

ĆWICZENIE 8

BADANIA MODELOWE PRZEPIĘĆ W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

8.1. WPROWADZENIE

Oprócz narażeń związanych z napięciem roboczym, elektroenergetyczne układy izolacyjne w czasie eksploatacji są narażone na dodatkowe oddziaływania napięciowe - przebiecia. Do najgroźniejszych zaliczamy bardzo krótkie przebiecia atmosferyczne o charakterze udarowym, pochodzące od bezpośrednich uderzeń piorunów. Najbardziej interesują nas uderzenia piorunów w linie elektroenergetyczne, które z powodu znacznych długości zbierają pioruny z dużego obszaru. Skutki tych uderzeń są odczuwalne w całym systemie elektroenergetycznym. Przebiecia bowiem, przenoszą się wzdłuż linii tak, że po pewnym czasie występują w miejscach odległych od miejsca uderzenia pioruna. Poznanie czynników wpływających na wartość przebiec, praw rządzących ich rozchodzeniem się w układach elektroenergetycznych oraz sposobów zapobiegania lub ochrony przed przebieciami jest konieczne z powodu narażeń, jakie ze sobą niosą.

Przebiecia te mogą spowodować procesy prowadzące do przebicia izolacji, a więc wyłączenie systemu elektroenergetycznego z eksploatacji. Wystarczy wspomnieć, że w miejscu uderzenia pioruna na przewodzie powstaje bardzo wysokie napięcie. Napięcie to jest zależne przede wszystkim od wartości amplitudy prądu pioruna, która może osiągnąć nawet 200 kA i wywołać przebiecia rzędu megawoltów, a więc wielokrotnie wyższe od napięć roboczych.

Ogólnie można powiedzieć, że przebiecia są jedną z form stanów nieustalonych w obwodach elektrycznych i podstawą do interpretacji ich przebiegu jest znajomość teorii stanów nieustalonych w obwodach elektrycznych o stałych rozłożonych [2].

Z punktu widzenia narażeń napięciowych najbardziej istotne jest określenie amplitud oraz przebiegów czasowych napięć względem ziemi. Pod tym kątem analizujemy rolę układu elektroenergetycznego - linii długiej. Wprowadzamy pewne uproszczenia, a wyniki analizy uzupełniamy dodatkowo współczynnikami korekcyjnymi uwzględniającymi dodatkowo wpływ rzeczywistych procesów (ulotu, rezystancji gruntu, itp.) na zjawiska przebieciowe.

Rozważania teoretyczne i obliczenia prowadzimy dla najprostszego układu przewod - ziemia. Taki układ jest wygodny do analizy, ale odbiega od praktyki, gdzie w zasadzie mamy do czynienia z układami wieloprzewodowymi. Natomiast układ przewod - ziemia odpowiada dokładnie tylko szczególnemu przypadkowi jednoczesnego zwarcia wszystkich przewodów.

Ponadto zakładamy, że linia elektryczna jest linią długą o równomiernie rozłożonych parametrach jednostkowych. Parametry te to: indukcyjność L [$\mu\text{H}/\text{m}$] pojemność C [$\mu\text{F}/\text{m}$], rezystancja R [Ω/m] i upływność G [S/m]. Analizując ten układ można zauważyć, że stałe R i G (szczególnie R) wpływają na wartość maksymalną i kształt fali przebieciowej, a stałe L i C powodują, że przebiecia poruszają się z pewną ograniczoną prędkością. Indukcyjność bowiem, przeciwstawia się zmianom prądu, pojemność natomiast zmianom napięcia. W przypadku bardzo szybkich zmian napięcia i prądu (np. przy uderzeniu pioruna) decydujący wpływ na przebiegi falowe ma więc wartość indukcyjności i pojemności, rezystancja R i upływność G mają znaczenie drugorzędne i w konsekwencji można je pominąć.

Dalszym uproszczeniem będzie pominięcie wirowości pola elektrycznego i przyjęcie znaku plus dla napięcia, jeśli potencjał przewodu jest wyższy od potencjału ziemi oraz znaku plus dla prądu, jeżeli płynie w kierunku rosnących odległości x od miejsca uderzenia pioruna.

Przy takich założeniach wyprowadza się równania równowagi napięciowej i prądowej dla dowolnego odcinka linii o elementarnej długości, jednostkowej indukcyjności L oraz pojemności C . W konsekwencji otrzymuje się podstawowe równania różniczkowe linii długiej nie odkształcającej (bez strat) [2].

Rozwiązaniem równania różniczkowego dla napięcia U jest funkcja w postaci

$$U = U_1 + U_2 = F_1(x - vt) + F_2(x + vt) \quad (8.1)$$

w której dwumian $(x \pm vt)$ decyduje o falowym charakterze funkcji i jej składowych, a $v = 1/\sqrt{LC}$ jest prędkością rozchodzenia się fali. Funkcje $U_1 = F_1(x-vt)$ i $U_2 = F_2(x+vt)$ są falami biegnącymi w przeciwnych kierunkach z szybkością v . Zależnie od warunków szczególnych mogą być przypadki, kiedy istnieje tylko U_1 lub tylko U_2 , lub też obie fale U_1 i U_2 występują równocześnie. Każdy stan nieustalony można więc wyrazić w postaci dwóch fal U_1 i U_2 , przy czym trzeba zaznaczyć, że fala U_1 zawsze przesuwa się bez zmiany kształtu w kierunku rosnących x z prędkością v , a fala U_2 zawsze w kierunku malejących x .

Rozwiązaniem równania różniczkowego dla prądu będzie funkcja falowa w postaci

$$i = i_1 + i_2 = \frac{1}{Z} F_1(x - vt) - \frac{1}{Z} F_2(x + vt) = \frac{1}{Z} U_1 + \left(-\frac{1}{Z} U_2\right) \quad (8.2)$$

gdzie: $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ oznacza impedancję falową linii.

Prąd również występuje w postaci fal. Fale prądowe są ściśle związane z falami napięciowymi. Różnica między znakami w równaniach (8.1) i (8.2) wynika stąd, że kierunek prądu dodatniego przyjęto zgodny z kierunkiem fal U_1 i i_1 , a przeciwny do kierunku fal U_2 , i_2 .

Kształty fal prądowych są takie same jak fal napięciowych, a między prądem i napięciem tej samej fali zachodzi prosta zależność odpowiadająca jak gdyby prawu Ohma, np. $U_1 = i_1 Z$. Natomiast między stanem napięciowym U (napięciem wypadkowym) a stanem i (prądem wypadkowym) w linii zależność taka nie istnieje. Może więc zdarzyć się, że pomimo braku napięcia, np. przy $U_1 = -U_2$, będzie płynął duży prąd wypadkowy $i = 2i_1$. Suma wartości chwilowych fal U_1 i U_2 (czy i_1 , i_2) w danym punkcie linii daje bowiem wypadkową wartość chwilową napięcia lub prądu w tym punkcie.

W praktyce linie posiadają skończoną długość i zjawiska falowe nie ograniczają się do prostej wędrówki fal od miejsca ich powstania do nieskończoności, ale stają się bardziej złożone. Zwarty lub otwarty koniec linii, rozgałęzienie linii, obciążenia o charakterze czynnym, pojemnościowym lub indukcyjnym stanowią tzw. punkty węzłowe. W punktach tych występuje nagła zmiana impedancji falowej i wskutek tego fale ulegają procesowi odbicia, czyli powstania fali o kierunku przeciwnym do fali pierwotnej. Falę tę nazywamy falą odbitą.

Do analizy przebiegów falowych w sieciach elektroenergetycznych można zastosować metody obliczeniową oraz graficzną, co umożliwi wyznaczenie przebiegu fal wypadkowych zarówno w zależności od drogi x jak i od czasu t przy znanej prędkości rozchodzenia się fali w linii.

Metoda schematu zastępczego ma na celu ułatwienie rozwiązania przez sprawdzenie linii długiej z występującymi w niej węzłami do układu zastępczego z impedancjami skupionymi. Zakładając, że w węźle:

jest napięcie wypadkowe $U = U_1 + U_2,$

płynie prąd wypadkowy $i = i_1 + i_2$

oraz uwzględniając, że $i_1 = \frac{U_1}{Z}$ $i_2 = -\frac{U_2}{Z},$

otrzymujemy równanie

$$U = 2U_1 - Z i \quad (8.3)$$

Równanie to jest podstawą schematu zastępczego, w którym napięcie wypadkowe w węźle jest równe podwójnej wartości napięcia fali przychodzącej do węzła $2U_1$ pomniejszonej o spadek napięcia na impedancji falowej linii od prądu wypadkowego $Z i$.

Jeżeli interesuje nas inny punkt linii, musimy wyznaczyć fale U_2 i i_2 . Fale te określamy z za-

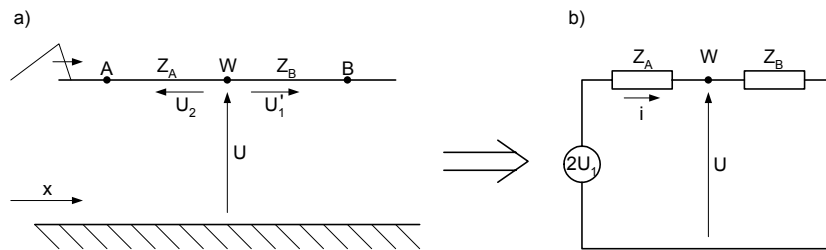
leżności dla punktu węzłowego

$$U_2 = U - U_1 \quad i_2 = i - i_1$$

i przesuując je odpowiednio w czasie i odległości nakładamy na fale U_1 , i_1 znajdując wypadkowy stan napięciowy lub prądowy w analizowanym miejscu linii.

W przypadku dołączenia do węzła dodatkowej linii długiej o impedancji falowej Z_B zastępujemy ją w schemacie zastępczym impedancją skupioną o wartości Z_B i uziemioną na końcu. Uziemienie impedancji Z_B w schemacie zastępczym nie ma rzeczywistego odpowiednika w postaci uziemieniu końca B linii. Linia ta jest w naszych rozważaniach tak długa, że warunki występujące na jej drugim końcu nie wpływają na zjawiska na początku linii.

Ten przypadek możemy traktować jako ogólny, bo zawsze mogą nas interesować przebiegi fali wypadkowej w węźle, przed nim i za nim. Rys. 8.1 przedstawia poglądowo linię z zaznaczonym węzłem w miejscu dołączenia linii o innej impedancji falowej. Na obu liniach zaznaczono również punkty A i B , które mogą być punktami naszego zainteresowania oraz pokazano schemat zastępczy odpowiadający takiej sytuacji.



Rys. 8.1. Przejście fali napięciowej z linii o impedancji falowej Z_A do linii o impedancji falowej Z_B ; a - schemat poglądowy linii o stałych rozłożonych, b - schemat zastępczy o stałych skupionych

Przy dojściu fali padającej U_1 do węzła W powstają dwie nowe fale: fala przepuszczana U_1' oraz fala odbita U_2 . Wartości tych fal wyznacza się biorąc pod uwagę, że wynikowe wartości napięcia oraz prądu tuż na lewo i tuż na prawo od węzła W są sobie równe. Przepuszczana więc za węzeł W fala U_1' równa się fali wypadkowej w węźle $U = U_1'$. Fala przepuszczona obliczona ze schematu zastępczego jest równa

$$U_1' = U = U_1 \cdot \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B} = \alpha \cdot U_1 \quad (8.4)$$

gdzie α jest współczynnikiem przejścia (8.5) równym stosunkowi fali przepuszczanej do fali padającej.

$$\alpha = \frac{2Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{U_1'}{U_1} = \frac{U}{U_1} \quad (8.5)$$

Natomiast falę odbitą U_2 obliczamy uwzględniając równanie (8.4) z zależności

$$U_2 = U - U_1 = U_1 \cdot \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} = \beta \cdot U_1 \quad (8.6)$$

gdzie β jest współczynnikiem odbicia (8.7) równym stosunkowi fali odbitej do fali padającej, określającym również znak fali odbitej.

$$\beta = \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} = \frac{U_2}{U_1} \quad (8.7)$$

Współczynniki α i β , są związane zależnością:

$$\alpha = 1 + \beta \quad (8.8)$$

Tablica 8.1
Znaczenie impedancji falowej linii za węzłem

Wielkość	Wartości				
Z_B	$Z_B = 0$	$Z_B < Z_A$	$Z_B = Z_A$	$Z_B > Z_A$	$Z_B = \infty$
α	$\alpha = 0$	$0 < \alpha < 1$	$\alpha = 1$	$1 < \alpha < 2$	$\alpha = 2$
β	$\beta = -1$	$-1 < \beta < 0$	$\beta = 0$	$0 < \beta < 1$	$\beta = 1$
$U = U_1'$	$U = 0$	$U < U_1$	$U = U_1$	$U > U_1$	$U = 2U_1$
U_2	$U_2 = -U_1$	$U_2 < -U_1$	$U_2 = 0$	$U_2 < U_1$	$U_2 = U_1$

Analizując dane w tablicy 8.1 można zauważyć, że w zależności od wartości Z_B napięcie w węźle W może osiągnąć wartość równą nawet podwójnej wartości napięcia fali padającej. W miarę zmniejszania Z_B przepięcie to ulega zmniejszeniu aż do całkowitej eliminacji.

W zależności od charakteru impedancji włączonej w węźle W zmianie wartości napięcia może towarzyszyć zmiana kształtu fali. Zmiana kształtu następuje w węźle z włączoną indukcyjnością lub pojemnością skupioną. Zmiany kształtu fali nie ma, gdy następuje tylko zmiana wartości impedancji falowej.

Prędkość v poruszania się fal wzdłuż nie odkształcającej linii długiej, jak również impedancja falowa Z tej linii zależą od jej jednostkowych indukcyjności L i pojemności C . O wartości tych wielkości decydują więc stałe materiałowe przewodów i ośrodka, parametry geometryczne linii i jej układu. W liniach napowietrznych na wartość pojemności linii C , jak również indukcyjności L , wpływać będą dodatkowo uloty i rezystancja gruntu [2].

Prędkość v bez uwzględnienia wpływu ulotu i rezystywności gruntu nie zależy od rodzaju układu (przewód - ziemia, przewód - przewód) ani od jego wymiarów. Wstawienie bowiem do wzoru na prędkość obliczanych wielkości L i C układu prowadzi do wzoru

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{300}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad [\text{m}/\mu\text{s}] \quad (8.9)$$

Stąd dla linii napowietrznych ($\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$) prędkość poruszania się fal jest równa prędkości światła i wynosi 300 m/ μ s. Natomiast dla linii kablowych, np. z izolacją papierowo-olejową ($\epsilon_r \approx 4$, $\mu_r = 1$) jest mniejsza i wynosi 150 m/ μ s. Uwzględnienie ulotu oraz rezystywności gruntu powoduje, że faktyczna prędkość rozchodzenia się fal w liniach napowietrznych jest niewiele mniejsza od prędkości światła.

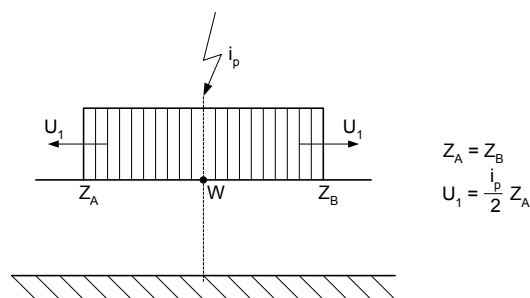
Impedancja falowa Z linii zależy w dużym stopniu od warunków geometrycznych, a mianowicie jest ona większa przy większych odstępach i mniejszych średnicach przewodów. Przykładowo, dla linii napowietrznych: $Z = 500 \Omega$ dla układu przewód - ziemia, $Z = 200 \Omega$ - trzy przewody, $Z = 800 \Omega$ - dwa przewody, a dla linii kablowych: $Z = 12 \div 50 \Omega$ - przewód - płaszcz i $Z = 6 \div 20 \Omega$ - trzy przewody zwarte - płaszcz. W liniach napowietrznych powstanie ulotu prowadzi do zmniejszenia impedancji falowej, natomiast wpływ rezystywności gruntu w niektórych układach zaznacza się zwiększeniem impedancji falowej Z [4]. Do obliczeń przyjmujemy zwykle: linia napowietrzna $Z = 500 \Omega$; linia kablowa $Z = 50 \Omega$.

Analizę dotyczącą fal wędrownych w liniach elektroenergetycznych rozpoczynamy od określenia schematu zastępczego linii o stałych rozłożonych. Zaznaczamy punkt węzłowy i wszystkie

elementy sieci do niego przyłączone. Zaznaczamy również interesujące nas punkty na liniach, dla których chcemy określić przebiegi napięcia czy prądu. Zakładając, że wszystkie dane są zwymiarowane przystępujemy do rysowania schematu zastępczego. Elementy sieci przyłączone do węzła W rysujemy w postaci skupionej zgodnie z ich sposobem przyłączenia. Impedancje falowe linii długich uziemiamy na końcu.

Mając narysowany schemat obliczamy napięcie w węźle W na linii. Znajomość tego napięcia jest podstawą do dalszej analizy, a więc określenia przebiegu fali napięciowej w punkcie poza węzłem W (fala przepuszczana) oraz fali odbitej w węźle i tym samym napięcia wypadkowego w dowolnym punkcie przed węzłem W .

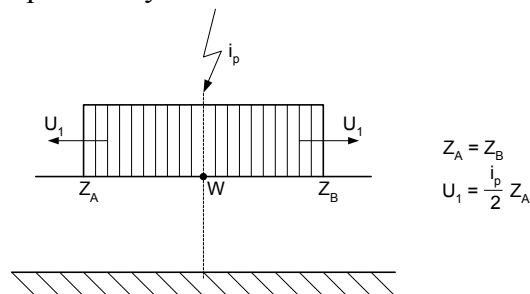
Przebiegi w punktach przed i za węzłem określamy dla wybranego czasu w stosunku do czasu dojścia fali napięciowej do węzła W . Różnice czasowe obliczamy znając odległości danego punktu od węzła W i prędkość poruszania się fali w linii o impedancji Z . Na rys. 8.2 schematycznie zaznaczono tok postępowania przy rozwiązywaniu zadań z przebiegów fal napięciowych. Przebiegi prądowe obliczamy ze znanych już zależności napięciowych.



Rys. 8.3. Fale powstające przy uderzeniu pioruna w przewód linii napowietrznej

Na rys. 8.3 do 8.10 pokazano zmiany napięcia wywołane dojściem fali padającej U_1 do węzła W . Podano również podstawowe zależności między U_1 , U i U_1' dla pokazanych różnych przypadków obciążenia węzła W oraz różnych wartości impedancji falowych linii przed i za węzłem W . Wybrano falę prostokątną zasilaną, gdyż takie obrazy najczęściej ogląda się na oscyloskopie podczas badań modelowych.

Fale powstające przy uderzeniach pioruna w przewód linii napowietrznej (rys. 8.3). Uderzenie pioruna wprowadza do linii pewien ładunek elektryczny. Ładunek zostaje podzielony na dwie równe części i wytwarza napięcie wprost proporcjonalne do impedancji linii, które w postaci jednakowych fal rozchodzi się w przeciwnych kierunkach wzdłuż linii.



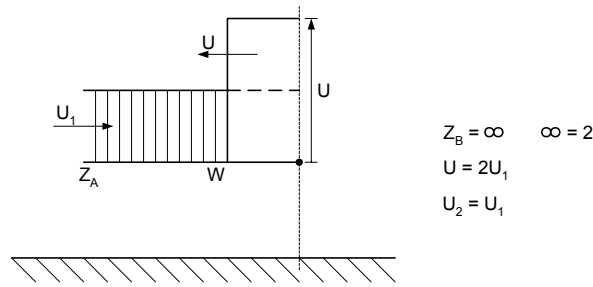
Rys. 8.3. Fale powstające przy uderzeniu pioruna w przewód linii napowietrznej

Na przykład przy

$$I_p = 30 \text{ kA} \quad \text{oraz} \quad Z_A = 500 \, \Omega \quad U = U_1 = \frac{I_p}{2} Z_A = 7,5 \text{ MV}$$

Najczęściej izolacja na słupach nie wytrzymuje takich wartości i następuje zwarcie do ziemi. Zależnie od napięcia znamionowego sieci i rodzaju słupów przepięcia wytrzymywane mogą dochodzić do 2 MV ($U_n = 750 \text{ kV}$, słup stalowy) czy 4 MV (30 kV, słup drewniany).

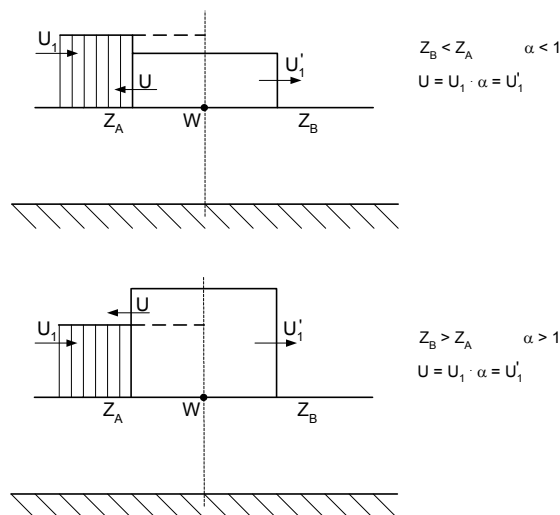
Trafienie fali w otwarty koniec linii (rys. 8.4).



Rys. 8.4. Trafienie fali w otwarty koniec linii

W przypadku otwartego końca linii w węźle W powstaje fala odbita równa fali padającej ($U_2 = U_1 \cdot \beta$, $\beta = 1$), a napięcie w węźle W równa się podwójnej wartości fali padającej. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne. Niebezpieczeństwo takie występuje w stacjach końcowych, w których zaciski transformatora są przyłączone do jednej linii. Fala przychodząca z tej linii trafia wprawdzie w uzwojenie transformatora, ale w pierwszej chwili przedstawia ono dla fali bardzo dużą impedancję falową.

Trafienie fali w miejsce połączenia dwóch linii o różnych impedancjach falowych (rys. 8.5).



Rys. 8.5. Trafienie fali w miejsce połączenia linii o różnych impedancjach falowych

Jeżeli Z_B jest większe od Z_A , to w węźle W powstaje fala napięciowa U , której amplituda jest α razy większa od fali padającej. Fala ta przechodzi dalej na linię Z_B . W węźle W powstaje fala odbita U_2 mniejsza od U_1 , ale tego samego znaku. Przypadek taki reprezentuje przejście linii kablowej w napowietrzną, ze względu na sporadyczność pojawiania się dużych przepięć w kablu nie stanowi to istotnego zagrożenia w praktyce.

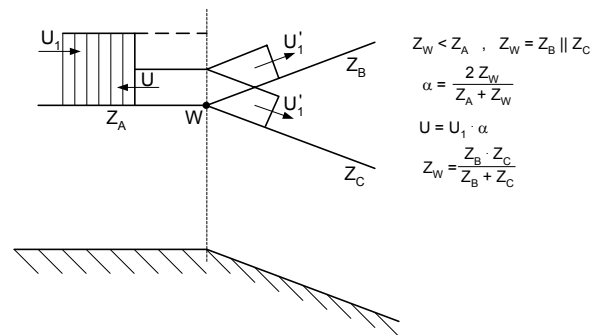
Jeżeli z kolei Z_B jest mniejsze od Z_A , to w węźle W powstaje fala odbita o znaku przeciwnym do fali padającej ($\beta > -1$). Fala przechodząca i napięcie wypadkowe w węźle W są mniejsze od napięcia fali padającej U_1 ($0 < \alpha < 1$). Przypadek ten reprezentuje przejście z linii napowietrznej w linię kablową i jest z punktu widzenia przepięć korzystny - zmniejsza fałę przepięciową.

Innym przykładem zmniejszania przepięć jest **trafienie fali w punkt rozgałęzienia linii** (rys. 8.6).

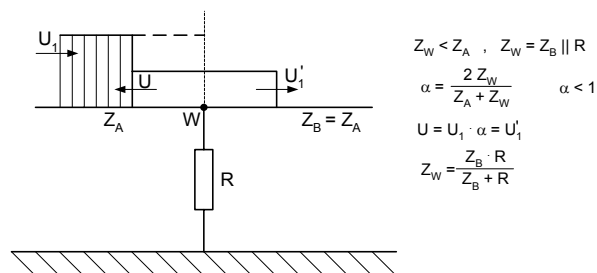
W tym przypadku stopień zmniejszenia przepięcia będzie zależał od liczby odgałęzień (linii) odchodzących od węzła W . Im ta liczba jest większa, tym impedancja falowa zastępcza mniejsza i w konsekwencji napięcie U mniejsze. Stacje węzłowe, w których spotyka się kilka linii są więc

mniej zagrożone przez fale przepięciowe.

Trafienie fali w rezystancję czynną włączoną między linię, a ziemię (rys. 8.7).



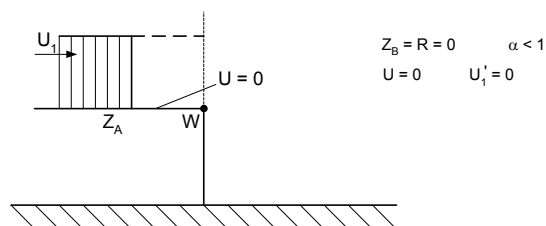
Rys.8.6. Trafienie fali w punkt rozgałęzienia linii



Rys. 8.7. Trafienie fali w rezystancję włączoną między linię a ziemię

W przypadku włączenia uziemionej rezystancji R do punktu W fala padająca U_1 zostanie obniżona, bo zawsze impedancja zastępcza (Z_B połączone równolegle z R) poza węzłem W będzie mniejsza od Z_A ($R < Z_A$). W praktyce stosuje się ten sposób do obniżenia fal udarowych pochodzenia piorunowego. Jest to realizowane w urządzeniach ochronnych (iskiernikach, ogranicznikach), gdzie przyłączenie rezystancji następuje po zapłonie przerwy iskrowej urządzenia ochronnego pod wpływem przepięcia udarowego.

Trafienie fali zwarty koniec linii (rys. 8.8). Zwarcie powoduje spadek napięcia do zera. Powstająca w punkcie zwarcia (w węźle W) fala odbita jest równa co do wartości lecz przeciwna co do znaku fali padającej ($\alpha = 0$, $\beta = -1$).

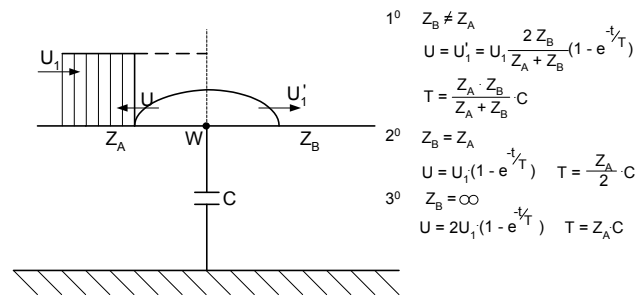


Rys. 8.8. Trafienie fali w zwarty koniec linii

Trafienie fali w kondensator włączony między linię a ziemię (rys.8.9). W pierwszej chwili kondensator włączony między linię Z_A a ziemię stanowi zwarcie dla czoła fali i dopiero w miarę upływu czasu ładowania się kondensatora napięcie w węźle W wzrasta do określonej wartości. Fala ta jest przepuszczana poza węzeł W . Powstaje również fala odbita $U_2 = U - U_1$. Kondensator C przede wszystkim łagodzi stromość fali, co jest korzystne z punktu widzenia ochrony przeciwprzepięciowej. Napięcie w węźle W po dostatecznie długim czasie osiąga wartość maksymalną fali padającej (dla $Z_B = Z_A$) lub większą (dla $Z_B > Z_A$).

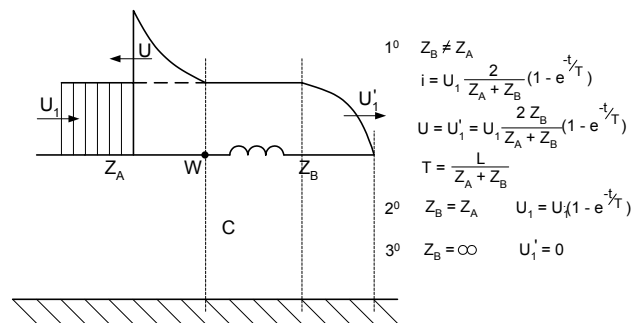
Kondensator zatem nie obniża wartości szczytowej przepięcia o długim czasie trwania.

Kondensator może jednak zmniejszyć wartość maksymalną napięcia - jeśli fala padająca będzie krótka w stosunku do stałej czasowej ładowania (np. fala samotna).



Rys. 8.9. Trafienie fali w kondensator włączony między linię a ziemię

Trafienie fali w dławik włączony szeregowo w linię (rys. 8.10). Dławik dla czoła fali stanowi przerwę w obwodzie, a więc początek cewki oddziałuje jak otwarty koniec linii ($Z_B = \infty$). Następuje odbicie fali i wartość napięcia przed cewką osiąga wartość równą podwójnej wartości fali padającej. W miarę upływu czasu cewka zaczyna przewodzić, pojawia się fala przepuszczana o czole złagodzonej w stosunku do czoła fali padającej. Stromość narastania i wartość napięcia fali przepuszczanej zależą od wartości Z_A i Z_B oraz od indukcyjności dławika L . Amplituda fali przepuszczanej różni się od napięcia w węzle W (przed dławikiem) o spadek napięcia na indukcyjności dławika.



Rys. 8.10. Trafienie fali w dławik (cewkę) włączony szeregowo w linię

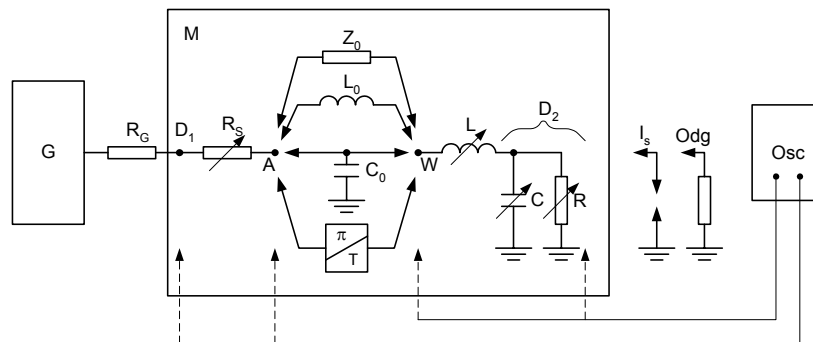
Falę przepuszczaną najłatwiej określić ze schematu zastępczego przez obliczenie spadku napięcia na impedancji Z_B . W przypadku fali długiej ochronne działanie dławika sprowadza się tylko do złagodzenia stromości fali przepuszczanej, a skuteczność działania dławika zależy od stosunku L/Z_B i rośnie wraz z nim. Jeśliby za dławikiem nie było linii ($Z_B = \infty$), stromość napięcia przepuszczanego byłaby nieskończenie wielka. Dławik chroni więc tylko dzięki spadkowi napięcia od prądu, który przez niego płynie. Możliwość obniżenia wartości szczytowej fali przepuszczanej istnieje tylko przy bardzo krótkich falach.

Aby łagodzenie czoła było skuteczne, indukcyjność cewki musi być znaczna (kilka mH). Stosowanie cewek o dużych indukcyjnościach i wytrzymałości elektrycznej ($2U_i$ na początku) jest kosztowne i wymaga uważnego doboru indukcyjności ze względu na możliwość rezonansu z pojemnościami za dławikiem (pojemność szyn, izolatorów, transformatorów i kondensatorów stacji rozdzielczych).

8.2. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie sposobów modelowania układów elektroenergetycznych i przeprowadzania analizy występujących w nich przebiegów.

Na rys. 8.11 przedstawiono zasadniczy schemat układu pomiarowego do badań modelowych fal wędrownych. Układ pomiarowy składa się z generatora impulsów prostokątnych, układu modelującego linię długą oraz oscyloskopu.



Rys. 8.11. Schemat układu pomiarowego; G - generator impulsów, M - układ modelowy, $Osc.$ - oscyloskop, R_G - impedancja wyjściowa generatora, R_s - rezystor szeregowy przed linią, A - punkt początkowy linii, Z_0 - linia zastąpiona impedancją falową skupioną $Z_0 = Z_A$, L_0 - linia zastąpiona indukcyjnością skupioną, C_0 - linia zastąpiona pojemnością skupioną, T lub π - linia zastąpiona czwórnikiem typu T lub π , W - punkt pomiarowy (węzeł na końcu linii Z_A), L - indukcyjność regulowana, I_s - model iskiernika ochronnego, O_d - model odgromnika, C - pojemność regulowana, R - rezystor regulowany, $D_{1,2}$ - dodatkowe punkty pomiarowe

Układ modelowy zawiera szereg regulowanych elementów odwzorowujących urządzenia i układy stosowane w systemach energetycznych jako obciążenie lub środki ochrony. Ponadto układ ten umożliwi dopasowanie rezystancji wyjściowej generatora impulsów do impedancji falowej zamodelowanej linii.

Model linii długiej jest linią łańcuchową o impedancji Z_A . Linia ta może być zastąpiona modelem linii o stałych skupionych R , L lub C tworzących układy L_0 , C_0 , π lub T .

Elementy na prawo od punktu W określane ogólnie jako Z_B mogą tworzyć różne kombinacje połączeń elementów R , L , C .

Wykonanie ćwiczenia obejmuje:

1. Określenie wartości impedancji falowej linii Z_A .
2. Dopasowanie rezystancji wyjściowej generatora impulsów do impedancji falowej linii Z_A .
3. Obliczenie długości linii o impedancji falowej Z_A .
4. Wykonanie obliczeń i analizy graficznej przypadków według pkt. e. Przedmiot analizy to przebiegi napięciowe w punktach A , W i D_2 układu pomiarowego.
5. Wykonanie pomiarów napięć w punktach A i W układu modelowego dla następujących przypadków:
 - a). $Z_B = \infty$
 - b). $Z_B = 0$
 - c). $Z_B = R > Z_A$
 - d). $Z_B = R = Z_A$
 - e). $Z_B = R < Z_A$
 - f). $Z_B = C$ pF, równolegle
 - g). $Z_B = L =$ mH, szeregowo

Pomiary należy wykonać dla fali prostokątnej zasilanej, a w przypadkach f i g dodatkowo dla fali prostokątnej krótkiej.

Uwaga: W przypadkach a - f indukcyjność szeregową L jest zwarta, pozostałe elementy odłączone lub zwarte.

Dla dopasowania impedancji wyjściowej generatora do impedancji falowej linii oscyloskop należy dołączyć do otwartego końca linii. Rezystor szeregowy R_s nastawić tak, aby na ekranie oscy-

loskopu było widać tylko jedną falę (o wartości $2U_1$) bez żadnych dodatkowych odbić od początku linii (A).

6. Zaprojektowanie ochrony przeciwprzebieciowej transformatora z izolowanym lub uziemionym punktem zerowym, mając do dyspozycji modele: odgromnika zaworowego, dławika szeregowego, kondensatora równoległego. Przyjąć, że napięcie znamionowe sieci równa się $U_n = \dots$ kV. Uwzględnić poziom ochrony i poziom podstawowy izolacji. Narysować spodziewane zmiany napięcia w każdym z węzłów,
7. Przeprowadzenie analizy porównawczej wyników badań modelowych z wynikami obliczeń komputerowych przebiegów falowych w liniach długich.

8.3. OCENA WYNIKÓW I WNIOSKI

Uzyskane wyniki analizy teoretycznej i pomiarów należy ująć w tablicy tak, aby można było porównać wartości oraz przebiegi napięć w punktach A , W i D_2 z odpowiadającymi im przebiegami pomiarowymi z oscyloskopu.

Narysować schemat zaprojektowanego systemu ochrony transformatora oraz przewidywane przebiegi napięć. Przytoczyć sposób doboru napięć do poszczególnych poziomów: ochrony i podstawowego oraz porównać przewidywany przebieg z przebiegiem pomiarowym z oscyloskopu.

W części dyskusyjnej przedstawić możliwe przyczyny rozbieżności wyników pomiarów z wynikami obliczeń ze schematu zastępczego. Wskazać, który z badanych przypadków jest najgroźniejszy pod względem wartości przebiegów, a który najlepszy z punktu widzenia ochrony przed przebiegami.

Przedyskutować wyniki analizy porównawczej badań modelowych i obliczeń komputerowych.

8.4. PYTANIA KONTROLNE

1. Przebiegi atmosferyczne. Ochrona linii i stacji.
2. Podstawowe równania linii długich - napięcie, prąd, prędkość i impedancja falowa linii.
3. Schemat zastępczy linii. Współczynniki α i β .
4. Znaczenie impedancji falowej linii za węzłem.
5. Pojemność i indukcyjność układów elektroenergetycznych (v , Z).
6. Trafienie fali w otwarty koniec linii. Narysować przebiegi U , i w p. A przed węzłem W . Fala trójkątna. Odległość $A - W$ równa 1.
7. Sposoby łagodzenia stromości i amplitudy fali przebieciowej.
8. Dławiki przeciwprzebieciowe, ograniczenia w stosowaniu.
9. Rezystor przeciwdrobnicyowy. Zastosowanie.
10. Krótki odcinek linii. Korzyści.
11. Tłumienie i odkształcanie fal przebieciowych.
12. Narysować spodziewany przebieg fali napięciowej prostokątnej w punkcie A na wejściu linii długiej o impedancji Z . Na wyjściu z tej linii jest przyłączony rezystor $R < Z$. Punkt A jest bezdrobnicyowy. Długość linii 600 m.

LITERATURA

1. Krywickij B.H.: Elementy techniki impulsowej i urządzenia impulsowe. Warszawa: WNT 1964
2. Nietuszył A.: Obwody o parametrach skupionych i rozłożonych. Warszawa: WNT 1969
3. Roth A.: Hochspannungstechnik. Springer Verlag 1950
4. Szpor S.: Ochrona odgromowa. Warszawa: WNT 1975
5. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. Warszawa: WNT 1988