

Narażenia eksploatacyjne urządzeń elektroenergetycznych a niezawodność zasilania energią elektryczną

Urządzenia elektroenergetyczne wchodzące w skład sieci przesyłowej i rozdzielczej podlegają różnym rodzajom narażeń eksploatacyjnych. Należy przy tym zaznaczyć, że nie wszystkie narażenia są uwzględniane przy wyznaczaniu parametrów znamionowych tych urządzeń. Narażenia napięciowe, prądowe, a także wybrane nietypowe warunki pracy łączników elektrycznych są przedmiotem referatu.

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie możliwie wysokiego (lub uzgodnionego) poziomu niezawodności zasilania energią elektryczną, przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów dostawy energii, ściśle się łączy z problematyką jakości energii elektrycznej przesyłanej odbiorcom. W praktyce ograniczane są koszty inwestycyjne i koszty obsługi urządzeń elektrycznych. Podwyższana bywa elastyczność przepływów energii w sieci poprzez odpowiednią jej konfigurację, czy instalowanie rezerwowego zasilania. W wyniku monitorowania i oceny stanu życia istniejących urządzeń wydłużany jest ich czas pracy. Efektywność i minimalizacja stopnia zużycia urządzeń elektrycznych (składnika majątkowego SM) w czasie eksploatacji jest więc uzależniona od zarządzania procesem jego obsługi [2,5,7]. Dotyczy to nie tylko wykonywania niezbędnych działań zapobiegawczych lub naprawczych, ale także oceny stanu zdolności do dalszej pracy, modernizacji, czy wymiany danych urządzeń elektrycznych. Jest to proces decyzyjny wielokryterialny, w którym decyzje są podejmowane na podstawie informacji technicznych, ekonomicznych i natury społecznej.

Wszystkie urządzenia elektryczne wchodzące w skład sieci przesyłowej i rozdzielczej ulegają starzeniu lub zużyciu. Podlegają narażeniom napięciowym, prądowym, mechanicznym, klimatycznym i innym, w zależności od warunków pracy. Przeciążenie torów prądowych i zestyków, prowadzące do

nadmiernego ich nagrzewania, przyspiesza proces korozyjny, obniża ich wytrzymałość mechaniczną, zmniejsza docisk zestyków, osłabia wytrzymałość elektryczną izolacji na przebicie itp. Zdarzenia te mogą być przyczyną szepienia się zestyków, przebicia izolacji, co może doprowadzić w konsekwencji do zwarcia łukowego w rozdzielnicy. Skutki ich mogą być katastrofalne, prowadząc nie tylko do uszkodzenia samego urządzenia i wynikającej stąd przerwy w zasilaniu, ale także być przyczyną obrażenia ciała, aż do utraty życia.

Przedstawienie wybranych narażeń oraz wartości związanych z nimi wymuszeń, dostarczenie praktycznych odpowiedzi na pytania dotyczące skutków tych narażeń w eksploatacji, oraz nietypowych zastosowań wyłączników i ich wpływu na ciągłość zasilania odbiorców energii elektrycznej jest przedmiotem referatu.

2. CIĄGŁOŚĆ ZASILANIA ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ ODBIORCÓW

Rozbudowa i modernizacja układów elektroenergetycznych jest powiązana z potrzebą systematycznego zwiększania wymagań dotyczących zarówno parametrów technicznych jak i niezawodności działania łączników [8,12,13]. W szczególności obejmują zagadnienia związane z łączeniem transformatorów nieobciążonych, silników, baterii kondensatorów, linii długich nieobciążonych, a także pracy w warun-

kach przeciążenia i przy innych częstotliwościach zasilania niż częstotliwość znamionowa sieci [3,9].

Ogólnie biorąc, uszkodzenia poszczególnych urządzeń elektroenergetycznych, a zwłaszcza aparatów elektrycznych mogą wynikać z przyczyn niedoskonałości ich konstrukcji, gdy wystąpią one w warunkach obciążeń nie przekraczających ich parametrów znamionowych, lub są rezultatem narażeń eksploatacyjnych urządzeń elektroenergetycznych w miejscu ich użycia i zainstalowania. Nawet krótkotrwała przerwa w zasilaniu odbiorców może powodować problemy eksploatacyjne, być przyczyną zagrożenia życia ludzkiego i to niezależnie od kategorii odbiorców energii elektrycznej. Kategoria odbiorców ma wpływ na rodzaj ich zasilania oraz dobór zainstalowanych w sieci aparatów elektrycznych i innych urządzeń elektrycznych. W przypadku odbiorców przemysłowych, koszty strat wynikłe z niedostarczonej energii elektrycznej są ogólnie biorąc proporcjonalne do długości przerw w dostawie energii i częstości ich występowania [14]. Stąd, do technicznego minimum powinny być sprawdzone stany awaryjne, zarówno zawinione jak i niezawinione przez dostawcę energii. W tym celu poznanie zjawisk fizycznych zachodzących w aparatach elektrycznych jak i całokształt środków służących uzyskaniu możliwie wysokiego poziomu niezawodności aparatów elektrycznych w spełnianiu pożądaných funkcji należy do bardzo istotnych.

3. NARAŻENIA NAPIĘCIOWE

3.1. Wstęp

Izolacja aparatów i urządzeń elektroenergetycznych w normalnych warunkach może pracować trwale pod napięciem wyższym od napięcia znamionowego sieci, do 20% jego wartości. Wynika to stąd, że moc pobierana przez odbiorniki systemu jest różna w ciągu doby i roku, a ponadto istnieje potrzeba utrzymania wartości napięcia w punktach sieci bardziej odległych od źródeł zasilania, na poziomie bliższym wartościom znamionowym.

W przypadku jednak gwałtownych zmian obciążenia, w następstwie zwarć doziemnych, dokonywanych czynności łączeniowych w sieci, czy w wyniku bezpośredniego (pośredniego) uderzenia pioruna w obiekty elektroenergetyczne, występują w systemie elektroenergetycznym przebiegi: długotrwałe, łączeniowe i atmosferyczne. Różnią się one wartościami szczytowymi, stromością narastania udarów, czasem ich trwania i kształtem przebiegu. Narażają one izolację urządzeń elektroenergetycznych, w tym aparatów elektrycznych. Przebiegi atmosferyczne

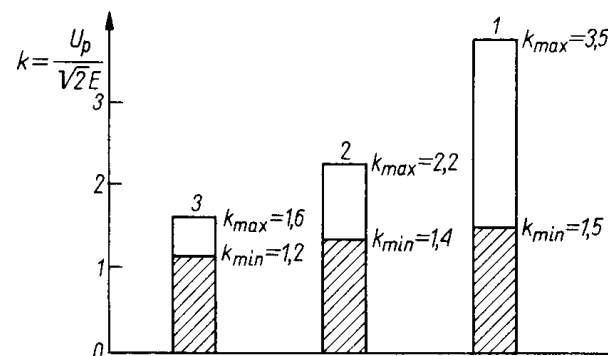
(piorunowe) o czasie trwania rzędu mikrosekund, które są spowodowane przez uderzenie pioruna w obiekty elektroenergetyczne nie są przedmiotem analizy.

3.2. Przebiegi długotrwałe

Przebiegi długotrwałe mogą w warunkach napięć średnich występować niekiedy przez dłuższy czas. Do przebiegów długotrwałych zaliczamy:

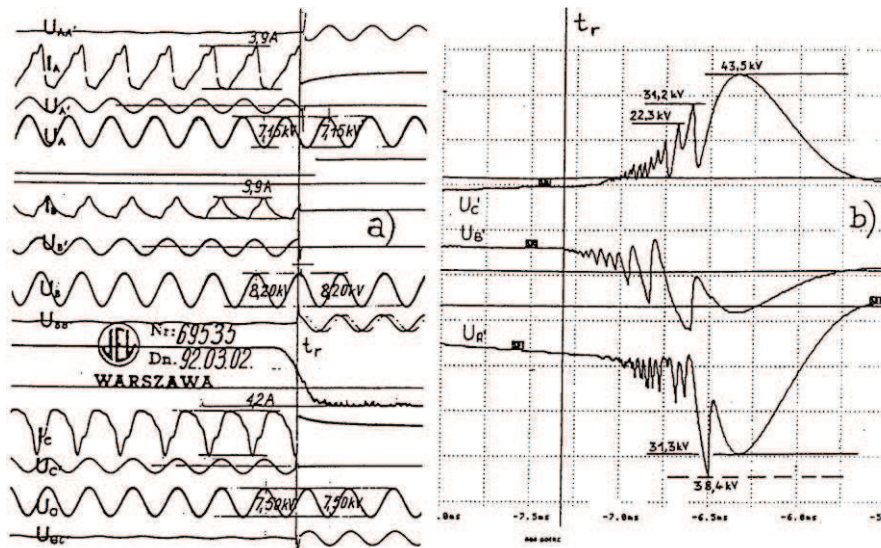
- przebiegi powodowane wyłączeniem odbiorów o dużych mocach zapotrzebowanych, oraz powstające na wskutek załączania linii nieobciążonej (efekt pojemnościowy); charakteryzuje je częstotliwość znamionowa sieci oraz współczynnik amplitudy przebiegu nie większy niż 1.4, a czas jego trwania nie przekracza 1 s,
- przebiegi ziemnozwarciowe, występujące przy zwarciu doziemnym jednofazowym (utrzymującym się); w sieci z izolowanym punktem zerowym, doziemienie jednej z faz powoduje wzrost napięcia w pozostałych fazach do wartości napięcia międzyprzewodowego (asymetrię napięć fazowych), które z uwagi na małe wartości prądów może być utrzymywane przez dłuższy czas (wiele godzin).

Zwarcie jednofazowe z ziemią w sieci z izolowanym punktem zerowym może być zwarciem łukowym. W przypadku gdy prąd tego zwarcia nie przekracza kilku amperów, to łuk elektryczny pali się niestabilnie. Występują wówczas przebiegi szybkozmiennie przy przerywaniu i zapłonie łuku [1,2]. Wartość współczynników przebiegów tego rodzaju, która zależna jest od parametrów sieci, warunków zapłonu oraz gaszenia łuku elektrycznego, waha się w granicach od 1.5 do 3.5 (rys. 1).



Rys. 1. Współczynnik przebiegów k w sieci średnich napięć [2]; 1 – z izolowanym punktem zerowym, 2 – kompensowanej przez dławik, 3 – uziemionej przez rezystor

Utrzymywanie w sieciach przemysłowych średniego napięcia nie wyłączonych zwarć łukowych prze-



Rys. 2. Rejestracja zapłonów wielokrotnych w komorach próżniowych, powstałych po „zerwaniu” prądu biegu jalowego transformatora wielkopądowego

rywanych jest niebezpieczne, zwłaszcza dla izolacji silników i kabli. Stan taki sprzyja przekształcaniu się zwarć pojedynczych w zwarcie na przykład podwójne, oraz utrudnia dobór ograniczników przepięć, z uwagi na występujące w nich kumulacyjne efekty termiczne.

W celu ograniczenia wartości tego rodzaju przepięć, punkt zerowy sieci jest uziemiany przez rezystor lub dławik o stosunkowo małej reaktancji. W sieciach dokładnie skompensowanych, zagrożenie izolacji jest natomiast mniejsze niż w sieciach z izolowanym punktem zerowym. Zwiększa się ono jednak w miarę wzrostu rozstrojenia kompensacji i wzrostu wartości wyższych harmonicznych prądu zwarcia, nie podlegających kompensacji.

3.3. Przepięcia łączeniowe

Przepięcia łączeniowe o wyższej częstotliwości, od kilku do kilkudziesięciu kiloherców, występują przy wyłączaniu prądów roboczych indukcyjnych i pojemnościowych oraz zwarciovych [3,9,15]. W czasie wyłączania obwodu mało- i średnioindukcyjnego można zauważyć, że przebieg napięcia na przerwie międzystykowej łącznika należy do stosunkowo łagodnych, z punktu widzenia procesu wyłączania. Napięcie na zaciskach łącznika elektrycznego jak i jego stromość zmieniają się łagodnie. Pewne problemy techniczne mogą stwarzać warunki obciążeniowe i ruchowe, wymagające dużej liczby łączy.

Problem komplikuje się wtedy, gdy wyłączamy silniki wysokonapięciowe znajdujące się w stanie zahamowanym lub podczas ich rozruchu, dławiki kompensacyjne, a także transformatory nieobciążone. Poważne zagrożenie, zwłaszcza dla izolacji silników,

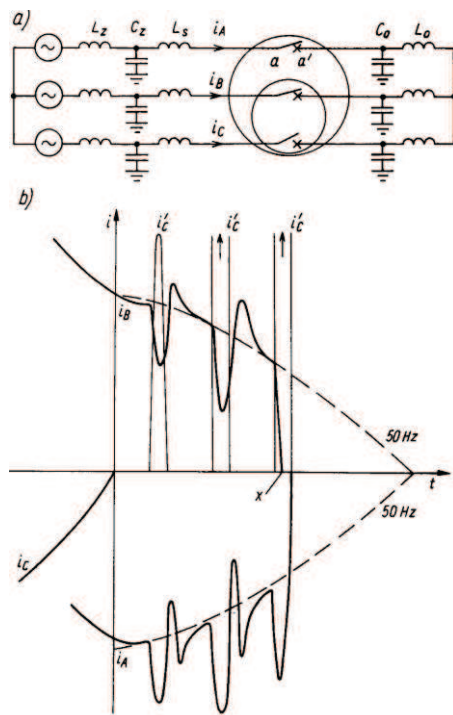
transformatorów od powstałych w obwodzie przepięć, występuje w następstwie zapłonów wielokrotnych o dużej stromości, oraz związanego z tym tzw. wirtualnego (mogącego zaistnieć) ucięcia prądu [4,12]. Zapłony wielokrotne w przestrzeni międzystykowej mogą praktycznie wystąpić w przypadku wszelkich rodzajów komór gaszeniowych. Zachodzą zwłaszcza w sytuacji, gdy styki łącznika elektrycznego zaczynają się rozchodzić, tuż przed przejściem prądu przez zero. Po chwilowym zgaszeniu łuku elektrycznego, z uwagi na niewielką jeszcze odległość międzystykową w trakcie wyłączania prądu i niedostateczną wytrzymałość elektryczną tej przerwy, występuje ponowny zapłon łuku i przepływ prądu o dużej częstotliwości (nawet kilka megaherców). Łączniki próżniowe charakteryzuje zdolność przerywania prądu przejściowego tego rodzaju.

Jak wynika z badań [6, 8,11], pomierzone wartości przepięć powstałe przy łączeniu transformatorów, przy pomocy wyłączników próżniowych (rys. 2), odpowiadały wartości współczynnika przepięcia z przedziału $k_u \approx 4.0 - 5.0$.

Przepięcia tego rodzaju nie są jednak groźne dla izolacji transformatora, który w przypadku transformatora np. 15 kV, poddawany jest obowiązkowej próbie napięciowej w laboratorium udarem łączeniowym 250/2500 μs o wartości 85 kV_m, co odpowiada współczynnikowi przepięć $k_u \approx 6.9$. Natomiast dla kabli eksploatowanych według [6], dopuszczalne przepięcia powinny mieścić się w granicach: $1.9 \leq k_u \leq 2.3$. Przy tak niskim poziomie dopuszczalnych przepięć, niezależnie od rodzaju zastosowanego wyłącznika, a zwłaszcza wyłącznika próżniowego jest technicznie uzasadnione zainstalowanie odpowiednio dobranych ograniczników przepięć.

Na przebieg rozważanego prądu przejściowego, oprócz wartości prądu głównego, wpływa ukształtowanie sieci, a więc rozkład pojemności i indukcyjności po stronach obciążenia i zasilania, liczba i budowa kabli, długość i ukształtowanie ciągu szynowego w rozdzielnicy, jej ukształtowanie i liczba pól [6].

W sieciach średniego napięcia z izolowanym punktem zerowym, w przypadku wyłączania prądów o mniejszych natężeniach i przy występowaniu zapłonów wielokrotnych, może wystąpić tzw. wirtualne ucięcie prądów (rys. 3).



Rys. 3. Wirtualne ucięcie prądów w biegunach A i B łącznika przy wystąpieniu wielokrotnych zapłonów w biegunie C; i_A, i_B, i_C – prądy fazowe o częstotliwości źródła zasilania; i'_c – prądy zapłonów wielokrotnych w biegunie C; x – wymuszone indukowanymi przebiegami wielkiej częstotliwości przejścia przez zero prądów w biegunach A i B

Jeśli założymy na przykład, że wyłączaniu prądu i_C w biegunie C towarzyszy występowanie zapłonów wielokrotnych, to wówczas prąd przejściowy dużej częstotliwości z tego bieguna wprzęga się w pozostałe bieguny A i B, głównie w obszarze szyn zbiorczych w drodze indukcyjnej. Prowadzi to do wymuszonego wcześniejszego (niekoniecznie jednoczesnego) przechodzenia prądów w tych biegunach przez zero. Wówczas te przejścia prądu przez zero mogą być przyczyną wyłączenia prądu (prądy w biegunach łącznika A i B nie płyną). W indukcyjności natomiast obciążenia (silnika) prądy są różne od zera, ponieważ prąd przejściowy towarzyszący zapłonom wielokrot-

nym w biegunie C płynie praktycznie w strefie szyn zbiorczych przez pojemności doziemne kabli. Istnieje realne niebezpieczeństwo zerwania tego prądu i pojawienia się przepięć o bardzo dużych wartościach.

Doświadczalnie stwierdzono, że omawiany proces wirtualnego ucięcia prądów jest praktycznie możliwy tylko przy prądach wyłączalnych o wartości nie przekraczającej 600 A [12].

Skutecznym sposobem zmniejszenia stromości fal przepięciowych na odcinku wyłącznik-silnik, co jest istotne ze względu na zagrożenie izolacji międzyzwojowej silników, zwłaszcza pierwszych cewek, jest zwiększanie pojemności względem ziemi układu na odcinku łącznik-silnik. Wzrost wartości międzyfazowych sprzężeń pojemnościowych sprzyjających wirtualnemu ucinaniu prądu w drugim i trzecim biegunie wyłączającego łącznika próżniowego jest niestety wadą tego rozwiązania.

Korzystniejszym sposobem zmniejszenia stromości oraz ograniczenia amplitudy przepięć w obwodzie, a tym samym zmniejszenia zagrożenia izolacji silników jest zastosowanie na zaciskach silników układu tłumiącego R-C, złożonego z szeregowo połączonych pojemności i rezystancji. Zmniejszenie stromości fal przepięciowych jest istotną zaletą układu R-C w stosunku do powszechnie stosowanych warystorowych ograniczników przepięć. Pewne niedogodności takiego sposobu ograniczania przepięć dotyczą potrzeby instalowania dodatkowego układu tłumiącego w pobliżu zacisków silników, oraz konieczności dopasowania rezystancji dołączonego układu do impedancji falowej kabla zasilającego silnik.

Poważne problemy techniczne związane ze zrywaniem wyłączanych prądów, o stosunkowo niewielkich wartościach, np. nieobciążonych transformatorów oraz silników, mogą stwarzać niektóre rodzaje wyłączników (styczniki), zwłaszcza próżniowe, ale również SF₆ i pneumatyczne. Oznacza to wyłączenie prądów przed ich naturalnym przejściem przez zero, a więc w chwili istnienia w układzie energii magnetycznej, proporcjonalnej do iloczynu kwadratu prądu zrywania i indukcyjności obwodu. Prowadzić to może do wysokich przepięć w obwodzie (3.1), przy czym ich wartości zależą od parametrów układu sieciowego, jak i od cech łączeniowych łącznika [12].

$$(u_{a'0})_m = E_m \sqrt{\eta \frac{L_T}{C_T} \left(\frac{I_m}{E_m} \right)^2 \sin^2 \Psi + \cos^2 \Psi} \quad (3.1)$$

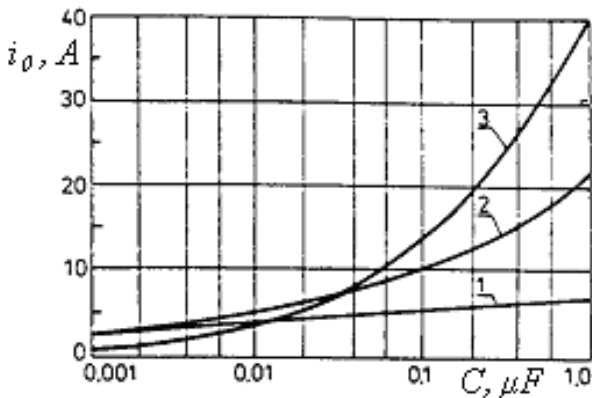
gdzie :

$(u_{a'0})_m$ – wartość maksymalna na zaciskach wyłączalnego transformatora,

L_T, C_T – parametry wyłączanego transformatora,

E_m – wartość maksymalna napięcia zasilającego,
 I_m – wartość maksymalna prądu biegu jałowego transformatora,
 Ψ – faza ucięcia prądu,
 η – współczynnik uwzględniający rozproszenie części energii zgromadzonej w indukcyjności transformatora w rezystancji transformatora; dla rdzenia wykonanego ze stali zimnowalcowanej, $\eta = 0.3 - 0.5$.

Największe przepięcia łączeniowe występują w układach zasilania złożonych z silnego źródła i krótkich linii kablowych. Częstotliwości takich przepięć wynoszą od setek herców do kilkunastu kiloherców. Ogólnie biorąc, wartości prądu ucięcia zależą zarówno od właściwości konstrukcyjnych wyłącznika (medium gaszącego, materiału stykowego, itp.), jak i od charakteru obwodu (rys. 4), zwłaszcza pojemności C uzwojeń transformatora, połączeń z transformatorem, czy silnikiem, oraz od wartości prądów magnesujących zależnych od rodzaju blach stosowanych na rdzenie transformatorów [11].



Rys. 4. Zależność prądów ucięcia i_0 od pojemności C równoległych po obu stronach obciążenia i zasilania, podczas wyłączania prądu wyłącznikami:
 1 – próżniowymi, 2 – małoolejowymi, 3 – z SF_6

Wartości prądu ucięcia wyłączników próżniowych nie zależą znacząco od pojemności układu. Dominujący wpływ mają tu właściwości materiału stykowego (temperatura topnienia, energia odparowania, przewodność elektryczna i termiczna [6]). W przypadku wyłączników z SF_6 , dużo większy wpływ na prądy ucięcia mają pojemności. Łączniki próżniowe budowane obecnie umożliwiają na ogół ograniczanie wartości prądów ucięcia do poziomu nie przekraczającego 5 A i nie stwarzają istotnego zagrożenia przepięciowego dla izolacji silników elektrycznych.

Pewnym jednak zagrożeniem dla izolacji układu mogą być zwarcia rozwijające się, będące konsekwencją przepięć powstałych podczas wyłączania prądu biegu jałowego transformatora i powstałego

następnie zwarcia jednofazowego transformatora [12]. W układzie zasilającym, którego punkt zerowy transformatora jest skutecznie uziemiony, wywołuje to w rozpatrywanym obwodzie przepływ prądu zwarciovego o dużej wartości, przy czym zapłon łuku elektrycznego między stykami wyłącznika występuje w chwili gdy styki znajdują się już w znacznej odległości od siebie. Może to być przyczyną uszkodzenia wyłącznika, z uwagi na nadmierny wzrost ciśnienia w komorze gaszeniowej.

W celu ograniczenia wartości niebezpiecznych przepięć powstałych przy wyłączaniu małych prądów indukcyjnych stosuje się: rezystory równoległe do przerw międzystykowych łączników, ochronniki przepięciowe lub dodatkowe odcinki kabla pomiędzy łącznikiem i transformatorem.

4. NARAŻENIA PRĄDOWE

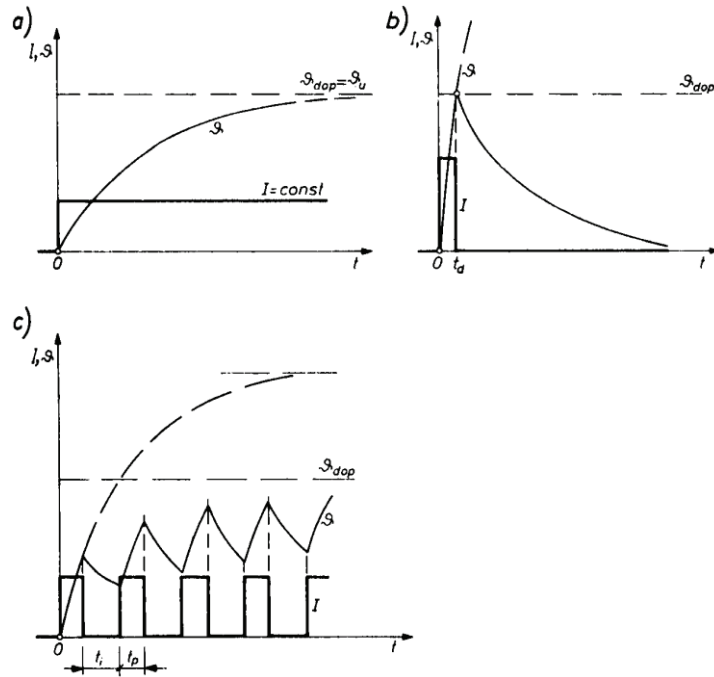
4.1. Wstęp

W pracy łączników elektroenergetycznych można wyróżnić warunki obciążeniowe robocze i zakłócenowe (przetężenia). W warunkach roboczych łączniki są obciążone praktycznie stałymi wartościami prądu lub zmiennymi w czasie. Obciążalność prądowa ciągła w znacznym stopniu zależy od intensywności odprowadzanego ciepła z ciała nagrzanego, w tym od zmienności temperatury otoczenia. Obciążenia zmienne w czasie są przypadkiem łagodniejszym od obciążenia ciągłego i stanowią potencjalną rezerwę do ewentualnego wykorzystania w przypadku koniecznych przeciążeń prądowych łącznika (toru prądowego) w stosunku do jego gwarantowanego prądu znamionowego.

Przetężenia prądowe charakteryzujące się przepływem prądu o wartości znacznie przekraczającej wartość prądu znamionowego mogą być przyczyną uszkodzeń torów prądowych i zestyków, na wskutek oddziaływania cieplnego i elektrodynamicznego prądu.

4.2. Przeciążenia prądowe i obciążenia zmienne

Dopuszczalne wartości temperatury przy obciążalności prądowej ciągłej torów prądowych i zestyków są zależne od własności materiału toru, jak również od własności środowiska w bezpośrednim sąsiedztwie toru [12,13]. W warunkach przeciążenia prądowego długotrwałego, wartość dopuszczalnego prądu I_a aparatu przy danej temperaturze otoczenia ϑ_a , różnej od obliczeniowej temperatury otoczenia ϑ_0 , określana jest z zależności:



Rys. 5. Zestawienie przebiegów nagrzewania (i chłodzenia) torów prądowych dla obciążenia: a) ciągłego; b) dorywczego; c) przerywanego

$$I_a = I_n \left(\frac{\vartheta_u - \vartheta_a}{\Delta \vartheta_{dop}} \right)^{\frac{1}{1.8}} \quad (4.1)$$

gdzie:

$\Delta \vartheta_{dop} = \vartheta_u - \vartheta_0$ – dopuszczalny przyrost temperatury w stanie ustalonym, °C,

ϑ_u – dopuszczalna temperatura w stanie ustalonym danego toru prądowego, °C,

ϑ_a – temperatura otoczenia, °C,

ϑ_0 – temperatura odniesienia, °C,

I_n – prąd znamionowy ciągły, A.

Oprócz obciążenia torów prądowych prądem ciągłym, o nieziennej wartości w czasie, tory prądowe mogą być poddane obciążeniu o charakterze zmiennym w czasie [12,13]. Wyróżnia się zatem obciążenie dorywcze i przerywane (rys. 5).

W przypadku obciążenia dorywczego przepływ prądu rozpoczyna się przy początkowej temperaturze toru równej temperaturze otoczenia ϑ_0 lub temperatury początkowej ϑ_p i trwa przez czas nie wystarczający do ustalenia się przyrostu temperatury $\Delta \vartheta_u$. Wartość dopuszczalną prądu przy obciążeniu dorywczym I_d [A], przy przepływie którego nie zostanie przekroczony dopuszczalny przyrost temperatury $\Delta \vartheta_{dop}$ w zadanym czasie obciążenia t_d , wyznaczamy z zależności

$$I_d = \sqrt{\Delta \vartheta_{dop} \frac{SkA}{\rho_g k_w (1 - e^{-t_d/T})}} = I_{dop} \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t_d/T}}} \quad (4.2)$$

Obciążenie przerywane jest obciążeniem zmiennym o powtarzających się na przemian okresach obciążenia i przerw bezprądowych. W okresach bezprądowych przewód nie stygnie do temperatury otoczenia, gdyż są one krótkie w stosunku do wartości stałej czasowej T . Wartość dopuszczalną prądu I_p [A] przy pracy przerywanej o równych cyklach pracy i stałych wartościach prądu można wyznaczyć ze wzoru

$$I_p = I_{dop} \sqrt{\frac{1 - \exp(-\frac{t_p}{T})}{\alpha_p T}} \quad (4.3)$$

gdzie:

$\alpha_p = \frac{t_p}{t_p + t_i}$, względny czas pracy;

t_p – czas przepływu prądu (pracy), [s];

t_i – czas przerwy (bezprądowy), [s].

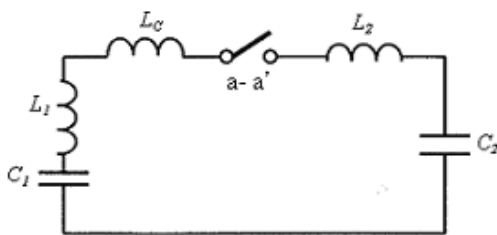
Szczegółowe przepisy eksploatacji urządzeń elektrycznych precyzują możliwości powiększenia obciążenia prądowego przy pracy dorywczej i przerywanej [13].

4.3. Przetężenia prądowe

W procesie załączania baterii kondensatorów o dużych pojemnościach możemy mieć do czynienia ze znacznymi przetężeniami [11,12,15]. Wskutek tego może wystąpić nieprawidłowe działanie łączników elektrycznych, a nawet ich uszkodzenie w wyniku

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

Podczas przyłączania poszczególnych sekcji kondensatorów do sekcji znajdujących się pod napięciem, o wartości przetężenia prądowego w obwodzie decydują przede wszystkim pojemności poszczególnych sekcji (grup) kondensatorów (rys. 6). Z uwagi na małe wartości indukcyjności w gałęziach (połączeniach) danej baterii w chwili załączania wyłącznikiem baterii C_2 , bateria C_1 jest praktycznie zwierana. Przebieg przejściowy prądu jest wówczas w znikomym stopniu tłumiony.



Rys. 6. 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

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. Wartość jego możemy określić z zależności

$$i_2(t) = u_{aa'}(0) \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2 + L_c) \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)}} \sin \omega_{02} t \quad (4.4)$$

gdzie:

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{L_1 + L_2 + L_c} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (4.5)$$

Największa wartość amplitudy prądu $i_2(t)$ może nawet niekiedy przekroczyć wartość prądu zwarcio-

wego udarowego w danym miejscu sieci. Stromości pojemnościowych prądów załączeniowych są tu znacznie większe od stromości zwarciowych prądów załączeniowych. Należy ponadto podkreślić, że z uwagi na wysoką częstotliwość składowej przejściowej prądu, wskutek efektu naskórkowości, rezystancja połączeń baterii jest w czasie przebiegu nieustalonego znacznie powiększona, co ma korzystny wpływ na jej tłumienie. Prądy o wysokiej częstotliwości mogą się jednak 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 [3,12].

Skutecznymi środkami ograniczającymi przetężenia przy łączeniu baterii kondensatorów [10,12,15], są:

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

4.4. Nietypowe warunki pracy

Praca wyłączników w układach przy częstotliwościach niższych od 50 Hz, a mianowicie 25 Hz, a zwłaszcza $16\frac{2}{3}$ Hz jest stosunkowo częstym przy-

padkiem zastosowania wyłączników średniego i wysokiego napięcia. Przy tych częstotliwościach łuk elektryczny w obszarze stykowym oddziałuje negatywnie na komorę gaszeniową wyłącznika szczególnie intensywnie [15]. Czas łukowy półfali prądu symetrycznego $16\frac{2}{3}$ Hz wynosi 30 ms, a więc jest

3-krotnie dłuższy od czasu łukowego półfali 50 Hz. Ładunek jaki przepływa przez obszar stykowy podczas palenia się tam łuku elektrycznego (całka prądu zwarciowego) jest około 3 razy większy od ładunku przepływającego przy przepływie półfali prądu o częstotliwości 50 Hz.

Prąd wyłączalny wyłącznika przy wyłączaniu zwarcia przy częstotliwości mniejszej od 50 Hz możemy określić z zależności

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{f_2}{f_1}} \quad (4.6)$$

gdzie:

I_1 – prąd wyłączalny wyłącznika przy częstotliwości znamionowej f_1 ,

I_2 – prąd wyłączalny wyłącznika przy częstotliwości mniejszej od znamionowej f_1 .

Należy przy tym dodać, że czynnikiem korzystnym jest obniżona stromość prądu w otoczeniu zera prądu zwarciovego.

5. WNIOSKI

- Uwzględnienie narażeń oraz nietypowych warunków pracy wyłączników w ich doborze jest ważnym czynnikiem wpływającym na niezawodną ich eksploatację.
- Przepięcia przy łuku przerywanym są znacznie większe niż przy zwarciu trwałym.
- Przerwanie prądu o częstotliwości znamionowej wkrótce po utracie styczności styków łącznika i zbyt wolne narastanie napięcia zapłonowego ma wpływ na występowanie zapłonów wielokrotnych w przerwie międzystykowej łącznika.
- Wartości przepięć powstałych przy wyłączaniu małych prądów indukcyjnych zależą od parametrów łączonego obwodu sieciowego i w znacznym stopniu od cech łączeniowych wyłącznika.
- Przekroczenie prądów dopuszczalnych przy obciążeniu prądowym ciągłym, powoduje osłabienie wytrzymałości mechanicznej i elektrycznej urządzeń elektrycznych, co może być powodem ich uszkodzenia.
- Występujące podczas załączenia baterii kondensatorów znaczne przetężenia prądowe mogą prowadzić do uszkodzenia poszczególnych kondensatorów baterii, a także mogą powodować szepianie się styków wyłącznika.

- Praca wyłączników w układach przy częstotliwościach niższych od 50 Hz, wpływa niekorzystnie na proces gaszenia łuku elektrycznego.

Literatura

1. *Anderson E.*: Przepięcia wewnętrzne w sieciach średnich napięć i ich ograniczanie. OWPW, Warszawa 1997.
2. *Ciołk Z., Maksymiuk J., Pochanke Z., Zdanowicz L.*: Badanie urządzeń energoelektrycznych. WNT, Warszawa 1992.
3. *Ciołk Z.*: Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych, WNT Warszawa, 1976.
4. *Damstra D., Vanden Heuvel W.*: Current chopping and overvoltages in MV and HV inductive circuits. CIGRE, Ref. 13, Sarajewo 5/1989.
5. *Dzierzbicki S.*: Aparaty Elektroenergetyczne. WNT, Warszawa 1977.
6. *Gul A.*: Przepięcia łączeniowe w wyłącznikach próżniowych, Seminarium Naukowe PAN, Instytut Energetyki, Warszawa, 1994.
7. *Gulski E., Maksymiuk J., Quak B., Smit J.J.*: Condition data analysis for asset management of high voltage components, OWPW, Warszawa 2007.
8. *Jankowicz S.*: Przepięcia łączeniowe wyłączników średniego napięcia. Wiadomości Elektrotechniczne, 1991, nr 4.
9. *Królikowski Cz.*: Technika łączenia obwodów elektroenergetycznych. PWN, Warszawa-Poznań 1975.
10. *Kulas S.*: Warunki pracy wyłączników średniego napięcia w układach kompensacji mocy biernej. Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa; Czasopismo Naukowo-Techniczne, PL IS-SN 0208-7448, Katowice 2009, nr 7 (461), str. 57 – 62.
11. *Kulas S.*: Aktualny stan oraz perspektywy rozwoju wyłączników średniego napięcia. Mechanizacja i Automatykacja Górnicwa; Czasopismo Naukowo-Techniczne, Katowice 2003, nr 7 (390), str. 73 – 79.
12. *Maksymiuk J.*: Aparaty elektryczne. WNT, Warszawa 1997.
13. *Markiewicz H., Wolkowiński K.*: Urządzenia elektroenergetyczne, WNT, Warszawa 1980.
14. *Marzecki J.*: Przemysłowe sieci elektroenergetyczne, WITE, Warszawa 2006
15. *Slade G. P.*: The vacuum interrupter. SRC Press 2008.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

EXPLOITATION HAZARDS OF ELECTRICAL EQUIPMENT AND ELECTRICAL POWER SUPPLY RELIABILITY

Electrical equipment enter into subtransmission grid and distribution network subject to different exploitation hazards. It is necessary to note that not all nominal parameters of electrical apparatuses are determined during testing. Voltage and current hazards, as well as non-standard operating conditions of electrical switches have been chosen for analysis in this paper.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И НАДЕЖНОСТЬ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ

Электроэнергетические устройства, входящие в состав сети высокого напряжения и распределительной сети подлежат разным видам эксплуатационных факторов. Следует при этом отметить, что не все факторы учитываются при определении номинальных параметров этих устройств. Факторы напряжения, тока, а также выбранные нетипичные условия работы электрических разъемов являются предметом статьи.