

Praca wyłączników w systemie przemysłowym – wybrane zagadnienia

Seminarium, 16 czerwiec 2015 r.

Plan wystąpienia:

- I. Wprowadzenie**
 - II. Wyłączanie prądów roboczych**
 - III. Napięcie przejściowe powrotne**
 - IV. Łączenie prądów czynnych**
 - V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych**
 - VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych**
 - VII. Wnioski**
- Literatura**

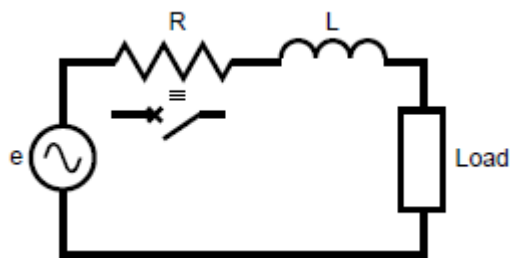
I. Wprowadzenie

Wyłącznik wymaga takiego zaprojektowania, aby możliwe było z jego wykorzystaniem przeprowadzanie różnych czynności łączeniowych. **Ten sam łącznik powinien więc poprawnie załączać linie długie, kondensatory, transformatory a także wyłączać obwody zwarciove, nie ulegając przy tym uszkodzeniu i nie generując zbyt wysokich przepięć.** Poza tym, praca wyłącznika przerywającego prąd w obwodzie o charakterze czysto rezystancyjnym przebiega w znacznie korzystniejszych warunkach, niż podczas wyłączania obwodów indukcyjnych lub pojemnościowych.

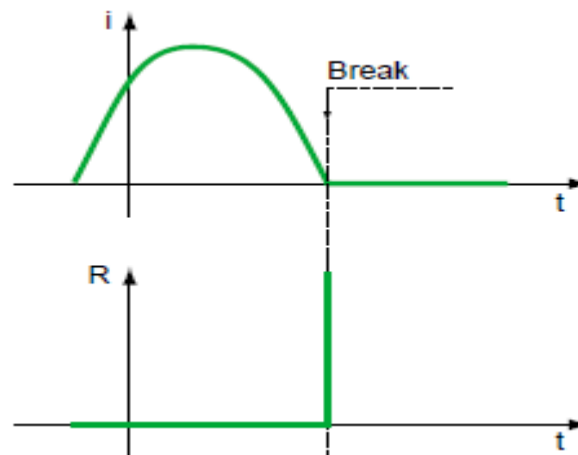
W niektórych przypadkach warunki pracy a także otoczenia wymagają, aby charakteryzował się bardzo różnorodnymi, nieraz wręcz przeciwstawnymi własnościami. Stąd instalując w systemie elektroenergetycznym lub przemysłowym określony typ aparatu elektrycznego należy tak sprecyzować jego parametry, aby mieć pewność poprawnej pracy podczas wyłączania dużych prądów o charakterze zwarciovym, a także zapewnić w sposób zadawalający łączenie nieobciążonych transformatorów.

II. Wyłączanie prądów roboczych

▪ **W praktyce wyłączanie prądów w warunkach idealnych nie jest możliwe do zrealizowania.** Na chwilę obecną nie istnieje bowiem takie urządzenie wyłączające lub idealny łącznik, który zainstalowany w obwodzie byłby w stanie natychmiast doprowadzić do zerwania prądu płynącego przez jego styki, nie doprowadzając przy tym do zapalenia się łuku elektrycznego między zestykami.



Rys. 1 Wyłączanie prądów z wykorzystaniem idealnego łącznika



▪ **Należy jednak zwrócić uwagę, iż powstający w komorze gaszeniowej łuk pozytywnie wpływa na proces wyłączania. Co prawda wydłuża czas procesu komutacji, jednak pozwala tym samym ograniczyć przepięcia a także sprzyja rozpraszaniu energii elektromagnetycznej wyłączanego obwodu LC.**

III. Napięcie przejściowe powrotne (ang. Transient Recovery Voltage)

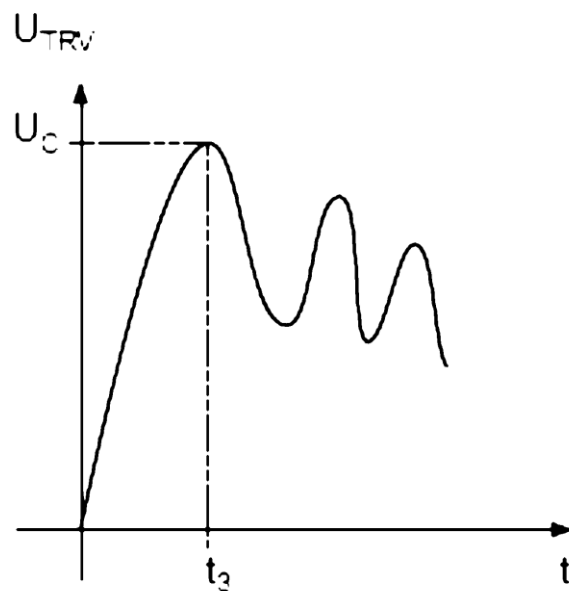
- Podczas procesu wyłączania każdego z obwodów elektroenergetycznych na skutek szybkich zmian napięcia (dU/dt) następuje generowanie **fali napięcia wstecznego, określane mianem napięcia przejściowego powrotnego (ang. TRV – Transient Recovery Voltage)**.
- Niezależnie od czasu wyłączania oraz typu zastosowanego wyłącznika, wartość napięcia przejściowego generowanego podczas wyłączania **dodaje się do napięcia sieciowego**. Jego amplituda oraz czas utrzymywania się w obwodzie wpływają nie tylko negatywnie na izolację wyłącznika, lecz również na aparaturę kontrolno-pomiarową oraz zainstalowane w obwodzie urządzenia energoelektroniczne.
- Mimo, iż wpływ napięcia powrotnego ma znaczący wpływ na urządzenia oraz aparaturę, to jednak jego wartość nie może zostać precyzyjnie wyznaczona dla wszystkich konfiguracji sieci.

III. Napięcie przejściowe powrotne (ang. Transient Recovery Voltage)

W tabeli 1 podano wybrane parametry napięcia przejściowego powrotnego w odniesieniu do napięcia znamionowego sieci zgodnie z normą *IEC 60056*.

Tabela 1 Wartość napięcia powrotnego w odniesieniu do napięcia znamionowego sieci

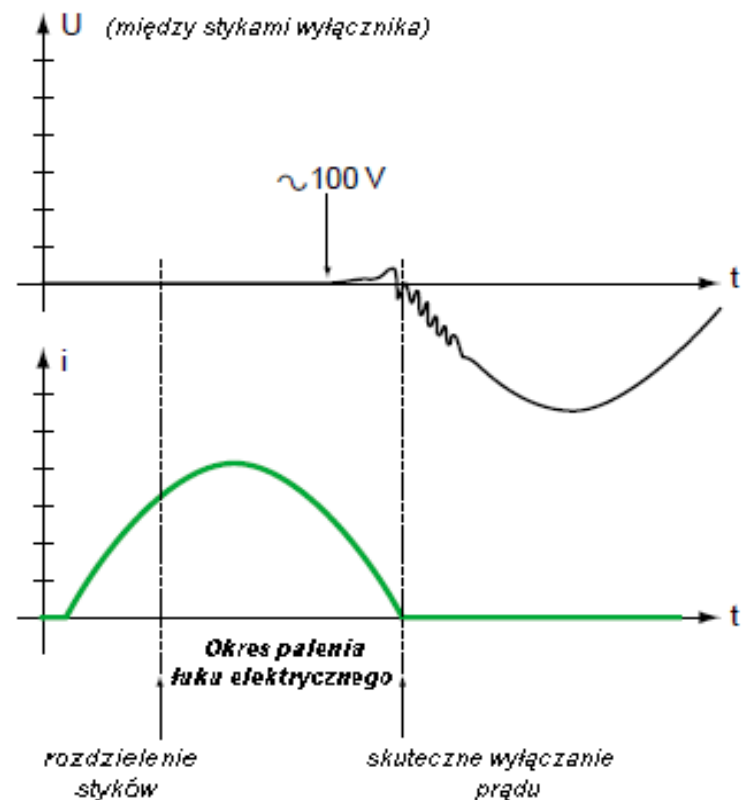
U_n [kV]	7,20	12,00	17,50	24,00	36,00	52,00
U_{CTRV} [kV]	12,30	20,60	30,00	41,00	62,00	89,00
t_3 [μ s]	52,00	60,00	72,00	88,00	108,00	132,00
U_c/t_3 [-]	0,24	0,34	0,42	0,47	0,57	0,68



Rys.2 Zmiana wartości napięcia przejściowego w chwili zwarcia na stykach wyłącznika (Norma IEC 60056)

IV. Łączenie prądów czynnych

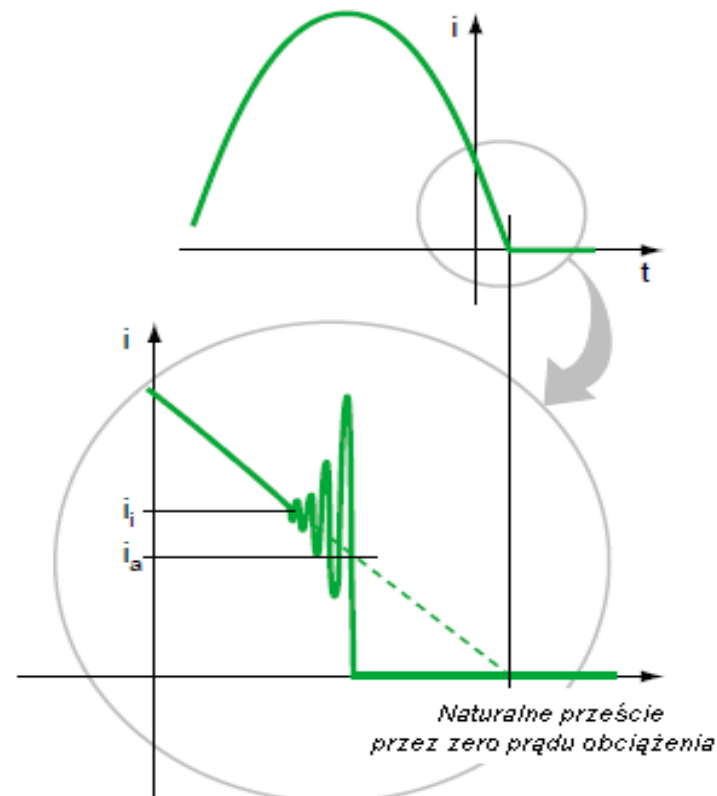
- Wyłączanie prądu roboczego obwodu o charakterze rezystancyjnym następuje praktycznie bez żadnych zjawisk przejściowych.
- **Prąd zwarciovowy obciążenia ma relatywnie małą wartość skuteczną w zakresie od: 10 do 50 kA.**
- Przy małym przesunięciu fazowym między prądem a napięciem i tym samym współczynnikiem mocy dążącym do jedności, obserwujemy niską wartość napięcia przejściowego powrotnego na stykach wyłącznika mocy, podczas wyłączania obwodu, Rys. 3.



Rys.3 Wyłączanie prądów roboczych obciążenia o charakterze rezystancyjnym

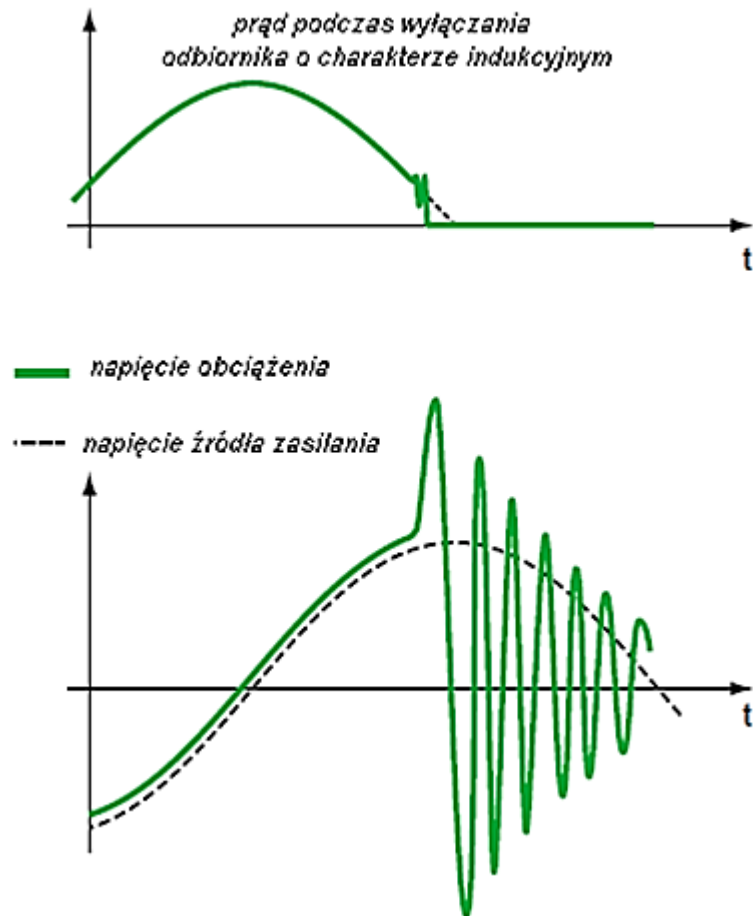
V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych

- Wyłączanie nieobciążonych lub obciążonych indukcyjnie transformatorów oraz dławików prowadzi do powstawania wysokich przepięć w obwodzie.
- **Bezpośrednią przyczyną tego zjawiska jest nagłe obrywanie małych prądów o charakterze indukcyjnym, przed ich naturalnym przejściem przez zero tzw. *current chopping*.**
- Dla niskich prądów indukcyjnych chłodzenie powstającego łuku elektrycznego następuje znacznie szybciej w stosunku do energii rozpraszanej w łuku. Prowadzi to do niestabilnego palenia się łuku i tym samym do wysokoczęstotliwościowych oscylacji prądu rzędu około 1 MHz, które gasną zanim prąd częstotliwości sieciowej osiągnie wartość zero, Rys. 4.



Rys. 4 Zjawisko oberwania prądu podczas wyłączania prądów o charakterze indukcyjnym obciążenia, (i - prąd wyłącznika, i_i - prąd przejściowy, i_a - prąd oberwania

V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych



Rys. 5 Zmiana charakteru napięć i prądów obwodu podczas wyłączenia niskich prądów indukcyjnych skutkująca powstawaniem przepięć w obwodzie

V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych

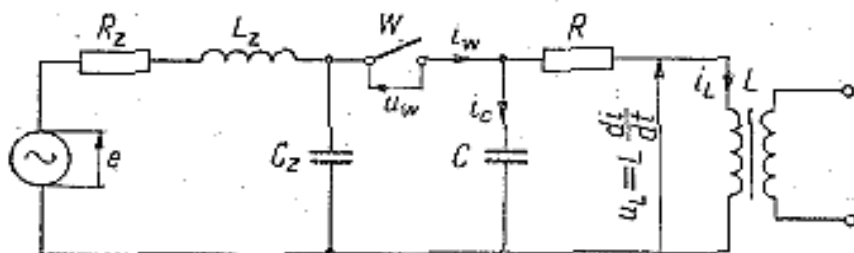
- **Zjawisko nagłego oberwania prądu, jest charakterystyczne głównie po stronie obciążenia i towarzyszą mu przebiegi przejściowe, rys.5.** Wartość napięcia po stronie zasilania równa jest wartości napięcia przejściowego, zależnej od pojemności oraz indukcyjności źródła zasilania systemu. Z kolei wartość napięcia między stykami wyłącznika jest równa różnicy potencjałów między napięciem sieci a napięciem obciążenia.
- Kolejnym zjawiskiem obserwowanym w obwodzie, prowadzącym do generowania wysokich przebiegów są **ponowne zapłony łuku elektrycznego między stykami wyłącznika podczas cyklu wyłączenia, tzw. *ang. re-ignition*.** Ogólnie rzecz biorąc, ponowny zapłon łuku jest nieunikniony w przypadku, gdy przestrzeń między stykami roboczymi jest zbyt mała, aby wytrzymać wartość generowanego napięcia. Dzieje się tak za każdym razem, w chwili gdy łuk elektryczny pojawia się zanim prąd osiągnie wartość zero. Podczas powtórnego zapłonu łuku, napięcie po stronie obciążenia oscyluje z częstotliwością około 1 MHz, a jego wartość jest dwa razy większa od poprzedzającej wartości.

V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych

- **W przypadku gdy wyłącznik jest w stanie oberwać prądy wysokiej częstotliwości, to wyłączenie obwodu następuje w czasie kilku mikrosekund od chwili ponownego zapalenia się łuku elektrycznego, podczas gdy prąd po raz pierwszy przechodzi przez zero. Ponowny zapłon może być jednak prawdopodobny, ze względu na wzrastającą amplitudę drgań przyczyniającą się do eskalacji napięcia, które z kolei może już być niebezpieczne dla obciążenia.**
- Należy zauważyć, że te same zjawiska pojawiają się podczas procesu załączania urządzeń do pracy. **Zjawisko iskrzenia, tzw. ang. *pre-striking* następuje w chwili zbliżenia styków wyłącznika na wystarczająco bliską odległość.** Podobnie jak w przypadku ponownych zapłonów, zmagazynowana energia wzrasta przy każdej próbie załączenia urządzenia do sieci zasilającej z tą jednak różnicą, że wzrost napięcia jest ograniczany przez komutujące styki wyłącznika.

V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych

Włączanie transformatorów nieobciążonych lub obciążonych indukcyjnie oraz dławików



Rys.6 Obwód zasilania transformatora w stanie jałowym

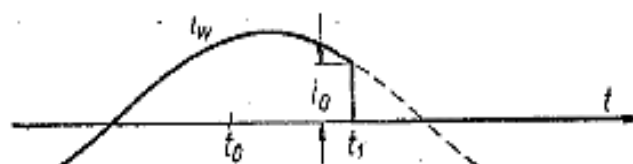
L- indukcyjność uzwojeń transformatora; R i C - rezystancja i pojemność (bardzo małe) transformatora, Cz, Lz, Rz - parametry obwodu zasilającego

Rys.7

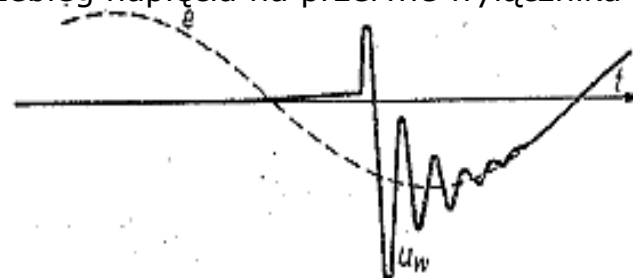
Przebiegi prądu i napięcia wyłączania indukcyjności w obwodzie z transformatorem w przypadku, **gdy nie powstają ponowne zapłony.**

to- chwila rozejścia się styków; t1- chwila urwania prądu; io - prąd urywany; um- największe napięcie na indukcyjności; u1- napięcie na indukcyjności w chwili urwania prądu; e - SEM źródła

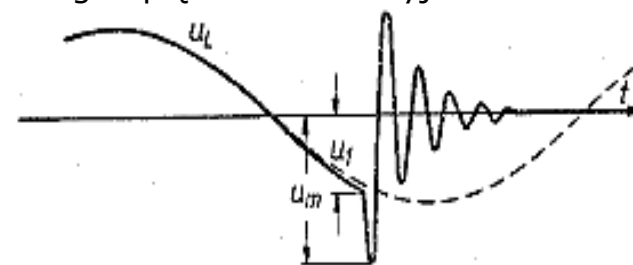
a. \ przebieg prądu płynącego przez wyłącznik



b. \ przebieg napięcia na przerwie wyłącznika

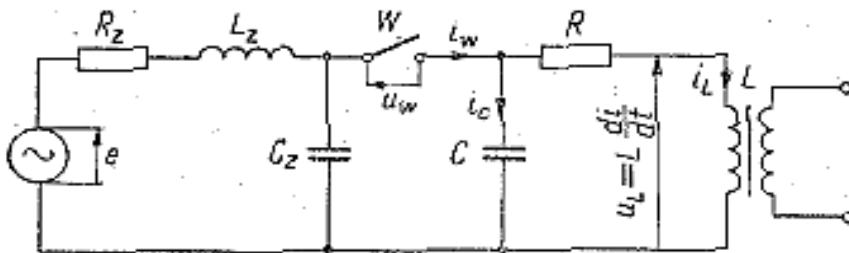


c. \ przebieg napięcia na indukcyjności



V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych

Włączanie transformatorów nieobciążonych lub obciążonych indukcyjnie oraz dławików



Rys.8 Obwód zasilania transformatora w stanie jałowym

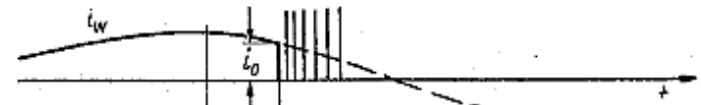
L- indukcyjność uzwojeń transformatora; R i C - rezystancja i pojemność (bardzo małe) transformatora, Cz, Lz, Rz - parametry obwodu zasilającego

Rys.9

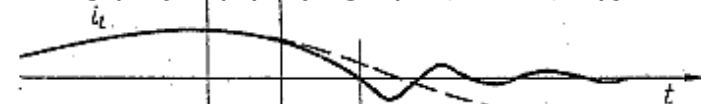
Przebiegi prądu i napięcia wyłączania indukcyjności w obwodzie z transformatorem w przypadku, **gdy powstają ponowne zapłony.**

t2 - chwila ponownego zapłonu łuku; t3-chwila przejścia przez zero prądu płynącego przez indukcyjność; uł - napięcie łuku; u1m- największe przepięcie na indukcyjności;

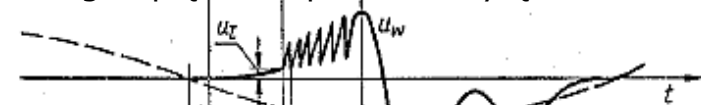
a.\ przebieg prądu płynącego przez wyłącznik



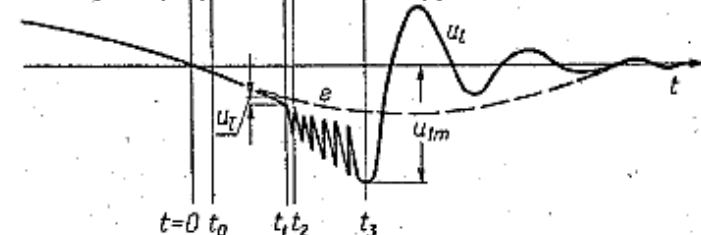
b.\ przebieg prądu płynącego przez indukcyjność



c.\ przebieg napięcia na przerwie wyłącznika

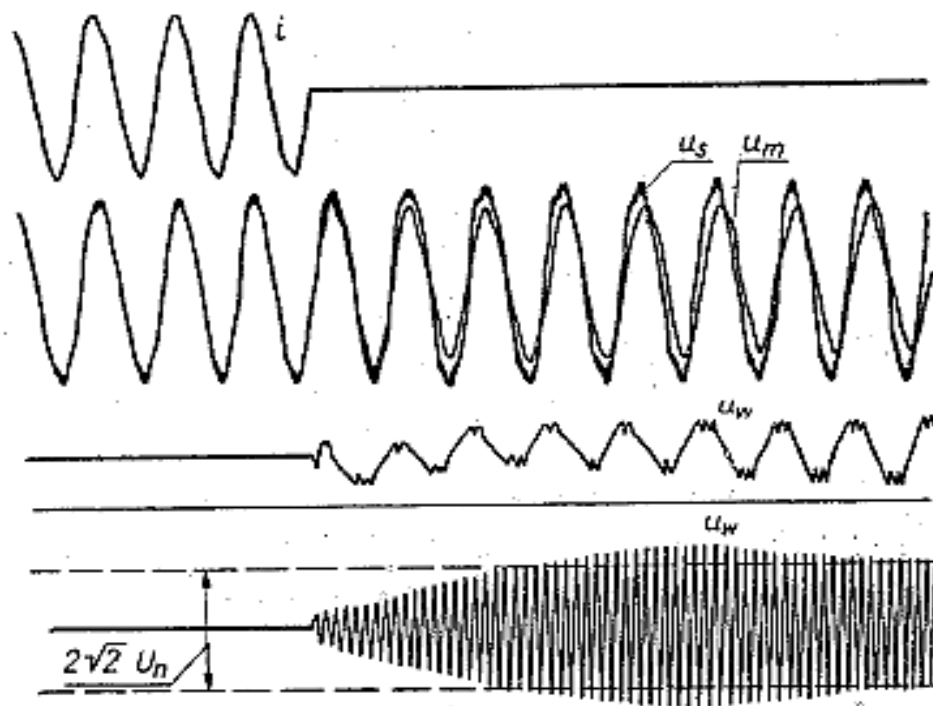


d.\ przebieg napięcia na indukcyjności



V. Łączenie prądów biernych indukcyjnych

Włączanie silników asynchronicznych



a. i - przebieg prądu

b. u_s - przebieg napięcia sieci zasilającej; u_m - przebieg napięcia na zaciskach silnika

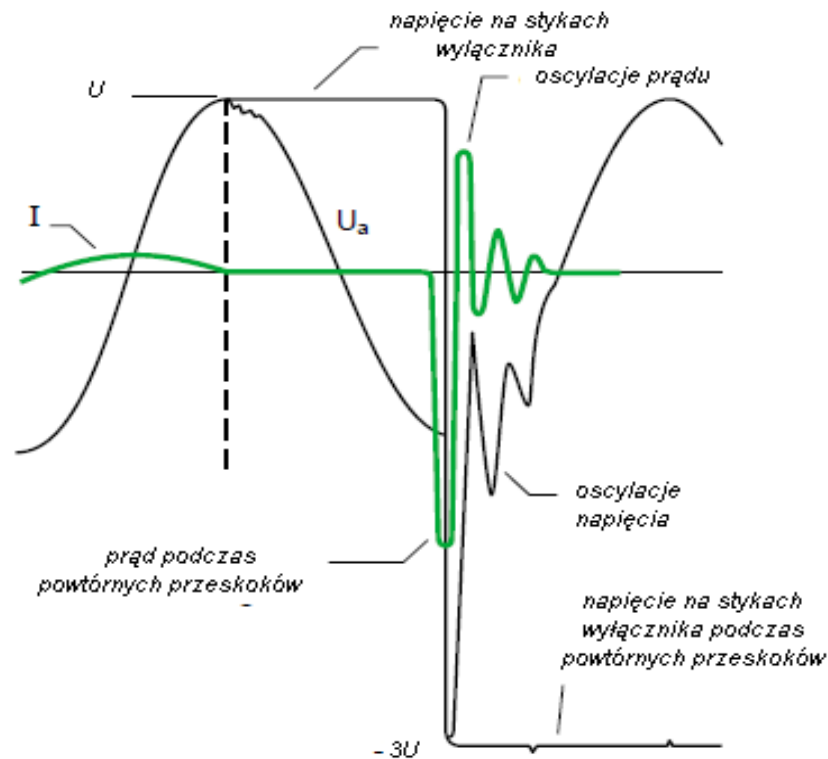
c. u_w - przebieg napięcia na wyłączniku

Rys. 10 Przebiegi prądu i napięcia podczas wyłączania silnika asynchronicznego

VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych

- **Wyłączanie prądów pojemnościowych może prowadzić do powstawania dodatkowych przebiegów w obwodzie na skutek obecności ponownych przeskoków, z ang. *re-striking* podczas generowania napięcia powrotnego.** Z teoretycznego punktu widzenia prąd pojemnościowy może być wyłączany bez żadnych trudności. W rzeczywistości jednak gdy zachodzi jego wyłączanie, napięcie na elemencie przesunięte jest w stosunku do prądu o 90 stopni elektrycznych i osiąga wartość maksymalną.
- Do czasu gdy kondensator pozostaje naładowany, oberwanie prądu powoduje powolne i łagodne narastanie napięcia, nie generując przy tym napięcia powrotnego na wyłączniku. Z drugiej jednak strony gdy napięcie sieci w połowie okresu ulega odwróceniu, wówczas amplituda napięcia na zaciskach wyłącznika może osiągnąć dwukrotnie większą wartość. **W tych warunkach ryzyko powstania ponownych przeskoków między stykami wyłącznika wzrasta i jest proporcjonalne do szybkości (powolnego) ich otwierania.**
- **W przypadku, gdy zjawisko ponownych przeskoków obserwowane jest w amplitudzie napięcia zasilającego, kondensator jest rozładowywany przez indukcyjność obwodu zasilającego powodując przy tym powstawanie silnych oscylacji prądu.**

VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych

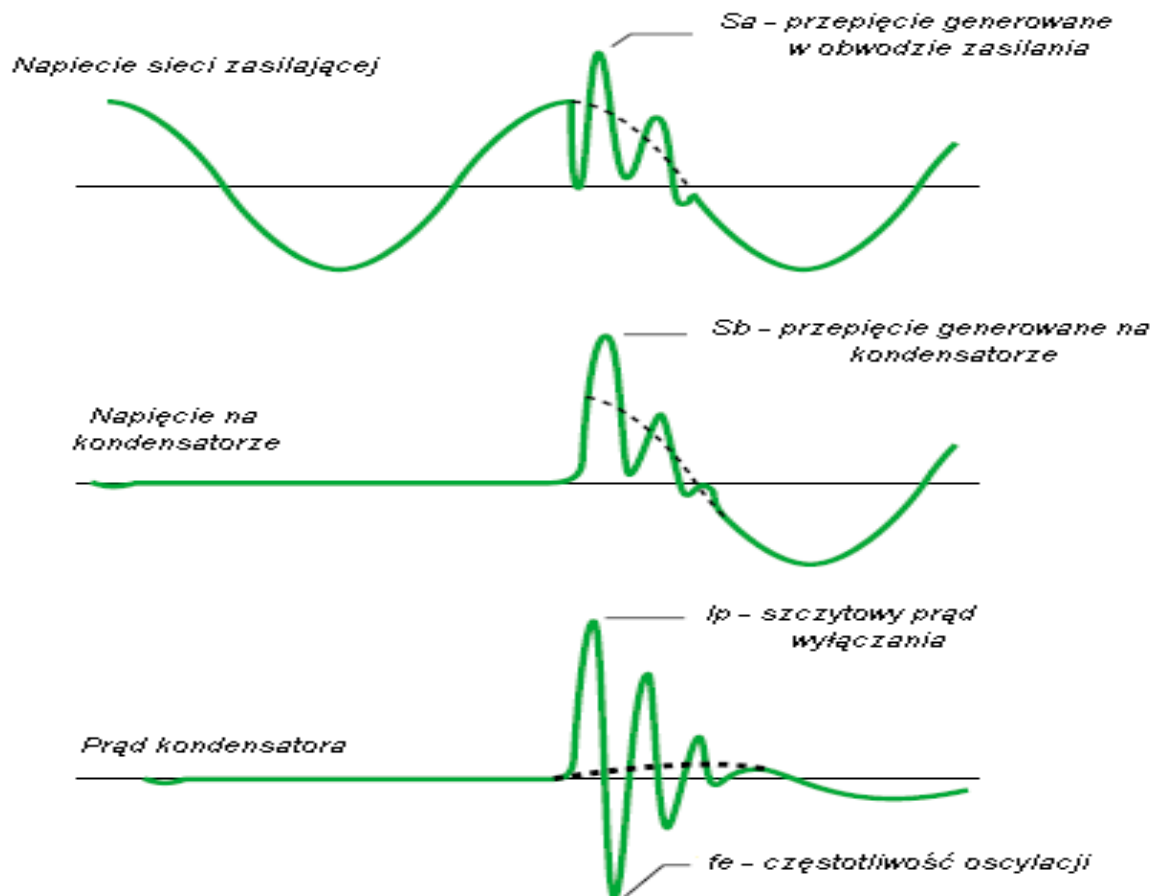


Rys. 11 Zmiana charakteru napięć i prądów obwodu podczas wyłączania prądów pojemnościowych

VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych

- **W momencie gdy napięcie zasilania po raz kolejny ulegnie odwróceniu, szczytowa wartość amplitudy napięcia na zaciskach wyłącznika będzie równa 5.** W konsekwencji generowane przebiegi mogą prowadzić do ponownych przeskoków. W praktyce, ich występowanie po 1/4 okresu prowadzi do dużej eskalacji napięcia, którego poziom zaczyna być niebezpieczny dla bezpiecznej pracy urządzeń oraz aparatury kontrolno-pomiarowej.
- W przypadku komutacji baterii kondensatorów składających się z kilku sekcji, opisywane zjawiska są jeszcze bardziej wyraźne. W tym przypadku amplituda prądu przejściowego może osiągnąć kilkukrotną wartość prądu znamionowego przy częstotliwości oscylacji rzędu kilkudziesięciu kHz.
- Podobnie jak w przypadku generowanych przeskoków tak i podczas załączania **pojemności do sieci zasilającej generowane prądy przejściowe powodują szybszą erozję styków a czasami nawet ich przepalenie.** Z kolei powstające przebiegi są niebezpieczne dla izolacji oraz zainstalowanej aparatury łączeniowej i urządzeń energoelektronicznych.

VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych



Rys. 12 Zmiana charakteru napięć i prądów obwodu podczas włączania baterii kondensatorów do sieci zasilającej

VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych

Wyłączanie linii długich w stanie jałowym

- W czasie wyłączania linii w stanie jałowym pojawia się **tzw. przepięcie dynamiczne. W linii takiej napięcie wzrasta w miarę oddalania się od miejsca zasilania (zjawisko Ferrantiego)**. Powstaje różnica między napięciami na początku i na końcu linii. Po przerwaniu prądu w linii pojawia się falowy przebieg wyrównawczy, który prowadzi do wyrównywania się napięć wzdłuż linii. Powstają słabo tłumione drgania o częstotliwości:

$$f = \frac{c}{2l}$$

przy czym:

c – prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznych w linii (ok.300000 km/s);

l – długość linii, w km.

- Przepięcia dynamiczne wzrastają w miarę powiększania długości linii. W liniach długości ok. 500 km powodują one chwilowy podskok napięcia na początku linii o ok. 15%, w liniach bardzo długich podskok ten może dochodzić do 50%, w liniach o długości poniżej 400km jest on prawie nie zauważalny.

VI. Łączenie prądów biernych pojemnościowych

Załączanie linii długich w stanie jałowym

- **Ponieważ częstotliwość drgań własnych nie przekracza w tym przypadku kilkuset herców, wartość maksymalna prądu w chwili załączania linii w stanie jałowym nie jest zwykle większa od około dziesięciokrotnej wartości szczytowej prądu ładowania linii, nie jest więc groźna z punktu widzenia pracy wyłącznika.**
- W wyłącznikach przeznaczonych do łączenia linii długich w stanie jałowym – nie stosuje się oporników, których głównym celem byłoby zmniejszenie wartości prądu w czasie zamykania wyłącznika.
- W czasie załączania linii długiej nie obciążonej może powstać przepięcie wywołane przebiegami wyrównawczymi związanymi z ładowaniem linii, w swej istocie podobnymi do przebiegów występujących przy wyłączaniu takiej linii. Przepięcie to może dochodzić do 2,0 – 2,2, napięcia fazowego linii, a więc osiągać znaczne wartości.

VII. Wnioski

- Przy wyłączeniu nieobciążonych i lub obciążonych indukcyjnie transformatorów oraz dławików powstają skomplikowane zjawiska, które mogą prowadzić do bardzo wysokich przebiegów;
- Aby zmniejszyć przebiegi powstające w czasie wyłączania nieobciążonych transformatorów, stosuje się oporniki bocznikujące przerwy wyłączeniowe wyłącznika, tylko o większej rezystancji niż w przypadku wyłączania prądów zwarciovych;
- W przypadku wyłączania silników asynchronicznych:
 - przebiegi na ogół maleją ze wzrostem mocy wyłączalnego silnika,
 - największe przebiegi powstają na ogół przy wyłączaniu w czasie rozruchu,
 - nie obserwuje się wyraźnych różnic wielkości przebiegów powstałych w czasie wyłączania silnika obciążonego i nieobciążonego;
- Największe przebiegi, bardzo groźne dla izolacji uzwojeń silnika, powstają przy wyłączaniu wyłącznikami pneumatycznymi małych silników wysokonapięciowych w czasie rozruchu;

VII. Wnioski

- Przy dużych częstotliwościach drgań własnych obwodu pojemnościowego, mogą powstać w czasie jego zamykania bardzo duże prądy, groźne dla wyłącznika i sieci;
- Najbardziej radykalnym sposobem ograniczenia przepięć przy wyłączaniu pojemności jest niedopuszczenie w ogóle do powstania ponownych przeskoków. Można to osiągnąć przez:
 - zwiększenie wzrostu odporności przerwy w wyłączniku, np. dodatkowy wtrysk oleju w wyłącznikach małoolejowych,
 - rozładowanie pojemności przez oporniki bocznikujące przerwę w wyłączniku;

Literatura

- [1] Dzierzbicki S., "Wyłączniki wysokonapięciowe prądu przemiennego", Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1966
- [2] Theoleyre S., "MV breaking techniques" Cathier Technique Schneider Electric no. 193, June 1999, pp. 1 -32
- [3] IEC 60056: High-voltage alternating-current circuit-breakers.
- [4] IEC 61233 report: High-voltage alternating current circuit-breakers - Inductive load switching.
- [5] Mueller A., Saemann D., "Switching phenomena in medium voltage systems – good engineering practise on the application of vacuum circuit breakers and contractors", Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC Europe),IEEE June 2011, pp. 1 – 9.
- [6] Kam S., "Modelling of Restriking and Reignition Phenomena in Three-phase Capacitor and Shunt Reactor Switching", Proceedings 2006 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'06), Victoria University, Melbourne 2006, pp.1-6
- [7] Nagami K., Honma S., Tabata S., Sasaki H., Okada I., Umesato Y., Mitani M., "Switching surges by vacuum circuit breaker, and protection guide",Fuji Electric Review,vol. 26,No.4 1980, pp.120–132
- [8] High voltage alternating current circuit breakers-inductive load switching," IEC Technical Report No. 1233, 1993
- [9] Lazimov T., Imano S., Sarafan E.A.A., "Transitional Recovery Voltages at Capacitive Currents Switching-offs by Vacuum And SF6 Circuit-Breakers", Modern Electric Power Systems 2010, Wroclaw, Poland, paper 13.1
- [10] Glinkowski M.T., Gutierrez M.R., Braun D., "Voltage Escalation and Reignition Behaviour of Vacuum Generator Circuit Breakers During Load Shedding", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.12-1, pp. 219–226, Jan. 1997
- [11] Popov M., "Switching Three-Phase Distribution Transformers with a Vacuum Circuit Breaker Analysis of Overvoltages and the Protection of Equipment," in Delft University of Technology,The Netherlands, 2002

Dziękuję Państwu za uwagę ...

Prelegent: Michał Gajdzica