

Analiza procesu załączania prądu łącznikami elektrycznymi zestykowymi w układach kompensacji mocy biernej

Zjawiska fizyczne zachodzące w wieloprądowych układach stykowych łączników elektrycznych podczas załączania prądu w układach kompensacji mocy biernej, towarzyszące łukowi elektrycznemu, dynamice ruchu styków lub szepianiu styków, są o wiele groźniejsze w skutkach niż zjawiska występujące w układach stykowych łączników zainstalowanych w innych układach elektroenergetycznych. Łączenie pojemności baterii kondensatorów wywołuje stany przejściowe w danym obwodzie, prowadzące do znacznych, szybkozmiennych przetężeń prądowych oraz przepięć, zarówno przy załączaniu, jak i przy wyłączaniu baterii kondensatorów. Wyłączaniu prądów pojemnościowych towarzyszą znaczne wartości chwilowe napięć międzystykowych łącznika, co może być przyczyną występowania pomiędzy stykami wyłącznika zapłonów ponownych późnych. Załączanie prądów pojemnościowych, ocena czasu trwania łuku elektrycznego podczas załączania oraz rola łączy synchronizowanych w procesie załączania prądów w układach kompensacji mocy biernej są przedmiotem artykułu.

1. WPROWADZENIE

Załączanie lub wyłączanie prądów w obwodach elektroenergetycznych zarówno wysokiego, jak i niskiego napięcia odbywa się na ogół przy użyciu łączników elektrycznych mechanizmowych zestykowych. Podczas zamykania styków w dowolnym środowisku stanowiącym izolację międzystykową łącznika następuje przebicie warstwy izolacji i pojawia się łuk elektryczny między zbliżającymi się stykami. Załączanie prądu w obwodzie elektrycznym następuje zatem najczęściej nie w wyniku uzyskania styczności styków, a w wyniku przebicia izolacji danego środowiska [1, 4, 6, 9]. Czas palenia się łuku elektrycznego jest zależny od wartości natężenia pola elektrycznego w obszarze stykowym oraz od prędkości schodzenia się styków [7, 11]. Największy wpływ na niezawodne działanie łączników mają wartości załączanych prądów i ich stromości oraz towarzyszą-

ce procesowi łączenia obwodów elektroenergetycznych znaczne przepięcia. Szczególnie niekorzystne znaczenie mają występujące wówczas w torach prądowych oddziaływania elektrodynamiczne, prowadzące do zmniejszenia docisku styków, a nawet ich odskoków, oraz skutki cieplne, które są przyczyną szybszego zużywania się układów stykowych, gaszeniowych łączników, jak również erozji i szepiania się styków. Proces erozji styków jest tym intensywniejszy, im wyższa jest temperatura łuku i czas jego palenia [2, 8, 10, 11].

Załączenie prądu w obwodach o charakterze pojemnościowym wiąże się z występowaniem stanów przejściowych w postaci przepięć i przetężeń o znacznej stromości narastania prądu, które mogą być groźne dla łącznika, łączonego odbiornika pojemnościowego i innych urządzeń w obwodzie. Przebieg zjawisk występujących przy wyłączaniu pojemności zależy przede wszystkim od szybkości narastania wytrzymałości elektrycznej na przebicie przerwy

międzystykowej łącznika oraz od mocy wyłączanej baterii, a także od parametrów układu sieci zasilającej [3, 5, 9]. Najbardziej skutecznym sposobem ograniczenia przepięć przy wyłączaniu pojemności jest niedopuszczanie do występowania późnych zapłonów ponownych. Obecnie do łączenia baterii kondensatorów stosowane są wyłączniki tzw. bezzapłonne (próżniowe i SF6), w których podczas otwierania styków uzyskuje się dostatecznie szybkie przyrastanie wytrzymałości powrotnej przerw gaszeniowych, decydujące o skutecznym przerwaniu prądu [12, 13].

Przedmiotem artykułu jest analiza stanów przejściowych występujących przy załączeniu baterii kondensatorów, ocena czasu lukowego podczas załączania oraz użyteczność łączy synchronizowanych do ograniczania negatywnych skutków procesów przejściowych podczas łączenia baterii kondensatorowych.

2. ZAŁĄCZENIE PRĄDÓW POJEMNOŚCIOWYCH

Łączenie prądów pojemnościowych dotyczy przede wszystkim baterii kondensatorów stosowanych do

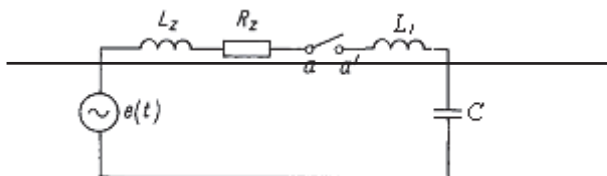
poprawy współczynnika mocy, zwłaszcza w zakładach przemysłowych, oraz nieobciążonych linii napowietrznych i kablowych. Baterie najczęściej instaluje się jako trójfazowe, połączone w gwiazdę nieuziemioną z uwagi na prostotę zabezpieczeń od zwarć wewnętrznych w baterii. Przyjmując jako założenie jednoczesne załączanie trzech faz, wobec symetrii układu, punkty gwiazdowe można połączyć bezopornowo i układ trójfazowy można sprowadzić do układu jednofazowego [1, 3, 9, 10].

Analizując przebiegi przejściowe występujące przy załączaniu skupionej pojemności baterii kondensatorów, należy rozpatrywać przypadek załączania pojedynczych kondensatorów do sieci, w której nie ma innych równolegle już dołączonych kondensatorów (rys. 1), oraz przypadek znacznie groźniejszy z punktu widzenia występujących przetężeń prądowych w obwodzie, polegający na przyłączaniu dodatkowych kondensatorów do obwodu z kondensatorami znajdującymi się już pod napięciem.

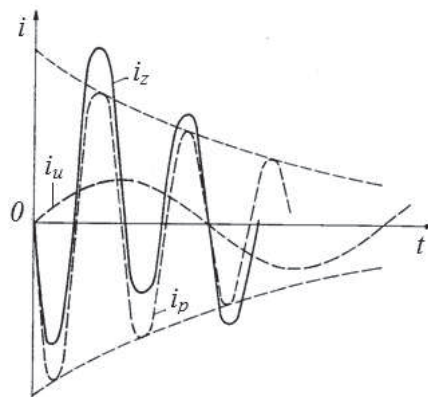
Okazuje się, że charakterystyczne dla załączania baterii kondensatorów są następujące graniczne momenty załączania:

- gdy chwilowa wartość napięcia sieci zasilającej równa się maksimum,
- gdy chwilowa wartość napięcia sieci zasilającej równa się zeru.

a)



b)



Rys. 1. Załączanie baterii o pojemności C oraz o indukcyjności połączeń L_1 w obwodzie zasilania o indukcyjności L_z ($L_z > L_1$) oraz rezystancji $R_z \approx 0$:
a) schemat zastępczy obwodu; b) przebiegi prądu załączeniowego i_z oraz jego składowych [5]

Przyjmując założenie sinusoidalnego napięcia zasilającego $e(t)$, pomijalnie małej rezystancji obwodu zasilającego R_z oraz nieuwzględniania indukcyjności L_1 połączeń łącznika z baterią kondensatorów, gdyż jest ona znacznie mniejsza od indukcyjności zasilania L_z , wartość prądu załączeniowego $i_z(t)$ obliczamy z zależności:

$$i_z = I_m (\sin \omega t - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t) \quad (1)$$

gdzie:

I_m – wartość maksymalna prądu ustalonego i_u ,
 $I_m = E_m \omega C$,

ω – pulsacja źródła zasilania,

ω_0 – pulsacja drgań własnych; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_z C}}$.

Amplituda prądu załączeniowego w najbardziej niekorzystnej chwili, a mianowicie gdy napięcie źródła osiąga wartość maksymalną tj. $e(t_0) = E_m$, wyznaczana jest z zależności:

$$i_{z \max} = I_m \left(1 + \frac{\omega_0}{\omega}\right) = I_m \left(1 + \sqrt{\frac{S_k}{Q_k}}\right) \quad (2)$$

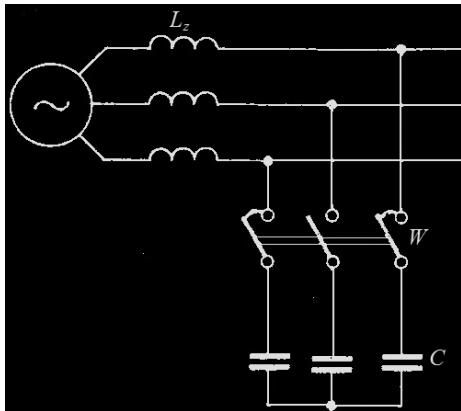
gdzie:

S_k – moc zwarciova obliczeniowa w miejscu dołączanej baterii kondensatorów,

Q_k – moc baterii kondensatorów.

Przy załączaniu pojedynczych baterii niskiego lub średniego napięcia amplituda prądu załączeniowego może osiągnąć krotność (5-20) względem wartości maksymalnej prądu ustalonego i_u . Napięcie na kondensatorze może osiągnąć najwyżej podwójną maksymalną wartość napięcia sieci.

W przypadku załączania nienaładowanej trójfazowej baterii kondensatorów (rys. 2) można założyć, że przebiecie przerwy między schodzącymi się stykami biegunów łącznika dwóch kolejnych faz następuje w chwili, w której odpowiednie napięcie międzyprzewodowe pomiędzy nimi ma wartość największą.



Rys. 2. Schemat układu załączania prądu w trójfazowej baterii kondensatorów [4]

Największą wartość prądu przejściowego i_p obliczamy z zależności:

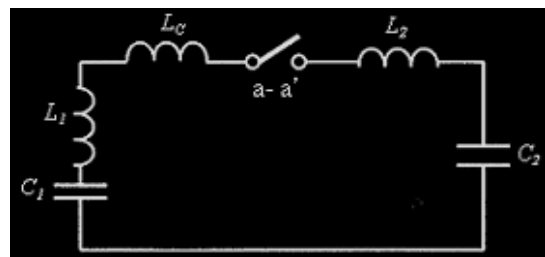
$$I_{pm} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m \sqrt{\frac{S_k}{Q_k}} \quad (3)$$

Największa wartość prądu przejściowego podczas zamykania styków bieguna łącznika trzeciej fazy ma wartość większą w stosunku do poprzednich i wyznaczamy ją z zależności:

$$I_{pm} = I_m \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) = I_m \sqrt{\frac{S_k}{Q_k}} \quad (4)$$

Największe chwilowe napięcie na zaciskach kondensatorów w chwili załączenia prądu w dwóch pierwszych biegunach łącznika może osiągnąć wartość co najwyżej równą podwójnej amplitudzie napięcia znamionowego, natomiast po zamknięciu trzeciego bieguna napięcie osiągnie wartość co najwyżej $\sqrt{3}$ razy większą od amplitudy napięcia znamionowego.

Celem dopasowania pojemności baterii kondensatorów do danej mocy biernej indukcyjnej systemu baterie kondensatorów są dzielone na sekcje (grupy). Podczas przyłączania poszczególnych sekcji kondensatorów do sekcji znajdujących się pod napięciem o wartości przetężenia prądowego w obwodzie decydują pojemności poszczególnych sekcji (grup) kondensatorów (rys. 3). Z uwagi na małe wartości indukcyjności w gałęziach (połączeniach) danej baterii w chwili załączania wyłącznikiem baterii C_2 bateria C_1 jest praktycznie zwierana [4, 9, 10]. Wówczas przebieg przejściowy prądu jest tłumiony w znikomym stopniu.



Rys. 3. Schemat zastępczy układu do analizy dołączania pojemności C_2 do układu grupy kondensatorów o pojemności C_1 ; L_1, L_2, L_c – indukcyjności połączeń [4]

Jeśli w czasie załączania baterii C_2 nastąpi przeskok wstępny pomiędzy stykami $a-a'$ wyłącznika przy maksymalnej wartości napięcia zasilania, to prąd przejściowy będzie miał wtedy największą stromość początkową oraz amplitudę. Jego wartość możemy określić z zależności:

$$i_2(t) = u_{aa'}(0) \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2 + L_c) \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)}} \sin \omega_{02} t \quad (5)$$

gdzie:

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_1 + L_2 + L_c} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)} \quad (6)$$

Największa wartość amplitudy prądu $i_2(t)$ może nawet niekiedy przekroczyć wartość prądu zwarcio-owego udarowego w danym miejscu sieci. Przy tym stromości pojemnościowych prądów załączeniowych są znacznie większe od stromości zwarcio-owych prądów załączeniowych. Ponadto należy podkreślić, że z uwagi na wysoką częstotliwość składowej przejściowej prądu wskutek efektu naskórkowości rezystancja połączeń baterii jest w czasie przebiegu niustalonego znacznie powiększona, co ma korzystny wpływ na jej tłumienie. Jednak prądy o wysokiej częstotliwości mogą się przenosić przez sprzężenia elektromagnetyczne na obwody sterownicze i inne obwody niskiego napięcia, oddziałując przy tym szczególnie niekorzystnie na różne układy elektroniczne, w tym na komputery i mikroprocesory układów sterowania i automatyki [6, 9].

3. OCENA CZASU ŁUKOWEGO PODCZAS ZAŁĄCZANIA

Zagadnienie minimalizacji czasu łukowego załączania ma związek z maksymalizacją wartości napięcia krytycznego $E_k = E_o$, a więc i napięcia krytycznego zwanego początkowym $U_o = U_p$, oraz minimalizacją czasu zamykania styków. Podczas załączania obwodu prądu przemiennego sygnał na załączenie łącznika elektrycznego na ogół nie jest skorelowany z fazą napięcia, stąd przebicie między stykami może następować przy różnej ich odległości i w różnych chwilach, tj. przy różnych kątach fazowych napięcia [6]. Czas łukowy załączania może być w związku z tym przy każdym załączeniu prądu inny.

W założeniu, że napięcie przebicia jest proporcjonalne do odległości między stykami (rys. 4), oraz że nie zależy od biegunowości styków, można wyznaczyć chwilę t_p , w której następuje przebicie podczas załączania prądu, przy napięciu $u = U_m \sin \omega t$, z zależności:

$$U_m |\sin \omega t| = E_k n v_s (t_s - t_p) \quad (7)$$

gdzie:

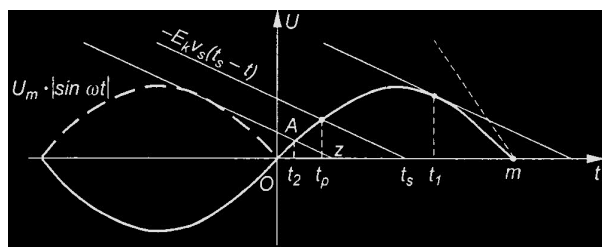
E_k – wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje przebicie,

v_s – wartość prędkości schodzenia się styków (zmniejszania się odstępów międzystykowej) w chwili zapłonu łuku elektrycznego w przerwie stykowej,

n – liczba przerw w biegunie,

t_p – chwila przebicia przerwy,

t – chwila zetknięcia się styków.



Rys. 4. Przykład określania chwili zapłonu łuku podczas załączania prądu przemiennego [6]

Załączenie prądu jest zatem możliwe przy dowolnym kącie fazowym napięcia, włącznie z kątem fazowym odpowiadającym chwili przejścia napięcia przez wartość zerową, jeżeli spełniony jest warunek:

$$k = \frac{n E_k v_s}{\omega U_m} \geq 1 \quad (8)$$

Czas palenia się łuku elektrycznego t_{az} przy założeniu, że nie występują drgania i odskoki styków przy załączaniu (rys. 4), wynosi:

$$t_{az} = t_s - t_p = \frac{U_m}{E_k v_s} |\sin \omega t_p| \quad (9)$$

Łuk elektryczny pali się między stykami najdłużej, jeśli przebicie nastąpi w chwili przejścia napięcia przez maksimum. Najkrótszy czas palenia się łuku w rozpatrywanym przykładzie ma miejsce przy przebicciu przerwy międzystykowej w chwili t_2 (rys. 4) i wynosi:

$$t_{az\min} = \frac{U_m}{E_k v_s} |\sin \omega t_2| \quad (10)$$

Wybór określonej fazy załączania prądu wymaga zastosowania układu elektronicznego sterującego procesem zamykania łącznika, np. łącznika zwarcio-owego lub wyłącznika synchronizowanego. Wprowadzenie do eksploatacji łączników próżniowych i z sześćfluorkiem siarki (SF₆), charakteryzujących się małymi rozrzutami czasów działania, umożliwiło wdrożenie łączy synchronizowanych [9, 12, 14].

Synchronizowane łączy zarówno obwodów elektrycznych o charakterze pojemnościowym, jak i indukcyjnym zyskują coraz większe zastosowanie z uwagi na poprawę niezawodności pracy łączników elektrycznych, a także z powodu skutecznego ograniczenia występowania przetężeń prądowych i przepięć łączy w systemie elektroenergetycznym. Dotyczy to zwłaszcza łączy baterii kondensatorów, linii długich nieobciążonych i dławików

oraz załączania transformatorów nieobciążonych i wyłączenia prądów zwarciovych. Łączniki przeznaczone do realizacji łączy synchronizowanych w układach trójfazowych powinny charakteryzować się rozrzutem czasów zamykania/otwierania nieprzekraczającym wartości ± 1 ms. W związku z tym powinny być wyposażone w niezależne mechanizmy napędowe, przemieszczające styki ruchome w poszczególnych biegunach łącznika. Dzięki łączy sterowanym możliwe jest ograniczenie narażeń elektrycznych, cieplnych i mechanicznych elementów systemu elektroenergetycznego oraz poprawa jakości energii, co daje jednocześnie znaczne korzyści ekonomiczne.

4. PODSUMOWANIE

Występujące podczas załączenia baterii kondensatorów znaczne przetężenia prądowe mogą prowadzić do uszkodzenia poszczególnych kondensatorów baterii, a także mogą powodować szepianie się styków wyłącznika.

Prądy załączeniowe o wysokiej częstotliwości w obwodach pojemnościowych przenoszą się przez sprzężenia elektromagnetyczne na obwody sterownicze i na inne obwody niskiego napięcia.

Czas palenia się łuku elektrycznego złączeniowego w przestrzeni międzystykowej jest zależny od wartości natężenia pola w obszarze stykowym oraz od prędkości schodzenia się styków.

Stosowanie synchronizowanych załączeń i wyłączeń prądu umożliwia istotne ograniczenie przepięć i przetężeń w układzie elektroenergetycznym.

10. Markiewicz H., Wołkowiński K.: *Urządzenia elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1980.
11. Miedziński B., Wiśniewski G., Kharin S.N., Nouri H.: *Possibility of Control of Transition of Switching Arc DC into Glowing*, Proc. of the Pakistan Academy of Science, 2012, 49(30), pp.173-180.
12. Shoffa V.N., Miedziński B.: *Sinchronnaja komutacja gerkonami elektriceskich cepiej pieremiennowo toka*, Proc. 3rd Int. Conf. on „REED Switches and Products”, Ryazan, Russia, 2011, pp. 48-60.
13. Strzelecki R., Supronowicz H.: *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*, OWPW, Warszawa 2000.
14. Ware B., Reckleff J., Mauthe G., Schett G.: *Synchronous Switching of Power Systems*, CIGRE Session 1990, Report No. 13-205.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.

Literatura

1. Ciok Z.: *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1976.
2. Dzierzbicki S.: *Aparaty elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1977.
3. Królikowski Cz.: *Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych*, PWN, Warszawa-Poznań 1975.
4. Kulas S.: *Warunki pracy wyłączników średniego napięcia w układach kompensacji mocy biernej*. „Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa”, 2009, nr 7 (461), s. 57-62.
5. Kulas S.: *Capacitor Switching Techniques*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09), Valencia 2009, Conference Proceedings – CD.
6. Kulas S.: *Tory prądowe i układy zestykowe*, seria: Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 29, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
7. Kulas S., Kolimas Ł.: *Analiza natężenia pola elektrycznego w wieloprądowych układach stykowych na przykładzie uziemnika szybkiego*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2008, nr 7, s. 178-181.
8. Kulas S.: *Electrical arc in the process of the closing contacts*, Trudy Instytutu Problem Materiałowodzenia NAN Ukrainy, seria: Kompozycyjnye, Sloistyje i Gradientnyje Materiały i Pokrytya “Elektriczieskije Kontakty i Elektrody”, Kijew 2004, pp. 71-79.
9. Maksymiuk J.: *Aparaty elektryczne*, WNT, Warszawa 1997.