

ZYGMUNT PILCH, WILIBALD WINKLER

Katedra Elektroenergetyki

WPLYW POJEMNOŚCI LINII NAJWYŻSZYCH NAPIĘC NA CHARAKTER
I ROZMIAR SKŁADOWYCH SWOBODNYCH NAPIĘCIA W PUNKCIE
ZABEZPIECZENIOWYM

Streszczenie. Wyprowadzono równanie, opisujące napięcie w stanach nieustalonych w punkcie zainstalowania zabezpieczenia. Zbadano zakres spodziewanych wartości składowych oscylacyjnych w napięciu w przypadku trójfazowych zwarć symetrycznych. Wyznaczono wartości najbardziej interesujących wielkości składowych oscylacyjnych dla linii 200 kV i 400 kV.

Wstęp

W warunkach poważnego wzrostu mocy zwarciowej systemu elektroenergetycznego, jedno z podstawowych wymagań, stawianych m.in. zabezpieczeniom przekaźnikowym linii przesyłowych dotyczących szybkości działania uległo znacznemu zaostreniu.

Zabezpieczenia, działające z czasami rzędu 30-60 ms, uważane do niedawna za bardzo szybkie, z uwagi na bezpieczeństwo maszyn i aparatów oraz stabilność pracy systemu elektroenergetycznego wymagają dalszego skracania czasów działania.

Wprowadzanie nowych metod pomiarowych oraz zastosowanie półprzewodników w konstrukcjach przekaźników, przeznaczonych do zabezpieczeń linii elektroenergetycznych, stwarza poważne możliwości znacznego obniżenia czasów działania tych zabezpieczeń. W tej sytuacji poważnego znaczenia nabrało zachowanie się omi-

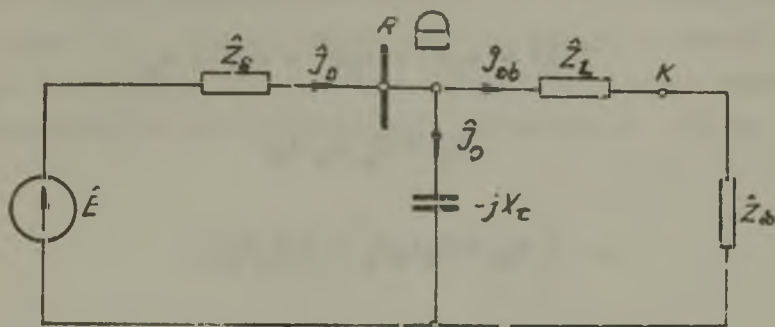
wianych zabezpieczeń w czasie procesów przejściowych, towarzyszących zwarciom, powstałym w chronionych liniach przesyłowych. Pojawienie się w prądzie i napięciu pierwotnym lub wtórnym składowych swobodnych może być powodem nieprawidłowego działania tych bardzo szybkich zabezpieczeń. Stąd istnieje potrzeba zbadania warunków w jakich mogą powstawać składowe swobodne w napięciu pierwotnym. W opublikowanych pracach dotyczących zachowania się zabezpieczeń w czasie procesów przejściowych pominięto dotychczas pojemności poprzeczne linii, co w konsekwencji doprowadzało do zastąpienia układu elektroenergetycznego obwodem zwarciowym złożonym z elementów R, L [1], [2], [3] w którym składowe swobodne napięcia i prądy mają charakter nieokresowy.

W niniejszym opracowaniu dokonano jakościowej i ilościowej analizy wpływu pojemności poprzecznej linii przesyłowych na charakter składowych swobodnych napięć ze szczególnym uwzględnieniem składowej oscylacyjnej. Ustalono przy tym możliwy zakres zmian takich wielkości jak:

- szczytowe wartości składowej oscylacyjnej;
- stałe czasowe zanikania składowych oscylacyjnych;
- częstotliwość przebiegów oscylacyjnych.

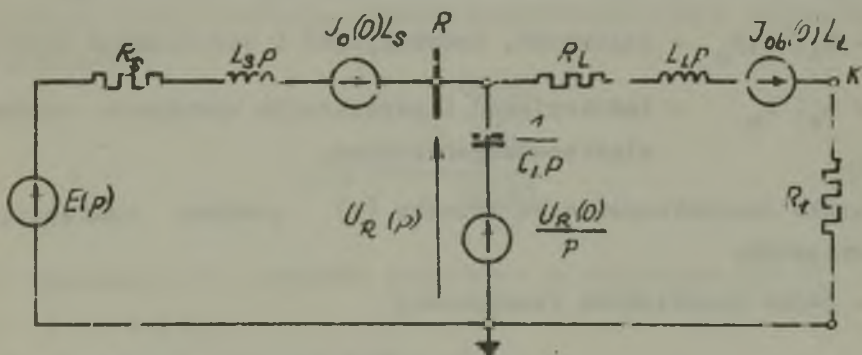
Badania wyznaczające napięcie w punkcie zabezpieczeniowym

Analizę kształtowania się wartości składowej swobodnej oscylacyjnej napięcia przeprowadzono dla trójfazowego zwarcia symetrycznego w układzie, podanym na rys. 1. Założono, że bezpośrednio przed wystąpieniem zwarcia w punkcie K linia była obciążona. Rozpatrywaną linię zastąpiono czwórnikami typu Γ , przy czym skupioną pojemność poprzeczną linii przyłączono na początku linii.



Rys. 1. Schemat zastępczy układu dla warunków przed wystąpieniem zwarcia

Na podstawie schematu zastępczego układu podanego na rys. 2 aktualnego dla warunków bezpośrednio po wystąpieniu zwarcia, o-



Rys. 2. Schemat zastępczy układu dla warunków bezpośrednio po wystąpieniu zwarcia

trzymano następujące równanie operatorowe, opisujące napięcie w punkcie zabezpieczeniowym R :

$$U_R(p) = \frac{Z_L(p)}{Z(p)} E(p) + \frac{I_0(0)L_s Z_L(p) - I_{ob}(0)L_L Z_s(p) + U_R(0)C_1 Z_s(p)Z_L(p)}{Z(p)} \quad (1)$$

przy czym

$$Z(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 \quad (2)$$

$$a_3 = C_L L_L L_S$$

$$a_2 = C_L L_L R_S + C_L L_S R_L$$

$$a_1 = L_L + L_S + C_L R_S R_L$$

$$a_0 = R_S + R_L$$

W powyższych wzorach zastosowano następujące oznaczenia:

- C_L, L_L, R_L - pojemność, indukcyjność i rezystancja linii,
- L_S, R_S - indukcyjność i rezystancja zastępcza systemu elektroenergetycznego.

Równanie charakterystyczne związku (1) posiada następujące pierwiastki:

- jeden pierwiastek rzeczywisty

$$p_1 = - \frac{R_L + R_S}{L_L + L_S} = - \frac{1}{T_L}$$

gdzie: T_L - stała czasowa linii;

- jedną parę pierwiastków zespolonych sprzężonych

$$p_{2,3} = - \delta \pm j\omega_0$$

Część urojona pierwiastków zespolonych sprzężonych, oznaczona przez ω_0 stanowi pulsację drgań własnych obwodu zwarciovego. Wartość ta, wyznaczona z równania (2) przez skreślenie wszystkich członów zawierających rezystancje [4] ma postać

$$\omega_0^2 = \frac{L_L + L_S}{C_L L_L L_S} = \omega^2 \frac{X_1 X_C}{X_L X_S} \quad (3)$$

przy czym:

X_S, X_L - reaktancje indukcyjne systemu i linii;

$X_1 = X_L + X_S$ - reaktancja całego obwodu zwarciovego

Część rzeczywistą pierwiastków sprzężonych, oznaczoną przez δ , będącą stałą tłumienia obwodu zwarciovego można wyznaczyć z zależności:

$$\delta = \frac{\sum_i R_i \frac{\partial Z(p)}{\partial R_i}}{\frac{\partial Z(p)}{\partial p}} \quad (4)$$

W wyrażeniu (4) pochodne cząstkowe są obliczone dla $R_i = 0$ i $p = j\omega_0$.

W rozważanym układzie mamy

$$R_i = (R_L; R_S)$$

Obliczając pochodne cząstkowe przy $R_i = 0$ i $p = j\omega_0$ otrzymamy następującą zależność na stałą tłumienia:

$$\delta = \frac{R_L \frac{L_S}{L_L} + R_S \frac{L_L}{L_S}}{2(L_S + L_L)} = \frac{1}{2X_1} \left(\frac{X_S}{T_L} + \frac{X_L}{T_S} \right), \quad (5)$$

przy czym T_S - stała czasowa systemu.

Oryginał napięcia znajdziemy na podstawie znanego przekształcenia odwrotnego Laplace'a

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{N(p)}{D(p)} \right] = \sum_k \frac{N(p_k)}{D'(p_k)} \exp(p_k t) + 2 \sum_{\xi} \operatorname{Re} \left[\frac{N(p_k)}{D'(p_k)} \exp(p_k t) \right] \quad (6)$$

We wzorze tym pierwsza suma (względem k) obejmuje wszystkie pierwiastki rzeczywiste mianownika $D(p)$. Druga suma (względem ξ) dotyczy pierwiastków zespolonych, przy czym obejmuje ona po jednym pierwiastku z każdej pary pierwiastków zespolonych sprzężonych.

Rozwiązanie równania (1) według przekształcenia (6) można przedstawić w postaci uproszczonej za pomocą zależności

$$u_R = A_w \sin(\omega t + \alpha) + A_{sn} \exp\left(-\frac{t}{T_L}\right) + A_{so} \exp\left(-\frac{t}{T_{so}}\right) \sin(\omega_0 t + \mu) \quad (7)$$

przy czym

A_w - amplituda napięcia wymuszonego,

A_{sn} - szczytowa wartość składowej nieokresowej napięcia,

A_{so} - szczytowa wartość składowej oscylacyjnej napięcia,

$T_{so} = \frac{1}{\delta}$ - stała czasowa zanikania składowej oscylacyjnej napięcia,

Jak wynika z równania (7), w przypadku uwzględnienia pojemności poprzecznej linii, napięcie pierwotne w punkcie zabezpieczeniowym zawiera dwa rodzaje składowych swobodnych: składową nieokresową oraz składową oscylacyjną. W niniejszym opracowaniu ograniczono się do analizy kształtowania się charakterystycznych wielkości dotyczących składowej oscylacyjnej napięcia.

Ocena ilościowa składowej oscylacyjnej napięcia

Ocena ilościowa składowej oscylacyjnej napięcia dotyczy następujących wielkości:

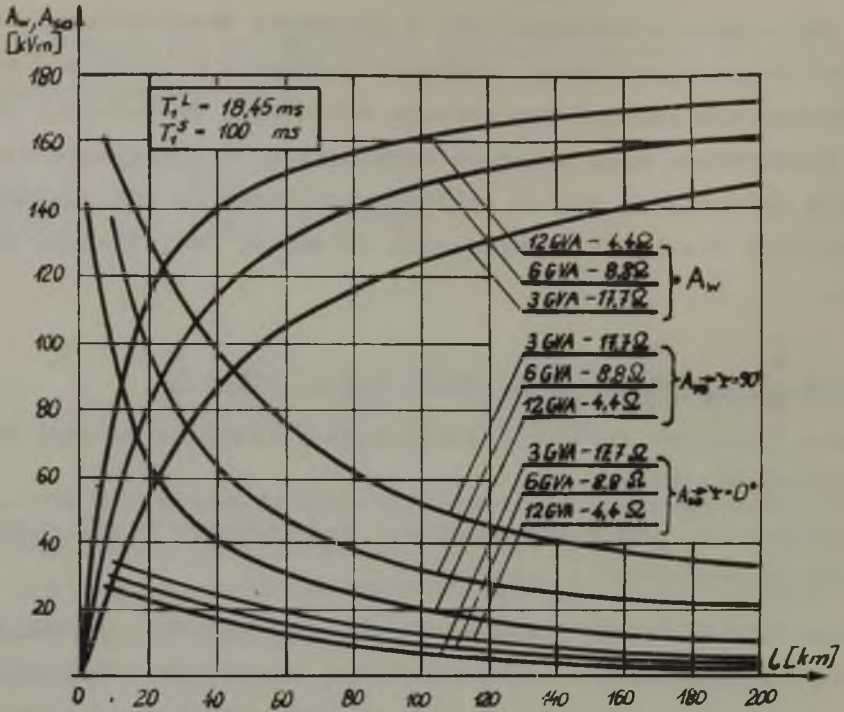
- maksymalnej amplitudy składowej oscylacyjnej w zależności od chwili wystąpienia zwarcia;
- wartości pulsacji drgań własnych ω_0 obwodu zwarciovego, ściśle związanej z częstotliwością przebiegów oscylacyjnych;
- wartości stałej tłumienia δ składowej oscylacyjnej;

Ponadto interesująca jest współzależność składowej oscylacyjnej i składowej wymuszonej.

Kształtowanie się wymienionych wielkości przeanalizowano w zależności od lokalizacji miejsca zwarcia i zastępczej impedancji systemu elektroenergetycznego.

Na rys. 3 przedstawiono wykresy podające zależność szczytowych wartości składowych oscylacyjnych od miejsca zwarcia na linii 220 kV oraz od chwili wystąpienia zwarcia. Wykresy opracowano dla różnych wartości mocy zwarcia trójfazowego w punkcie zabezpieczeniowym R.

Z analizy charakterystyk wynika, że maksymalne amplitudy składowej oscylacyjnej tłumionej zależą w głównej mierze od chwili wystąpienia zwarcia; gdy zwarcie występuje przy $\psi = 90^\circ$, amplitudy są największe i dla konkretnego układu zależą głów-



Rys. 3. Maksymalne wartości składowych napięcia w punkcie przekąźnikowym dla zwarcia trójfazowego

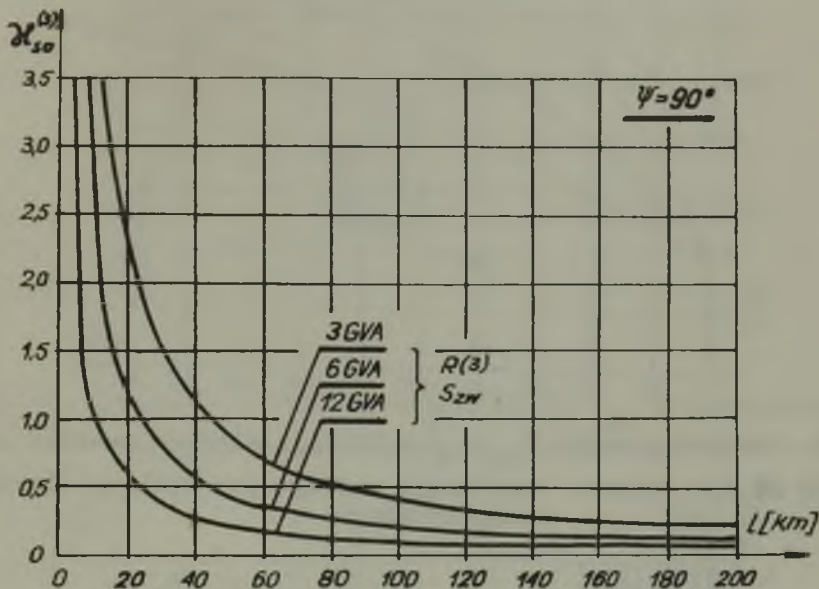
A_w - składowa wymuszona, A_{so} - składowa oscylacyjna

nie od impedancji zastępczej systemu i miejsca zwarcia. Z dużymi wartościami amplitud należy się liczyć przede wszystkim przy stosunkowo małych mscach zwarciovych, równoznacznych z dużymi impedancjami zastępczymi systemu.

Wprowadzając do rozważań wielkość zwaną współczynnikiem zaburzeniowym \mathcal{K}_{so} , określony zależnością

$$\mathcal{K}_{so} = \frac{A_{so}}{A_w}, \quad (8)$$

można ocenić udział składowej oscylacyjnej w napięciu wymuszonym. Na rys. 4 podano graficzny przebieg wyrażenia (8) w zależności od położenia punktu zwarcia w analizowanej linii 220 kV.



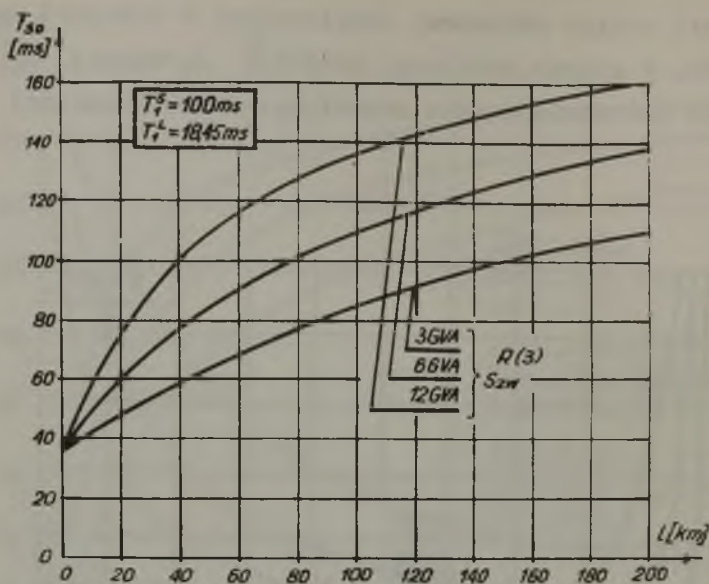
Rys. 4. Zależność χ_{so} w funkcji miejsca zwarcia w linii 220 kV

Drugą interesującą wielkością charakterystyczną jest stała tłumienia przebiegu oscylacyjnego δ . Na rys. 5 podano charakterystyki, obrazujące kształtowanie się stałej czasowej zanikania tej składowej – będącej odwrotnością stałej tłumienia – w przypadku zwarc bezpośrednich.

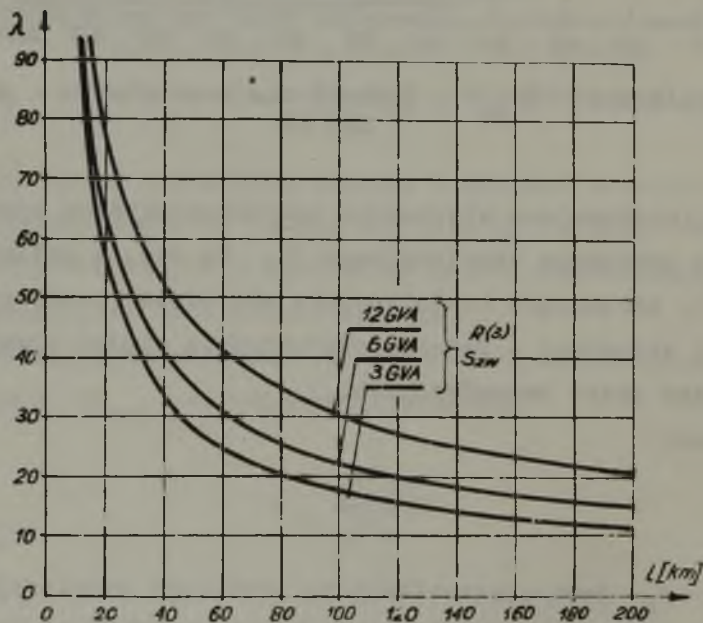
Stosunek

$$\lambda = \frac{f_o}{f_n} \quad (9)$$

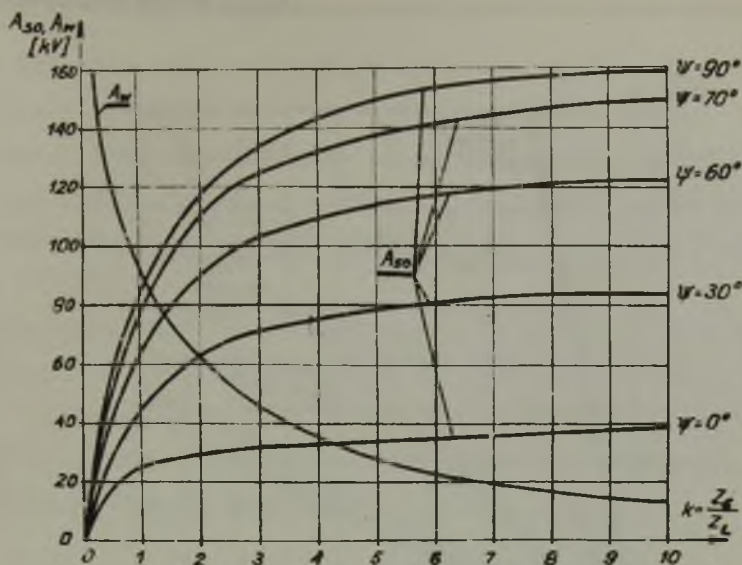
w którym f_o jest częstotliwością przebiegu oscylacyjnego a f_n częstotliwością podstawową napięcia, zmienia się w rozwa-



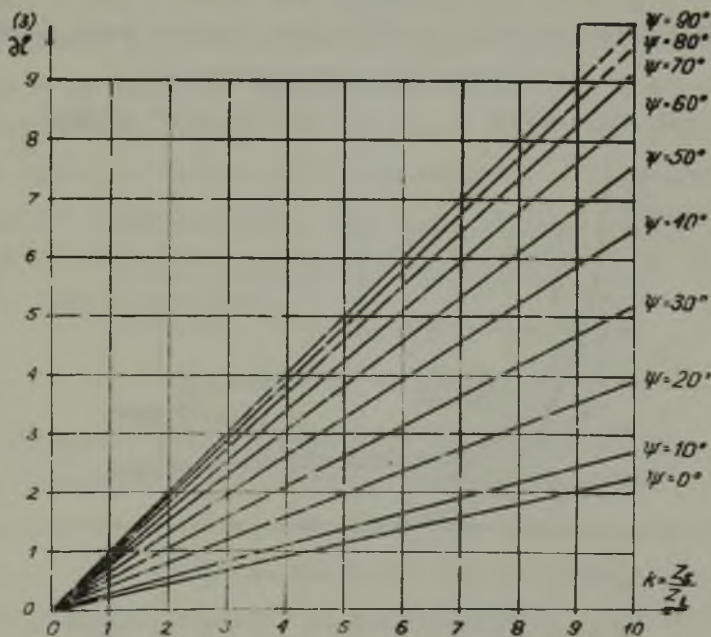
Rys. 5. Charakterystyki $T_{so} = \frac{1}{\delta}$ w funkcji miejsca zwarcia w linii 220 kV dla różnych impedancji zastępczych systemu elektroenergetycznego



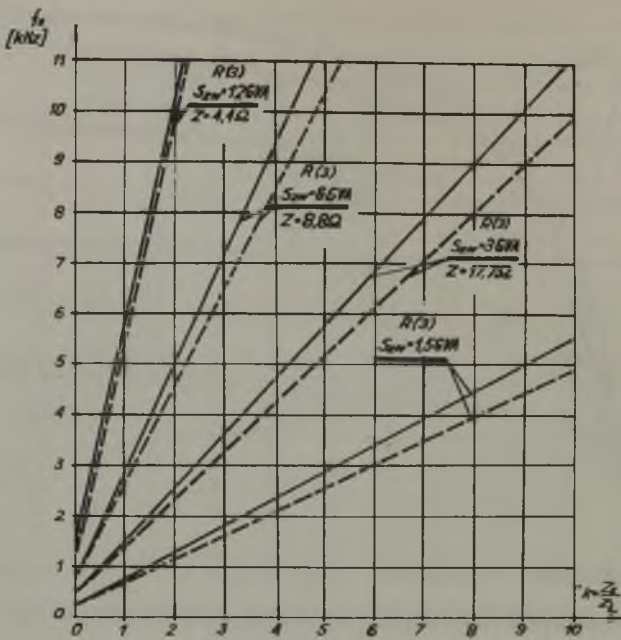
Rys. 6. Przebieg funkcji $\lambda = f(l)$ w linii 220 kV



Rys. 7. Zależność składowej oscylacyjnej A_{SO} i wymuszonej A_W napięcia od współczynnika systemowego K

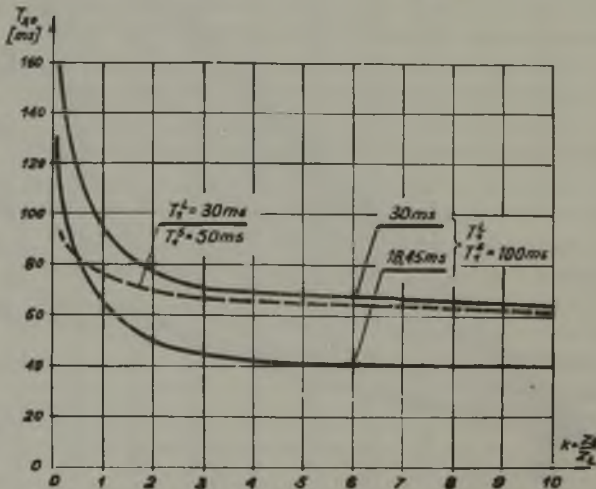


Rys. 8. Charakterystyki $X_{SO} = f(k)$ dla różnych wartości argumentu



Rys. 9. Charakterystyki $f_0 = F(k)$ dla różnych mocy zwarciovych w punkcie przekąźnikowym

— $C_L = 9 \text{ nF/km}$ - - - $C_L = 11 \text{ nF/km}$



Rys. 10. Charakterystyka $T_{50} = f(k)$ dla różnych stałych czasowych linii i systemu

zanym układzie według krzywych podanych na rys. 6. Z podanych charakterystyk wynika, że zwarciom w pobliżu punktu zabezpieczeniowego towarzyszą przebiegi oscylacyjne o dużych częstotliwościach rzędu 11 kHz, natomiast w przypadku zwarć na końcu rozpatrywanej linii należy się liczyć z częstotliwościami rzędu 300 Hz.

Dotychczasowe rozważania prowadzone były dla konkretnej linii. Wszystkie wielkości mające związek ze składową swobodną oscylacyjną napięcia były podawane bezpośrednio w funkcji odległości miejsca zwarcia od punktu zabezpieczeniowego, a więc pośrednio w funkcji stosunku

$$k = \frac{Z_S}{Z_L}, \quad (10)$$

w którym k nosi nazwę współczynnika systemowego. Rozważania nad ilościowym kształtowaniem się interesujących nas wielkości związanych ze składową oscylacyjną napięcia w warunkach zwarcia trójfazowego, można więc uogólnić, przedstawiając te wielkości w funkcji współczynnika systemowego k . Odpowiednie charakterystyki podano na rys. rys. 7,8,9 i 10. Charakterystyki $f_0 = F(k)$, przedstawione na rys. 9 otrzymano przy założeniu, że linia jest jednotorowa.

Wnioski

Wpływ pojemności linii najwyższych napięć na procesy przejściowe w warunkach zwarciovych wyraża się zawartością w napięciu pierwotnym składowej swobodnej oscylacyjnej tłumionej. Stała czasowa zanikania oraz częstotliwość przebiegu oscylacyjnego zależą głównie od wartości współczynnika systemowego k ; szczytowa wartość składowej oscylacyjnej zależy ponadto od chwili wystąpienia zwarcia.

Z przeprowadzonej analizy wynika istotny - z punktu widzenia praktycznego wykorzystania wyników - wniosek, iż wartość współczynnika zaburzeniowego \mathcal{K}_{SO} nie zależy ani od wartości pojemności poprzecznej linii ani od stopnia obciążenia wstępnego linii bezpośrednio przed wystąpieniem zwarcia. Znając zatem wartość współczynnika systemowego k dla dowolnego układu można określić wartość współczynnika \mathcal{K}_{SO} na podstawie charakterystyk z rys. 8. Znajomość wartości \mathcal{K}_{SO} oraz szczytowej wartości składowej wymuszonej A_w pozwala na otrzymanie szczytowej wartości składowej oscylacyjnej A_{SO} . Nie trzeba więc przeprowadzać żmudnych obliczeń na podstawie złożonych wzorów, wystarczy znajomość wartości A_w , która dla trójfazowych zwarcí bezpośrednich została podana na rys. 7.

Przeprowadzone na modelu jednofazowym linii 400 kV badania wykazały dużą zbieżność z przedstawionymi w niniejszym opracowaniu wynikami analizy teoretycznej.

LITERATURA

- [1] Lewis D.W.: Effect of Transients on EHV protection. Electrical Times t. 151, 1967 r.
- [2] Matlews P., Nellist B.D.: Transient in distance protection Proceedings IEE nr 2 1963 r.
- [3] Żydanowicz J.: Wpływ składowej nieokresowej prądu zwarciowego na komparatory fazowe koincydencyjne do zabezpieczeń odległościowych. Archiwum Elektrotechniki, tom XVIII, zeszyt 2 1969, str. 347-362.
- [4] Winkler W.: Przenoszenie sygnału napięciowego przez pojemnościowe przekładniki napięciowe w warunkach zwarciowych linii najwyższych napięć. Praca doktorska. Politechnika Śląska r. 1969.

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТИ ЛИНИЙ ВЕРХОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ХАРАКТЕР
И РАЗМЕРЫ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ СМОНТИРОВАНИЯ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Р е з ю м е

Выведено уравнение, описывающее напряжение переходных процессов в точке смонтирования защиты. Исследовано диапазон ожидаемых значений осцилляционных составляющих в напряжении в случае симметрических трёхфазных коротких замыканий. Определены значения наиболее интересных величин осцилляционных составляющих для линии 220 кВ и 400 кВ.

INFLUENCE OF THE CAPACITANCE OF THE HIGHEST VOLTAGE LINES
ON THE NATURE AND MAGNITUDE OF SWING COMPONENTS IN THE
RELAY POINT VOLTAGE

S u m m a r y

The formulae determining the voltage on the relay point during transients are derived. A survey of the expected values of voltage swing components in case of symmetrical three-phase faults are made. The values of the most interesting quantities of oscillatic components on 220 kV and 400 kV transmission lines are determined.