących równolegle. Powoduje to zmianę rozkładu napięcia na szeregowo połączonych grupach wewnątrz jednostki. Zwijki zdrowe pracują wtedy przy napięciu najczęściej przekraczającym 110% ich napięcia znamionowego, co znacznie zwiększa prawdopodobieństwo uszkodzenia. Zwarcie jednej grupy zwijek w jednostce zbudowanej z kilku grup zwijek połączonych szeregowo powoduje zwiększenie pojemności

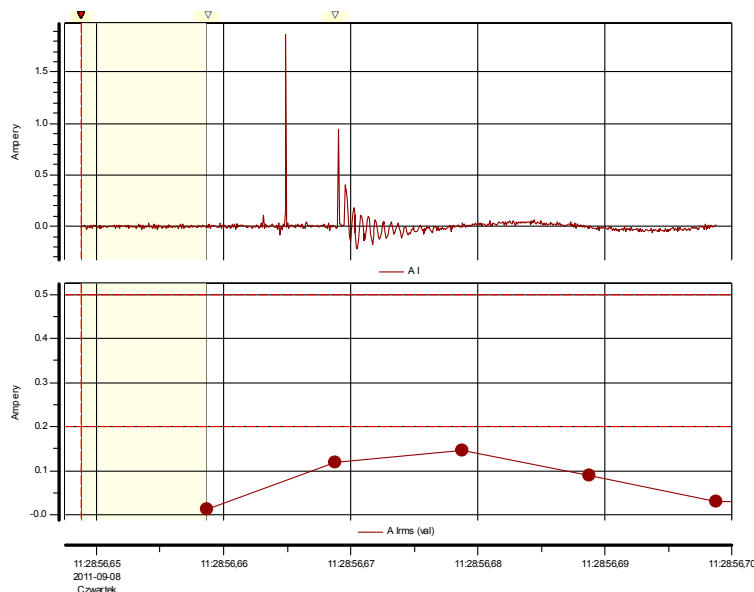
jednostki. Tym samym rośnie również moc jednostki i wydzielane straty czynne. Prowadzi to do zwiększenia temperatury jednostki i skrócenia trwałości zwijek zdrowych. Zrozumiałe jest, że wszystkie wymienione czynniki działające równocześnie prowadzi do kolejnych zwarć w dalszych zwijkach aż do pełnego zwarcia jednostki. Powstaje przy tym duża ilość gazów, które podnoszą ciśnienie wewnątrz obudowy kondensatora mogąc doprowadzić do jego rozerwania.



Rys. 4. Budowa kondensatora. Schemat połączeń

Do ochrony baterii kondensatorowej przez skutkami zwarć wewnętrznych zbudowanej w układzie podwójnej gwiazdy (Y-Y) w połączeniu między gwiazdowym instaluje się przekładnik prądowy o dużej dokładności pomiaru, współpracującym z zabezpieczeniem działającym przy wzroście prądu niezrównoważenia. Zabezpieczenie ma działać na wyłączenie oraz na zablokowanie przed ponownym załączeniem. Należy nastawić zwłokę czasową działania zabezpieczenia (np. 0,2 s), potrzebną do uniknięcia wyłączeń w stanach nieustalonych baterii, przy jej załączaniu lub zwarcu w sieci. Wartość nastawionego prądu oraz czasu należy skorygować w oparciu o zarejestrowane przebiegi łączeniowe.

Przykładowy przebieg przedstawia rys 5.



Rys. 5. Wykres prądu w połączeniu między gwiazdowym baterii kondensatorów SN, podczas załączenia

c) Zabezpieczenie przez przeciążeniami prądowymi

Zabezpieczenie przed przeciążeniem prądowym powinno wyłączyć baterię kondensatorów przy prądzie przeciążeniowym o wartości większej niż $1,3 \times I_n$.

d) Zabezpieczenie przed skutkami zwarć jednofazowych do ziemi

Zabezpieczenie przed skutkami zwarć jednofazowych można wykonać jako normalne ziemnozwarciowe, które powinno chronić całą baterię (w tym kable) przed skutkami zwarć doziemnych.

e) Zabezpieczenie od wzrostu temperatury w pomieszczeniu kondensatorów (dot. tylko baterii wewnętrznych)

Zabezpieczenie takie należy instalować tam, gdzie zachodzi możliwość przekroczenia najwyższej dopuszczalnej temperatury otoczenia.

f) Zabezpieczenie przed skutkami przeciążeń napięciowych

Zabezpieczenie od skutków przeciążeń napięciowych (wzrostu napięcia) należy zrealizować za pomocą przekaźnika nadnapięciowego zwłocznego zasilanego z przekładników napięciowych w polu pomiarowym. Zabezpieczenie powinno działać na wyłączenie baterii.

Jednostki kondensatorowe powinny nienagannie pracować przy poziomach napięć zgodnie z wartościami podanymi w tabeli 2.

Współczynnik napięciowy $\times U_n$ (wartość skuteczna)	Maksymalny czas trwania
1	Długotrwale
1,1	12 h w ciągu każdych 24 h
1,15	30 min w ciągu każdych 24 h
1,2	5 min
1,3	1 min

Tab. 2. Dopuszczalne poziomy napięć w eksploatacji

g) Zabezpieczenie od zaniku napięcia

Zabezpieczenie zanikowe (podnapięciowe) zasilane z przekładników napięciowych w polu pomiarowym powinno działać jako bezzwłoczne na wyłączenie baterii.

Każdy chwilowy zanik napięcia i ponowny jego powrót, może spowodować uszkodzenie kondensatorów, jeśli napięcie szczytkowe w chwili załączenia jest większe niż 10% napięcia znamionowego.

h) Blokada czasowa przed ponownym załączeniem nie rozładowanej baterii

Ponowne załączenie baterii do sieci dopuszcza się tylko wtedy gdy napięcie szczytkowe na kondensatorach nie przekracza 10% napięcia znamionowego. W przypadku baterii regulowanych automatycznie, baterie należy wyposażyć w blokadę czasową przed ponownym załączeniem nie rozładowanej baterii. Zaleca się zastosowanie blokady również w przypadku baterii sterowanych ręcznie, w celu uniknięcia pomyłem przez obsługę.

7. PODSUMOWANIE

Do najczęściej popełnianych błędów podczas projektowania baterii kondensatorów można zaliczyć:

- dobór mocy baterii tylko na podstawie mocy transformatora, a nie głębszej analizy sieci i potrzeb systemu w danym punkcie sieci;
- brak obliczeń rezonansowych i nie stosowanie środków zapobiegawczych w celu uniknięcia przeciążeń kondensatorów;
- brak obliczeń początkowych prądów szczytowych przy załączaniu dwóch równoległych baterii, w rezultacie projektowanie baterii bez dławików i ostatecznie przeciążanie kondensatorów ponad normatywne wartości;
- dobór nie właściwego napięcia znamionowego kondensatorów;
- projektowanie błędnych nastaw aparatury zabezpieczeniowej:
 - nie poprawna wartość prądu zabezpieczenia od zwarć wewnętrznych (pomiar prądu w połączeniu między gwiazdowym baterii).

- brak zabezpieczenia zanikowego (podnapięciowego).
- wybór wartości kontrolowanej w zabezpieczeniu '1 harmoniczna', a nie wartości RMS.
- brak blokady czasowej załączenia nie rozładowanej baterii;
- dobór aparatury łączeniowej dla baterii kondensatorów nie posiadającej wymaganej zdolności łączenia prądów pojemnościowych.

Błędy popełnione przy projektowaniu baterii kondensatorów lub niewłaściwa eksploatacja mogą prowadzić do uszkodzenia baterii, a nawet do jej eksplozji. Minimalizacja błędów na etapie projektowania ma znaczący wpływ na prawidłową pracę baterii, jej niezawodność, a także na bezpieczeństwo obsługi.

Literatura

- [1] Norma PN-EN 60871-1 „Kondensatory do kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym powyżej 1000V”
- [2] Nartowski Z.: Baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej. WNT, Warszawa, 1967
- [3] Poradnik Inżyniera Elektryka, tom 3. WNT, Warszawa, 1996
- [4] Poradnik Inżyniera Elektryka, tom 2. WNT, Warszawa, 1995, 1997
- [5] Badania własne Przedsiębiorstwa Badawczo-Wdrożeniowego "OLMEX" S.A.