Seria: ELEKTRYKA z.124

Nr kol. 1139

Pawel SOWA

OBLICZANIE PRZEBIEGÓW PRZEJŚCIOWYCH W LINIACH PRZESYŁOWYCH NAJWYZSZYCH NAPIĘĆ PRZY UWZGLĘDNIENIU WPŁYWU ULOTU

<u>Streszczenie</u>. W artykule przedstawiono matematyczny model ulotu dynamicznego wprowadzonego do modelu linii przesyłowej najwyższych napięć. Przebiegi przejściowe prądów i napięć obliczono za pomocą dwóch metod: – metody różnic skończonych, przy kaskadowym połączeniu układów – odcinków linii o parametrach skupionych wraz z dołączonymi do punktów węzłowych elementami nieliniowymi odwzorowującymi charakterystykę nieliniową ulotu; – metody wprowadzającej nieliniowy model ulotu do programu EMTP. Przeprowadzono dyskusję wzorów empirycznych stosowanych w literaturze.

<u>Summary</u>. The paper presents a mathematical corona model and its use for transmission line modelling with corona. Two alternative methods have been used for modelling. In one single phase line section has been represented by cascading identical model circuits and equations has been solved by a finite difference method. In second of the alternative the implementation of a simple and accurate numerical model representing the non-linear corona phenomenon in a general purpose EMTP-program were used. The results from model confirm with available experimental data in the literature.

Резюме. В статье представляется модель динамической короны введенной в модель ЛЭП сверхвысокого напряжения. Переходные процессы токов и хапряжений рассчитывались с помощью двух методов: -- метода конечных разностей при каскадном соединении схем - участков линии с сосредоточенными параметрами вместе с присоединенными к узловым точкам нелинейными элементами отодражающими нелинейныю характеристику короны; -- метода вводящехо нелинейную модель короны в программу ЕМТР. Проводиится дискуссия эмпирических формул применяемых в литературе.

#### 1. WPROWADZENIE

Badania zjawiska ulotu prowadzone są od 1911 roku, kiedy to Peek [1] opublikował szereg wzorów doświadczalnych wyrażających m.in. straty ulotowe. Zagadnienie to było następnie przedmiotem wielu publikacji, w których wzory oparte na wynikach własnych badań laboratoryjnych wyrażających straty ulotowe w zasadniczy sposób różniły się między sobą. Wzory wyprowadzone przez Peeka, pomimo wielu krytycznych analiz, czasami wykazujących całkowitą nieprzydatność w zakresie napięć bliskich napięcia początkowego ulotu [2], do dzisiaj znajdują zastosowanie w podręcznikach techniki wysokich napięć.

Wraz z rozwojem w drugiej połowie XX wieku maszyn matematycznych, w literaturze można spotkać znacznie więcej analiz teoretycznych niż doświadczalnych. Nieliczne badania laboratoryjne [4,5] stanowiły podstawę do weryfikacji wyprowadzanych modeli ulotu. Na podstawie porównania rezultatów otrzymanych na drodze eksperymentalnej oraz analitycznej można stwierdzić, że dla określonych warunków pogodowych oraz geometrii przewodów wyniki badań prowadzonych przez różnych autorów są mniej lub bardziej zgodne. Niezwykle trudno jest zatem stwierdzić, które z wyprowadzonych wzorów stanowić mogą uniwersalną bazę do analizy wpływu ulotu na zjawiska przejściowe w liniach najwyższych napięć.

W artykule przedstawiono wyniki badań zaproponowanego modelu ulotu, uzyskanych za pomocą programów komputerowych: - EMTP [3] oraz własnego, przy czym obliczenia wykonano za pomocą komputerów typu IBM PC.

### 2. MODEL MATEMATYCZNO - FIZYCZNY ULOTU W LINIACH NAJWYZSZYCH NAPIĘĆ

### 2.1. Charakterystyka q = f(u) dla linii wysokich napięć

W ogólnym przypadku charakterystyka ma postać podaną na rys. 1. W zakresie od zera do u (napięcie początkowe ulotu), dla każdego punktu tangens kąta nachylenia krzywej q = f(u) określony jest pojemnością geometryczną przewodu

$$c_{g} = 2\pi\varepsilon_{0}/\ln\frac{2h}{r} .$$
 (1)

Obliczanie przebiegów przejściowych



Rys.1. Aproksymacja charakterystyki q=f(u) dla dodatniego udaru napięciowego 1.2/5 μ

Fig.1. Approximation of charge-voltage characteristics for 1.1/5 µs waves of positive polarity

107

Powyżej napięcia początkowego dla każdego punktu tangens kąta nachylenia krzywej q =f(u) określony jest wartością:

$$c_d \neq \frac{\partial q}{\partial u}$$
 (2)

Wielkość c<sub>d</sub> nazywana pojemnością dynamiczną, aczkolwiek nie posiada fizycznego uzasadnienia, może być wprowadzona do równań falowych linii bezstratnej:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = c_{d} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial t}$$
(3)

Pojemność dynamiczna jest zawsze większa niż statyczna i podczas obliczeń komputerowych określona jest za pomocą relacji:

$$c_{d} = \frac{q(t)-q(t-\Delta t)}{u(t) - u(t-\Delta t)} .$$

$$\tag{4}$$

Dla określonego napięcia początkowego u wartość pojemności dynamicznej można wyznaczyć wg wzoru:

$$c_{d} = 2\pi\varepsilon_{0}/\ln(\frac{2h}{r} - 1)$$
(5)

stąd bardzo łatwo można oszacować stosunek pojemności dynamicznej do statycznej

$$\frac{c_d}{c_g} = \frac{\ln \frac{2h}{r}}{\ln (\frac{2h}{r} - 1)} .$$
(6)

Dla linii najwyższych napięć wartość tego stosunku waha się od 1,16 do 1,25.

# 2.2. Określenie napięcia początkowego

W literaturze można znaleźć wiele wzorów wyprowadzonych na podstawie pomiarów, służących do obliczania napięcia początkowego ulotu u Każdy z tych wzorów wyraża zależność od natężenia pola elektrycznego, w bardzo różny sposób określanego przez poszczególnych autorów. Na podstawie badań Peeka podana jest zależność:

$$E = 31 \,\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right) \tag{7}$$

która określona została dla gęstości względnej powietrza w stosunku do obecnie przyjętych za normalne warunków atmosferycznych (temperatura 20°C, ciśnienie 760 mm Hg). Krytyczne natężenie pola elektrycznego jest dla udarów ujemnych nieco większe niż dla dodatnich. Najczęściej jednak dla przewodów o średnicy 1 + 5 cm różnica ta jest do pominięcia. Przykładowo Kostenko [6] określił wzory:

$$E_{kr}^{(+)} = 24 \, \delta \left( 1 + \frac{0.638}{r^{0.38} \delta^{0.3}} \right) , \qquad (8)$$

$$E_{kr}^{(-)} = 24 \ \delta \left( 1 + \frac{0.62}{r^{0.38} \delta^{0.3}} \right)$$

Wśród wielu innych wzorów wyróżnić można podane przez: - Al Tai i in. [7]:

$$E_{\rm kr} = 23.8 \left( 1 + \frac{0.67}{r^{0.4}} \right) ,$$
 (9)

- Salesskiego [8]:

$$E_{kr} = 24.5 \left( 1 + \frac{0,613}{r^{0,4}} \right) , \qquad (10)$$

- Boczkowskiego [9]:

$$E_{kr} = 30 \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}} \right) .$$
 (11)

Większość wzorów na napięcie początkowe określono na podstawie pomiarów dla przewodów gładkich. Tichodeev [10] podał wzory na napięcie początkowe ulotu dla przewodów – linek skręconych z drutów:

$$\mu_{p} = \frac{r n E_{kr}}{1 + (n-1)(r/r_{r})} \ln \frac{2h}{r_{e}}$$
(12)

gdzie:

$$r_{e} = \sqrt{n} r r_{T}^{n-1}$$
 - zastępczy promień dla przewodów wiązkowych

n - liczba przewodów w wiązce,

r - promień przewodu,

$$r_{T} = \frac{a}{2 \sin \frac{180}{2}}$$

#### 2.3. Określenie promienia ulotu

Zjawisko ulotu, przez silne zjonizowanie warstwy powietrza wokół przewodu, powoduje umowne zwiększenie średnicy przewodu. W pracy [6] zaproponowano wzór przybliżony dla określenia maksymalnej średnicy umownej przewodu w warunkach ulotu dynamicznego:

$$r_{\rm umax} = \frac{r}{\kappa} \left( q^{*} \frac{n}{1 + \Delta\beta} \right)$$
(13)

gdzie:

κ, Δβ - oznaczają współczynniki zależne od wymiarów przewodów oraz znaku sygnału udarowego

$$q^* = \left(\frac{u}{u_{kr}}\right) D \left(\frac{u}{u_{kr}} - 1\right)^{5/3}$$
(14)

D = 0,78 dla udarów dodatnich, D = 0,375 dla udarów ujemnych.

Wzory zaproponowane przez innych autorów zakładają nie analityczne, lecz iteracyjne obliczanie promienia umownego wg wzoru:

$$\mathbf{r}_{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) = \left(\mathbf{r} + \frac{\mathbf{u}}{\alpha E_{\mathbf{k}\mathbf{r}}}\right) / \left[1 + \frac{2\mathbf{h} - \mathbf{r}}{2\mathbf{h}} \ln\left(\frac{2\mathbf{h} - \mathbf{r}}{2\mathbf{h}}\right)\right]$$
(15)

przy czym  $\alpha$  = wartość stała (0,9 + 1,0) Wartość r<sub>u</sub>(t) stanowi podstawę do określania charakterystyki q=f(u) w niektórych obliczeniach numerycznych wg wzoru:

$$q(t) = 2\pi\varepsilon_{o}\alpha E_{kr}r_{u}(t) \frac{2h-r_{u}(t)}{2h} .$$
 (16)

# 2.4. Możliwości uwzględnienia modelu ulotu przy odwzorowaniu linii przesyłowej najwyższych napięć

Schematy zastępcze linii przesyłowej zawierają – w zależności od rozpatrywanego problemu – parametry równomiernie rozłożone lub skupione. Model ulotu będzie zatem w istotny sposób zależał od tego, jak odwzorowywana jest linia. W schematach zastępczych zawierających parametry rozłożone uwzględnienie zjawiska ulotu powinno następować dla każdego nieskończenie krótkiego elementu linii, przy czym konsekwentnie będą się zmieniać zarówno impedancja falowa linii, jak i stała rozchodzenia się fali. W tej sytuacji można określić impedancję falową dynamiczną:

$$z_{fd} = \sqrt{\frac{L}{c_d(u)}}$$
(17)

w porównaniu do impedancji falowej bez uwzględnienia zjawiska ulotu:

$$z_{f} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$
(18)

analogicznie stałą rozprzestrzeniania się fali:

$$\boldsymbol{v}_{d} = \frac{1}{\sqrt{Lc_{d}(u)^{\dagger}}} \quad (19)$$

W związku z tym wszystkie parametry muszą być obliczane na nowo w każdym kroku czasowym podczas obliczeń numerycznych. Zasada superpozycji nie może być zastosowana z uwagi na nieliniowy charakter zależności c\_=f(u).

W przypadku modelowania linii za pomocą parametrów skupionych (np. zastępcze czwórniki typu II), uwzględnienie ulotu odbywa się przez wprowadzenie dodatkowych elementów w punktach węzłowych. Wraz ze wzrostem liczby czwórników rośnie odpowiednio liczba pojemności i upływności poprzecznych odwzorowujących ulot, co może utrudnić optymalizację obliczeń numerycznych. Liczba dodatkowych punktów z podłączonymi pojemnościami i upływnościami ograniczona jest z jednej strony wymaganą dokładnością obliczeń, z drugiej zaś koniecznością obniżenia amplitudy fal odbitych pojawiających się w punktach nieciągłości – węzłach (zjawisko nie wystepujące w układach rzeczywistych).

# 2.5. Schemat zastępczy modelu ulotu

Z przytoczonych powyżej rozważań wynika, że model linii uwzględniający zjawisko ulotu musi stanowić kompromis między dokładnością, szybkością obliczeń oraz pojemnością pamięci operacyjnej komputera. Dla badań opisywanych w niniejszym artykule zastosowano następujące opcje:

- linia podzielona na n odcinków odwzorowanych za pomocą parametrów rozłożonych, dodatkowe układy uwzględniające ulot dołączane są w n punktach węzłowych,
- linia podzielona na n odcinków odwzorowanych za pomocą parametrów skupionych, dodatkowe układy uwzględniające ulot dołączane są w n punktach węzłowych.

Na rysunku 1-A pokazano zasadę tworzenia dodatkowych układów modeli ulotu. W zależności od wymaganej dokładności możliwe jest stosowanie jednego (rys.1a-A) lub drugiego (rys.1b-B) przybliżenia charakterystyki nieliniowej q=f(u).

Dodatkową pojemność Δc można również odwzorowywać za pomocą nieliniowych zależności:

- wg Kostenki [6]

$$Ac = c_g M \left( \frac{u}{u_{kr}} - 1 \right)^{2/3}$$

przy czym

$$M^{(+)} = 1,292$$
,  $M^{(-)} = 0,63$ ,

- wg Boczkowskiego [9]

$$\Delta c = c_{g} \left[ \frac{4}{3} B \left( \frac{u}{u} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

przy czym

$$B^{(+)} = 1,02$$
,  $B^{(-)} = 0,85$ .

# 3. METODA OBLICZEŃ

Zastosowano dwa równoległe tory obliczeń:

 za pomocą programu EMTP (wersje ATP2 oraz MT). W tym przypadku linie odwzorowano parametrami rozłożonymi. Wykorzystano aproksymację



- Rys.2. Schemat układu linia o parametrach rozłożonych wraz z modelem ulotu
- Fig.2. Scheme of computation with distributed line and corona model

(21)

(20)

odcinkową charakterystyki nieliniowej q=f(u), przy czym model linii wraz z ulotem realizowano wg schematu zastępczego przedstawionego na rys.2,

 za pomocą własnego programu mikrokomputerowego, przy czym model linii wraz z ulotem realizowano wg schematu zastępczego przedstawionego na rys.3. Charakterystykę nieliniową modelowano zgodnie z zależnością (20) lub (21).



Rys.3. Schemat układu - linia o parametrach skupionych wraz z modelem ulotu Fig.3. Scheme of computation with lumped line and corona model

# 3.1. Obliczenia za pomoca programu EMTP

Metoda trapezów wykorzystana w programie EMTP, obok niewątpliwych zalet (łatwość zastosowania, zapewniona stabilność rozwiazania), ma zasadniczą wadę, szczególnie dokuczliwą przy analizie przepięć: w układach zawierających parametry skupione istnieje możliwość pojawienia się oscylacji numerycznych. Parametry występujące w schemacie zastępczym modelu ulotu mogą jako punkty nieciągłości stanowić źródło oscylacji, które w rzeczywistym układzie nie występuje. Znalazło to potwierdzenie w badaniach testowych, których wyniki przedstawiono na rys. 4a  $\div$  4e. Zbadano tutaj model ulotu wraz z aktualnie zalecanym przez użytkowników programu EMTP, "lekarstwem" obniżającym amplitudę oscylacji, wprowadzaniem rezystancji tłumiących – tzw. CDA (Critical Damping Adjustment) [10]. Jak widać z przebiegów charakterystyk i=f(u) na rys. 4a  $\div$  4e, w celu uniknięcia oscylacji numerycznych musiałaby być w tym przypadku zastosowana rezystancja R<sub>CDA</sub> > 10<sup>10</sup>  $\Omega$ . W tej







Fig. 4. Damping of numerical oscillations with series resistance (R<sub>CDA</sub>) - Critical Damping Adjastment



Rys.5. Porównanie charakterystyki q=f(u) dla ekstremalnie różniących się parametrów

Fig. 5. Voltage-charge diagram compared for the extremely conditions

sytuacji pojemność c nie odgrywałaby żadnej roli, co jest widoczne na rys.5, gdzie dla ekstremalnie różnych pojemności c oraz  $R_{CDA} = 10^{10} \Omega$  otrzymano identyczne przebiegi charakterystyk. Wynika z tego, że w przypadku modelu ulotu zastosowanie CDA nie stanowi żadnego rozwiązania problemu oscylacji numerycznych. Wykluczone jest zatem odwzorowywanie linii za pomocą parametrów skupionych. Podczas modelowania linii za pomocą parametrów rozłożonych problem oscylacji numerycznych nie występuje.

#### 3.2. Obliczenia za pomocą programu mikrokomputerowego

W modelu układu pokazanym na rys. 3 zastosowano metodę numeryczną różnic skończonych. Ta metoda, celem zachowania stabilności rozwiązania, wymaga zarówno małych kroków obliczeniowych, jak również bardzo krótkich odcinków Δx linii odwzorowywanych za pomocą parametrów skupionych. Oznacza to, że obliczenia mogą być prowadzone tylko dla krótkich linii. W przeciwnym przypadku, jeżeli pojemność komputera na to pozwala, czas obliczeń znacznie się wydłuża.

Dla przedstawionego schematu zastępczego można napisać następujące równania:

$$\mathbf{e}_{1} = \mathbf{L} \Delta \mathbf{x} \frac{\partial \mathbf{I}_{1}}{\partial \mathbf{t}} + \mathbf{e}_{\mathbf{k}}$$
$$\mathbf{i}_{1} = \Delta \mathbf{x} \frac{\partial \mathbf{q}_{\mathbf{k}}}{\partial \mathbf{t}} + \mathbf{i}_{\mathbf{k}}$$

a po zastosowaniu metody różnic skończonych:

$$\frac{\partial i_{i}}{\partial t} = -\frac{i_{i}^{(n+1)} - i_{i}^{(n)}}{\Delta t}}{\frac{\partial q_{k}}{\partial t}} = -\frac{q_{k}^{(n)} - q_{i}^{(n-1)}}{\Delta t}}{\frac{\partial q_{k}}{\Delta t}}$$
(23)

W następstwie tego równania (22) można przekształcić do postaci:

$$e_{k}^{(n)} = e_{1}^{(n)} - \frac{L\Delta x}{\Delta t} \left( i_{1}^{(n+1)} - i_{1}^{(n)} \right)$$

$$i_{k}^{(n)} = i_{1}^{(n)} - \frac{\Delta x}{\Delta t} \left( q_{k}^{(n)} - q_{k}^{(n-1)} \right)$$
(24)

117

(22)



Rys.6. Program czasowo-przestrzenny obliczeń Fig.6.The space-time plan

Obliczenia przebiegają wg planu i-k-n (rys.6), przy czym rozpoczynają się od warunku początkowego:

$$e_1^{(n)} = napięcie zasilające,$$
  
 $i_1^{(n)} = \frac{e_1^{(n)}}{z}$ , z - impedancja falowa linii  
dla n = 1,2,...,N

W następnym kroku wartości e<sup>(n)</sup> będą obliczane z zależności (24).

W kolejnym kroku z charakterystyki  $q^{(n)} = f(e^{(n)})$  otrzymuje się wartości ładunku, w konsekwencji z równania (24) prądy itd. Dla rozwiązania układów rownan mieliniowych zastosowano metodę Newtona-Raphsona.

# 4. WYNIKI OBLICZEŃ

#### 4.1. Tłumienie i zniekształcenie fal udarowych

W obliczeniach jako wielkości wejściowe przyjęto udary znormalizowane – dwubiegunowe. Udary takie, jak wiadomo, odtwarzają nie tylko przepięcia atmosferyczne, lecz również niektóre przepięcia łączeniowe. W badaniach przyjęto udary o różnych parametrach czasowych: o czołach od 0,6 do 250 µs i grzbietach od 0,6 do 2500 µs. Wprawdzie 90% udarów atmosferycznych występuje ze znakiem ujemnym, przeprowadzono jednak badania dla udarów obydwu znaków, przy czym dla porównania przeanalizowano przebiegi w układzie bez oraz z uwzględnieniem modelu ulotu.



Rys. 7., Zależność wartości maksymalnej napięcia do amplitudy sygnału wejściowego od odległości do miejsca udaru

Fig. 7., The distance dependence of the peak attenuation u max imax

Badania wykazały bardzo silne tłumienie i odkształcenie fal w warunkach udaru związane ze stratą energii na zapalenie ulotu. Na rys.7 pokazano zależność amplitudy udaru od odległości od miejsca jego powstania. Jak



Rys.8. Zależność czasu osiągania maksimum przez falę napięciową 1.2/5 oraz 1.2/50 μs biegnącą wzdłuż linii od odległości do miejsca udaru

Fig.8., Variation in time to crest of a 1.2/5 and 1.2/50  $\mu s$  voltage waves as it travels along the line

Tablica 1

Wartości maksymalne napięć w [%] amplitudy udaru napięciowego 1,2/5 μs oraz czas jej osiągania dla wybranych odległości od miejsca udaru

	UDAR DODATNI		UDAR UJEMNY	
1	A	t	A	ŧ
m	%	μs	%	μs
400	98.34	1.935	99.73	1.761
800	94.44	2.325	98.53	1.950
1200	88.62	2.780	96.27	2.175
1600	82.02	3.220	93.52	2.425
2000	76.61	3.705	82.61	2.631

### Obliczanie przebiegów przejściowych ....

widać, im dłuższa droga, tym dłuższy czas odbierania energii przez ulot i tym większe obniżenie wartości szczytowej napięcia, przy czym dla udarów zanikających wolniej tłumienie to jest mniejsze. Dla krótkich udarów z kolei występuje krótszy schodek poziomy na czole fali, stąd szybciej osiąga udar swoje maksimum, co jest widoczne na rys.8. Dla udarów o znaku ujemnym, tłumienie fali jest mniejsze niż dla udarów o znaku dodatnim, jednak dla udarów ujemnych następuje szybsze odbudowanie fali, co wynika z tablicy 1. Zniekształcenie stromości w zależności od odległości od miejsca udaru pokazuje rys.9. Jak wynika z badań, dla udarów długich, np.250/2500 µs, różnica w przebiegu fal dla modelu bez oraz z uwzględnieniem ulotu jest do pominięcia.





### 4.2. Wpływ parametrów schematu zastępczego na wyniki obliczeń

Właściwy dobór parametrów schematu zastępczego modelu ulotu odgrywa w badaniach decydującą rolę. Przede wszystkim bardzo ważne jest dokładne określenie napięcia początkowego, pojemności dynamicznej oraz charakterystyki g=f(u). Przykładowe przebiegi prądów i napięć dla różnych parametrów

121



Rys.10. Przebiegi fal napięciowych dla udaru 1.2/5 µs dla różnych parametrów schematu zastępczego modelu ulotu

Fig. 10. Propagation of the 1.2/5  $\mu s$  pulse calculated for different corona model parameters

schematu zastępczego pokazano na rys. 10. Wprowadzenie pojemności dynamicznej do równań opisujących linię powoduje zmianę impedancji falowej. Brak uwzględnienia tego zjawiska powoduje powstanie dodatkowych punktów nieciągłości będących źródłem odbicia fal, jak to przykładowo pokazano na rys.11, gdzie porównano przebiegi napięciowe dla linii bez i z uwzględnieniem modelu ulotu. przy czym impedancja falowa obliczona zostala dla linii bez uwzględnienia ulotu. Bardzo trudne jest określenie minimalnej długości odcinków linii włączanych pomiędzy punkty węzłowe, w których dołączane są układy uwzględniające ulot. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dla udarów o czołach powyżej 0,1 µs długość odcinka linii nie powinna przekraczać 20 metrów. Zbadano również wplyw uwzglednienia zależności parametrów linii od częstotliwości przez wprowadzenie w programie EMTP tzw. modelu Martiego [3]. Ponadto przeanalizowano przebiegi napięć i pradów w przewodach (jak również torach) sąsiednich, tj. nie dotkniętych



Rys.11. Przebiegi przejściowe napięć obliczone dla modelu linii z modelem oraz bez modelu ulotu, obciążonej impedancją falową

Fig.11. Results of digital computer calculation of a traveling wave on a line with and without corona terminated by natural surge impedance

udarem. Badania wykazały pomijalny wpływ obydwu wymienionych czynników. Wnioski te pozwalają na znaczne zaoszczędzenie nakładu pracy oraz czasu obliczeń numerycznych.

# 5. UWAGI KOŃCOWE

Badania omawiane w niniejszym artykule, jak również prezentowane fragmentarycznie wyniki stanowią część ogromnego zadania, jakim jest próba wyboru optymalnego, kompleksowego modelu linii najwyższych napięć do analizy stanów przejściowych w niej występujących. Model taki będzie zawsze zależny od problemu, który należy rozwiązać. Wyniki z przeprowadzonych badań nie pozwalają jednak na kategoryczne stwierdzenie, w jakich przypadkach można zrezygnować z dodatkowego uwzględniania w modelu linii modelu ulotu. Istnieje bowiem wiele dodatkowych czynników, które mogą mieć wpływ na przebieg udarów napięciowych bądź prądowych w linii (przykładowo uwzględnienie przeskoków na izolatorach). Badania prowadzone w tej dziedzinie powinny uwzględniać następujące czynniki:

- dla konkretnej linii musi być dokładnie określona, jeżeli to możliwe na drodze pomiarowej, charakterystyka zależności ładunku od napięcia. Jest to szczególnie istotne z uwagi na bardzc duże rczbieżności wartości napięć początkowych ulotu obliczanych na podstawie wzorów (niektóre przytoczono w rozdziale 2) podawanych przez różnych autorów:
- muszą zostać uwzględnione warunki pracy linii wraz z parametrami takich urządzeń, jak odgromniki zaworowe, kable doprowadzające itp.

W przypadku konieczności uwzględnienia modelu ulotu można zastosować każdą z zaproponowanych powyżej metod, przy czym dla linii o długości większej od 500 metrów zalecana jest metoda wykorzystująca program EMTP.

### LITERATURA

- Peek F.W. jr.: The Law of Corona and the Dielectric Strength of Air, J.Amer.Inst.Electr.Engng. 30 (1911) s.1458
- [2] Prinz H.: Zur Gültigkeit des Peekschen Korona Verlustgesetzes, Archiv für Elektrotechnik, Bd.3 H.12 (1941) s.705 - 714
- [3] EMTP Theory Book, Dept. of El.Engn. UBC Columbia Canada 1986
- [4] Wagner C.F., Gross I., Lloyd B.L.: High-voltage impulse test on transmission line, AIEE-Trans. on PAS 73 (1954) 4 s.196-210
- [5] Maruvada P.S., Menemenlis H., Malewski R.: Corona Characteristics of Conductor Bundes under Impulse Voltages, IEEE Trans., Vol. PAS-96. No 1, s. 102-115, 1977
- [6] Kostenko M.V.: Physikalisch Modell f
  ür die Impulskorona, 10.Wiss. Konf. der TU Dresden 1984 s.24-28
- [7] Al-Tai M.A., Elayyan H.S.B., German D.M., Hadda A., Harid N., Waters R.T.: The simulation of surge corona on transmission lines, IEEE/PES Summer Meeting, Portland, Oregon, July 24-29, 1988, 88SM 552-2
- [8] Salesski A.M.: Elektrische Energieübertragung Nr 6 ГЭЙ (1948)
- [9] Boczkowskij B.B.: Impulse corona on single and split conductors, Elektriczestwo, No 7, 1966
- [10] Tichodeev N.N.: Zur Berechnung der Anfangsfeldstrke der allgemeinen Korona auf Gleichstromleitungen - Elektriczestwo, 10/1957, s. 12-19

Recenzent: prof.dr hab.inż. Zbigniew Ciok

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 czerwca 1991 r.

Obliczanie przebiegów przejściowych

COMPUTATION OF THE TRANSIENTS ON TRANSMISSION LINES WITH CORONA MODELLING

#### Abstract

The paper presents a mathematical corona model and its use for transmission line modelling with corona. The corona model is used as an element of the discretized transmission line model. Two alternative methods have been used for modelling. In one single phase line section has been represented by a non-linear model circuit with changes in its state depending on the present and the previous values of this voltage. Propagation with corona has been simulated by cascading identical model circuits and the non-linear transmission line equations were solved by a finite difference method. In second of the alternative the implementation of a simple and accurate numerical models representing the non-linear corona phenomenon in a general purpose Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) were used. The number of segments needed for discretization depends on the type of transient being simulated. In addition the three phase frequency dependent modelling are developed. However in many practical situation. single phase studies will be sufficiently revealing for assessing the effect of corona on transients on lines. The effect of corona threshold voltage is represented by placing a diode in series with D.C battery. The parameters of the line element model circuit may be determined from the experimental q-e characteristics. The paper presents the results of digital calculation of current- and voltageform in the line taking into consideration the corona under impulse voltage conditions. The waveshapes show the typical distortion of the wavefront and reduction in crest values associated with corona losses. Figures in paper show the attenuation of the crest voltage against distance travelled along the line. With positive lightning surges - 1.2/5 µs and  $1.2/50 \ \mu s$  - corona losses result in a very marked attenuation of the crest voltage in a distance of a few kilometers. The attenuation of negative surges is not as pronounced but it is significant. The results from model confirm with available experimental data in the literature.