

Analiza procesu załączania wybranych obwodów elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Zjawiska fizyczne zachodzące w wielkopiędowych układach stykowych łączników elektrycznych podczas załączania transformatorów nieobciążonych oraz baterii kondensatorów są o wiele groźniejsze w skutkach niż zjawiska występujące w układach stykowych łączników zainstalowanych w innych układach elektroenergetycznych. Załączaniu transformatorów nieobciążonych towarzyszyć mogą znaczne przetężenia, przekraczające istotnie wartości prądów znamionowych transformatora. Łączenie pojemności baterii kondensatorów wywołuje stany przejściowe w danym obwodzie, prowadzące do znacznych, szybkozmiennych przetężeń prądowych i przepięć. Prądy wysokiej częstotliwości mogą się przenosić przez sprzężenia elektromagnetyczne na obwody sterownicze i inne obwody niskiego napięcia. Analiza procesów przejściowych podczas załączania transformatorów nieobciążonych oraz pojemności baterii kondensatorów, a także ocena wpływu fazy załączania prądu w poszczególnych obwodach na powstające tam przetężenia są przedmiotem artykułu.

Słowa kluczowe: *załączanie transformatorów nieobciążonych oraz baterii kondensatorów, faza załączania prądu, łączenia synchronizowane.*

1. WPROWADZENIE

Załączanie lub wyłączenie prądów w obwodach elektroenergetycznych zarówno wysokiego, jak i niskiego napięcia odbywa się na ogół przy użyciu wyłączników elektrycznych mechanizmowych zestykowych. Procesowi łączenia obwodu elektrycznego towarzyszy stan przejściowy napięcia i prądu, związany z istnieniem w obwodzie indukcyjności i pojemności [1, 5, 10]. Powstające wówczas przepięcia i przetężenia o znacznych wartościach i stromościach mogą być niebezpieczne tak dla łączonych odbiorników, jak i dla samego wyłącznika. Zjawiska te są przyczyną szybszego zużywania się układów i łączników oraz erozji i sczepiania się styków. Proces erozji styków jest tym intensywniejszy, im wyższa jest temperatura łuku i czas jego palenia [6, 8, 9]. Nie bez znaczenia jest także wpływ tych zjawisk na bezpieczeństwo prowadzenia robót górniczych [11].

Podczas zamykania styków w dowolnym środowisku stanowiącym izolację międzystykową łącznika następuje przebicie warstwy izolacji i pojawia się łuk elektryczny między zbliżającymi się stykami. Załą-

czanie prądu w obwodzie elektrycznym następuje zatem najczęściej nie w wyniku uzyskania styczności styków, a w związku z przebiciem izolacji danego środowiska. Czas palenia się łuku elektrycznego jest zależny od wartości natężenia pola elektrycznego w obszarze stykowym oraz od prędkości schodzenia się styków [7, 9].

Podczas wyłączenia prądów zmiennych, zwłaszcza prądów zwarciovych, łuk elektryczny, który pojawia się z chwilą rozdzielenia styków, gaśnie przy przejściu prądu przez zero. Bezpośrednio po przejściu prądu przez zero wzrasta wytrzymałość międzystykowa, zwana również wytrzymałością zapłonową. Szybkość wzrostu tej wytrzymałości zależy od szybkości neutralizacji ładunków, które znajdują się w obszarze międzystykowym. Liczba tych ładunków zależy od prądu płynącego uprzednio w łuku. Jednocześnie stan nieustalony, wywołany w obwodzie wyłączeniem prądu wyłączeniowego, prowadzi do pojawienia się między rozchodzącymi się stykami łącznika napięcia zwanego napięciem powrotnym. Napięcie powrotne zawiera składową podstawową o pulsacji źródła zasilania i swobodną o pulsacji znacznie większej. Na jego przebieg wpływ mają

przede wszystkim: napięcie łuku, kanał połukowy, układ gaszeniowy łącznika [1, 5].

Z analizy warunków pracy wyłączników wysokiego napięcia wynika, że w zwykłych warunkach ich pracy można przyjąć liczbę operacji łączeniowych w ciągu roku równą 80, czemu odpowiada trwałość mechaniczna wyłącznika określona na co najmniej 2000 przestawień w czasie 25-letniej eksploatacji. W szczególnych przypadkach, jakie występują np. przy łączeniu baterii równoległych, dławików, filtrów w elektrowniach pompowych i wiatrowych, liczba łączy w ciągu roku może być znacznie większa, stąd trwałość łączeniową określa się na co najmniej równą 10 tys. przestawień.

W artykule zostały przedstawione zagadnienia dotyczące analizy przebiegu załączania transformatorów nieobciążonych oraz baterii kondensatorów, oceny właściwości procesów przejściowych towarzyszących załączaniu prądów oraz wyboru odpowiedniej fazy załączenia prądu w rozpatrywanych obwodach w celu ograniczania negatywnych właściwości procesów przejściowych.

2. WYBRANE PROBLEMY ZWIĄZANE Z ZAŁĄCZANIEM PRĄDÓW PRZEMIENNYCH

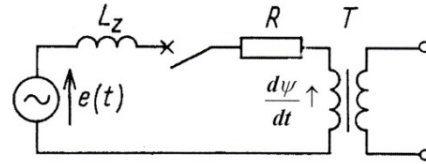
W zakresie analizy przejściowych przebiegów łączeniowych związanych z załączaniem prądów przemiennych należy wyróżnić:

- załączanie nieobciążonych transformatorów,
- załączanie baterii kondensatorów.

2.1. Załączanie transformatorów nieobciążonych

Załączaniu transformatorów nieobciążonych do sieci towarzyszy stan przejściowy, podczas którego występują przetężenia prądowe, które mogą osiągać znaczne wartości [3, 4, 9]. Zależą one od parametrów transformatora, ale również od cech wyłącznika. Przebieg procesów przejściowych towarzyszący załączaniu prądu w obwodzie jest związany przede wszystkim z nieliniowością obwodu magnetycznego transformatora oraz z możliwością występowania w rdzeniu magnetyzmu szczytkowego, będącego pozostałością po wcześniejszej eksploatacji transformatora. Oznacza to, że kolejne załączenie transformatora może nastąpić przy wartości strumienia w rdzeniu różnej od zera. Należy przy tym dodać, że zbliżone przebiegi łączeniowe występują także przy łączeniu dławików równoległych [1, 9].

Przedmiotem analizy są zjawiska fizyczne zachodzące przy załączaniu jednofazowego transformatora nieobciążonego, którego schemat zastępczy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy układu

Przebieg czasowy prądu dla stanu przejściowego załączania obwodu zastępczego transformatora (rys. 1) oraz przy pominięciu indukcyjności rozproszenia uzwojenia pierwotnego ($L_z = 0$) wyznaczamy z równania [9]:

$$e(t) = Ri + \frac{d\psi}{dt} = E_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

gdzie:

$e(t)$ – wartość chwilowa SEM źródła zasilania;

ω – pulsacja źródła zasilania;

Ψ – wartość chwilowa skojarzenia magnetycznego uzwojenia pierwotnego w czasie załączania transformatora;

φ – faza SEM w chwili załączania;

i – wartość chwilowa prądu załączania transformatora;

R – rezystancja załączanego obwodu.

Po scałkowaniu równania (1) otrzymamy:

$$\psi(t) = \frac{E_m}{\omega} \sin(\omega t + \varphi) - R \int_0^t i dt + C_1 \quad (2)$$

Stała całkowania C_1 dla warunków brzegowych $t = 0$, $i = 0$, $\Psi = \Psi_0$ (skojarzenie wynikające z magnetyzmu szczytkowego) wynosi:

$$C_1 = \psi_0 - \frac{E_m}{\omega} \sin \varphi \quad (3)$$

Stąd rozwiązanie równania ma postać:

$$\psi(t) = \psi_0 + \frac{E_m}{\omega} [\sin(\omega t + \varphi) - \sin \varphi] - R \int_0^t i dt \quad (4)$$

Największe wartości chwilowe skojarzenia magnetycznego otrzymamy, jeśli:

- $\Psi(0) > 0$ i jest duże, tzn. jeśli magnetyzm szczytkowy jest duży;
- $\varphi = -\pi/2$ faza początkowa SEM w chwili załączania odpowiada przejściu SEM przez zero.

Największa wartość strumienia skojarzonego Ψ_m wystąpi po czasie $t = \pi / \omega$ i wyniesie:

$$\psi_m = \psi_0 + 2 \frac{E_m}{\omega} - R \int_0^t i dt \approx \psi_0 + 2\psi_{um} - R \int_0^t i dt \quad (5)$$

gdzie:

ψ_{um} – wartość maksymalna skojarzenia magnetycznego w stanie ustalonym.

Zakładając z kolei w równaniu (1) wartość rezystancji uzwojenia $R = 0$, otrzymujemy:

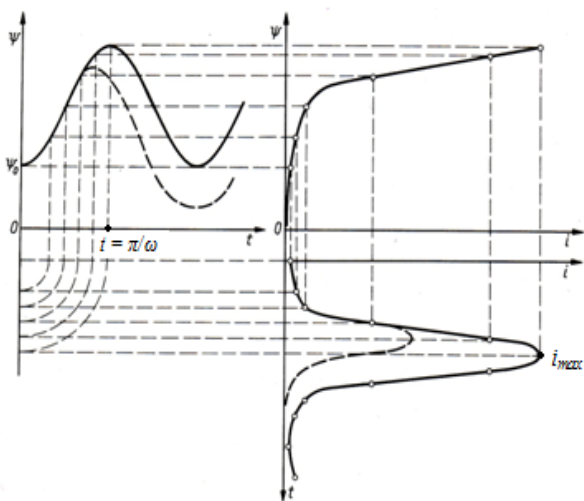
$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi) = \frac{d\psi_u}{dt} \quad (6)$$

Stąd skojarzenie magnetyczne w stanie ustalonym określa zależność:

$$\psi_u = \frac{E_m}{\omega} \sin(\omega t + \varphi) = \psi_{um} \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Przykładowy przebieg wyznaczonego graficznie prądu załączeniowego transformatora dla zadanej charakterystyki magnesowania przedstawiono na rys. 2.

Jak wynika z rys. 2, z uwagi na płaski przebieg charakterystyki $\Psi(i)$ osiągane wartości szczytowe prądu mogą być znaczne. Są one tym wyższe, im większa jest wartość skojarzenia $\Psi(0)$ wskutek magnetyzmu szczytkowego oraz im większe jest nasycenie stanu ustalonego odpowiadające skojarzeniu magnetycznemu Ψ_{um} .



Rys. 2. Wyznaczenie przebiegu prądu podczas załączania transformatora nieobciążonego dla założonej krzywej magnesowania; $R = 0$ (linia ciągła) i $R > 0$ (linia przerywana) [9]

Przy załączeniu niesterowanym transformatora, zwłaszcza wielkiej mocy, należy się liczyć z prądami załączeniowymi dochodzącymi do od 8- do 15-krotnej wartości ich prądu znamionowego, a więc zbliżonego do wartości prądu zwarcia.

Takie wartości prądu oddziałują już mechanicznie na uzwojenia transformatora, a ponadto mogą pobudzać obwody zabezpieczeń i powodować niezamierzone wyłączenia. Również należy się liczyć z możliwością indukowania dodatkowych prądów i napięć w obwodach sterowania i obwodach niskiego napięcia. Mogą być one niedopuszczalne zwłaszcza dla urządzeń elektronicznych.

Uważa się zatem, że dla transformatorów, zwłaszcza wielkich mocy, istnieje pełne uzasadnienie stosowania załączeń synchronizowanych (sterowanych) w sytuacji, gdy obniżają się magnetyzm szczytkowy rdzenia oraz dokonuje załączania transformatora w maksimum napięcia [2, 4, 9, 12, 13].

Istnieje zatem pełne uzasadnienie stosowania załączeń synchronizowanych transformatorów nieobciążonych i załączanie ich w maksimum napięcia zasilania w celu ograniczania występujących w obwodzie przetężeń prądowych [2, 4, 9, 12, 13].

2.2. Załączanie baterii kondensatorów

Łączenie pojemności baterii kondensatorów wywołuje ważne w technice łączeniowej stany przejściowe, prowadzące do znacznych przetężeń oraz przebiegów. Zbliżone problemy łączeniowe występują także przy łączeniu nieobciążonych linii długich [2, 5, 9, 10].

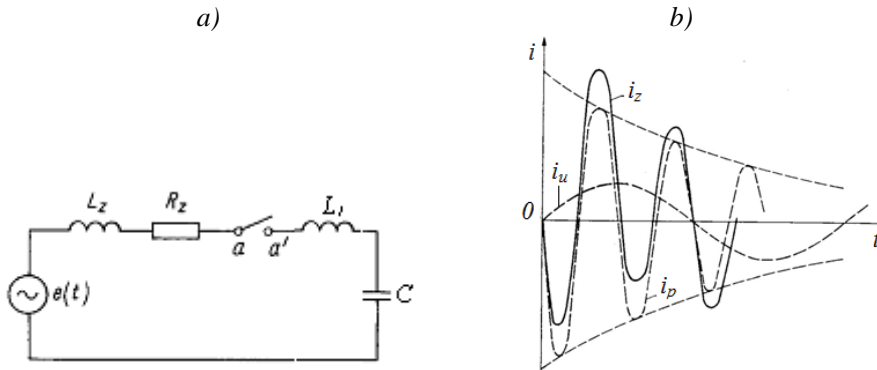
Baterie kondensatorów najczęściej instaluje się jako trójfazowe, połączone w gwiazdę nieuziemioną z uwagi na prostotę zabezpieczeń od zwarć wewnętrznych w baterii. Przy założeniu jednoczesnego załączania trzech faz, wobec symetrii układu, punkty gwiazdowe można połączyć bezoporowo i układ trójfazowy można sprowadzić do układu jednofazowego [2, 6, 9].

Charakterystycznymi dla załączania baterii kondensatorów są następujące graniczne momenty załączania [6, 7]:

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

Przebiegi łączeniowe dla innych chwil czasowych są zawarte między tymi przypadkami granicznymi. Przypadek załączenia do sieci kondensatora przy maksimum napięcia zasilania występuje najczęściej. W wyniku przebiecia przerwy międzystykowej ma miejsce zapalenie się łuku elektrycznego między stykami wyłącznika. Występuje wówczas przepływ prądu przejściowego, który charakteryzuje największe przetężenie prądowe w obwodzie.

Analizując przebiegi przejściowe występujące przy załączaniu skupionej pojemności baterii kondensatorów, należy rozpatrzyć przypadek załączania pojedynczych kondensatorów do sieci, w której nie ma innych równoległe już dołączonych kondensatorów



Rys. 3. Załączanie baterii o pojemności C oraz o indukcyjności połączeń L_1 w obwodzie zasilania o indukcyjności L_z ($L_z \gg L_1$) oraz rezystancji $R_z \approx 0$; a) schemat zastępczy obwodu, b) przebiegi prądu załączeniowego i_z oraz jego składowych [6]

Przy założeniu sinusoidalnego napięcia zasilającego $s(t)$, pomijalnie małej rezystancji obwodu zasilającego R_z oraz nieuwzględniania indukcyjności L_1 połączeń łącznika z baterią kondensatorową, gdyż jest znacznie mniejsza od indukcyjności zasilania L_z , wartość prądu załączeniowego $i_z(t)$ obliczamy z zależności:

$$i_z = I_m \left(\sin \omega t - \frac{\omega_0}{\omega} e^{\alpha t} \sin \omega_0 t \right) \quad (8)$$

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:

$$i_{z, \max} = I_m \left(1 + \frac{\omega_0}{\omega} \right) = I_m \left(1 + \sqrt{\frac{S_k}{Q_k}} \right) \quad (9)$$

gdzie:

S_k – moc zwarciova obliczeniowa w miejscu dołączanej baterii kondensatorów;

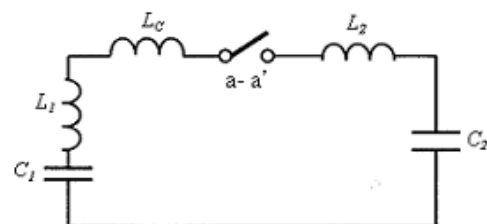
Q_k – moc baterii kondensatorów.

Przy załączaniu pojedynczych baterii niskiego lub średniego napięcia amplituda prądu załączeniowego może osiągnąć krotność (5-20) wartości szczytowej

(rys. 3) 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.

prądu w stanie ustalonym, natomiast napięcie na kondensatorze może osiągnąć najwyżej podwójną maksymalną wartość napięcia źródła. W obwodach rzeczywistych przebiegi przejściowe prądów i napięć są tłumione w wyniku występowania rezystancji obwodu oraz powiększonego efektu zjawiska naskórkowości.

Dołączanie dodatkowej baterii kondensatorów do baterii wcześniej już załączonej, w celu lepszego dopasowania całkowitej pojemności do danej mocy biernej, może stwarzać poważne problemy łączeniowe. Podczas przyłączania poszczególnych sekcji kondensatorów do sekcji znajdujących się pod napięciem o wartości przetężenia prądowego w obwodzie decydują pojemności poszczególnych sekcji (grup) kondensatorów (rys. 4.). Z uwagi na małe wartości indukcyjności w gałęziach (połączeniach) danej baterii w chwili załączania wyłącznikiem baterii C_2 bateria C_1 jest praktycznie zwierana [2, 5, 9]. Wówczas przebieg przejściowy prądu jest w znikomym stopniu tłumiony.



Rys. 4. 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 [6]

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:

$$i_2(t) = u_{aa'}(0) \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2 + L_c) \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)}} \sin \omega_{02} t \quad (10)$$

gdzie:

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_1 + L_2 + L_c} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)} \quad (11)$$

Największa wartość amplitudy prądu $i_2(t)$ może nawet niekiedy przekroczyć wartość prądu zwarciego udarowego w danym miejscu sieci. Przy tym stromości pojemnościowych prądów załączeniowych są znacznie większe od stromości prądów zwarciovych. Ponadto 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, 10, 12].

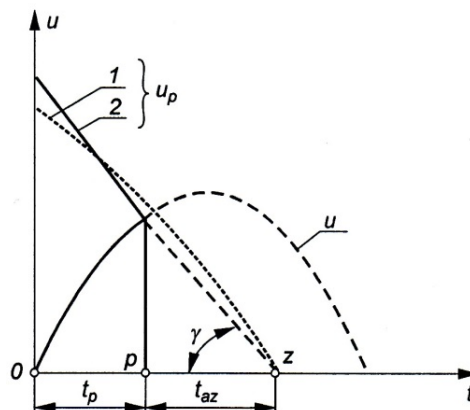
Skutecznymi środkami ograniczającymi przetężenia przy łączeniu baterii kondensatorów [2, 9, 10] są:

- dwustopniowe załączanie baterii kondensatorów wyłącznikiem wyposażonym w rezystor, zwierany z opóźnieniem wystarczającym do skutecznego wy tłumienia procesu przejściowego prądu,
- załączanie synchronizowane w chwili przechożenia napięcia zasilania przez zero.

3. WYBÓR FAZY ZAŁĄCZANIA PRĄDU

Ograniczona wytrzymałość dielektryczna środowiska, otaczająca styki zamykanego wyłącznika elektrycznego wysokiego napięcia, powoduje, że załączenie prądu w obwodzie elektrycznym następuje najczęściej nie w wyniku uzyskania styczności styków, a w wyniku przebicia elektrycznego danego środowiska, np. SF₆ [6, 7]. Przebicie przerwy międzystykowej występuje w chwili zrównania się wartości wytrzymałości dielektrycznej przerwy międzystykowej $u_p(t)$ z chwilową wartością przyłożonego do przerwy napięcia $u(t)$ (rys. 5).

Ogólnie rzecz biorąc, im większa jest wartość prędkości v_s schodzenia się styków łącznika elektrycznego, tym krótszy jest czas własny łącznika. W rezultacie krótszy czas palenia się łuku elektrycznego wpływa na większą trwałość łączników elektrycznych.



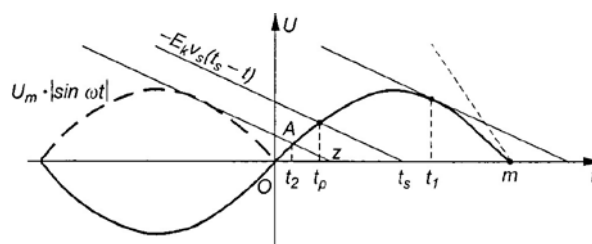
Rys. 5. Graficzne wyznaczanie czasu przedłukowego t_p i łukowego t_{az} podczas załączania prądu [7]

Zakładając, że napięcie przebicia jest proporcjonalne do odległości między stykami (rys. 6.) oraz 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:

$$U_m |\sin \omega t| = E_k n v_s (t_s - t_p) \quad (12)$$

gdzie:

- E_k – wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje przebicie;
- v_s – wartość prędkości schodzenia się styków (zmniejszania się odstępów międzystykowych) w chwili zapłonu łuku elektrycznego w przerwie stykowej;
- n – liczba przerw w biegunie;
- t_p – chwila przebicia przerwy;
- t_s – chwila zetknięcia się styków.



Rys. 6. 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:

$$k = \frac{n E_k v_s}{\omega U_m} \geq 1 \quad (13)$$

Minimalną wartość prędkości styków w chwili mechanicznego ich zetknięcia się, przy której nie nastąpi przebiecie przerwy międzystykowej podczas załączania prądu w obwodzie elektrycznym, można więc określić z zależności:

$$v = \frac{\omega U_m}{nE_k} \quad (14)$$

Im większa jest wartość prędkości v_s schodzenia się styków wyłącznika elektrycznego, tym krótszy jest czas własny łącznika ($t_s - t$), a więc i krótszy jest czas palenia się łuku elektrycznego. W przypadku załączania synchronizowanego wymagane jest wystrojenie wyłącznika w taki sposób, by w zależności od charakteru obciążenia początek przepływu prądu w poszczególnych fazach następował w momencie, gdy wartość chwilowa napięcia danej fazy jest najkorzystniejsza z punktu widzenia przebiegów łączeniowych. Oznacza to, że w przypadku załączania obciążenia indukcyjnego wyłącznikiem idealnym wygenerowanie impulsu powinno dokonać się w takiej chwili, by zwarcie jego styków nastąpiło przy maksymalnej wartości chwilowej napięcia, a przy załączeniu obciążenia pojemnościowego – przy zerowej wartości napięcia.

Wyłączniki dla umożliwienia realizacji łączy trójfazowych powinny w zasadzie dysponować osobnymi napędami dla poszczególnych biegunów. Wybór określonej fazy załączenia prądu wymaga zastosowania układu elektronicznego sterującego procesem zamykania wyłącznika.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy i badań opisanych w niniejszym artykule można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Podczas załączania transformatora nieobciążonego w jego obwodzie pierwotnym mogą wystąpić znaczne przetężenia, dochodzące do od 8- do 15-krotnej wartości ich prądu znamionowego. Ich efektem są narażenia aparatury łączeniowej, a zwłaszcza sterującej i zabezpieczeniowej.
2. Występujące podczas załączenia baterii kondensatorów znaczne przetężenia prądowe mogą prowadzić do uszkodzenia poszczególnych kondensatorów baterii, a także powodować szepianie się styków wyłącznika.

3. Prądy załączeniowe o wysokiej częstotliwości w obwodach pojemnościowych przenoszą się przez sprzężenia elektromagnetyczne na obwody sterownicze i na inne obwody niskiego napięcia.
4. Faza załączania prądu w obwodzie elektrycznym, prędkość schodzenia się styków wyłącznika oraz rozrzuty czasów własnych jego działania mają istotny wpływ na przetężenia i przepięcia w załączanym obwodzie.
5. Stosowanie synchronizowanych załączeń i wyłączeń prądu umożliwia istotne ograniczenie przepięć i przetężeń w układzie elektroenergetycznym.

Literatura

1. Brunke J.H.: *Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, No. 16(2).
2. Ciok Z., Maksymiuk J., Kulas S., Zgliński K.: *Problemy analizy, badania oraz eksploatacji urządzeń rozdzielczych*, Symposium Krajowe pt. „Elektryczna Aparatura Rozdzielcza”, EAR 2004, s. 9-18, Poznań 2004.
3. Furgał J., Kuniewski M., Pająk P.: *Symulacje komputerowe i badania napięć i prądów podczas załączania transformatorów energetycznych*, Zeszyty Naukowe Wydziału EiA Politechniki Gdańskiej, nr 30, Gdańsk 2011.
4. Horiszny J.: *Analiza prądu załączania transformatora*, PAK, 2007, nr 4.
5. Królikowski Cz.: *Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych*, PWN, Warszawa 1975.
6. Kulas S.J., Supronowicz H.: *Analiza procesu załączania prądu łącznikami elektrycznymi zestykowymi w układach kompensacji mocy biernej*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2013, nr 12(514), s. 38-42.
7. Kulas S.: *Capacitor Switching Techniques*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09), Valencia 2009, Conference Proceedings.
8. Kulas S.: *Tory prądowe i układy zestykowe*, Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 29, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
9. Maksymiuk J.: *Aparaty elektryczne i podstawy doboru*, SEP-COSiW, nr 33, Warszawa 2010.
10. Markiewicz H., Wołkowiński K.: *Urządzenia elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1980.
11. Mnukhin A.G., Iordanow I.V.: *Improved safety in the use of electric energy in coal mines*, Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2015, No. 3(523), pp. 31-36.
12. Shoffa V.N., Miedzinski B.: *Synchronous Switching by REED Switches of AC Circuits.*, Proc. 3rd Int. Conf. on „REED Switches and Products” Ryazan, Russia 2011, pp. 48-60.
13. Ware B., Reckleff J., Mauthe G., Schett G.: *Synchronous Switching of Power Systems*, CIGRE Session 1990, Report No. 13-205.

prof. dr hab. inż. STANISŁAW KULAS
 prof. dr hab. inż. HENRYK SUPRONOWICZ
 Instytut Systemów Elektronicznych,
 Wojskowa Akademia Techniczna
 ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
 {stanislaw.kulas, supronowicz}@wat.edu.pl