

Prof. Zbigniew Hanzelka
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

PROCES ŁĄCZENIA BATERII KONDENSATORÓW¹

Streszczenie: Wraz ze wzrostem cen energii elektrycznej, stała bateria kondensatorów przeznaczona do kompensacji - w przypadku zmiennej mocy biernej - jest już obecnie coraz częściej nie akceptowanym rozwiązaniem. Potrzebne są baterie przełączalne, zmieniające wartość mocy biernej w ślad za zmianami stanu kompensowanych odbiorników. Ponieważ wartość ich mocy oraz warunki pracy systemu zasilającego podlegają zmianie, kondensatory są załączane i wyłączane, niekiedy bardzo często, w celu spełnienia wymagań regulacji napięcia i korekcji współczynnika mocy. Proces łączenia baterii kondensatorów to źródło zaburzeń w sieci zasilającej. Ważna jest znajomość istoty tych procesów, związanych z nimi zagrożeń oraz sposobów redukcji negatywnych skutków.

1. WSTĘP

Załączanie baterii kondensatorów jest procesem bardzo często występującym w systemie zasilającym. Kondensatory służą do realizacji trzech podstawowych celów (równocześnie bądź oddzielnie): kompensacji mocy biernej, filtracji wyższych harmonicznnych oraz stabilizacji napięcia.

Łączenie baterii to proces wywołujący zaburzenie w układzie zasilającym. Skutkiem są stany przejściowe w napięciu, które najczęściej nie stanowią problemu z punktu widzenia urządzeń elektroenergetycznych, lecz które w pewnych okolicznościach mogą negatywnie oddziaływać na odbiorców finalnych. Zainstalowana u tych ostatnich ochrona przepięciowa od zaburzeń wysokiej częstotliwości może nie być przystosowana do przejęcia energii niskoczęstotliwościowych przebiegów towarzyszących łączeniu kondensatorów. Wiele urządzeń elektronicznych i energoelektronicznych, posiadających w swych układach zasilających kondensatory są czułe na ten rodzaj zaburzenia nawet, jeżeli jego wartość nie jest zbyt duża. Skutkiem mogą być nieprawidłowości w ich działaniu lub nawet, w krańcowych przypadkach, trwałe uszkodzenia.

2. PROCES ŁĄCZENIA BATERII KONDENSATORÓW

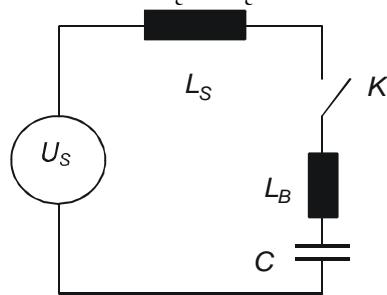
W procesie łączenia można wyróżnić dwa przypadki, istotne z punktu widzenia występujących procesów łączeniowych:

- łączenie pojedynczej baterii kondensatorów (dominują przepięcia);
- przyłączanie kolejnej baterii do szyn, do których są już dołączone inne kondensatory (dominują przetężenia o dużej częstotliwości).

2.1. Łączenie pojedynczej baterii kondensatorów

¹ Elektroinstalator 2/2002

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy obwodu, który posłuży do analizy procesu łączenia pojedynczej baterii kondensatorów o pojemności C . Założono brak rezystancji w obwodzie oraz brak napięciowego warunku początkowego na kondensatorze w chwili zamknięcia łącznika K .



- U_S - napięcie sieci zasilającej (wartość skuteczna)
- L_S - indukcyjność sieci zasilającej
- L_B - indukcyjność występująca w obwodzie przyłączanej baterii kondensatorów (np. indukcyjność przewodów łączących)
- C - pojemność załączanej baterii kondensatorów

Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy obwodu, w którym przyłączana jest pojedyncza bateria kondensatorów

Chwila załączenia kondensatora, to moment zwarcia sieci zasilającej w miejscu jego przyłączenia wynikający z faktu, że napięcie na kondensatorze nie może zmienić się w sposób natychmiastowy. Jeżeli w szereg z kondensatorem nie ma dławika, wówczas napięcie na szynach osiąga w praktyce wartość bliską zero w czasie kilku μs . W momencie zamknięcia łącznika prąd o wysokiej częstotliwości i dużej wartości płynie pomiędzy źródłem zasilania i kondensatorem powodując wyrównanie napięć między dwoma elementami obwodu. Jego wartość determinowana jest napięciem źródłowym w chwili zamykania łącznika, indukcyjnością zastępczą obwodu oraz pojemnością przyłączanego kondensatora (przy założeniu, że bateria nie była wstępnie naładowana). Wartość maksymalna tego prądu może być określona związkiem:

$$I_{\max.} = \frac{\sqrt{2}U_S}{Z_C} = \sqrt{2}U_S \sqrt{\frac{C_B(\mu F)}{(L_S + L_B)(\mu H)}} = \sqrt{2} \sqrt{I_{ZW} \cdot I_{CN}} \quad (1)$$

gdzie:

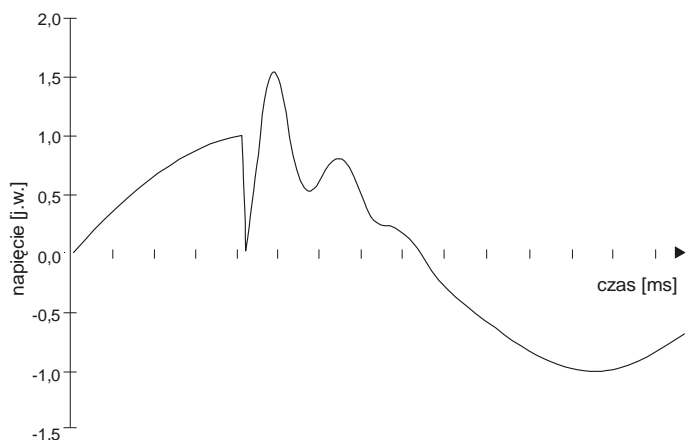
- Z_C - impedancja charakterystyczna analizowanego obwodu
- $I_{ZW.}$ - prąd zwarcia w miejscu przyłączenia baterii
- I_{CN} - znamionowy prąd baterii.

Powyzsza zależność nie uwzględnia tłumiącego efektu występującego w rzeczywistych układach. W praktyce tłumienie redukuje prąd maksymalny do około 90% wartości wyznaczonej z zależności (1).

Podczas procesu łączeniowego występują znaczące spadki napięcia na impedancjach sieci zasilającej, co może uaktywnić układy zabezpieczeń. Na rysunku 2 przedstawiono typowy przebieg napięcia (w jednostkach względnych – j.w.) podczas łączenia baterii kondensatorów. W drugim etapie procesu łączenia napięcie kondensatora narasta od zera do wartości maksymalnej, czemu towarzyszy przetężenie prądowe. Rozpoczyna się oscylacyjny proces wymiany energii – pomiędzy pojemnością kondensatora i indukcyjnością sieci zasilającej – podczas którego napięcie odzyskuje swój pierwotny przebieg czasowy. Częstotliwość tych oscylacji (f) może być szacowana na podstawie zastępczej indukcyjności systemu w miejscu przyłączenia baterii i wartości jej pojemności:

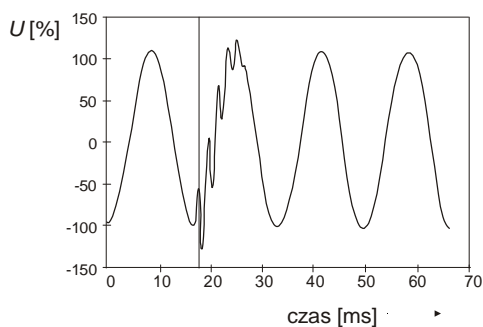
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S C_B)}} \quad \text{lub} \quad f = f_s \sqrt{\frac{I_{ZW.}}{I_{CN}}} \text{ Hz} \quad \text{gdzie} \quad f_s = 50\text{Hz}$$

Zwykle częstotliwość ta wynosi kilkaset Hz (typowo 300-600). W szczególnych przypadkach może osiągnąć wartość 900 Hz i więcej.

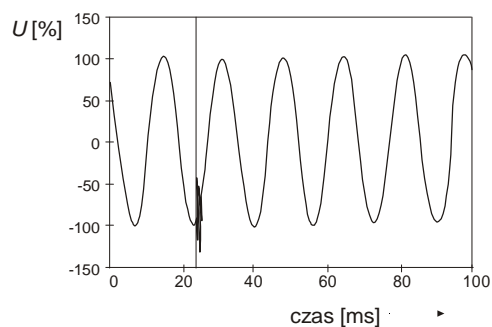


Rys. 2 Typowy przebieg napięcia zasilającego podczas procesu łączenia baterii

W początkowym okresie oscylacji chwilowe napięcie, w zależności od fazy załączenia, może osiągnąć w najbardziej niekorzystnym przypadku (załączenie nie naładowanej baterii kondensatorów w szczycie lub blisko szczytu przebiegu czasowego napięcia zasilającego), maksymalną wartość równą podwójnej amplitudzie nie zaburzonego przebiegu. Tłumienie systemu redukuje tę wartość do około 110-160%. Czas trwania zjawiska zmienia się typowo od 0,5 do 3 okresów. W przypadku dołączonych równolegle odbiorników, ich tłumiący wpływ sprawia, że proces przejściowy kończy się zazwyczaj przed upływem okresu napięcia. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy napięcia zaburzony procesem załączania baterii. Przedstawiono także prądu w linii, do której dołączono kondensatory. Proces łączenia baterii to również stres dla kondensatorów związany z przetężeniem prądowym.



(a)



(b)

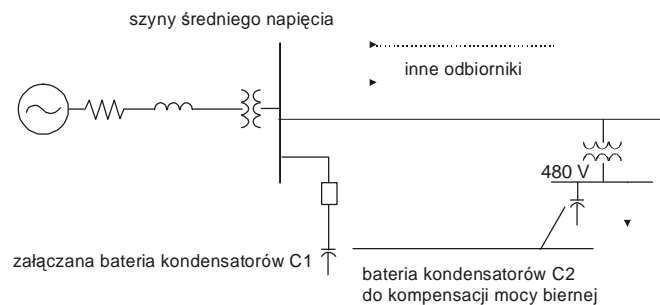
Rys. 3. Przebieg czasowy napięcia (a) i prądu (b) podczas łączenia baterii kondensatorów

Zarówno początkowa, skokowa zmiana jak i późniejsze oscylacje napięcia są ważną częścią łączeniowych stanów przejściowych. Początkowa zmiana jest istotna ze względu na dużą pochodną występującej wówczas redukcji napięcia. Następujące po niej oscylacje stanowią znacznie większy problem. Ich wartość nie jest niebezpieczna z punktu widzenia systemu transmisji i dystrybucji. Sprzęt elektroenergetyczny jest projektowany dla przepięć o wartości do 200% napięcia znamionowego. Jednakże oscylacje te, ze względu na relatywnie niską częstotliwość, przenikają przez transformatory obniżające napięcie i u finalnego użytkownika mogą być źródłem eksploatacyjnych kłopotów. Można wyróżnić dwie kategorie problemów:

- wzmocnienie zaburzenia. Proces łączeniowy wywołuje zjawisko wzmocnienia oscylacji, czego skutkiem może być między innymi uszkodzenie napięciowe sprzętu elektronicznego, kondensatorów, przepalenie bezpieczników, uszkodzenie elementów ochrony przepięciowej, itp.
- awaryjne wyłączenie czułych odbiorników. Nawet, jeżeli przebiegi oscylacyjne nie podlegają wzmocnieniu, pewne kategorie odbiorników mogą być czułe na ten rodzaj zaburzenia. Ich wartość jest wystarczająca, aby spowodować awaryjne wyłączenia np. regulowanych napędów i innych odbiorników z elektronicznymi zasilaczami lub z napięciową synchronizacją.

2.2 Proces wzmocnienia oscylacji łączeniowych

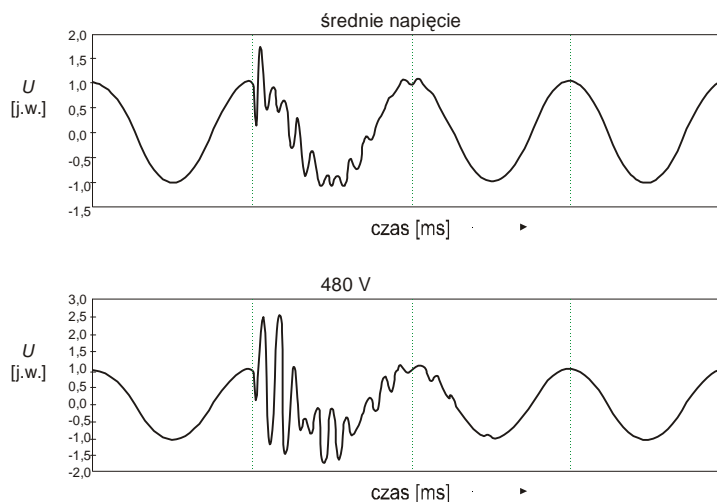
- Wzmocnienie oscylacji występuje jako rezultat pobudzenia – procesem łączenia baterii – drgań własnych w słabo tłumionym obwodzie L_5C utworzonym z zastępczych indukcyjności systemu zasilającego (w sieciach rozdzielczych głównie transformatorów) oraz pojemności dołączanej i już przyłączonych baterii kondensatorów. Rezultatem jest między innymi wzrost napięcia na szynach niskiego napięcia (nn).



Rys.4. Przykładowy schemat układu zasilania zakładu, w którym może wystąpić problem pobudzenia oscylacji na skutek łączenia baterii kondensatorów

Rysunek 4 przedstawia taki przypadek w typowej sieci rozdzielczej. Bateria C1 jest przyłączana do równoległego obwodu utworzonego przez szeregowe połączenie impedancji zastępczej transformatora i baterii kondensatorów nn przeznaczonych do kompensacji mocy biernej. Wzmocnienie oscylacji występuje w praktyce, jeżeli:

- pojemność kondensatora C1 jest dużo większa niż pojemność kondensatora C2, (co najmniej 10 razy), np. 3MVar i 200kVar (współczynnik 15) jak na rysunkach 4 i 5.
- częstotliwość „łączeniowa” $\sqrt{\frac{S_{ZW}}{Q_C}}$ (S_{ZW} – moc zwarcia w punkcie przyłączenia baterii, Q_C – moc załączanej baterii) jest bliska częstotliwości szeregowego obwodu utworzonego przez transformator obniżający i baterię C2 przeznaczoną do korekcji współczynnika mocy.
- nie ma wystarczającej liczby odbiorników „rezystancyjnych” w sieci nn. Ich obecność gwarantuje tłumienie oscylacji. W wielu zakładach przemysłowych dominują jednakże odbiorniki silnikowe, które nie zapewniają wystarczającego tłumienia i w ich przypadku wzmocnienie oscylacji może być szczególnie poważnym problemem. Przypadek taki przedstawiono na rysunku 5.



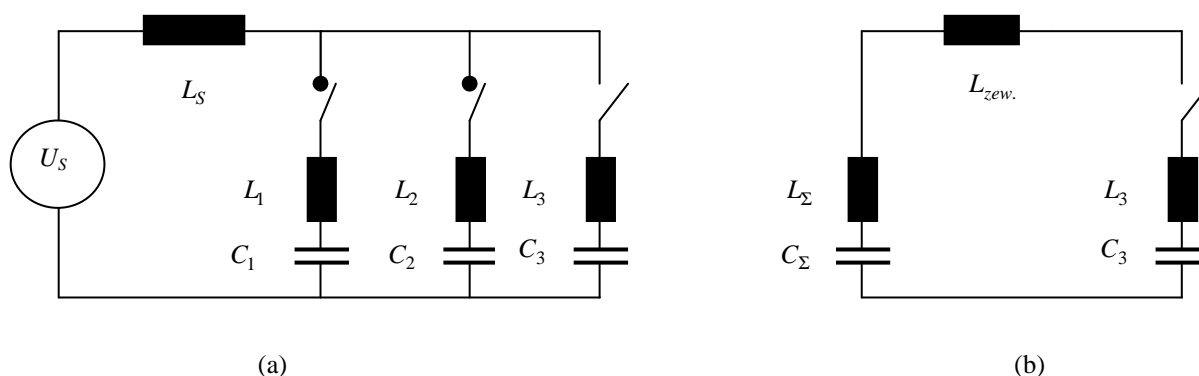
Rys. 5. Przebiegi ilustrujące wzmocnienie oscylacji po stronie niskiego napięcia

2.3 Dołączanie kolejnej baterii

Ten rodzaj łączenia wywołuje w sieciach zasilających pogorszenie jakości zasilania w następstwie stanów przejściowych o dużej częstotliwości występujących w napięciu i w prądzie. Wartość i częstotliwość prądu łączeniowego baterii zależą od:

- impedancji charakterystycznej obwody zawierającego indukcyjność źródła zasilania i pojemność przyłączanej baterii;
- chwili czasu względem przebiegu czasowego napięcia zasilającego, w której łącznik zamknie obwód;
- tłumienia załączanego obwodu.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy schemat ideowy (a) i zastępczy (b) stosowany do analizy procesu przyłączania równoległej baterii kondensatorów do baterii już pracującej.



Rys. 6. (a) Szyny z przyłączonymi dwoma bateriami kondensatorów; (b) uproszczony schemat zastępczy do analizy procesu załączania kolejnej baterii kondensatorów. ($L_{zew.}$ – indukcyjność zastępcza oszynowania; L_{Σ}, C_{Σ} – zastępcza indukcyjność i pojemność; przyjęto $L_1=L_2=L_3$; $C_1=C_2=C_3$)

Na rysunku 6b pominięto indukcyjność i napięcie źródła zasilania. Uczyniono tak, ponieważ podczas kilku pierwszych milisekund po zamknięciu łącznika dominujący wpływ na procesy

przejściowe wywierają, w analizowanym przypadku, już przyłączone równoległe baterie kondensatorów. W tym okresie wpływ sieci zasilającej jest praktycznie niewielki. Stąd:

$$L_{\Sigma} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad C_{\Sigma} = C_1 + C_2$$

Podczas przyłączania trzeciej baterii, jak na rysunku 6, wszystkie elementy obwodu są połączone szeregowo, dając wypadkową wartość indukcyjności i pojemności zastępczej odpowiednio:

$$L = L_{\Sigma} + L_{zew.} + L_3 \quad C = \frac{C_{\Sigma} C_3}{C_{\Sigma} + C_3}$$

Już przyłączone baterie stanowią źródło napięcia o minimalnej impedancji zastępczej. Dlatego wartość maksymalna prądu łączeniowego może przekroczyć prąd zwarcia analizowanego obwodu i występuje ona tuż po zamknięciu łącznika. Można ją szacować na podstawie związku analogicznego jak dla pojedynczej baterii kondensatorów:

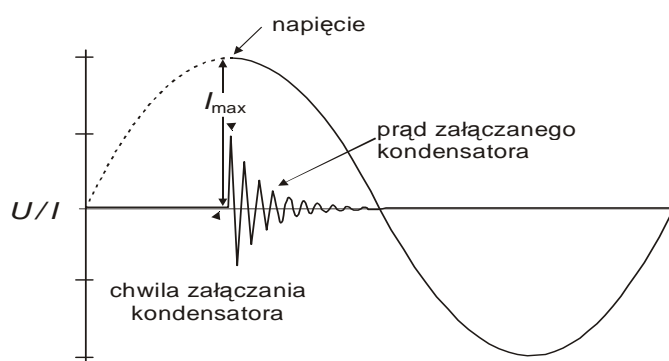
$$I_{max.} = \frac{\sqrt{2}U_S}{Z_C} = \sqrt{2}U_S \sqrt{\frac{C}{L}} = \sqrt{\frac{2U_S I_{CN1} I_{CN2}}{\omega L_{zew.} (I_{CN1} + I_{CN2})}}$$

gdzie: I_{CN1}, I_{CN2} - znamionowe prądy załączanej i załączanych baterii.

Tłumienie związane z różną od zera zastępczą rezystancją obwodu powoduje redukcję wartości maksymalnej prądu do około 90% wartości wyznaczonej z powyższej zależności. Duża jest nie tylko wartość, lecz także częstotliwość prądu łączeniowego określona związkiem:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Wartość tej częstotliwości zawarta jest typowo w przedziale 1-8,5 kHz. Czas trwania procesu przejściowego jest zwykle krótki, co przedstawiono przykładowo na rysunku 7.



Rys. 7. Prąd łączeniowy podczas procesu przyłączania baterii kondensatorów do baterii już pracującej. Dla czytelności rysunku nie przedstawiono stanu przejściowego w napięciu.

Stany łączeniowe w napięciu są zredukowane przez kondensatory już przyłączone, tak, więc najbardziej niekorzystne warunki, z punktu widzenia napięcia, dotyczą łączenia pierwszego stopnia. Redukcja napięcia na szynach rozdzielni jest mniejsza niż w przypadku łączenia pojedynczej baterii ze względu na ładunek elektryczny w kondensatorach już pracujących.

2.4 Szczególne warunki łączenia baterii

Wszystkie powyższe rozważania dotyczyły idealnych warunków łączenia. Istnieją jednakże pewne szczególne przypadki mające zasadniczy wpływ na przebieg procesów łączeniowych. Są to:

- załączanie baterii wstępnie naładowanej
- zapłon łuku podczas procesu wyłączenia baterii.

Załączanie baterii wstępnie naładowanej

W normalnych warunkach eksploatacyjnych kondensator po wyłączeniu powinien być rozładowany w określonym czasie, do określonego napięcia (np. 5 min., 50V). Najbardziej niekorzystne warunki łączenia wystąpią wówczas, gdy zamknięcie łącznika nastąpi w szczycie napięcia zasilającego, a kondensator będzie naładowany do napięcia o takiej samej wartości, lecz przeciwnej polaryzacji. Może nastąpić wówczas podwojenie prądu w stosunku do jego wartości przyłączenia rozładowanej baterii.

Zapłon łuku podczas procesu wyłączenia baterii

Gdy styki łącznika zaczynają się otwierać, prąd pojemnościowy przestaje płynąć przy pierwszym przejściu przez wartość zerową. Napięcie na wyłączniku po stronie zasilania i napięcie na kondensatorze są wówczas równe a ich wartości maksymalne. Napięcie na kondensatorze zachowa tę stałą wartość. Pół okresu później napięcie źródła zasilania zmieni się na ujemne - w stosunku do napięcia kondensatora. Wówczas różnica potencjałów między stykami wyłącznika osiągnie podwójną amplitudę napięcia zasilającego. Jeżeli ta wartość przekroczy wytrzymałość przerwy międzystykowej wyładowanie łukowe pomiędzy nimi spowoduje gwałtowny wzrost prądu źródła zasilania. Na przeciwną zmieni się polaryzacja napięcia kondensatora. Może ono osiągnąć wartość równą potrójnej amplitudzie napięcia sieci. Proces ten może ulec powieleniu w dalszych chwilach czasu.

3. SPOSOBY REDUKCJI PRZEPIĘĆ I PRZETĘŻEŃ ŁĄCZENIOWYCH

Zwykle nie ma potrzeby kontrolowania załączania baterii, jeżeli proces ten nie występuje często. Istnieją jednakże przypadki wymagające takich działań, szczególnie dla baterii dużej mocy przyłączanych w systemie rozdzielczym, w rozdzielniach odbiorców przemysłowych lub w systemie transmisyjnym. Możliwe jest wówczas:

- łączenie baterii wraz z rezystorami w celu zwiększenia tłumienia obwodu i ograniczenia prądu łączeniowego;
- włączenie dławika w szereg z kondensatorami. Dławik ten może odstroić obwód i w ten sposób przeciwdziałać wzmocnieniu drgań (tzw. dławik odstrajający). Może również w połączeniu z baterią kondensatorów pełnić rolę filtra dla wybranej harmonicznej, (jeżeli np. odbiorniki są nieliniowe i istnieje potrzeba ich filtracji).
- rozstrojenie obwodu przez zmianę mocy baterii lub jej przyłączenie do innego punktu w sieci zasilającej (w celu redukcji efektu wzmocnienia oscylacji).

Włączenie szeregowo z załączaną baterią impedancji dodatkowej - rezystancji lub reaktancji indukcyjnej – jest jednym ze sposobów ograniczenia prądów i napięć towarzyszących zwykle procesowi łączenia baterii kondensatorów. Po zakończeniu przebiegów przejściowych impedancja dodatkowa może być eliminowana z obwodu (bocznikowana). Towarzyszy temu

zazwyczaj stan przejściowy, lecz jego wartość i czas trwania są znacząco zredukowane. Wartość dodatkowej impedancji jest szacowana na podstawie początkowego stanu łączeniowego, przepięć i przetężeń towarzyszących jej eliminacji z obwodu, jak również w oparciu o zdolność do dysypacji energii związanej z zaburzeniami i możliwością regularnego powtarzania tego procesu w zależności od bieżących potrzeb eksploatacyjnych.

Mogą to być także działania eliminujące przypadkowość procesu łączenia, na rzecz jego sterownia, a więc synchronizacja chwili załączania tak, aby nastąpiło ono np.:

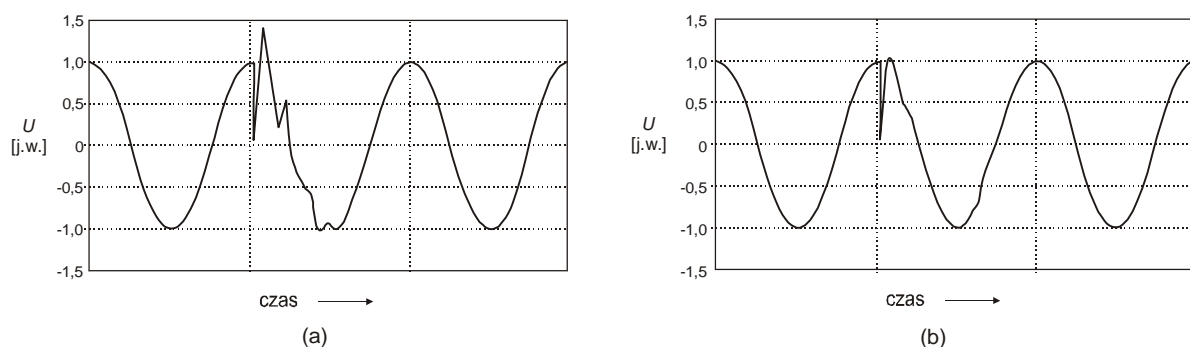
- przy przejściu napięcia przez wartość zerową;
- przy przejściu napięcia przez wartość maksymalną z równoczesnym wcześniejszym naładowaniem wstępnym kondensatora. Ten rodzaj łączenia jest stosowany w układach kompensatorów statycznych TSC (*Thyristor Switched Capacitors*).

3.1. Szeregowa rezystancja

Jest jednym z najprostszych, a zarazem najskuteczniejszych sposobów kontrolowania pojemnościowych stanów przejściowych (rys. 8), jakkolwiek względy niezawodnościowe (uszkodzenia termiczne) i koszty eksploatacyjne (przy znaczącej częstotliwości łączeń) sprawiają, że użytkownicy często rezygnują z stosowania tego elementu na rzecz dławików szeregowych. Optymalna wartość oporności zależy od mocy załączanej baterii kondensatorów i od mocy zwarciowej źródła zasilania. Wartość szeregowej rezystancji (R)

szacowana jest za pomocą zależności: $R \approx \sqrt{\frac{L_S}{C}}$. Jest więc ona dobierana indywidualnie dla

każdego przypadku i zwykle zawiera się w przedziale 25-75 Omów.



Rys. 8. Proces łączenia kondensatora (3MVAR): (a) bez rezystora; (b) z rezystorem szeregowym

Stosowane bywają układy, w których rezystor jest włączony tylko na krótki okres czasu (10-15 ms). Im większa rezystancja, tym bardziej efektywne jest tłumienie stanów przejściowych w napięciu.

3.2. Szeregowy dławik

Jest z sukcesem stosowany do ograniczania prądu łączeniowego baterii. Wprowadza także pewien poziom ograniczenia napięciowych stanów przejściowych, jakkolwiek nie zawsze. W „słabych” sieciach zasilających o małej mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia baterii może w niekorzystnych warunkach wystąpić wzmocnienie wartości chwilowych napięcia podczas procesu załączania. Zaletą dławików jest to, że w przeciwieństwie do rezystorów, są bardziej niezawodne (mniej istotne względy termiczne) i bardziej ekonomiczne w eksploatacji (mniejsze straty mocy). Dławiki ograniczają także prąd baterii podczas zwarć występujących w ich pobliżu. Istnieją układy, w których dławik jest bocznikowany po zakończeniu procesu łączeniowego. Dławiki szeregowy mogą być również łączone po stronie odbiorcy, jak ma to

miejsce w przypadku regulowanych napędów elektrycznych, chroniąc tym samym jego instalację przed negatywnymi skutkami załączania baterii kondensatorów.

3.3. Ochrona przepięciowa

Zabezpiecza przed wzrostem wartości napięcia podczas procesu łączeniowego typowo na poziomie 1,8-2,5 napięcia znamionowego. Krytyczne dla pracy zabezpieczenia są wyładowania wtórne za zaciskach wyłącznika podczas procesu łączenia baterii. W przypadku instalowania ochrony przepięciowej po stronie nn, podczas wzmocnienia oscylacji napięciowych w układzie może zdarzyć się, że energia tych oscylacji przekroczy możliwości absorpcji zabezpieczenia (zwykle kilkaset J) powodując jego uszkodzenie.

3.4. Filtry wh

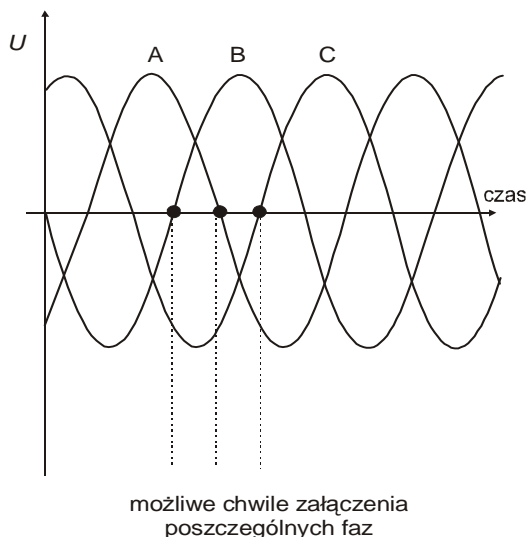
Są stosowane głównie do redukcji wartości wyższych harmonicznych. W większości przypadków zmniejszają także wartość przepięcia bowiem: (a) dodanie dławika w gałęzi filtru może zmienić korzystnie charakterystykę częstotliwościową układu oraz (b) nawet w przypadku wzmocnienia oscylacji większość napięcia odłoży się na kondensatorze i dławiku, w mniejszym stopniu na szynach zasilających

3.5. Synchroniczne łączenie

Oznacza kontrolowanie chwili załączenia lub rozłączenia wyłącznika względem przebiegu czasowego napięcia lub prądu. Realizuje się wówczas synchroniczne łączenie np. przy przejściu napięcia przez wartość zerową, za pomocą wyłączników z niezależną pracą poszczególnych styków fazowych. W praktyce wymaga to analizowania sygnałów napięcia i/lub prądu i ekstrapolację możliwej chwili wykonania zadania – przychodzący sygnał załączenia lub wyłączenia jest wówczas odpowiednio opóźniony.

Bateria połączona w uziemioną gwiazdę

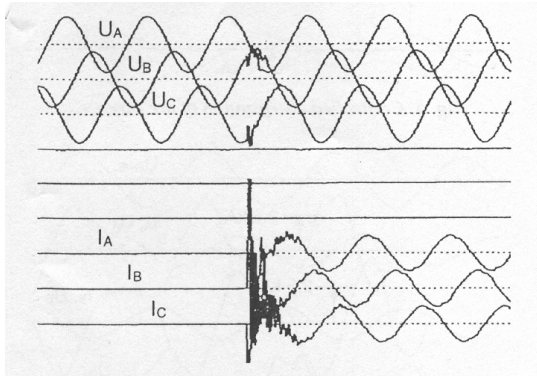
Załączanie polega na niezależnym zamykaniu styków dla każdej fazy w pobliżu przejścia napięcia fazowego przez wartość zerową jak na rysunku 9. Oznacza to, że czas pomiędzy kolejnymi łączeniami wynosi 3,3ms. (0 ms, 1/6 okresu, 1/3 okresu).



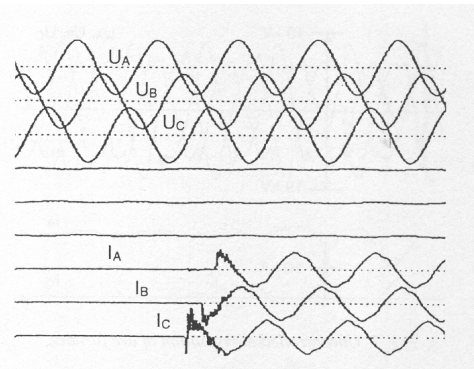
Rys. 9. Koncepcja synchronicznego łączenia baterii kondensatorów połączonej w gwiazdę (uziemiając)

W celu zrealizowania załączenia w- lub pobliżu przejścia napięcia przez wartość zerową niezbędne jest zastosowanie aparatu łączeniowego o wytrzymałości napięciowej wystarczającej dla wyeliminowania wyładowań pomiędzy stykami przed ich fizycznym zetknięciem się. Pożądane jest, aby prąd zaczynał płynąć dopiero w chwili uzyskania mechanicznego kontaktu styków, a nie wcześniej, w efekcie wyładowania łukowego. W

praktyce możliwe jest osiągnięcie precyzji łączenia $\pm 0,5$ ms wokół przejścia napięcia przez wartość zerową. Badania wykazały, że dokładność synchronizacji rzędu $\pm 1,0$ ms gwarantuje w praktyce poziom redukcji przepięć osiągany w przypadku zastosowania prawidłowo dobranej rezystancji szeregowej. Na rysunku 10 przedstawiono proces łączenia pojedynczej baterii bez synchronizacji, a na rysunku 11 ten sam proces w przypadku zastosowania synchronicznego łączenia. Wyraźnie widać redukcję przepięć i przetężeń towarzyszących załączaniu baterii.



Rys. 10. Napięcia i prądy fazowe dla nie synchronicznego łączenia pojedynczej baterii kondensatorów



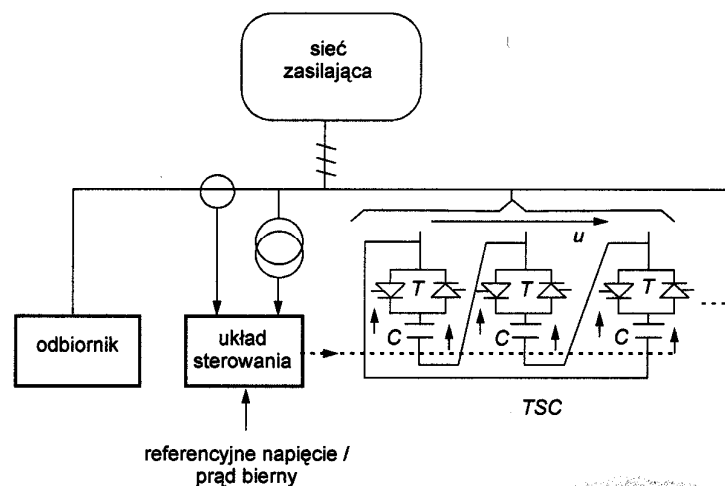
Rys. 11. Napięcia i prądy fazowe dla synchronicznego łączenia pojedynczej baterii kondensatorów

Bateria połączona w nie uziemioną gwiazdę

W pierwszej kolejności zamykane są styki napięcia międzyfazowego przy jego przejściu przez zero, a następnie zamykane są styki wyłącznika trzeciej fazy z opóźnieniem 5 ms (90^0).

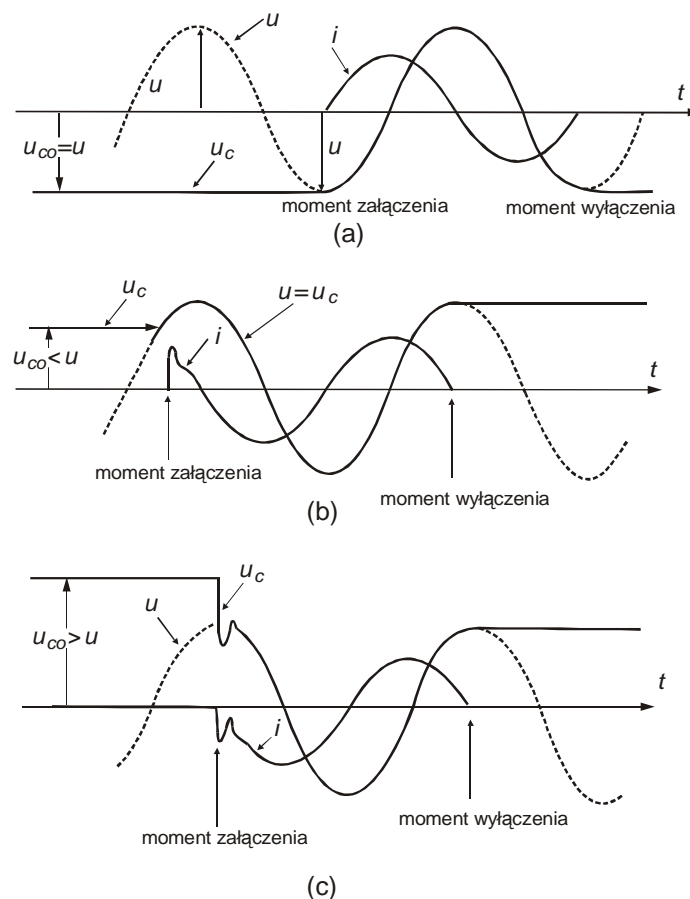
3.6. Załączanie kondensatorów za pomocą łączników tyrystorowych (kompensator statyczny TSC)

W przypadku kompensatora TSC międzyfazowo łączone są baterie kondensatorów, podzielone na sekcje, z których każda jest załączana (lub wyłączana) indywidualnie za pomocą łączników tyrystorowych prądu przemiennego (rys. 12). Wartości susceptancji kompensacyjnych zmieniają się w sposób dyskretny w zależności od liczby przewodzących sekcji. Poprzez wybór odpowiednio dużej ich liczby można uzyskać dowolnie małą wartość mocy biernej pojedynczego stopnia.



Rys. 12. Schemat kompensatora statycznego z bateriami kompensatorów załączanymi łącznikami tyrystorowymi (TSC)

Każdy międzyfazowy obwód w boku pojedynczego trójkąta kondensatorów zawiera trzy główne elementy składowe: pojemność C (X_C) indukcyjność L (X_L) (nie zaznaczoną na rysunku 31) oraz łącznik tyrystorowy prądu przemiennego T. Analiza procesu łączeniowego takiego obwodu wykazuje, że jest możliwe załączenie kondensatorów w każdym boku trójkąta bez przepięć i przetężeń jeżeli: (a) tyrystory są załączane w dodatnim lub ujemnym szczycie międzyfazowego napięcia zasilającego oraz (b) załączany kondensator jest wstępnie naładowany do napięcia $U_{C0} = U_{Sm} \frac{n^2}{n^2 - 1}$ o takiej samej biegunowości jak napięcie zasilania w chwili załączania tyrystorów. U_{Sm} jest amplitudą napięcia zasilającego, a (n) jest względną częstotliwością własną ω_0 załączanego obwodu odniesioną względem częstotliwości napięcia zasilającego ω ($=2\pi f$): $n = \sqrt{X_C/X_L} = \omega_0/\omega$. Obecność indukcyjności w obwodzie sprawia, że kondensator musi być naładowany do napięcia wyższego od amplitudy napięcia zasilania U_{Sm} . Miarą "przeładowania" kondensatora jest współczynnik $\frac{n^2}{n^2 - 1}$. Gdy wartość n jest mała współczynnik ten może być znaczący.



Rys. 13. Synchroniczne łączenie baterii kondensatorów stosowane w kompensatorach TSC (U_{C0} – napięciowy warunek początkowy kondensatora)

Na rysunku 13 przedstawiono przykładowo wybrane przebiegi czasowe prądu i napięcia w zależności od wzajemnej relacji napięciowego warunku początkowego i amplitudy napięcia zasilającego ($X_L \approx 0$).

Rysunek 13b przedstawia proces załączania w chwili, w której napięcie zasilania ma poziom napięcia kondensatora przed osiągnięciem swej wartości maksymalnej. Kondensator jest wówczas załączany z pewnym stanem przejściowym o charakterze oscylacyjno-tłumionym, przy czym stopień tłumienia zależy zarówno od dobroci dławika i kondensatora jak również od rezystancji sieci zasilającej i równolegle przyłączonych odbiorników. Drugi przypadek - rysunek 13c - to załączenie w chwili, gdy napięcie osiąga wartość maksymalną, która jest mniejsza od napięciowego warunku początkowego kondensatora U_{C0} . Idealne warunki załączania przedstawiono na rysunku 13a.

4. WNIOSKI

Proces łączenia baterii kondensatorów to źródło wielu zaburzeń w sieci zasilającej. Ważna jest więc znajomość istoty tych procesów, związanych z nimi zagrożeń oraz sposobów redukcji negatywnych ich skutków. W przypadku instalacji kondensatorów ważne jest, aby:

1. wykorzystać istniejące możliwości redukcji negatywnych efektów procesu łączenia baterii szczególnie w przypadku odbiorców przemysłowych posiadających dużą liczbę regulowanych napędów lub innego sprzętu energoelektronicznego;
2. energetyka zawodowa posiadała informacje oraz informowała swoich głównych przemysłowych odbiorców odnośnie lokalizacji i procedury łączenia (czasu, sposobu łączenia itp.) dużych baterii kondensatorów;
3. nie zapominać, że instalowanie wejściowych dławików dla urządzeń energoelektronicznych, szczególnie regulowanych napędów, podwyższa ich odporność na przebiegi łączeniowe baterii kondensatorów (również zmniejsza odkształcenie prądu wejściowego);
4. baterie kondensatorów, szczególnie w sąsiedztwie odbiorników nieliniowych wyposażać w dławiki odstrajające lub instalować jako filtry harmoniczných.

LITERATURA

1. Hanzelka Z., Piekarz A.: *Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia*. Seminarium JUEE, AGH-Kraków, 2000.
2. Handbook of power signatures. Dranetz BMI 1997
3. Raport EPRI: *Analyzing and solving power quality problems*.
4. Stanek M., Carvalho A.C., Rahmani M., Alatalo P., Sawada J.H., Peelo D.F., Bergman W.J., Bowden G.T.: *Experiences with improving power quality by controlled switching*. CIGRE Session-2000, 13/14/36-01