

Rozważania o jakości energii elektrycznej (VI)

Zbigniew Hanzelka

Kondensatory służą do realizacji trzech podstawowych celów (jednocześnie bądź oddzielnie): kompensacji mocy biernej, filtracji wyższych harmonicznnych oraz stabilizacji napięcia.

Załączanie baterii kondensatorów jest procesem bardzo często występującym w systemie zasilającym. Skutkiem tego są stany przejściowe napięcia, które najczęściej nie stanowią problemu ze względu na urządzenia elektroenergetyczne, lecz w pewnych okolicznościach mogą negatywnie oddziaływać na odbiorców finalnych. Zainstalowana u tych ostatnich ochrona przepięciowa od zaburzeń wielkiej częstotliwości może nie być przystosowana do przejścia energii przebiegów o małej częstotliwości towarzyszących łączeniu konden-

Wraz ze wzrostem cen energii elektrycznej stała bateria kondensatorów przeznaczona do kompensacji – w przypadku zmiennej mocy biernej – jest już obecnie coraz częściej nieakceptowanym rozwiązaniem. Potrzebne są baterie przełączalne, zmieniające wartość mocy biernej w ślad za zmianami stanu kompensowanych odbiorników. Proces łączenia baterii kondensatorów jest źródłem zaburzeń w sieci zasilającej. Ważna jest znajomość istoty tych procesów, związanych z nimi zagrożeń oraz sposobów redukcji negatywnych skutków.

Proces łączenia baterii kondensatorów

satorów. Wiele urządzeń elektronicznych i energoelektronicznych, zawierających w układach zasilających kondensatory, jest czułych na ten rodzaj zaburzenia, nawet gdy jego wartość nie jest zbyt duża. Skutkiem mogą być nieprawidłowości w ich działaniu lub – w krańcowych przypadkach – trwałe uszkodzenia.

Łączenie baterii kondensatorów

Ze względu na występujące procesy łączeniowe można wyróżnić dwa przypadki:

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

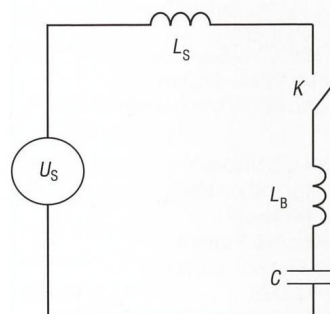
● **Łączenie pojedynczej baterii kondensatorów.** Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy obwodu, który posłuży do analizy procesu łączenia pojedynczej baterii kondensatorów o pojemności C . Założono brak rezystancji w obwodzie oraz brak napięciowego warunku początkowego na kondensatorze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

Chwila załączenia kondensatora to moment zwarcia sieci zasilającej w miejscu jego przyłączenia, ponieważ napięcie na kondensatorze nie może zmienić się natychmiast. Jeżeli nie ma dławika połączonego w szereg z kondensatorem, to napięcie na szynach osiąga w praktyce wartość bliską zeru w czasie kilku mikrosekund. W momencie zamknięcia łącznika prąd o wielkiej częstotliwości i dużej wartości płynie między źródłem zasilania a kondensatorem powodując wyrównanie napięć między dwoma elementami obwodu. Jego wartość jest określona 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 wyrażona następująco:

$$I_{\max} = \frac{\sqrt{2}U_S}{Z_C} = \sqrt{2}U_S \sqrt{\frac{C}{L_S + L_B}} = \sqrt{2} \sqrt{I_{ZW} I_{CN}}$$

gdzie:

Z_C – impedancja charakterystyczna analizowanego obwodu,



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

I_{ZW} – prąd zwarcia w miejscu przyłączenia baterii,
 I_{CN} – znamionowy prąd baterii.

Zależność ta nie uwzględnia tłumiącego efektu występującego w rzeczywistych układach. W praktyce tłumienie redukuje prąd maksymalny do ok. 90% wartości wyznaczonej z podanej zależności.

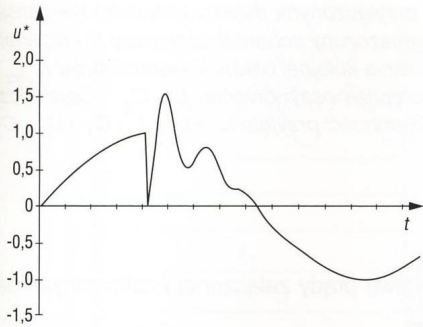
Podczas procesu łączeniowego występują znaczące spadki napięcia na impedancjach sieci zasilającej, co może uaktywnić układy zabezpieczeń. Na rys. 2 przedstawiono typowy przebieg napięcia podczas łączenia baterii kondensatorów.

W drugim etapie procesu łączenia napięcie kondensatora narasta od zera do wartości maksymalnej, czemu towarzyszy przetężenie prądowe. Rozpoczyna się oscylacyjny proces wymiany energii – między pojemnością kondensatora a indukcyjnością sieci zasilającej – podczas którego napięcie odzyskuje swój pierwotny przebieg czasowy. Częstotliwość f tych oscylacji może być szacowana na podstawie zastępczej indukcyjności systemu w miejscu przyłączenia baterii L_S i wartości jej pojemności:

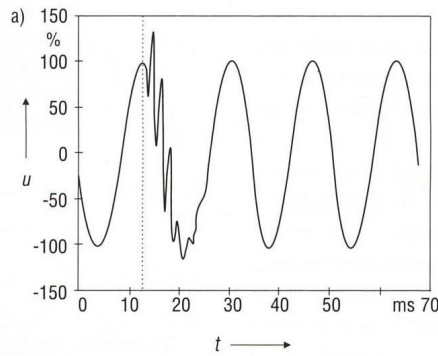
$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_S C)}}$$

$$\text{lub } f = f_S \sqrt{\frac{I_{ZW}}{I_{CN}}}$$

gdzie $f_S = 50$ Hz



Rys. 2. Typowy przebieg napięcia zasilającego u^* (w jednostkach względnych) podczas procesu łączenia baterii



Rys. 3. Przebieg czasowy napięcia (a) i prądu (b) podczas łączenia kondensatorów, wg (2)

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

W początkowym okresie oscylacji chwilowe napięcie, w zależności od fazy załączenia w najbardziej niekorzystnym przypadku (załączenie nie naładowanej baterii kondensatorów w szczycie lub blisko szczytu przebiegu czasowego napięcia zasilającego), może osiągnąć maksymalną wartość równą podwójnej amplitudzie nie zaburzonego przebiegu. Tłumienie systemu redukuje tę wartość do ok. 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 rys. 3 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy napięcia zaburzony procesem załączania baterii. Pokazano także przebieg czasowy prądu w linii, do której dołączono kondensatory. Proces łączenia baterii jest również narażeniem izolacji kondensatorów związanym z przetężeniem prądowym.

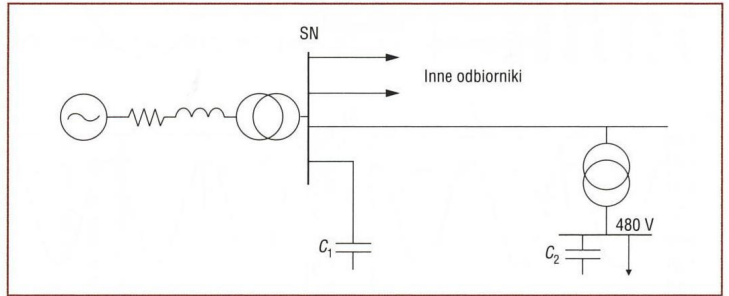
Zarówno początkowa, skokowa zmiana, jak i późniejsze oscylacje napięcia są ważną częścią łączeniowych stanów przejściowych. Początkowa zmiana jest istotna ze względu na dużą pochodną występującej wówczas redukcji napięcia. Następujące po niej oscylacje stanowią znacznie większy problem, chociaż ich wartość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

- wzmocnienie zaburzenia; proces łączeniowy wywołuje zjawisko wzmocnienia oscylacji, czego skutkiem może być m.in. uszkodzenie napięciowe sprzętu elektronicznego, kondensatorów, przepalenie bezpieczników, uszkodzenie elementów ochrony przepięciowej;

- awaryjne wyłączenie czułych odbiorników; nawet jeżeli przebiegi oscylacyjne nie podlegają wzmocnieniu, pewne kategorie odbiorników mogą być czułe na ten rodzaj zaburzenia, a ich wartość może spowodować awaryjne wyłączenia np. regulowanych napędów i innych odbiorników z elektronicznymi zasilaczami lub z napięciową synchronizacją.

● **Oscylacje łączeniowe.** Wzmocnienie oscylacji występuje jako rezultat pobudzenia – procesem łączenia baterii – drgań własnych, w słabo tłumionym obwodzie $L_S C$ utworzonym z zastępczych indukcyjności systemu zasilającego (w sieciach rozdzielczych głównie transformatorów) oraz pojemności dołączanej i już przyłączonych baterii kondensatorów. Rezultatem jest m.in. wzrost napięcia na szynach niskiego napięcia (nn). Na rys. 4 przedstawiono taki przypadek w typowej sieci rozdzielczej. Bateria C_1 jest przyłączana do równoległego

Rys. 5. Przebiegi ilustrujące oscylacje: a) na średnim napięciu, b) wzmocnienie oscylacji po stronie niskiego napięcia, wg [3]



Rys. 4. Schemat układu zasilania zakładu, w którym może wystąpić pobudzenie oscylacji na skutek załączenia baterii kondensatorów C_1 (C_2 – pracująca bateria)

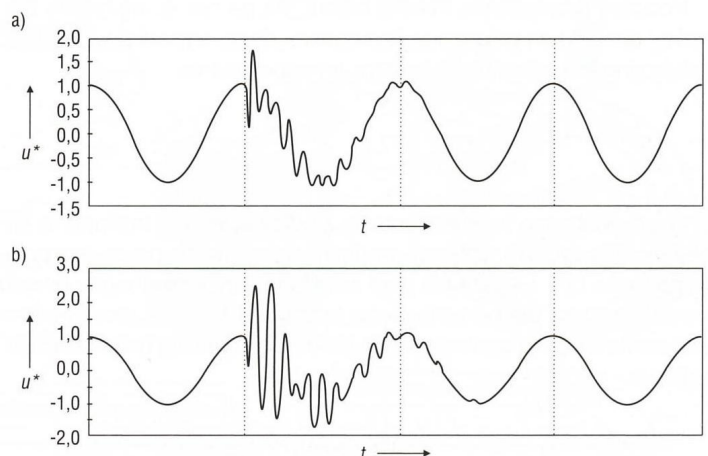
obwodu utworzonego przez szeregowe połączenie impedancji zastępczej transformatora i baterii kondensatorów nn przeznaczonej do kompensacji mocy biernej. Wzmocnienie oscylacji występuje w praktyce, jeżeli:

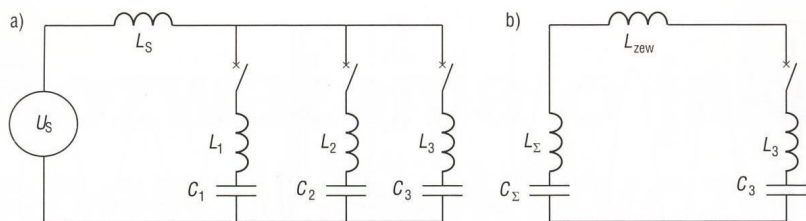
- pojemność kondensatora C_1 jest dużo większa niż pojemność kondensatora C_2 (co najmniej 10 razy), np. 3 Mvar i 200 kvar (współczynnik 15) jak na rys. 4 i 5;

- częstotliwość „łączeniowa” $\sqrt{\frac{S_{ZW}}{Q_C}}$ (S_{ZW} – moc zwarciova w

punkcie przyłączenia baterii, Q_C – moc załączanej baterii) jest bliska częstotliwości szeregowego obwodu utworzonego przez transformator obniżający i baterię C_2 przeznaczoną do poprawy współczynnika mocy;

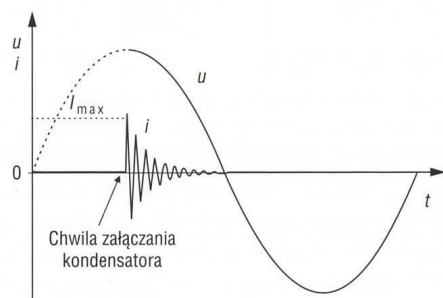
- nie ma wystarczającej liczby odbiorników „rezystancyjnych” w sieci nn (ich obecność gwarantuje tłumienie oscylacji); w wielu zakładach przemysłowych dominują jednak odbiorniki silnikowe, które nie zapewniają wystarczającego tłumienia i w ich przypadku wzmocnienie oscylacji może być szczególnie poważnym problemem. Przypadek taki przedstawiono na rys. 5.





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

Rys. 7. Prąd łączeniowy podczas procesu przyłączania baterii kondensatorów do baterii już pracującej (dla czystości rysunku nie przedstawiono stanu przejściowego napięcia)



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 ok. 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 jest typowo zawarta w przedziale 1-8,5 kHz. Czas trwania procesu przejściowego jest zwykle krótki, co przedstawiono przykładowo na rys.7.

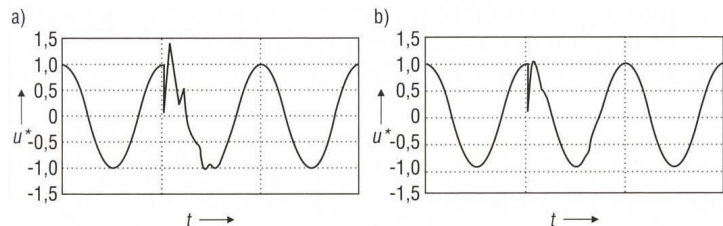
Stany łączeniowe w napięciu są redukowane przez kondensatory już przyłączone, tak więc najbardziej niekorzystne warunki, ze względu na napięcie, dotyczą łączenia pierwszego stopnia. Redukcja napięcia na szynach rozdzielni jest mniejsza niż w przypadku łączenia pojedynczej baterii ze względu na ładunek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

● **Szczególne warunki łączenia baterii.** Wszystkie powyższe rozważania dotyczyły idealnych warunków łączenia. Istnieją jednak 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, 50 V). 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 wtedy 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 między nimi spowoduje gwałtowny wzrost prądu źródła zasilania. Na przeciwną zmieni się polaryzacja napięcia kondensatora. Może ono osiągnąć war-



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

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

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

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

Na rys. 6b pominięto indukcyjność i napięcie źródła zasilania, 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:

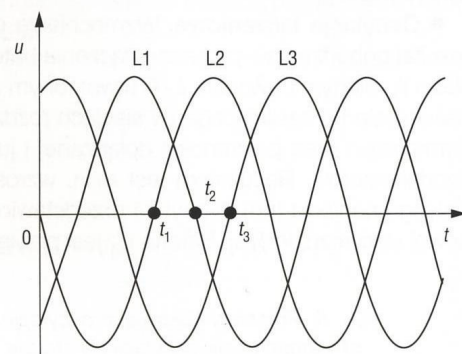
$$L_{\Sigma} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad C_{\Sigma} = C_1 + C_2$$

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

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

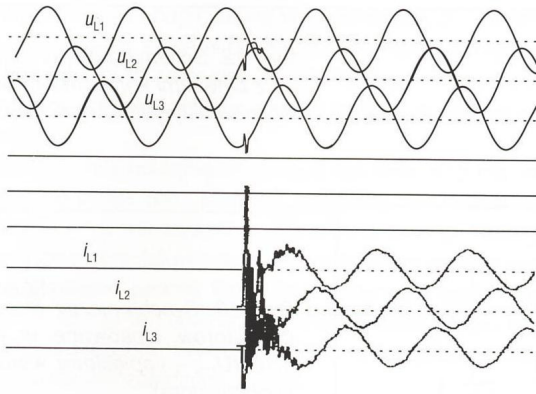
Już przyłączone baterie stanowią źródło napięcia o minimalnej impedancji zastępczej. Dlatego wartość maksymalna prądu łączeniowego może być większa niż prąd zwarcia analizowanego obwodu i występuje ona tuż po zamknięciu łącznika. Można ją szacować na podstawie związku analogicznego jak dla pojedynczej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

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



Rys. 9. Koncepcja synchronicznego łączenia baterii kondensatorów połączonej w gwiazdę (uziemioną); t_1 , t_2 , t_3 – chwile załączania poszczególnych faz

Rys. 10. Napięcia i prądy fazowe w przypadku niesynchronicznego łączenia pojedynczej baterii kondensatorów



tość równą potrójnej amplitudzie napięcia sieci. Proces ten może ulec powielaniu w dalszych chwilach.

Sposoby redukcji przepięć i przetężeń łączeniowych

Zwykle nie ma potrzeby kontrolowania załączania baterii, jeżeli proces ten nie występuje często. Czasami jednak takie działania są wymagane, szczególnie w przypadkach baterii dużej mocy przyłączanych w systemie rozdzielczym, w rozdzielniach odbiorców przemysłowych lub w systemie transmisyjnym. Możliwe jest wówczas:

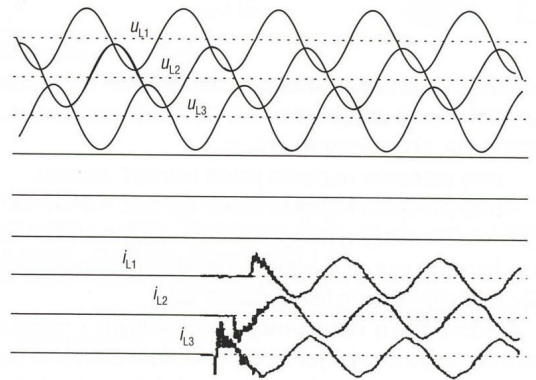
- łączenie baterii wraz z rezystorami w celu zwiększenia tłumienia obwodu i ograniczenia prądu łączeniowego;
- włączenie dławika w szereg z kondensatorami; dławik ten może odstroić obwód i w ten sposób przeciwdziałać wzmożeniu drgań (tzw. dławik odstrajający), może również w połączeniu z ba-

terią kondensatorów pełnić funkcję filtra wybranej harmonicznej (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 wzmożenia 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). Powoduje to zwykle stan przejściowy, lecz jego wartość i czas trwania są znacznie zmniejszone. Wartość dodatkowej impedancji jest szacowana na podstawie początkowego stanu łączeniowego, przepięć i przetężeń towarzyszących jej eliminacji z obwodu, jak również według zdolności do rozproszenia energii związanej z zaburzeniami i możliwością regularnego powtarzania tego procesu w zależności od bieżących potrzeb eksploatacyjnych.

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



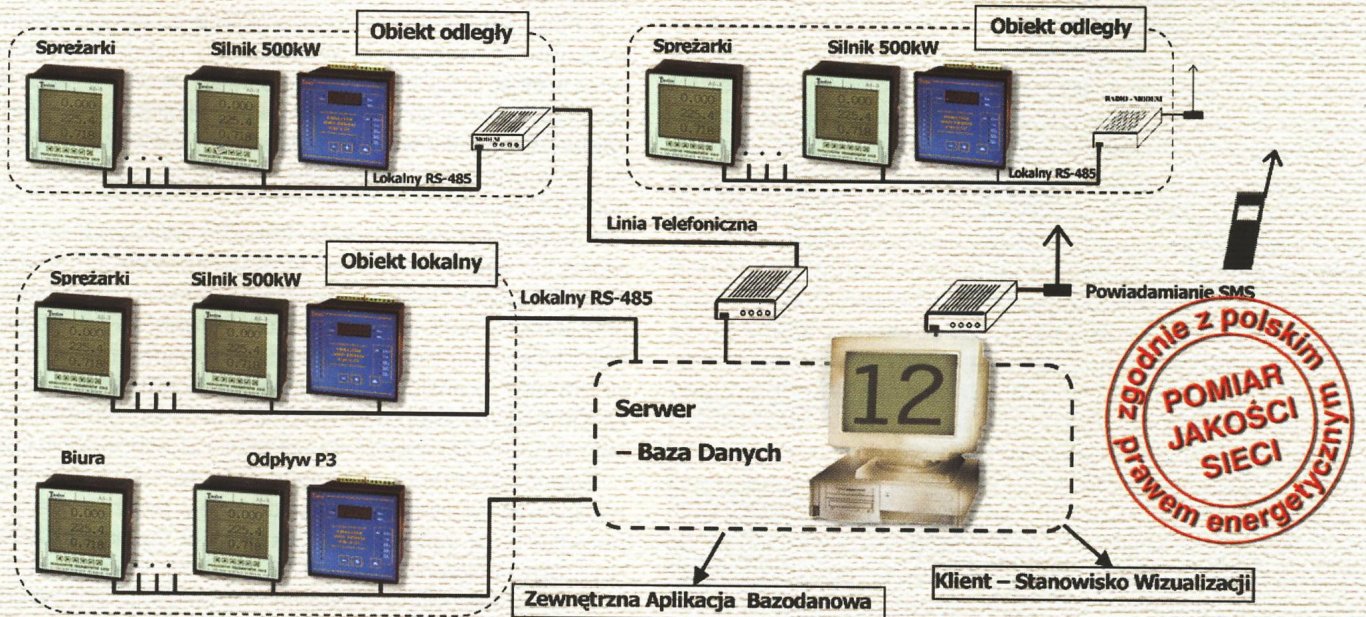
01/00475-03

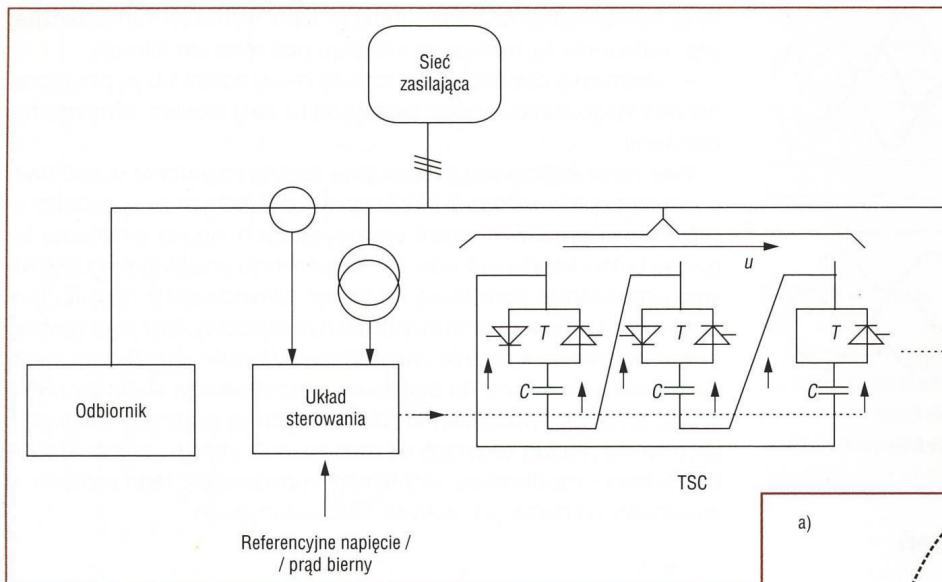
Twelve Electric

**Kompensacja Mocy Biernej
Rozdział Energii
Monitoring Jakości Sieci
Osprzęt Elektrotechniczny**

Po pełną wersję artykułu
prof. Z. Hanzelki dzwonić:
(22) 872-20-20
lub odwiedź stronę
www.twelvee.com.pl

wykonujemy kompleksowo pomiary jakości sieci elektrycznej





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

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

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

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

● **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 dużej częstotliwości łączeń) sprawiają, że użytkownicy często rezygnują ze stosowania tego elementu na rzecz dławików szeregowych. Optymalna wartość rezystancji zależy od mocy załączanej baterii kondensatorów i od mocy zwarciowej źródła zasilania.

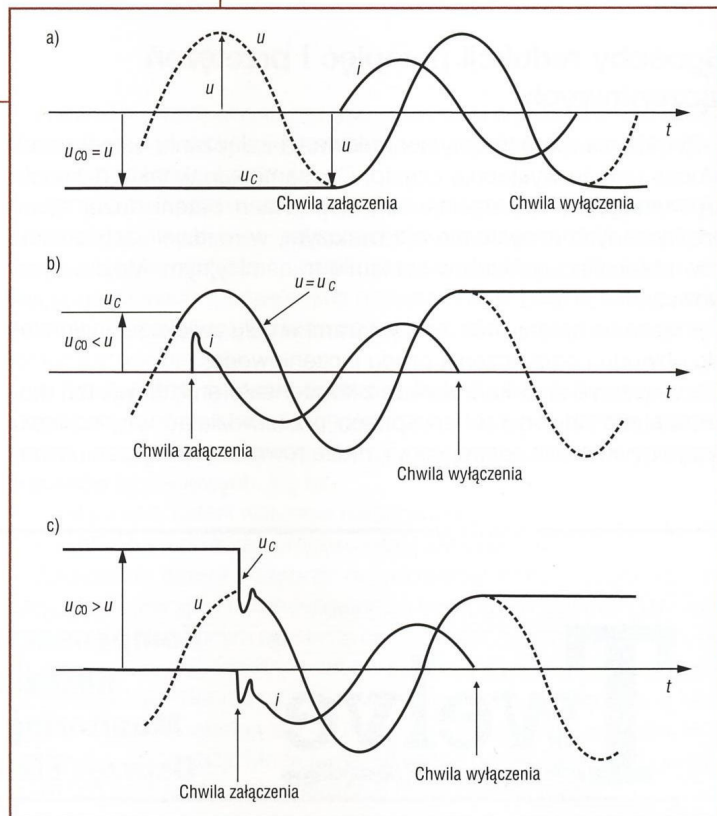
Wartość szeregowej rezystancji R jest szacowana za pomocą zależności: $R \approx \sqrt{\frac{L_S}{C}}$. Jest więc ona dobierana indywidualnie w każdym

przypadku i zwykle zawiera się w przedziale 25-75 Ω .

Stosuje się układy, w których rezystor jest włączony tylko na krótki okres (10–15 ms). Im większa rezystancja, tym bardziej efektywne jest tłumienie stanów przejściowych napięcia.

● **Szeregowy dławik.** Jest z sukcesem stosowany do ograniczenia prądu łączeniowego baterii. Niekiedy wprowadza także ograniczenia napięciowych stanów przejściowych. W „słabych” sieciach zasilających (o małej mocy zwarciowej) w punkcie przyłączenia baterii w niekorzystnych warunkach może 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 również ograniczają prąd baterii podczas zwarć występujących w ich pobliżu. Istnieją układy, w których dławik jest bocznikowany po zakończeniu procesu łączeniowego. Dławiki szeregowe mogą być łączone po stronie odbiorcy, jak ma to miejsce w przypadku regulowanych napędów elektrycznych, chroniąc tym samym jego instalację przed negatywnymi skutkami załączania baterii kondensatorów.

● **Ochrona przepięciowa.** Chroni ona przed wzrostem napięcia podczas procesu łączeniowego najczęściej na poziomie 1,8-2,5 napięcia znamionowego. Krytyczne dla jej pracy są wyładowania wtórne na zaciskach wyłącznika wywołane napięciem powrotnym w czasie procesu łączenia baterii. W razie instalowania ochrony przepięciowej po stronie nn, podczas wzmocnienia oscylacji napięciowych w układzie może się zdarzyć, że energia tych oscylacji przekroczy moż-



liwości absorpcji (zwykle kilkaset dżuli) określonego środka ochrony przepięciowej powodując jego uszkodzenie.

● **Filtry wh.** Są one stosowane głównie do ograniczenia wartości wyższych harmonicznych. W większości przypadków zmniejszają także wartość przepięcia, dodanie bowiem dławika w gałęzi filtru może zmienić korzystnie charakterystykę częstotliwościową układu oraz nawet w przypadku wzmocnienia oscylacji większość napięcia odłoży się na kondensatorze i dławiku, w mniejszym zaś stopniu na szynach zasilających.

● **Synchroniczne łączenie.** Oznacza kontrolowanie chwili załączenia lub wyłączenia aparatu 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 oraz 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 w każdej fazie w pobliżu przejścia napięcia fazowego przez wartość zerową jak na rys. 9. Oznacza to, że czas między kolejnymi łączeniami wynosi 3,3 ms (0 ms, 1/6 okresu, 1/3 okresu).

W celu zrealizowania załączenia przy przejściu napięcia przez wartość zerową w jego pobliżu niezbędne jest zastosowanie aparatu łą-

zeniowego o wytrzymałości napięciowej wystarczającej do wyeliminowania wyladowań między stykami przed ich fizycznym zetknięciem się. Pożądane jest, aby prąd zaczynał płynąć dopiero w chwili uzyskania mechanicznego kontaktu styków, a nie wcześniej, w efekcie wyladowania lukowego.

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

Bateria połączona w nieuziemioną gwiazdę. W pierwszej kolejności są zamykane styki napięcia międzyfazowego przy jego przejściu przez zero, a następnie styki wyłącznika trzeciej fazy z opóźnieniem 5 ms (90°).

● **Kompensator statyczny TSC.** W przypadku kompensatora TSC międzyfazowo łączy się 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 sekcji przewodzących. Wybierając odpowiednio dużą ich liczbę można uzyskać dowolnie małą wartość mocy biernej pojedynczego stopnia.

Każdy międzyfazowy obwód w boku pojedynczego trójkąta kondensatorów zawiera trzy główne elementy składowe: pojemność C (X_C) indukcyjność L (X_L) (nie zaznaczoną na rys. 12) 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:

- tyrystory są załączane w dodatnim lub ujemnym szczycie międzyfazowego napięcia zasilającego,
- 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, gdzie:

U_{Sm} – amplitudą napięcia zasilającego,
 n – względną częstotliwości własną ω_0 załączanego obwodu odniesioną względem częstotliwości napięcia zasilającego ($\omega = 2\pi f$): $n = \sqrt{X_C / X_L} = \omega_0 / \omega$.

Obecność indukcyjności w obwodzie sprawia, że kondensator musi być naładowany do napięcia wyższego od amplitudy napięcia zasilania U_{Sm} .

Miarą „przeładowania” kondensatora jest współczynnik $\frac{n^2/(n^2 - 1)}{n^2 - 1}$

Gdy wartość n jest mała, współczynnik ten może być znaczny.

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

Na rys. 13b pokazano załączanie w chwili, w której napięcie zasilania jest równe napięciu kondensatora przed osiągnięciem swej wartości maksymalnej. Kondensator jest wówczas załączany z pewnym stanem przejściowym o charakterze oscylacyjno-tłumionym, przy czym stopień tłumienia jest zależny zarówno od dobroci dławika i kondensatora, jak i od rezystancji sieci zasilającej oraz równoległe przyłączonych odbiorników. Drugi przypadek (rys. 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 rys. 13a.

Wnioski

Proces łączenia baterii kondensatorów jest źródłem wielu zaburzeń w sieci zasilającej. Ważna jest więc znajomość istoty tych procesów,

związanych z nimi zagrożeń oraz sposobów redukcji negatywnych ich skutków. Kiedy stosuje się baterie kondensatorów, jest ważne, aby:

- wykorzystać istniejące możliwości ograniczania negatywnych skutków procesu łączenia baterii, szczególnie w przypadku odbiorców przemysłowych, z dużą liczbą regulowanych napędów lub innych urządzeń energoelektronicznych;
- energetyka zawodowa miała informacje oraz informowała głównych przemysłowych odbiorców o lokalizacji dużych baterii kondensatorów i procedurze ich łączenia (czasie, sposobie łączenia itp.);
- nie zapominać, że instalowanie wejściowych dławików w urządzeniach energoelektronicznych, szczególnie regulowanych napędów, poprawia ich odporność na przebiegi łączeniowe baterii kondensatorów (również zmniejsza odkształcenie prądu wejściowego);
- baterie kondensatorów, zwłaszcza w sąsiedztwie odbiorników nieliniowych, wyposażyć w dławiki odstrajające lub instalować jako filtry harmonicznych.

220

Ei

Dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka

– profesor Akademii Górniczo-Hutniczej,
 konsultant ds. technicznych firmy TWELVE

LITERATURA

- HANZELKA Z., PIEKARZ A.: Załączanie baterii kondensatorów w sieciach niskiego i średniego napięcia. Seminarium JUEE, AGH-Kraków 2000.
- Handbook of power signatures. Dranetz BMI 1997.
- Raport EPRI: Analyzing and solving power quality problems.
- STANEK M. i in.: Experiences with improving power quality by controlled switching. CIGRE Session-2000, 13/14/36-01.

01/00715-01