

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

CZEŚĆ 6 – Proces łączenia baterii kondensatorów

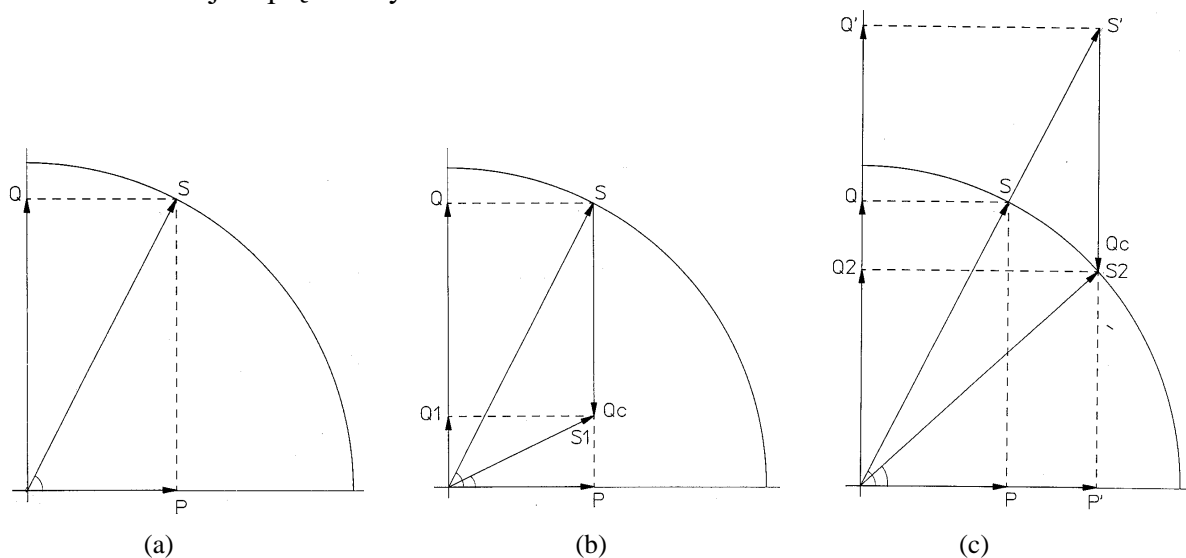
Zbigniew Hanzelka

Akademia Górniczo-Hutnicza, 30-019 Kraków, Al. Mickiewicza 30
tel: (012) 617 28 78, tel/fax: (012) 633 22 84, e-mail: hanzel@uci.agh.edu.pl
Konsultant techniczny Twelve Electric.

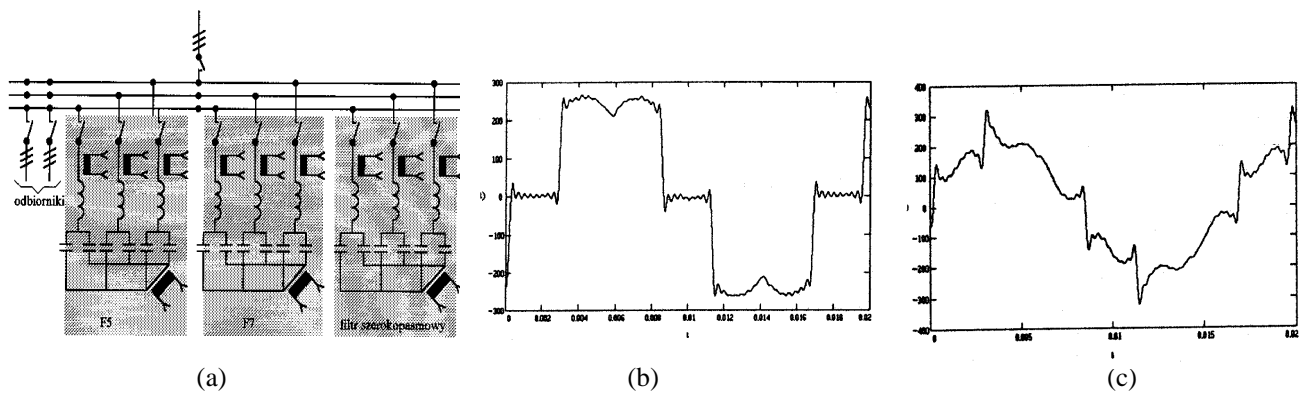
Streszczenie: Wraz ze wzrostem cen energii elektrycznej, stała bateria kondensatorów przeznaczona do kompensacji - w przypadku zmiennej mocy biernej - jest już obecnie coraz częściej nie akceptowanym rozwiązaniem. Potrzebne są baterie przełączalne, zmieniające wartość mocy biernej w ślad za zmianami 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

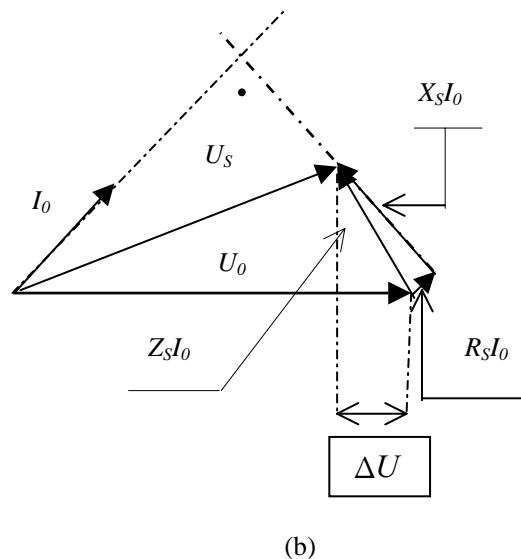
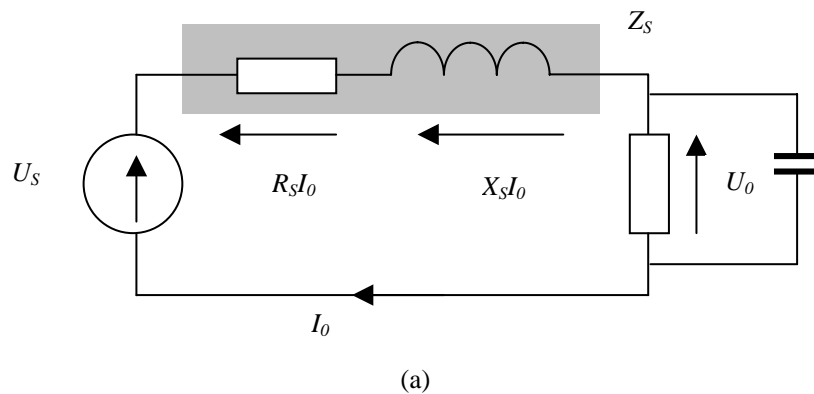
Załączanie baterii kondensatorów jest procesem bardzo często występującym w systemie zasilającym. Kondensatory służą bowiem do realizacji trzech podstawowych celów (równocześnie bądź oddzielnie): kompensacji mocy biernej (tym samym redukcji mocy pozornej odbiornika, wzrostu przesyłanej systemem elektroenergetycznym mocy czynnej, redukcji strat przesyłu energii, uniknięcia ewentualnych opłat karnych płaconych przez odbiorcę dostawcy energii itp.) – rysunek 1, filtracji wyższych harmonicznych (wh) – rysunek 2 oraz stabilizacji napięcia – rysunek 3.



Rys. 1 Zasada stosowania baterii kondensatorów w układach kompensacji mocy biernej (P , Q , S – moc czynna, bierna i pozorna, Q_C – moc baterii kondensatorów): (a) wskaźy mocy odbiornika; (b) wskaźy mocy po załączeniu baterii kondensatorów; (c) wzrost mocy czynnej w linii zasilającej, przy niezmięnionej wartości mocy pozornej, uzyskany w efekcie przyłączenia baterii kondensatorów



Rys. 2. (a) Układ pasywnych filtrów wyższych harmonicznych; (b) prąd odbiornika; (c) prąd odbiornika po odfiltrowaniu piątej harmonicznej w filtrze F5



Rys. 3. Jednofazowy schemat zastępczy sieci zasilającej (a) oraz (b) wykres wskazowy dla odbiornika rezystancyjno-pojemnościowego (po dołączeniu baterii kondensatorów) - $U_S \leq U_0$

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 przejścia 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.

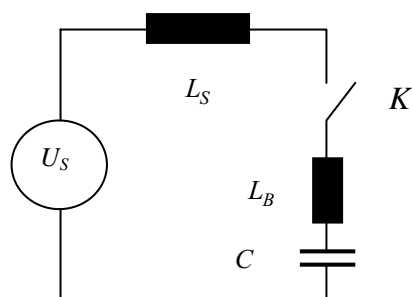
2. PROCES ŁĄCZENIA BATERII KONDENSATORÓW

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

Na rysunku 4 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. 4. 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 . Nie naładowany kondensator może być traktowany w początkowej chwili załączania jako zwarcie. W momencie zamknięcia łącznika prąd o wysokiej częstotliwości i dużej wartości płynie pomiędzy źródłem zasilania i kondensatorem powodując wyrównanie napięć między tymi 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:

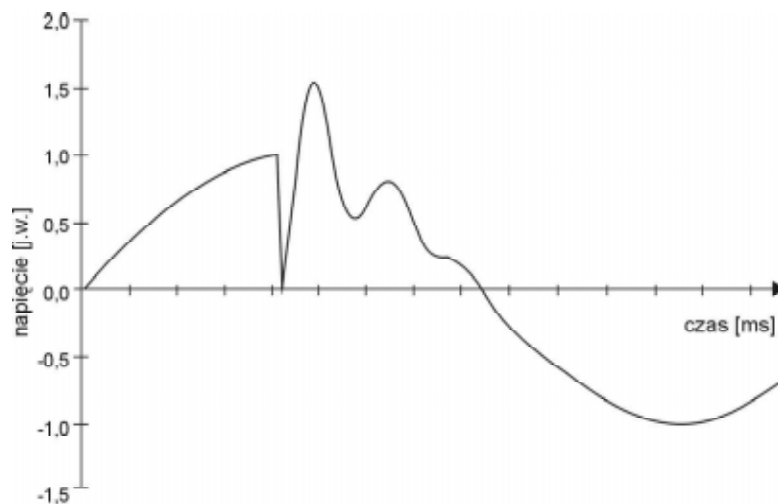
Z_C - impedancja charakterystyczna analizowanego obwodu

I_{ZW} - prąd zwarcia w miejscu przyłączenia baterii

I_{CN} - znamionowy prąd baterii.

Powyższa zależność nie uwzględnia tłumiącego efektu występującego w rzeczywistych układach. W praktyce tłumienie redukuje prąd maksymalny do około 90% wartości wyznaczonej z zależności (1). Prąd ten będzie zawsze mniejszy niż prąd zwarcia analizowanego obwodu.

Podczas procesu łączeniowego występują znaczące spadki napięcia na impedancjach sieci zasilającej, co może uaktywnić układy zabezpieczeń. Na rysunku 5 przedstawiono typowy przebieg napięcia (w jednostkach względnych – j.w.) podczas łączenia baterii kondensatorów.



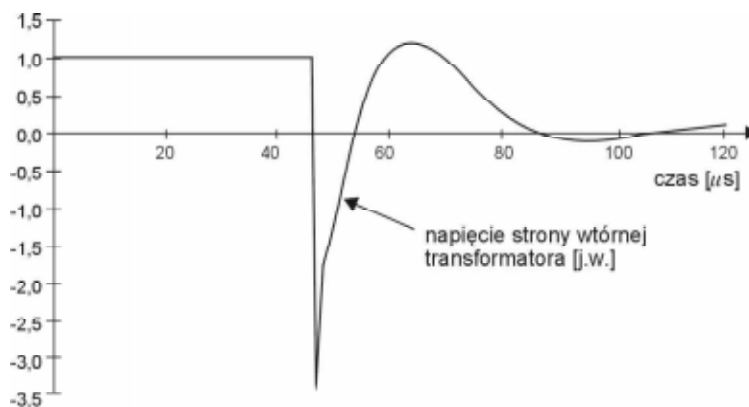
Rys. 5. Typowy przebieg napięcia zasilającego podczas procesu łączenia baterii

Nagle obniżenie napięcia na szynach do których przyłączany jest kondensator, podczas jego ładowania, wywołuje bardzo dużą pochodną zmiany napięcia. Może to spowodować znaczne przepięcia na końcach zwojów uzwojeń transformatorów ze względu na pojemności międzyzwojowe i międzyuzwojeniami. Wg [12] sprzężenie pojemnościowe pomiędzy uzwojeniami może spowodować „dynamiczną” transformację napięć, inną niż wynika to z przełożenia zwojowego. Wg tego samego źródła przykładowo dla transformatora o przełożeniu zwojowym 10:1, pojemnościowa transformacja napięcia może przyjąć wartość 10:4. Oznacza to, że względna zmiana napięcia o wartości 10 występująca na pierwotnej stronie transformatora wywoła zmianę napięcia o wartości do 4 (w jednostkach względnych) na stronie wtórnej.

Wpływ sprzężeń pojemnościowych uzwojeń transformatora zwykle nie jest rozważany, bowiem odbiornik lub dodatkowa pojemność na stronie wtórnej (np. pojemność przyłączonych kabli) silnie redukuje ten efekt. Jednakże w przypadku bardzo słabo obciążonego transformatora i/lub krótkich kabli, przejściowe przepięcia mogą powodować uszkodzenie sprzętu elektronicznego np. diod w wejściowych prostownikach urządzeń elektro- i energoelektronicznych. W granicznych przypadkach przepięcia te mogą wywołać także uszkodzenie izolacji transformatora. Dla ilustracji zjawiska na rysunku 6 przedstawiono

przebieg czasowy napięcia wtórnego słabo obciążonego transformatora podczas załączania baterii kondensatorów na jego stronie pierwotnej.

Zwykle wartość energii tych oscylacji nie jest duża i konwencjonalne układy przepięciowe stosowane w instalacjach użytkownika stanowią wystarczające zabezpieczenie.



Rys. 6. [12] Przepięcie na wtórnej stronie słabo obciążonego transformatora spowodowane międzyzwojowym sprzężeniem pojemnościowym podczas szybkiego stanu przejściowego wywołanego załączeniem baterii kondensatorów

Nagłe obniżenie napięcia podczas procesu przyłączania baterii wywołuje, szczególnie w sieciach wysokiego napięcia, zjawisko fal wędrujących wzdłuż wszystkich linii przyłączonych do szyn na których odbywa się proces łączenia. Fale te odbijając się od otwartych końców linii oraz radialnie pracujących transformatorów powracają ponownie do miejsca przyłączenia kondensatora i w procesie kolejnych odbić ulegają wzmocnieniu. Wędrujące fale ulegają wielokrotnemu odbiciu zanim zostaną ostatecznie wytłumione stratami. W efekcie mogą powstać przepięcia o bardzo dużych wartościach, często groźne w skutkach.

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:

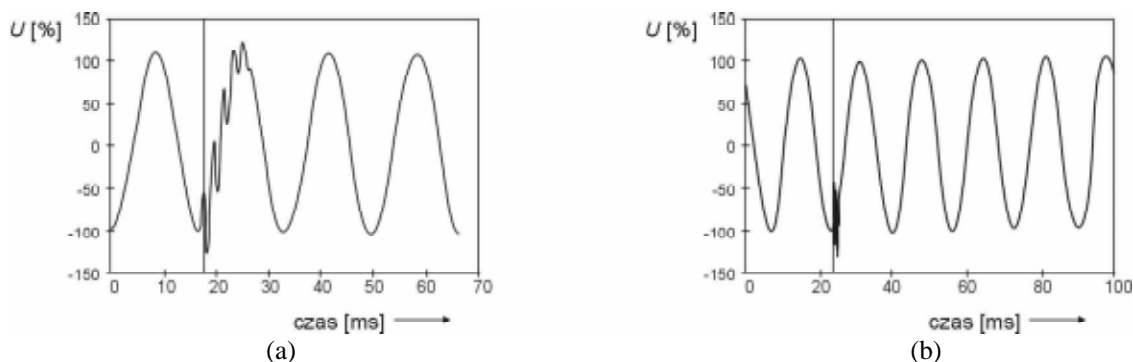
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S C_B)}} \quad \text{lub} \quad f = f_S \sqrt{\frac{I_{ZW.}}{I_{CN}}} \quad \text{Hz} \quad \text{gdzie} \quad f_S = 50\text{Hz}$$

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

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi czasowe napięcia podczas łączenia dwóch baterii o różnych mocach. Przebieg jak na rysunku 7a dotyczy baterii o dużej mocy (częstotliwość oscylacji jest rzędu około 600 Hz), natomiast na rysunku 7b baterii o mniejszej mocy (częstotliwość oscylacji jest rzędu 2kHz).

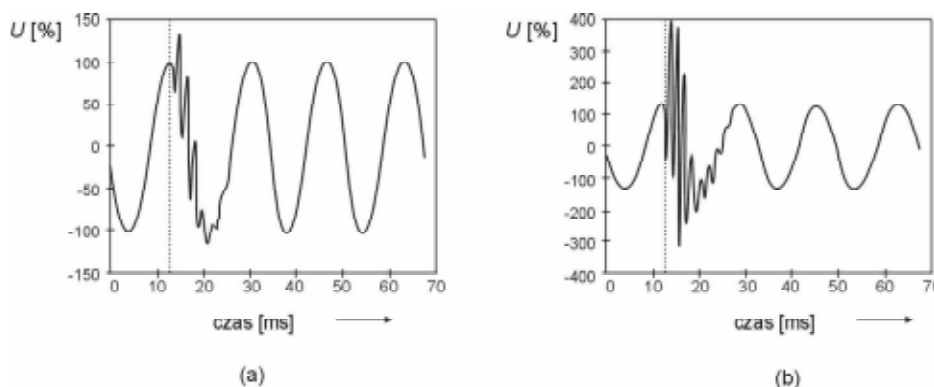
W początkowym okresie oscylacji chwilowe napięcie, w zależności od fazy załączenia, może osiągnąć w najbardziej niekorzystnym przypadku (załączenie nie naładowanej baterii kondensatorów w szczycie lub blisko szczytu przebiegu czasowego napięcia zasilającego), maksymalną wartość równą podwójnej amplitudzie 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 równoległe odbiorników, ich tłumiący wpływ sprawia, że proces przejściowy kończy się zazwyczaj przed upływem okresu napięcia.



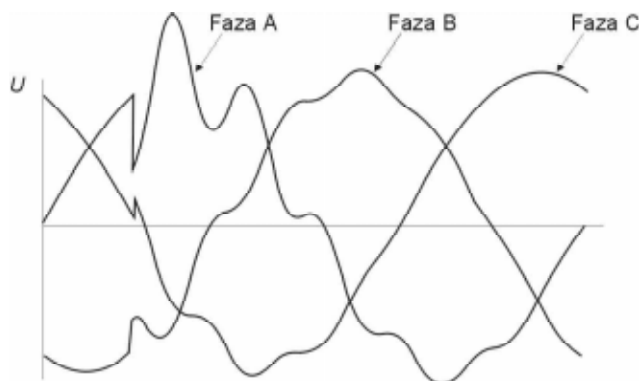
Rys. 7. [5] Przykładowe przebiegi napięcia podczas łączenia baterii kondensatorów. Przebieg (a) dotyczy baterii dużej mocy, dla której częstotliwość oscylacji wynosi około 600Hz. Przebieg (b) dotyczy małej baterii, dla której częstotliwość oscylacji miała wartość około 2kHz

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy napięcia zaburzony procesem załączania baterii. Przedstawiono także przebieg prądu w linii, do której dołączono kondensatory. Proces łączenia baterii to również stres dla kondensatorów związany z przetężeniem prądowym.



Rys. 8. [5] Przebieg czasowy napięcia (a) i prądu (b) podczas łączenia baterii kondensatorów

Na rysunku 9 przedstawiono proces łączenia baterii trójfazowej. Zawsze jedna z faz wykazuje szczególnie duży wzrost przejściowego napięcia.



Rys. 9 [5] Proces łączenia trójfazowej 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 bowiem 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.

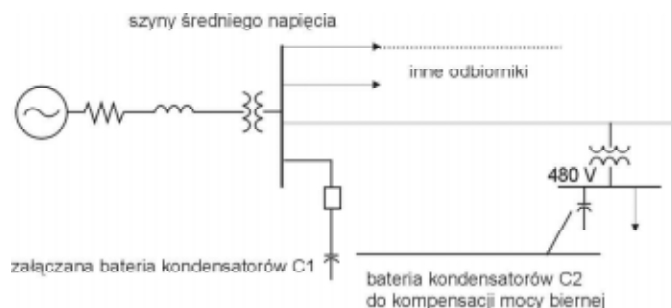
2.2 Proces wzmocnienia oscylacji łączeniowych

Wzmocnienie oscylacji występuje jako rezultat pobudzenia – procesem łączenia baterii – drgań własnych w słabo tłumionym obwodzie L_sC 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). Rysunek 10 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 przeznaczonej do kompensacji mocy biernej. Wzmocnienie oscylacji występuje w praktyce, jeżeli:

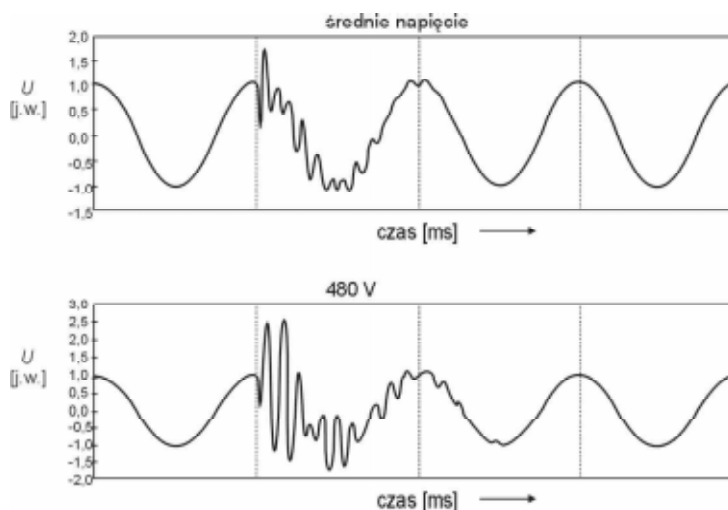
- pojemność kondensatora C1 jest dużo większa niż pojemność kondensatora C2, (co najmniej 10 razy), np. 3MVA_r i 200kVA_r (współczynnik 15) jak na rysunkach 10 i 11.
- częstotliwość „łączeniowa” $\sqrt{\frac{S_{zw}}{Q_c}}$ (S_{zw} – moc zwarcia w punkcie przyłączenia baterii, Q_c – moc załączanej baterii) 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 11.

Należy zauważyć, że ten rodzaj wzmocnionych przepięć może wystąpić dla szerokiego przedziału wartości mocy baterii kondensatorów niskiego napięcia. Rysunek 12 przedstawia rezultaty obliczeń dla układu zasilania jak na rysunku 10. Przedstawiony przebieg pokazuje stopień wzmocnienia napięcia na szynach 480V spowodowany załączeniem baterii kondensatorów o mocy 3 MVA_r (C1) w sieci średniego napięcia. Przepięcie uzależnione jest od mocy baterii kondensatorów nn (C2) zmieniającej się w przedziale 100-500 kVA_r

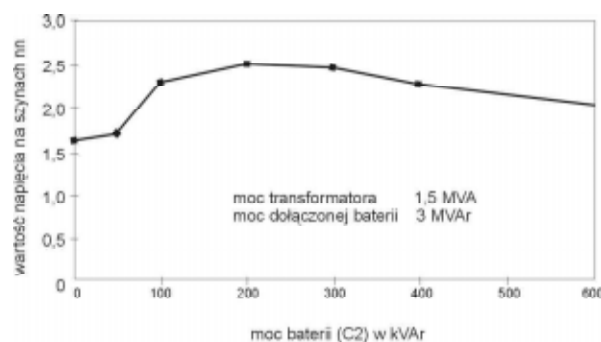
(typowe wartości mocy baterii dla transformatora obniżającego o mocy 1,5 MVA). Stopień wzmacnienia przekracza 2 (w jednostkach względnych). Badania wykazują, że w praktyce wartość ta zawiera się w przedziale 2-4.



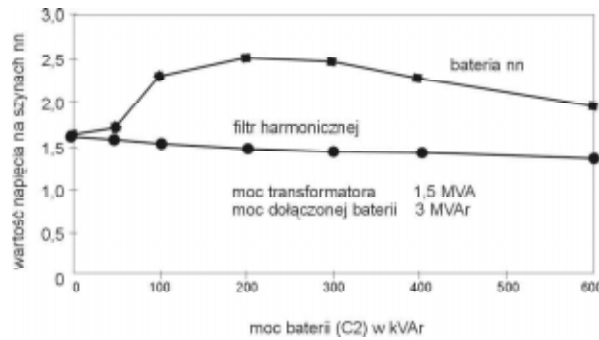
Rys.10. [10] Przykładowy schemat układu zasilania zakładu, w którym może wystąpić problem pobudzenia oscylacji na skutek łączenia baterii kondensatorów



Rys. 11. [10] Przebiegi ilustrujące wzmacnienie oscylacji po stronie niskiego napięcia



Rys. 12. [10] Wpływ mocy baterii kondensatorów nn (C2) na wzmacnienie przepięć łączeniowych. Moc przyłączanej baterii (C1) wynosi 3 MVar



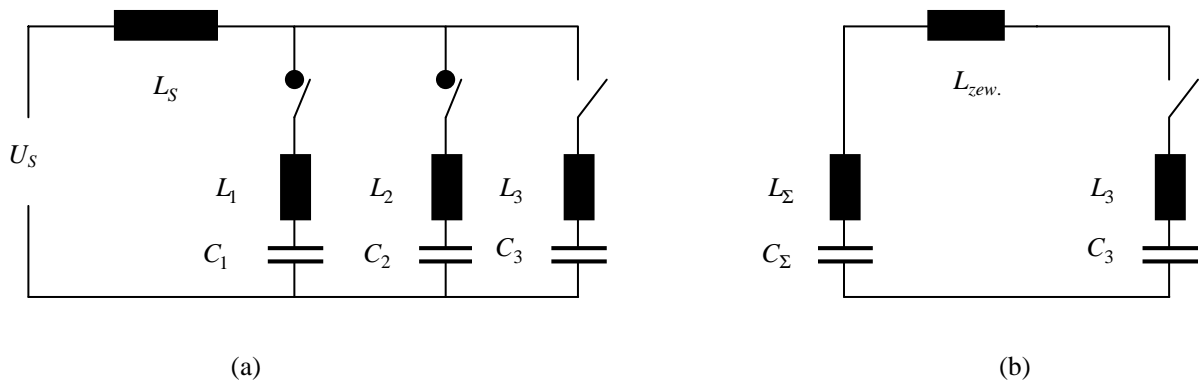
Rys. 13. [10] Wpływ skonfigurowania baterii C2 jako filtra harmonicznej na wartość przepięcia w sieci nn (C1 – 3MVAr)

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



Rys. 14. (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 14b 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 14, 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:

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

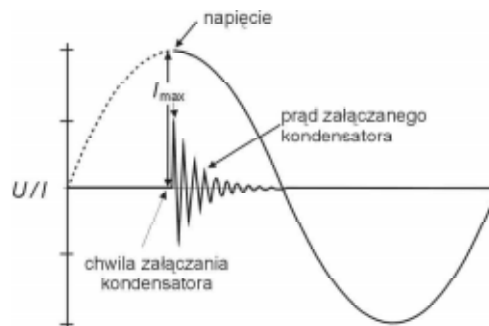
gdzie: I_{CN1}, I_{CN2} - znamionowe prądy załączonej i załączanych baterii.

Tłumienie związane z różną od zera zastępczą rezystancją obwodu powoduje redukcję wartości maksymalnej prądu do około 90% wartości wyznaczonej z powyższej zależności.

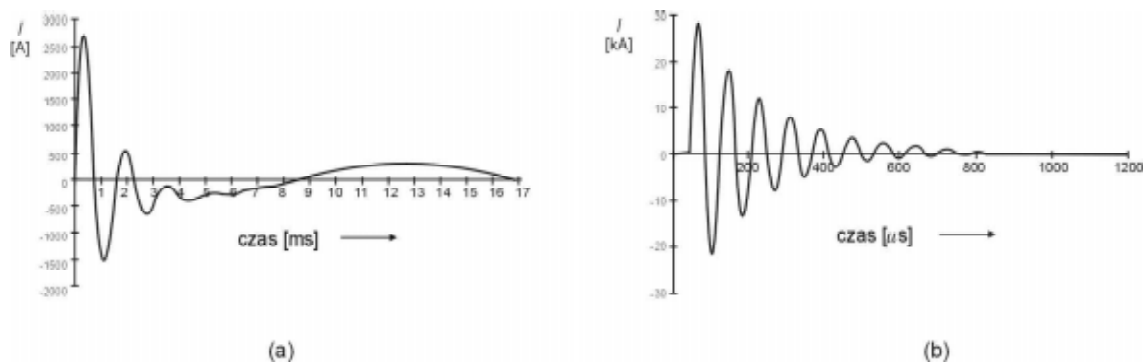
Duża jest nie tylko wartość, lecz także częstotliwość prądu łączeniowego określona związkiem:

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

Wartość tej częstotliwości zawarta jest typowo w przedziale 1-8,5 kHz. Czas trwania procesu przejściowego jest zwykle krótki, co przedstawiono przykładowo na rysunku 15. Przykładowe przebiegi prądu baterii kondensatorów dołączanej jako pierwsza i kolejna przedstawiono także na rysunku 16.



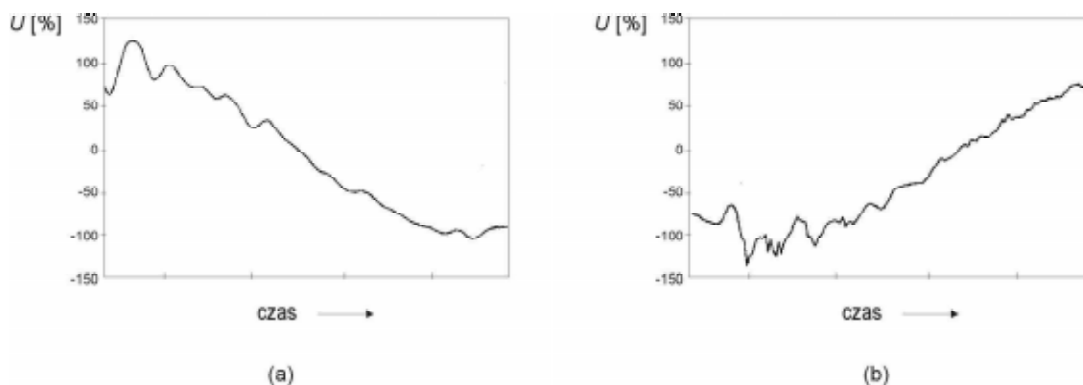
Rys. 15. Prąd łączeniowy podczas procesu przyłączania baterii kondensatorów do baterii już pracującej. Dla czytelności rysunku nie przedstawiono stanu przejściowego w napięciu.



Rys. 16. [12] (a) Prąd podczas procesu załączania pojedynczej baterii oraz baterii dołączanej do już pracującej (b)

Stany łączeniowe w napięciu są redukowane 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. Przykładowo dla dwóch baterii o takiej samej mocy, minimalna wartość napięcia wynosi około 50% tej która była na załączonej baterii tuż przed chwilą dołączenia kolejnej.

Na rysunku 17 przedstawiono 1/4 okresu przebiegu czasowego napięcia dla dwóch przypadków: załączanie pierwszej baterii kondensatorów (widoczna składowa oscylacyjna pojedynczej częstotliwości); dołączanie drugiej baterii (widoczne składowe oscylacyjne o więcej niż jednej częstotliwości).



Rys. 17. [5] Powiększony przebieg czasowy napięcia podczas załączania baterii kondensatorów. Przebieg (a) dotyczy załączenia pierwszego stopnia baterii. Widoczne są oscylacje o pojedynczej częstotliwości. Po trzech minutach został załączony drugi stopień – przebieg (b). Widać składowe oscylacyjne o więcej niż jednej częstotliwości.

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:

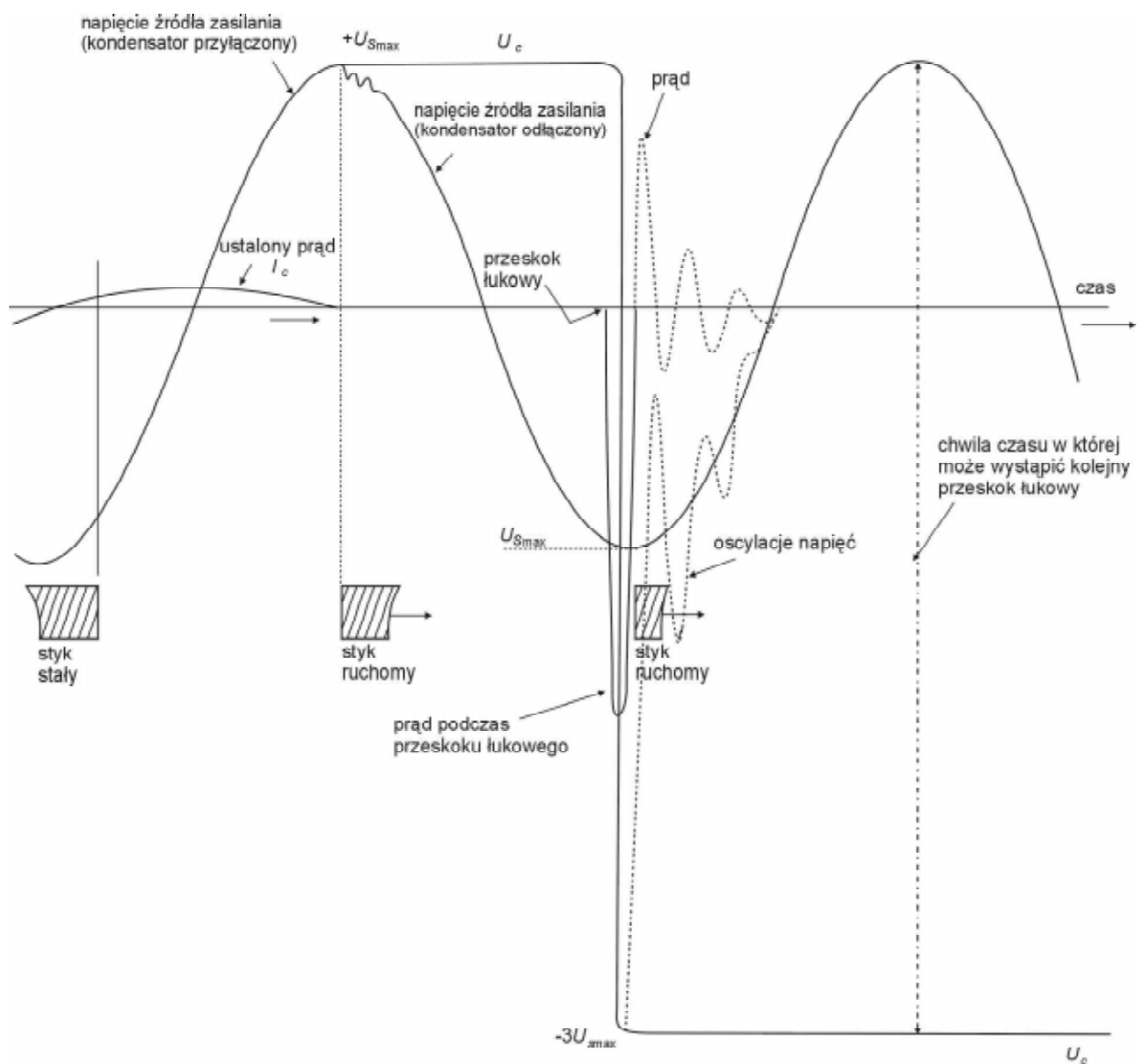
- załączanie baterii wstępnie naładowanej
- zapłon łuku podczas procesu wyłączania baterii.

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 przy łączeniu rozładowanej baterii.

Zapłon łuku podczas procesu wyłączania baterii

Skutkiem są stany przejściowe w napięciu zasilającym, jakkolwiek w przypadku współczesnych konstrukcji wyłączników realność tego zagrożenia jest niewielka. Zjawisko to może wystąpić w wyłącznikach stosujących magnetyczną cewkę wydmuchową. Gdy ustalony prąd baterii jest znacząco mniejszy od prądu znamionowego wyłącznika, wówczas podczas otwierania, strumień magnetyczny mający spowodować przerwanie łuku, może być zbyt słaby by skutecznie przerwać obwód.



Rys. 18. [6] Przebiegi przejściowe napięcia i prądu w przypadku wystąpienia przeskoku łukowego w wyłączniku podczas przerywania prądu pojemnościowego

Proces otwierania wyłącznika, w którym wystąpiły przeskoki łukowe przedstawiono na rysunku 18. Gdy styki łącznika zaczynają się otwierać, prąd pojemnościowy przestaje płynąć przy pierwszym przejściu przez wartość zerową. Przerwanie prądu pojemnościowego nie jest trudne, szczególnie w porównaniu z prądem indukcyjnym. 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

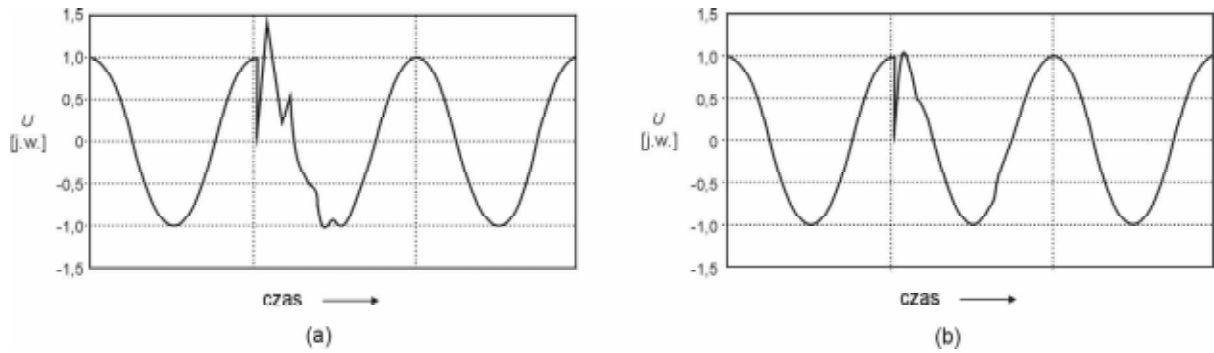
Zwykle nie ma potrzeby kontrolowania załączania baterii, jeżeli proces ten nie występuje często. Istnieją jednakże przypadki wymagające takich działań, szczególnie dla baterii dużej mocy przyłączanych w systemie rozdzielczym, w rozdzielniach odbiorców przemysłowych lub w systemie transmisyjnym. Możliwe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

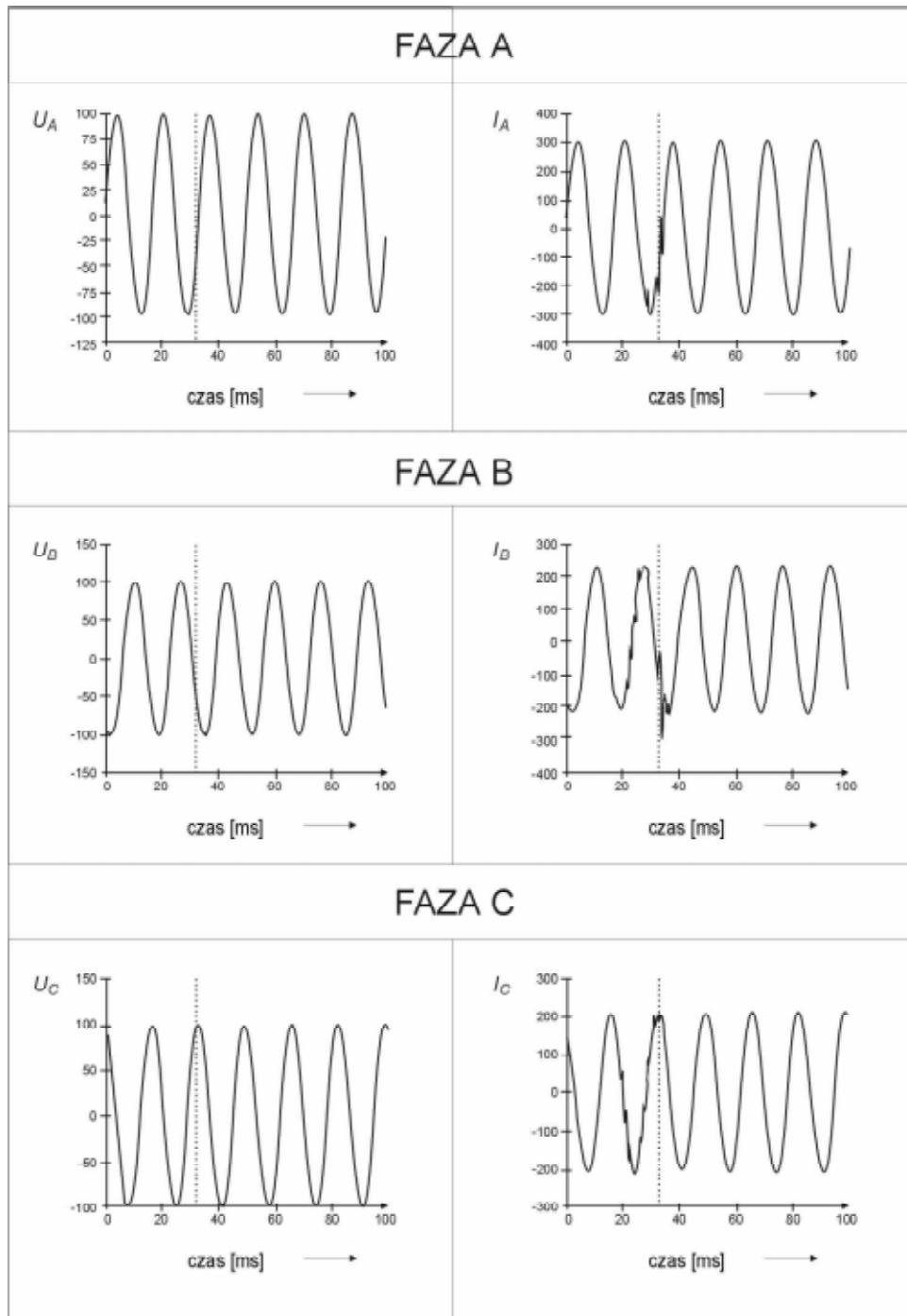
Włączenie szeregowo z załączaną baterią impedancji dodatkowej - rezystancji lub reaktancji indukcyjnej - jest jednym ze sposobów ograniczenia prądów i napięć towarzyszących zwykle procesowi łączenia baterii kondensatorów. Po zakończeniu przebiegów przejściowych impedancja dodatkowa może być eliminowana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



Rys. 19. Proces łączenia kondensatora (3MVar): (a) bez rezystora; (b) z rezystorem szeregowym



Rys. 20. [5] Proces łączenia baterii z rezystorem tłumiącym. Na przebiegach pionową przerywaną linią zaznaczono moment wyłączenia rezystora

3.1. Szeregowa rezystancja

Jest jednym z najprostszych, a zarazem najskuteczniejszych sposobów kontrolowania pojemnościowych stanów przejściowych (rys. 19), 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.

Stosowane bywają układy, w których rezystor jest włączony tylko na krótki okres czasu (10-15 ms). Ze względu na dopuszczalną obciążalność prądową styków wyłącznika, które realizują proces łączenia rezystorów zwykle ich wartość zawiera się wówczas w przedziale 100-400Ω. Im większa rezystancja, tym bardziej efektywne jest tłumienie stanów przejściowych w napięciu. Jednakże z drugiej strony wraz ze wzrostem wartości rezystancji zwiększa się stan przejściowy towarzyszący jej wyłączeniu (bocznikowaniu) – rysunek 20.

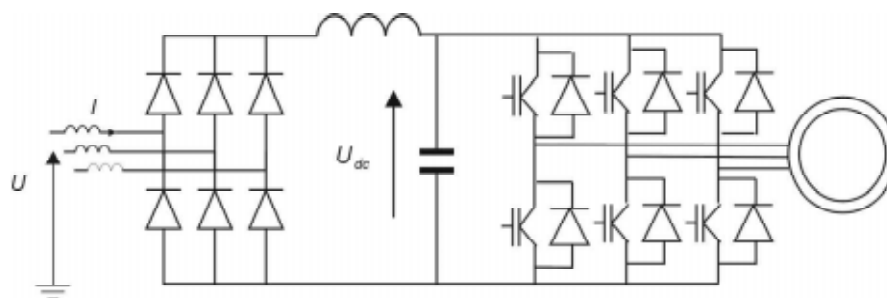
3.2. Szeregowy dławik

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 zwarcia występujących w ich pobliżu.

Istnieją układy, w których dławik jest bocznikowany po zakończeniu procesu łączeniowego. Jego impedancja, zależna od częstotliwości, jest większa w początkowym okresie, gdy częstotliwość przebiegów jest duża. Następnie ulega zmniejszeniu, gdy płynie prąd o częstotliwości sieci zasilającej. Podobnie jak w przypadku wyłączanego rezystora, tu również występuje drugi stan przejściowy podczas bocznikowania dławika. Występujące wówczas przepięcia i przetężenia są jednakże znacząco mniejsze, ze względu na mniejszą wartość reaktancji dławika dla częstotliwości podstawowej.

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.

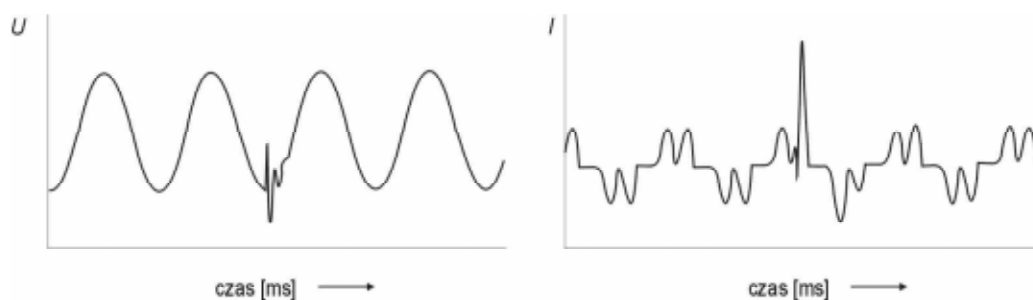
3.2.1. Awaryjne wyłączenia czułych odbiorników



Rys. 21 Schemat pośredniego przemiennika częstotliwości do zasilania napędu elektrycznego

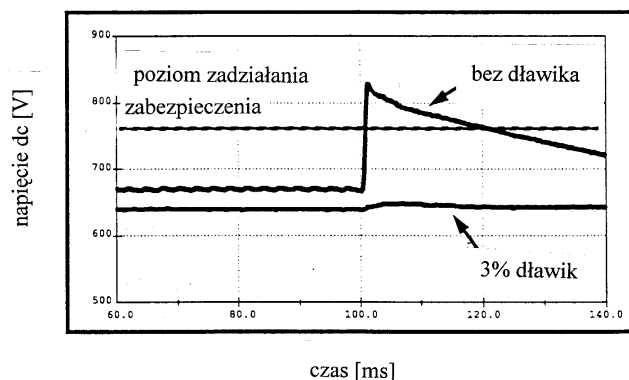
W instalacji końcowego użytkownika występuje często sprzęt czuły na zaburzenia towarzyszące procesowi łączenia kondensatorów. Przykładem takich odbiorników są regulowane napędy elektryczne, które mogą ulec wyłączeniu podczas przebiegów przejściowych nawet o małej wartości towarzyszących łączeniu kondensatorów.

W przypadku napędów prądu przemiennego (rys. 21) ich ograniczona odporność jest spowodowana głównie zmianą napięcia w obwodzie pośredniczącym (dla napięciowych przemienników częstotliwości) i uaktywnieniem zabezpieczeń kontrolujących napięcie stałe w tym obwodzie. Groźba takiego wyłączenia zależy od wielu czynników, wśród których należy wymienić: wielkość baterii kondensatorów w obwodzie prądu stałego, poziom nastawy zabezpieczenia napięciowego¹ oraz wartość zastępczej indukcyjności pomiędzy dwoma kondensatorami: załączanym w obwodzie *ac* i istniejącym w obwodzie *dc* napędu. Przypadek taki przedstawiono na rysunku 22.



Rys. 22. Wpływ przepięć podczas załączania baterii kondensatorów na prąd wejściowy napięciowego przemiennika częstotliwości

PRZYKŁAD - Dla napędu zasilanego z sieci 480 V, wartość napięcia pobudzająca zabezpieczenie nadnapięciowe w obwodzie *dc* przemiennika jest ustawiona na poziomie 760 V (rys. 23). W takim przypadku międzyfazowe napięcie mniejsze od 120% wartości znamionowej (w praktyce prawie zawsze przekroczone podczas łączenia kondensatorów) może spowodować wyłączenie napędu. Dotyczy to również innych układów elektro- i energoelektronicznych z kondensatorami *dc*.



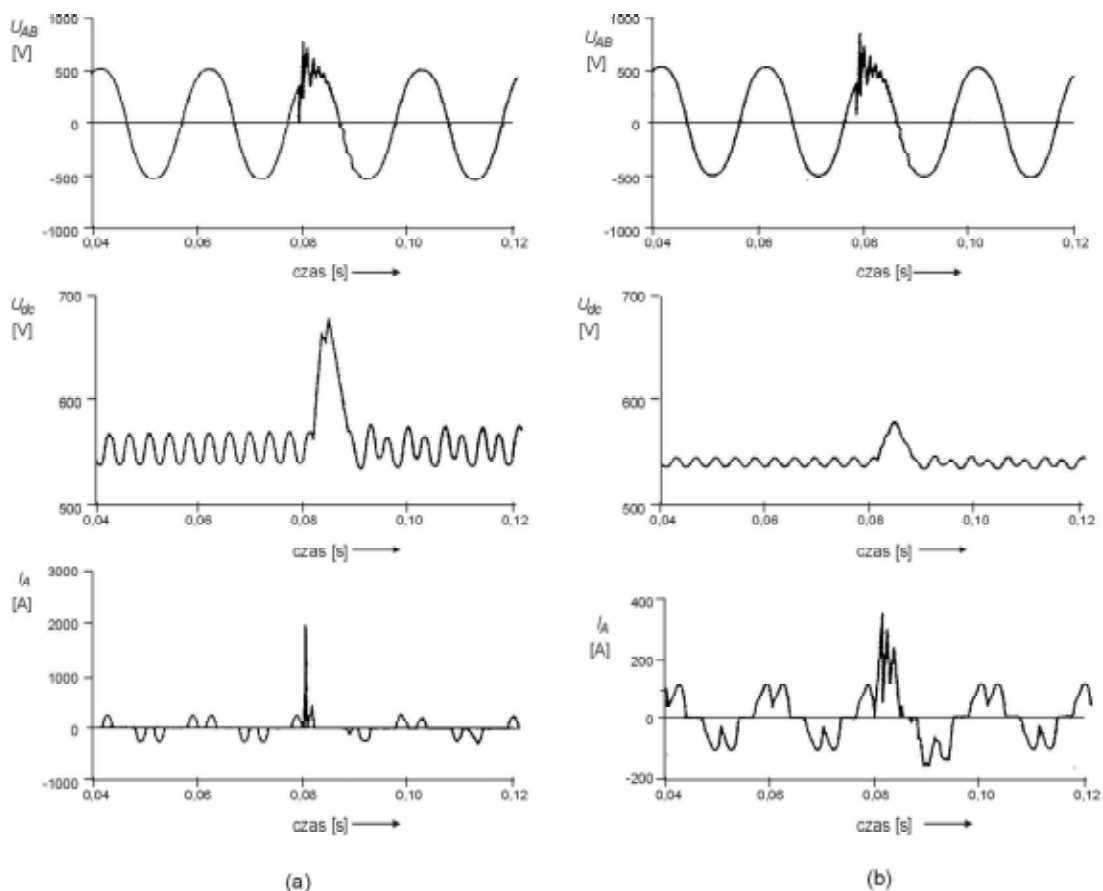
Rys. 23. [10] Wpływ wejściowych dławików na wartość napięcia w obwodzie *dc* przemiennika częstotliwości podczas załączania baterii kondensatorów. Oś pionowa jest wyskalowana w wartości napięcia kondensatora *dc* [V], a oś pozioma - w ms

Problem ten doświadcza wielu użytkowników. Korzystnym jego rozwiązaniem jest zastosowanie na wejściu napędu dławików o odpowiednio dobranej indukcyjności tak, aby

¹ Dla wielu napędów prądu przemiennego małej i średniej mocy poziom zabezpieczenia w obwodzie prądu stałego wynosi często 115-120% napięcia znamionowego. Taka wartość może być osiągnięta nawet w przypadku synchronicznego łączenia baterii, jeżeli błąd detekcji przejścia napięcia przez zero, co jest podstawą wyboru chwili łączenia baterii, będzie zawarty w przedziale ± 1 ms [2, 3].

jego impedancja przeciwdziałała także przeteżeniom prądowym doładowującym kondensator dc jak na rysunkach 24. Jak widać prąd bez dławików wejściowych osiąga w rozważanym przypadku wartość szczytową 2000A i charakteryzuje się dużą szybkością narastania. Po włączeniu dławika wejściowego prąd jest bardziej „rozmyty” i jego maksymalna wartość nie przekracza 400 A. Redukcji uległa również wartość składowej zmiennej napięcia kondensatora dc .

Obecnie w większości przypadków przemienniki częstotliwości są wyposażane w dławiki wejściowe lub dławiki po stronie prądu stałego (ten sam cel działania). Pozwala to często uniknąć awaryjnych wyłączeń spowodowanych procesem łączenia kondensatorów. Wybór wartości indukcyjności takiego dławika należy przeprowadzać w oparciu o uważną analizę wpływu spadku napięcia na dławiku na pracę napędu. Typowe wielkości szeregowych dławików: 1,5%, 3%, i 5% (max.)



Rys. 24. [5] Przebiegi czasowe napięcia (U) i prądu (I) sieci zasilającej oraz napięcia (U_{dc}) w obwodzie pośredniczącym przemiennika częstotliwości dla przypadku: (a) bez dławika i (b) z dławikiem wejściowym

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 powtórne 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.

Zabezpieczenia te nie redukują wartości prądów łączeniowych i spadków napięcia podczas łączenia kondensatorów.

3.4. Filtry wh

Są stosowane głównie do redukcji wartości wyższych harmonicznych. W większości przypadków zmniejszają także wartość przepięcia bowiem:

- dodanie dławika w gałęzi filtra może zmienić korzystnie charakterystykę częstotliwościową układu,
- nawet w przypadku wzmocnienia oscylacji większość napięcia odłoży się na kondensatorze i dławiku, w mniejszym stopniu na szynach zasilających

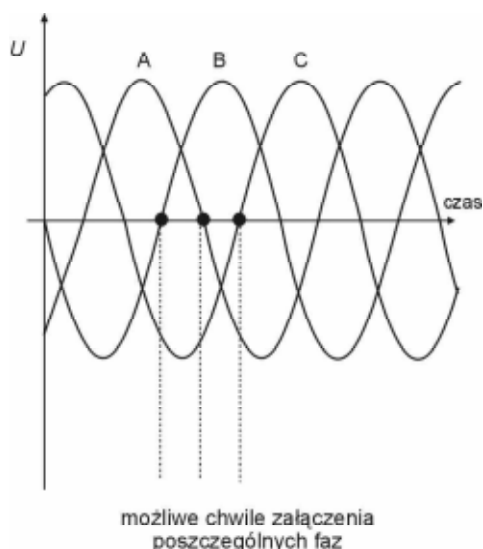
Porównanie rysunków 12 i 13 uwidacznia korzystny efekt skonfigurowania baterii kompensacyjnej nn jako filtra harmonicznego.

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 SF6 lub próżniowych 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

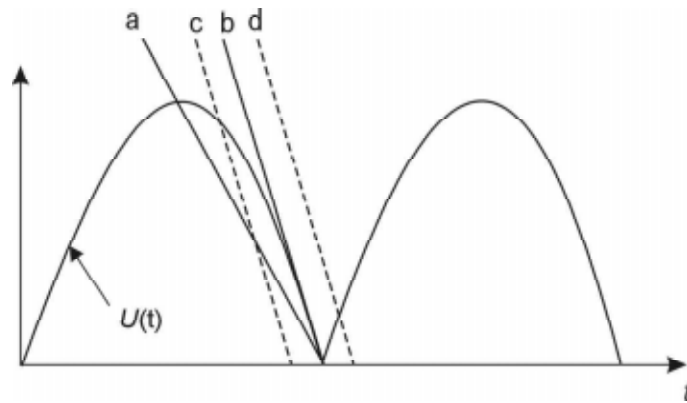
Załączanie polega na niezależnym zamykaniu styków dla każdej fazy w pobliżu przejścia napięcia fazowego przez wartość zerową jak na rysunku 25. Oznacza to, że czas pomiędzy kolejnymi łączeniami wynosi 3,3ms. (0 ms, 1/6 okresu, 1/3 okresu).



Rys. 25. Koncepcja synchronicznego łączenia baterii kondensatorów połączonej w gwiazdę (uziemioną)

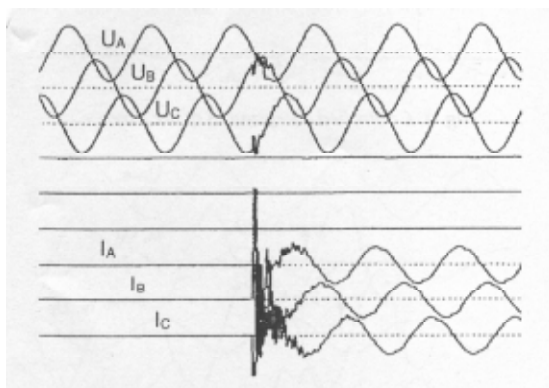
W celu zrealizowania załączenia w- lub pobliżu przejścia napięcia przez wartość zerową niezbędne jest zastosowanie aparatu łączeniowego o wytrzymałości napięciowej wystarczającej dla wyeliminowania wyładowań pomiędzy stykami przed ich fizycznym zetknięciem się. Pożądane jest, aby prąd zaczynał płynąć dopiero w chwili uzyskania mechanicznego kontaktu styków, a nie wcześniej, w efekcie wyładowania łukowego. To wymaganie zilustrowano na rysunku 26, gdzie $u(t)$ jest napięciem pomiędzy stykami łącznika, półproste a-d ilustrują poziom redukcji wytrzymałości napięciowej szczeliny powietrznej międzystykowej. Linia (a) wykazuje redukcję wytrzymałości napięciowej szczeliny uniemożliwiającą synchroniczne łączenie. Prąd zacznie płynąć – w efekcie

zainicjowanego wyładowania łukowego - wówczas gdy linia (a) przetnie się z przebiegiem $u(t)$. W przypadku linii (b) wytrzymałość napięciowa szczeliny maleje szybciej, co czyni możliwym realizację synchronicznego łączenia. Kontakt styków wystąpi w najbardziej pożądanej chwili, czyli w zerze napięcia. Na rysunku 26 przedstawiono także linie (c) i (d) dotyczące granicznych przypadków opóźnienia i wyprzedzenia przejścia napięcia przez zero - $\pm 1ms$. Widać wyraźnie, że korzystniejsze warunki występują przy opóźnionym załączeniu, co powoduje w praktyce zamierzone opóźnianie załączenia względem przejścia napięcia przez zero (wg [14] opóźnienie to wynosi około 0,3 ms).

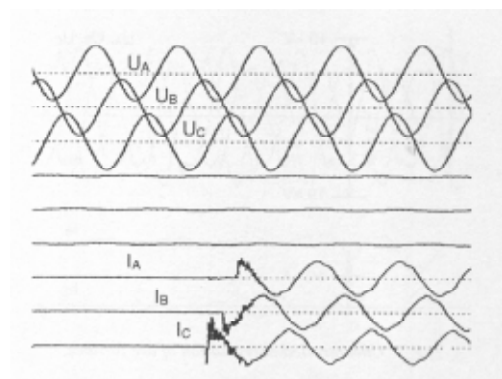


Rys. 26. Wytrzymałość napięciowa szczeliny międzystykowej podczas synchronicznego łączenia baterii (objaśnienia w tekście)

W praktyce możliwe jest osiągnięcie precyzji łączenia $\pm 0,5 ms$ wokół przejścia napięcia przez wartość zerową². Badania wykazały, że dokładność synchronizacji rzędu $\pm 1,0 ms$ gwarantuje w praktyce poziom redukcji prądów osiągany w przypadku zastosowania prawidłowo dobranej rezystancji szeregowej³. W tym procesie istotna jest możliwość zastosowania tej metody w różnych zmieniających się warunkach zasilania i warunkach metrologicznych. Wymaga to precyzyjnej predykcji chwili łączenia, co niekiedy nie jest zadaniem trywialnym. Zaletą tego sposobu jest potrzeba jedynie niewielkiej modyfikacji konstrukcyjnej typowego łącznika – głównie instalacja układu synchronizacji.



Rys. 27 [14] Napięcia i prądy fazowe dla niesynchronicznego łączenia pojedynczej baterii kondensatorów



Rys. 28. [14] Napięcia i prądy fazowe dla synchronicznego łączenia pojedynczej baterii kondensatorów

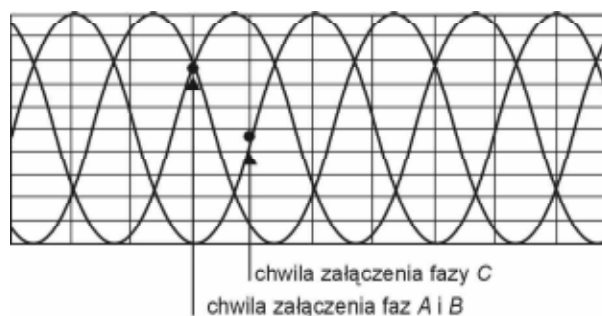
² W [12] podano jako graniczne wartości błędów synchronizacji łączenia (spowodowane głównie temperaturą i czasem eksploatacji wyłącznika) od -0,5 do 1,5 ms wokół przejścia napięcia przez wartość zerową.

³ Wg [14] ten poziom tolerancji gwarantuje około 60% redukcji prądu łączeniowego.

PRZYKŁAD - W artykule [14] opisano doświadczenia ośmioletniej eksploatacji dwóch baterii kondensatorów 2x55MVar, 138kV w Kanadzie w których zastosowano synchroniczne łączenie. Na rysunku 27 przedstawiono proces łączenia pojedynczej baterii bez synchronizacji, a na rysunku 28 ten sam proces w przypadku zastosowania synchronicznego łączenia. Wyraźnie widać redukcję przepięć i przetężeń towarzyszących załączaniu baterii.

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) – rysunek 29.



Rys. 29. [14]. Synchroniczne łączenie trójfazowej nie uziemionej gwiazdy kondensatorów

3.6. Załączanie kondensatorów za pomocą łączników tyrystorowych

W przeciwieństwie do łączników mechanicznych, łączniki tyrystorowe umożliwiają bardzo precyzyjny wybór fazy załączania, w ten sposób redukując lub praktycznie eliminując łączeniowe stany przejściowe.

Na rysunku 30 przedstawiono różne możliwe konfiguracje łączenia baterii kondensatorów za pomocą łączników tyrystorowych w sieciach trójfazowych niskiego napięcia. Kondensatory i łączniki, mogą być połączone w gwiazdę lub w trójkąt, jeden z tyrystorów łącznika może być zastąpiony przez diodę, mogą być zastosowane tylko dwa łączniki, może być przewód neutralny lub może go nie być itp. W każdym przypadku obowiązuje zasada, zgodnie z którą łącznik może być zamknięty gdy jego napięcie przechodzi przez wartość zerową. Na rysunku 30 zastosowano następujący kod oznaczeń (zgodny z IEEE Standard 428):

- pierwsza litera identyfikuje zastosowany element półprzewodnikowy: *U* – pojedynczy tyrystor; *V* – jeden tyrystor i jedna dioda; *W* – dwa przeciw-równoległe połączone tyrystory;
- dwie kolejne cyfry identyfikują liczbę faz oraz liczbę sterowanych łączników
- dwie ostatnie litery określają sposób połączenia łączników i kondensatorów: *D* – połączenie w trójkąt; *Y* – połączenie w gwiazdę, *N* – gwiazda z przewodem zerowym; *A* – inne połączenie.

<p>W33NA W33AN</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = I$ $U_T = 1,63 U$ $U_C = 0,82 U$ $U_{dc} = \pm 0,82 U$ $\pm 0,82 U$ $\pm 0,82 U$	<p>W33AA</p>	$I_T = 0,41 I$ $I_C = 0,58 I$ $U_T = 2,83 U$ $U_C = 1,41 U$ $U_{dc} = \pm 1,41 U$ $\pm 1,41 U$ $\pm 1,41 U$	$T_{on} = \frac{1}{2} T$ $T_{off} = \frac{1}{2} T$ $T_{rec} = T$
<p>W33YA W33AY</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = I$ $U_T = 1,93 U$ $U_C = 1,12 U$ $U_{dc} = \pm 1,12 U$ $\pm 0,82 U$ $\pm 0,30 U$	<p>W33AD</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = 0,58 I$ $U_T = 1,93 U$ $U_C = 1,93 U$ $U_{dc} = \pm 1,93 U$ $\pm 0,52 U$ $\pm 1,41 U$	$T_{on} = \frac{5}{12} T$ $T_{off} = \frac{5}{12} T$ $T_{rec} = \frac{21}{12} T$
<p>V33YA V33AY</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = I$ $U_T = 1,93 U$ $U_C = 1,12 U$ $U_{dc} = \pm 1,12 U$ $\pm 0,82 U$ $\pm 0,30 U$	<p>V33AD</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = 0,58 I$ $U_T = 1,93 U$ $U_C = 1,93 U$ $U_{dc} = \pm 1,93 U$ $\pm 0,52 U$ $\pm 1,41 U$	$T_{on} = \frac{7}{12} T$ $T_{off} = \frac{7}{12} T$ $T_{rec} = \frac{21}{12} T$
<p>W32YA W32DA W32AY</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = I$ $U_T = 3,35 U$ $U_C = 1,12 U$ $U_{dc} = \pm 1,12 U$ $\pm 0,82 U$ $\pm 0,30 U$	<p>W32AD</p>	$I_T = 0,71 I$ $I_C = 0,58 I$ $U_T = 3,35 U$ $U_C = 1,93 U$ $U_{dc} = \pm 1,93 U$ $\pm 0,52 U$ $\pm 1,41 U$	$T_{on} = \frac{7}{12} T$ $T_{off} = \frac{7}{12} T$ $T_{rec} = \frac{21}{12} T$
<p>W33DA</p>	$I_T = 0,41 I$ $I_C = I$ $U_T = 3,35 U$ $U_C = 1,12 U$ $U_{dc} = \pm 1,12 U$ $\pm 0,82 U$ $\pm 0,30 U$	<p>U33DA</p>	$I_T = 0,82 I$ $I_C = I$ $U_T = 3,35 U$ $U_C = 1,12 U$ $U_{dc} = \pm 1,12 U$ $\pm 0,82 U$ $\pm 0,30 U$	$T_{on} = \frac{5}{12} T$ $T_{off} = \frac{1}{2} T$ $T_{rec} = \frac{21}{12} T$

Rys. 30. [9] Możliwe konfiguracje schematów łączy baterii kondensatorów za pomocą elementów półprzewodnikowych

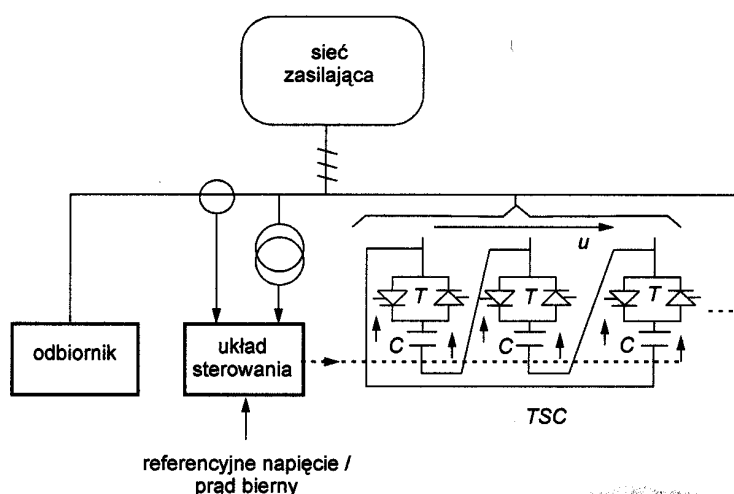
Przedstawione konfiguracje obwodu można podzielić na trzy grupy:

I grupa – obwód utworzony jest przez trzy jednofazowe gałęzie. W dwóch pierwszych konfiguracjach: W33NA i W33AN łączniki i kondensatory połączone są szeregowo w gwiazdę. Punkt zerowy gwiazdy połączony jest z punktem neutralnym systemu zasilającego. W trzecim przypadku – W33AA, połączone szeregowo łączniki i kondensatory tworzą trójkąt. Istotny jest brak wzajemnej interakcji pomiędzy trzema gałęziami – jedno równanie może być zastosowane do opisu pracy trzech łączników.

- II grupa – charakteryzuje się istnieniem interakcji pomiędzy trzema łącznikami; zamknięcie i otwarcie łączników zależy od aktualnego stanu dwóch innych łączników. W pierwszej podgrupie – konfiguracje W33YA, W33AY i W33AD – zastosowano trzy łączniki tyrystorowe. W drugiej podgrupie – konfiguracja V33YA, V33AY i V33AD – zastosowano łączniki utworzone z diody i tyrystora. W trzeciej podgrupie – W32YA, W32DA, W32AY i W32AD – zastosowano tylko łączniki tyrystorowe. Konfiguracje w każdej podgrupie różnią się pozycją tyrystorów lub połączeniem kondensatorów (gwiazda lub trójkąt). Konfiguracje W32YA i W32DA są szczególne. Te dwa obwody są elektrycznie jednakowe, jednakże pierwszy z nich powstał jako modyfikacja konfiguracji W33YA, a drugi z W33DA.
- III grupa – W33DA i U33DA tworzą obwody połączonych w trójkąt łączników. W przypadku pierwszej konfiguracji rozptyw prądów pomiędzy tyrystorami zależy od ustalonego spadku napięcia na elementach półprzewodnikowych. Dla konfiguracji U33DA tyrystory nie mogą być ponownie załączone zanim napięcie na kondensatorach nie zmniejszy się poniżej krytycznych wartości.

Zasadnicza różnica występuje pomiędzy konfiguracjami „jednofazowymi” (grupa I) i pozostałymi. Podczas gdy konfiguracje „jednofazowe” mogą być ponownie załączane bez żadnych ograniczeń, pozostałe wymagają, aby łączniki były zamykane w ściśle zdefiniowanej kolejności. Jeżeli określona sekwencja łączenia nie będzie spełniona, pozostające w chwili zaniku prądu napięcia kondensatorów sprawią, że napięcie na jednym z łączników nigdy nie osiągnie wartości zerowej uniemożliwiając tym samym jego zamknięcie bez przepięć i przetężeń.

Konfiguracje przedstawione na rysunku 30 różnią się pomiędzy sobą nie tylko wymiarem prądowym łączników, lecz także opóźnieniami w wyłączeniu i załączaniu baterii, napięciem maksymalnym na łączniku i na kondensatorach. Na rysunku podano skuteczne wartości prądów tyrystorów i kondensatorów (I_T i I_C), ich maksymalne napięcia (U_T i U_C) oraz składową stałą napięcia kondensatora gdy łączniki są otwarte (U_{dc}), maksymalny czas opóźnienia załączania w przypadku całkowitego rozładowania kondensatorów (T_{on}), maksymalny czas opóźnienia wyłączenia (T_{off}) i minimalne opóźnienie pomiędzy chwilą gdy łączniki zakończą przewodzenie i chwilą gdy one mogą być ponownie załączone (T_{rec}). Na tym samym rysunku napięcia i prądy zostały wyrażone w jednostkach względnych odniesionych do skutecznej wartości napięcia międzyfazowego (U) i skutecznej wartości prądu liniowego (I), opóźnienia są wyrażone jako ułamki okresu podstawowego (T).



Rys. 31. Schemat kompensatora statycznego z bateriami kompensatorów załączanymi łącznikami tyrystorowymi (TSC)

3.6.1. Konfiguracja W33AA (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. 31). Wartości susceptancji kompensacyjnych zmieniają się więc w sposób dyskretny w zależności od liczby przewodzących sekcji. Poprzez wybór odpowiednio dużej ich liczby można uzyskać dowolnie małą wartość mocy biernej pojedynczego stopnia.

Każdy międzyfazowy obwód w boku pojedynczego trójkąta susceptancji zawiera trzy główne elementy składowe: pojemność C (X_C), indukcyjność L (X_L) (nie zaznaczoną na rysunku 31) oraz łącznik tyrystorowy prądu przemiennego T . Przebieg czasowy prądu kondensatora po załączeniu łącznika tyrystorowego opisany jest zależnością (2):

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \alpha) - nB_C \left(U_{C0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} U_{Sm} \sin \alpha \right) \sin \omega_0 t - I_m \cos \alpha \cos \omega_0 t \quad (2)$$

$$i(t) = i_{ust.} + i_{osc.}$$

gdzie: α - faza początkowa określona chwilą załączania tyrystora,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = n\omega \quad - \text{częstotliwość własna załączanego obwodu.}$$

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \frac{\omega_0}{\omega} \quad - \text{względna częstotliwość własna załączanego obwodu}$$

odniesiona do częstotliwości napięcia zasilającego ω .

$$B_C = \omega C$$

Zasadniczy wpływ na wartość napięć i prądów po załączeniu tyrystorów ma wartość częstotliwości własnej ω_0 . Jest ona trudna do precyzyjnego określenia, bowiem reaktancja indukcyjna sieci zasilającej, która stanowi element składowy załączanego obwodu jest w praktyce znana jedynie z pewnym przybliżeniem. Zgonie z zależnością (2) w prądzie baterii po załączeniu można wyróżnić składową podstawową $i_{ust.}$, która wyprzedza napięcie

o kąt $\frac{\pi}{2}$. Amplitudę I_m tego prądu określa zależność (3):

$$I_m = U_{Sm} B_C \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (3)$$

Dwa ostatnie składniki prawej strony zależności (2), reprezentują składową oscylacyjną $i_{osc.}$. Ich analiza wykazuje, iż jest możliwe załączenie obwodu LC bez stanów przejściowych na dowolną całkowitą ilość półokresów przewodzenia. Jest to możliwe przy spełnieniu dwóch warunków (4):

$$a) \cos \alpha = 0 \quad (4a)$$

$$b) U_{C0} = U_{Sm} \frac{n^2}{n^2 - 1} = \pm X_C I_m \quad (4b)$$

Warunek pierwszy (4a), oznacza, że tyrystory powinny być załączane w dodatnim lub ujemnym szczycie napięcia zasilania.

Warunek drugi (4b), oznacza, że kondensator winien być uprzednio naładowany do napięcia $U_{C0} = U_{Sm} \frac{n^2}{n^2-1}$ o takiej samej biegunowości jak napięcie zasilania w chwili załączania tyrystorów. 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.

W każdym kompensatorze ze względu na zastosowane tyrystory, szeregowo z łącznikiem T musi być zawsze połączona niewielka indukcyjność w celu ograniczenia pochodnej prądu (di/dt). W większości przypadków wartość tej indukcyjności jest większa niż wynikałoby to z powyższego kryterium. Pełni ona bowiem również rolę indukcyjności odstrajającej obwód szeregowy LC od harmonicznych występujących w napięciu zasilania (indukcyjność przeciwrezonansowa). Przy pominięciu rezystancji załączanego obwodu w praktycznych układach słuszna jest zależność:

$$n^2 = \frac{X_C}{X_L} = 10 \div 20 = \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \quad (5)$$

Uwzględniając zmiany napięcia zasilania warunek (4b) będzie spełniony, jeżeli kondensator nie będzie rozładowany podczas stanów nie przewodzenia łączników (T) lub jeżeli w układzie będą realizowane jego doładowania do napięcia równego $U_{Sm} \frac{n^2}{n^2-1}$.

Spełnienie warunków łączeniowych (4) wymaga od układu sterowania synchronizacji momentu załączania tyrystorów. Istnieją jednakże pewne szczególne stany pracy układu, w których warunki łączeniowe (4) są dalekie od spełnienia.

Jednym z nich jest chwila uruchamiania układu, w której kondensator jest całkowicie rozładowany tzn. $U_{C0} = 0$. W bardziej ogólnym przypadku U_{C0} może mieć dowolną wartość w zależności od warunków, w których zakończyło się ostatnie przewodzenie tyrystorów. Istotne są wówczas odpowiedzi na pytania: jak amplituda składowej oscylacyjnej prądu zależy od U_{C0} w chwili załączania? Jak należy wybrać chwilę załączania tyrystorów aby zminimalizować wartość składowej oscylacyjnej dla zadanego napięciowego warunku początkowego kondensatora? W praktyce możliwe są dwie strategie załączania tyrystorów:

$$\text{a) w chwili gdy } u = U_{C0} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{U_{C0}}{U_m} \quad (5a)$$

$$\text{b) w chwili gdy } \frac{du}{dt} = 0 \Rightarrow \cos \alpha = 0 \quad (5b)$$

W pierwszym przypadku (5a), istnieje groźba utraty sterowalności układu, jeżeli $U_{C0} > U_{Sm}$. Jeżeli $U_{C0} = U_{Sm}$ wówczas niezerowa składowa oscylacyjna prądu ma taką samą wartość dla obydwu strategii załączania tyrystorów, bez względu na wartość częstotliwości

Rysunek 32b przedstawia proces załączania według warunku (5a) tzn. gdy 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 32c - to załączenie w chwili, gdy napięcie osiąga wartość maksymalną, która jest mniejsza od napięciowego warunku początkowego kondensatora U_{c0} (załączenie według strategii (5b)). Idealne załączenie przedstawiono na rysunku 32a oznacza spełnienie obydwu warunków (5a) i (5b).

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 wyposażyć w dławiki odstrajające lub instalować jako filtry harmonicznych.

LITERATURA:

1. Dugan R.C., McGranaghan M.F. Wayne B.H.: *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill, 1996
2. Grebe T.E.: CIGRE 36.05/CIGRE CC02/9925: *Capacitor switching and its impact on power quality*
3. Grebe T.E.: *Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality*. IEEE Trans. IA, 3, 32, 1996
4. Hanzelka Z., Piekarczyk A.: *Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia*. Seminarium JUEE, AGH-Kraków, 2000.
5. Handbook of power signatures. Dranetz BMI 1997
6. McCoy C.H., Floryancic B.L.: *Characteristics and measurement of capacitor switching at medium voltage distribution level*. IEEE Trans. on Ind. Appl. 6, 30, 1994
7. Miller D.F.: *Application guide for shunt capacitors on industrial distribution systems at medium voltage levels*. IEEE PCIM-75-26
8. Nandi S., Biswas P., Nandakumar V.N., Hegde R.K.: *Two novel schemes suitable for static switching of three-phase delta-connected capacitor banks with minimum surge current*. IEEE Trans. on Ind. Appl., 5, 33, 1997
9. Olivier G., Mougharbel I., Dobson-Mack G.: *Minimal transient switching of capacitors*. IEEE Trans. on Power Delivery, 4, 8, 1993
10. Raport EPRI: *Analyzing and solving power quality problems*.
11. Sapiejewski M.: *Techniczne aspekty stosowania przemienników częstotliwości i układów łagodnego rozruchu silników*. Seminarium Naukowo-Techniczne pt. Zastosowanie nowoczesnej aparatury Groupe Schneider w urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych niskiego napięcia, Politechnika Białostocka, Białystok, 3.02.1999
12. *Shunt capacitor bank switching stresses and test methods*. 1st part – Electra, 182, Feb. 1999; 2nd part – Electra, 183, April, 1999
13. Söderström R.: *Synchronized switching of MV-circuit breaker for MV-capacitor banks*. (materiały otrzymane od autora).
14. 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