

W. WINKLER, A. PRZYGRÓDZKI
Katedra Elektroenergetyki
Politechniki Śląskiej

STAŁE CZASOWE ZANIKANIA SKŁADOWYCH NIEÓKRESOWYCH
PRĄDU ZWARCIOWEGO W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

S t r e s z c z e n i e

W pracy dokonano oceny wartości stałych czasowych współczesnych generatorów, transformatorów i linii najwyższych napięć. Przedstawiono sposób obliczania stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu przy zwarciu trójfazowym w złożonych układach elektroenergetycznych. Dokonano oceny błędu w przypadku stosowania metod uproszczonych. Przeanalizowano wpływ niektórych wielkości na kształtowanie się wartości zastępczej stałej czasowej.

1. WSTĘP

Znaczny postęp w konstrukcjach szybko działających przełączników elektroenergetycznych w ostatnich latach, przy jednoczesnym zmniejszaniu się rezystancji uzwojeń generatorów, transformatorów i autotransformatorów dużej mocy oraz przewodów linii przesyłowych, wpłynął na wzrost zainteresowania procesami przejściowymi pochodzenia zwarciovego w układach elektroenergetycznych.

W pierwszej chwili po wystąpieniu zwarcia w prądzie występuje składowa nieokresowa zanikająca ze stałą czasową, której wartość jest zdeterminowana stosunkiem $X:R$ obwodu zwarciovego. Może ona ujemnie wpłynąć zarówno na wierne przenoszenie do obwodu wtórnego sygnału prądowego przez indukcyjne przekładniki prądowe konwencjonalnej budowy, jak i na prawidłowe działanie przełączników o bardzo szybkim działaniu, rzędu 10–60 ms [1][2].

Właściwa ocena stopnia zagrożenia prawidłowej pracy przekładników i przełączników, zainstalowanych w danym węźle układu elektroenergetycznego, zależy m.in. od znajomości wartości stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu zwarciovego przy zwarciu w tym węźle. W niniejszej pracy zestawiono wartości stałych czasowych poszczególnych elementów układu i przedstawiono analityczne metody wyznaczania wartości stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu w przypadku bezpośredniego zwarcia trójfazowego w dowolnym punkcie złożonego układu elektroenergetycznego.

2. STAŁE CZASOWE PODSTAWOWYCH ELEMENTÓW UKŁADU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Stała czasowa zanikania składowej nieokresowej T_a dowolnego elementu układu elektroenergetycznego przy zwarciu trójfazowym jest dana znaną zależnością:

$$T_a = \frac{X}{\omega R}, \quad [s] \quad (1a)$$

gdzie: X i R - reaktancja indukcyjna i rezystancja danego elementu.

Przy założeniu, że częstotliwość $f = 50$ Hz, można stałą czasową wyrazić w milisekundach za pomocą związku:

$$T_a = 3,18 \frac{X}{R} \quad (1b)$$

W praktyce na ogół rzadko operuje się pojęciem stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu, z wyjątkiem nowoczesnych generatorów dużej mocy, dla których wytwórcy m.in. podają jej wartość dla przypadku zwarc trójfazowych na zaciskach wyjściowych a czasami i dla innych rodzajów zwarc. Wydaje się więc celowe przypomnieć w tym miejscu zasadę wyznaczania omawianych stałych czasowych oraz podać przeciętne wartości podstawowych elementów układu elektroenergetycznego do których należą: generatory synchroniczne, transformatory oraz linie napowietrzne. Wartości te zostaną podane dla zwarc trójfazowych.

G e n e r a t o r y

W przypadku braku danych odnośnie stałej czasowej nieokresowej turbogeneratorów za reaktancję indukcyjną X , wchodzącą do wzorów (1a) i (1b), można podstawić wartość obliczoną na podstawie reaktancji przejściowej wstępnej X_d'' [3] zgodnie ze wzorem:

$$X_G = \frac{X_d'' U_n^2}{100 S_n}, \quad (2)$$

przy czym:

X_d'' - wyrażone w %;

U_n - napięcie znamionowe generatora w kV;

S_n - znamionowa moc pozorna w MVA.

Rezystancję uzwojeń stojana R najkorzystniej określić na drodze pomiarowej. Zazwyczaj w elektrowniach zawodowych istnieją dane pomiarowe tej wartości.

Na rys. 1 podano wykres ilustrujący zakres wartości stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu dla turbogeneratorów przy trójfazowym zwarciu metalicznym na wyprowadzeniach, w zależności od mocy znamionowej.

Tablica 1

Stałe czasowe zanikania składowej nieokresowej prądu zwarciovego niektórych turbogeneratorów

Lp.	Typ - Wytwórca Kraj	Moc pozorna S_n	Napięcie znamion. U_n	Stała czasowa $T_a(3)$
-	-	MVA	kV	ms
1	2	3	4	5
1	T209-315 - Alsthom Francja	69	10,5	210
2	SH6383/2 - Skoda CSR	69	10,5	240
3	TW2-100-2 - ZSRR	117,5	13,8	380
4	TGH-120-Dolmel Polska	150	13,8	200

cd. tablicy 1

1	2	3	4	5
5	TGH-120 - Anglia	150	13,8	350
6	Siemens NRF	230	10,5	420
7	TGW-300-2 - ZSRR	353	20	420
8	B.B.C. Szwajcaria	400	brak danych	530
9	"	750	"	630
10	"	800	"	800

W tablicy 1 zestawiono wartości tej stałej dla niektórych typów turbogeneratorów. Jak z zestawienia wynika, jednostki o mocy 400 MVA charakteryzują się już stałymi czasowymi rzędu 500 ms.

Transformatory

Reaktancję indukcyjną transformatorów dwuuzwojeniowych wyznacza się ze znanej zależności:

$$x_T = \frac{U_z U_n^2}{100 S_n} \quad (3)$$

gdzie:

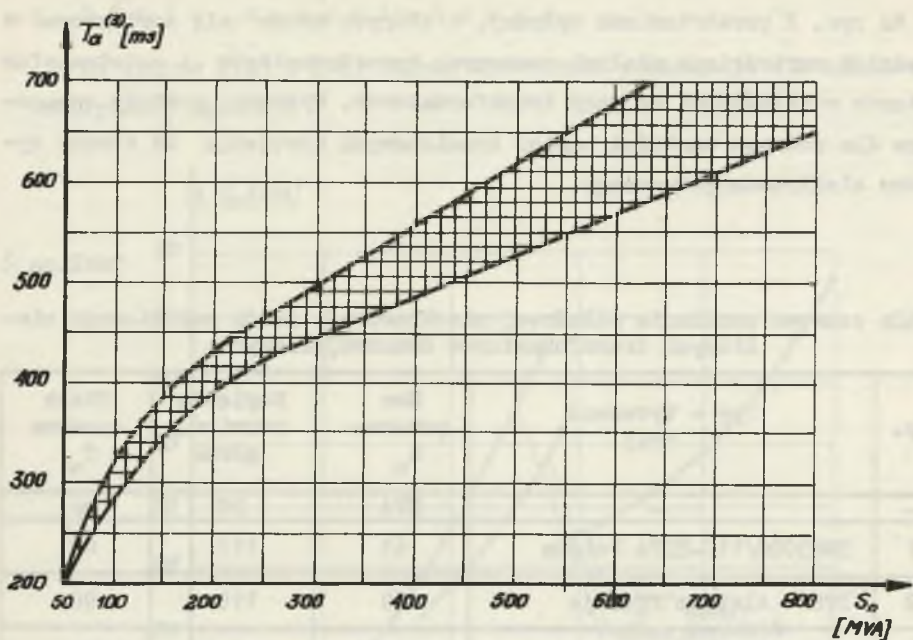
U_z - napięcie zwarcia w %.

Rezystancję uzwojeń transformatorów można określić ze wzoru:

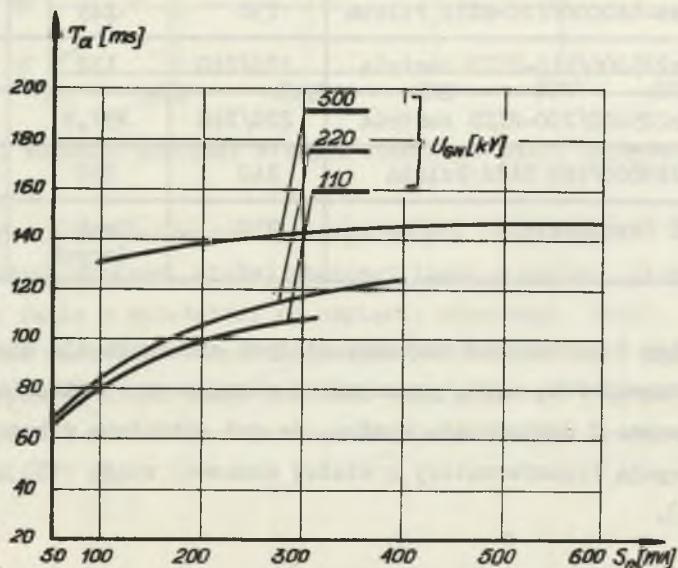
$$R_T = \Delta P_{Cu} \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad (4)$$

przy czym napięcie U_n wyrażone jest w kV, straty obciążeniowe ΔP_{Cu} w kW, a moc znamionowa S_n w MVA.

Podobnie postępuje się przy obliczaniu stałych czasowych transformatorów trójuzwojeniowych, wprowadzając odpowiednie napięcia zwarcia i straty obciążeniowe w zależności od uwzględnionych uzwojeń.



Rys. 1. Zakres wartości stałych czasowych zanikania składowych nieokresowych turbogeneratorów w zależności od mocy znamionowej



Rys. 2. Średnie wartości stałych czasowych transformatorów i auto-transformatorów

Na rys. 2 przedstawiono wykresy, z których można się zorientować w średnich wartościach stałych czasowych transformatorów i autotransformatorów w zależności od mocy transformatorów. Wykresy zostały opracowane dla różnych wartości napięć znamionowych uzwojenia od strony systemu elektroenergetycznego.

Tablica 2

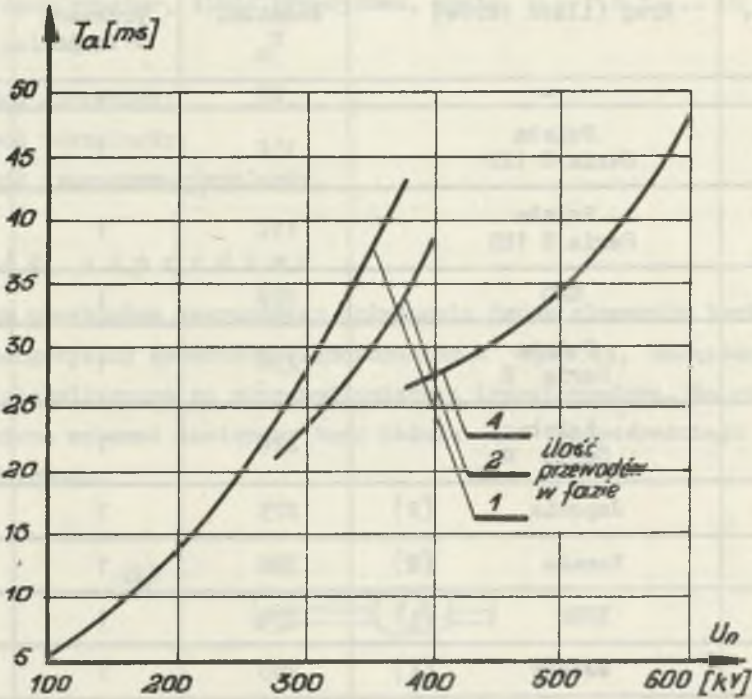
Stałe czasowe zanikania składowej nieokresowej prądu zwarciovego niektórych transformatorów dwuuzwojennowych

Lp.	Typ - Wytwórca Kraj	Moc pozorna S_n	Napięcie znamion. górne	Stała czasowa T_a
-	-	MVA	kV	ms
1	TW63000/110-ELTA Polska	63	110	80
2	DTE - Alstom Francja	69	110	90
3	RTx-160000/110 ELTA Polska	150	110	105
4	Siemens AG NRF	230	110	294
5	RTxa-140000/220-ELTA Polska	130	245	103
6	RTx225000/110-ELIN Austria	220/240	132	135
7	RTx225000/200-ELIN Austria	220/240	257,5	140
8	TW240000/200 ELTA Polska	240	250	133
9	BBC Szwajcaria	750	brak danych	154

W tablicy 2 zestawiono wartości stałych czasowych dla niektórych typów transformatorów, m.in. pracujących w krajowym układzie elektroenergetycznym. Z zestawienia wynika, że już aktualnie w krajowym układzie występują transformatory o stałej czasowej rzędu 130 ms (pozycja 8 tablicy).

Linie n a p o w i e t r z n e

Do wzorów (1a) i (1b) należy wprowadzić reaktancje dla składowej symetrycznej zgodnej.



Rys. 3. Średnie wartości stałych czasowych linii najwyższych napięć

Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki ilustrujące kształtowanie się średnich wartości stałej czasowej linii o różnej ilości przewodów w jednej fazie w zależności od napięcia roboczego linii. W tabelicy 3 zestawiono wartości stałych czasowych niektórych linii napowietrznych, m.in. typowych linii krajowych. Jak widać, linie najwyższych napięć ($U_n \geq 220$ kV) charakteryzują się aktualnie stałymi czasowymi w zakresie 16 ... 73 ms.

Tablica 3

Staże czasowe
niektórych napowietrznych linii elektroenergetycznych

Lp.	Kraj (ilość torów)	Napięcie znamion. U_n kV	Ilość przewod. w fazie	Staża czasowa T_a ms
-	-	kV	-	ms
1	Polska Seria S 120	110	1	5,5
2	Polska Seria S 185	110	1	8,0
3	NRD	220	1	12,15
4	Polska Seria H	220	1	16,4
5	Polska Seria M	220	1	17,6
6	Japonia (2)	275	1	21,8
7	Kanada (2)	300	1	34,7
8	ZSRR (1)	330	1	19,8
9	Włochy (1)	380	1	43,1
10	Japonia (2)	275	2	26,8
11	Australia (1)	330	2	24,1
12	USA (1)	345	2	32,8
13	Włochy (1)	380	2	38
14	Polska Seria F (1)	400	2	30
15	Szwecja (1)	380	3	66
16	ZSRR (1)	525	3	44,1
17	NRF (2)	380	4	27,5
18	Kanada (1)	500	4	30,4
19	Kanada (1)	785	4	73,4

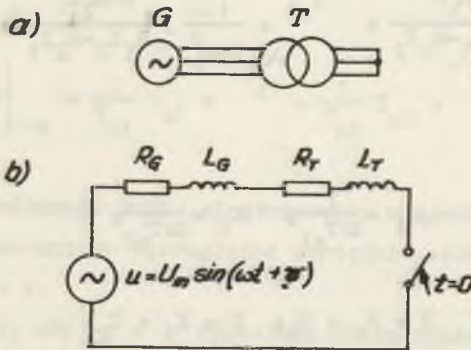
3. STAŁE CZASOWE ZANIKANIA SKŁADOWEJ NIEOKRESOWEJ WYPADKOWEGO PRĄDU ZWARCIOWEGO W OBWODZIE WIELOELEMENTOWYM

W każdym układzie elektroenergetycznym można wyodrębnić trzy elementarne obwody, złożone z n -elementów typu: generator, transformator lub autotransformator, linia przesyłowa, gdzie $n = 1, 2, 3 \dots$. Do obwodów tych należą:

- obwód szeregowy;
- obwód równoległy;
- obwód szeregowo-równoległy.

O b w ó d s z e r e g o w y

Typowym przykładem szeregowego połączenia dwóch elementów jest blok elektroenergetyczny generator-transformator z rys. 4a, załączony na zwarcie, zlokalizowane na wyprowadzeniach z transformatora. Na rys. 4b przedstawiono schemat zastępczy tego układu dla bezpośredniego zwarcia trójfazowego.



Rys. 4. Blok elektroenergetyczny generator-transformator (a) i odpowiadający mu schemat zastępczy (b)

Oryginał prądu zwarciovego po włączeniu SEM $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ wyraża się związkiem:

$$i = I_m \left[\sin(\omega t + \varphi) - \sin \varphi e^{-\frac{t}{T_a}} \right] \quad (5)$$

w którym drugi człon jest składową nieokresową prądu, zanikającą z wypadkową stałą czasową T_a . Stała czasowa spełnia zależności:

$$T_a = \frac{L_G + L_T}{R_G + R_T} \text{ [s]} \quad \text{lub} \quad T_a = 3,18 \frac{X_G + X_T}{R_G + R_T} \text{ [ms]} \quad (6)$$

Praktyczny wzór, na podstawie którego można obliczyć wypadkową stałą czasową w przypadku n - elementów połączonych szeregowo ma postać:

$$T_a = 3,18 \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (7)$$

Obwód równoległy

W obwodzie równoległym, złożonym z dwóch elementów, do którego w chwili $t = 0$ włączono SEM $u = U_m \sin \omega t$, popłynie prąd zawierający składową nieokresową wyrażoną zależnością:

$$i_{aw} = U_m \left(\frac{1}{1 + \alpha_1^2} \cdot \frac{R - \alpha_1 X}{R_2 X_1 - R_1 X_2} e^{-\frac{t}{T_{a1}}} + \frac{1}{1 + \alpha_2^2} \cdot \frac{R - \alpha_2 X}{R_1 X_2 - R_2 X_1} e^{-\frac{t}{T_{a2}}} \right) \quad (8)$$

przy czym:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\omega T_{a1}}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\omega T_{a2}},$$

$$R = R_1 + R_2; \quad X = X_1 + X_2.$$

Wyrażenie (8) można zapisać w uproszczonej postaci:

$$i_{aw} = I_{1a} e^{-\frac{t}{T_{a1}}} + I_{2a} e^{-\frac{t}{T_{a2}}}. \quad (9)$$

W analizowanym obwodzie w prądzie zwarciovym występują więc dwie składowe nieokresowe, zanikające ze stałymi czasowymi T_{a1} i T_{a2} określonymi zależnościami:

$$T_{a1} = 3,18 \frac{X_1}{R_1} \quad \text{i} \quad T_{a2} = 3,18 \frac{X_2}{R_2} \quad [\text{ms}] \quad (10)$$

Im większa jest różnica pomiędzy wartościami stałych czasowych, tym bardziej wypadkowy prąd nieokresowy różni się od przebiegu wykładniczego. W takich warunkach stosowanie pojęcia wypadkowej stałej czasowej dla całego czasu występowania składowych nieokresowych staje się problematyczne. Można natomiast znaleźć stałą czasową dla dowolnej chwili, wykorzystując związek:

$$T_{ax} = \frac{I_{1x} + I_{2x}}{\left. \frac{di_{aw}}{dt} \right|_{t=x}} \quad (11)$$

gdzie:

$$\left. \frac{di_{aw}}{dt} \right|_{t=x} = \frac{1}{T_{a1}} I_{a1} e^{-\frac{t}{T_{a1}}} + \frac{1}{T_{a2}} I_{a2} e^{-\frac{t}{T_{a2}}} \quad (12)$$

jest pochodną wypadkowego prądu nieokresowego w dowolnym czasie $t = x$. Przez I_{1x} , I_{2x} oznaczono bezwzględne wartości składowych nieokresowych w chwili $t = x$.

W szczególności, gdy $x = 0$ wypadkowa stała czasowa ma postać

$$T_{ao} = \frac{I_{a1} + I_{a2}}{\frac{I_{a1}}{T_{a1}} + \frac{I_{a2}}{T_{a2}}} \quad (13)$$

Dla n - elementów równoległych wypadkowy prąd nieokresowy można opisać równaniem

$$i_{aw} = I_{a1} e^{-\frac{t}{T_{a1}}} + I_{a2} e^{-\frac{t}{T_{a2}}} + \dots + I_{an} e^{-\frac{t}{T_{an}}}, \quad (14)$$

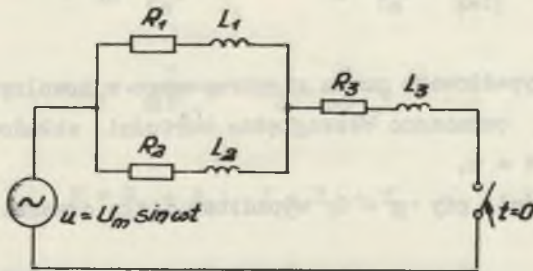
a wypadkową stałą czasową w dowolnej chwili $t = x$ związkiem

$$T_{ax} = \frac{I_{1x} + I_{2x} + \dots + I_{2n}}{\left| \frac{di_{aw}}{dt} \right|_{t=x}} \quad (15)$$

Obwód szeregowo-równoległy

W chwili włączenia do obwodu z rys. 5 siły elektromotorycznej $u = U_m \sin \omega t$ popłynie w nim prąd, zawierający składową nieokresową wypadkową, którą można wyrazić równaniem

$$i_a = U_m \left[\frac{\omega}{p_1^2 + \omega^2} \cdot \frac{R + p_1 L}{p_1 - p_2} e^{-p_1 t} + \frac{\omega}{p_2^2 + \omega^2} \cdot \frac{R + p_2 L}{p_2 - p_1} e^{-p_2 t} \right] \quad (16)$$



Rys. 5. Obwód szeregowo-równoległy trzech elementów układu elektroenergetycznego

Stałe czasowe składowych nieokresowych z ostatniej zależności można określić z następujących związków:

$$T_{a1} = -\frac{1}{p_1} = \frac{2A}{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}, \quad (17a)$$

$$T_{a2} = -\frac{1}{p_2} = -\frac{2A}{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}, \quad (17b)$$

w których oznaczono:

$$A = L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3,$$

$$B = L_1(R_2 + R_3) + L_2(R_1 + R_3) + L_3(R_1 + R_2), \quad (18)$$

$$C = R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3.$$

Również w tym przypadku, gdy $T_{a1} = T_{a2}$ ustalenie jednej wartości wypadkowej stałej czasowej dla całego czasu trwania stanu nieustalonego jest niemożliwe. Znalezienie takiej stałej dla określonej chwili t wiąże się z żmudnymi obliczeniami.

4. STAŁA CZASOWA ZASTĘPCZEGO PRZEBIEGU WYKŁADNICZEGO

Znalezienie wypadkowej stałej czasowej w obwodach równoległych i szeregowo-równoległych metodami omówionymi w poprzednim punkcie stanowi problem niezłatwy, zwłaszcza przy większej ilości elementów połączonych równolegle. Stąd dla praktycznych celów poszukiwano metod, pozwalających w stosunkowo prosty sposób określić przybliżone wartości stałej czasowej wypadkowego przebiegu nieokresowego. Zaproponowane metody [4][5] polegają na zastąpieniu rzeczywistego przebiegu, opisanego równaniem (14), przebiegiem o charakterze wykładniczym, zanikającym ze stałą czasową zastępczą. Wspomniane metody różnią się od siebie sposobem wyznaczania zastępczej stałej czasowej. Mniej złożona i łatwiej-

szą w stosowaniu jest metoda podana w literaturze [5], według której zastępczą stałą czasową określa się ze wzoru

$$T_{az} = 3,18 \frac{X_z}{R_z} \quad [\text{ms}] \quad (19)$$

w którym:

X_z jest zastępczą reaktancją indukcyjną obwodu zwarciovego, obliczoną z wypadkowej impedancji tego obwodu przy założeniu, że wszystkie rezystancje w rozpatrywanym obwodzie są równe zero;

R_z jest rezystancją zastępczą obwodu, obliczoną z impedancji wypadkowej obwodu przy założeniu $\sum X = 0$.

Dla obwodu równoległego, złożonego z dwóch elementów, otrzymuje się w ten sposób:

$$X_z = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \quad i \quad R_z = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Gdy obwód równoległy składa się z n - elementów, wtedy odpowiednie wzory będą miały postać:

$$X_z = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{X_n}}, \quad (21a)$$

oraz

$$R_z = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{R_n}} \quad (21b)$$

Dla układu szeregowo-równoległego z rys. 5 reaktancję i rezystancję zastępczą oblicza się z zależności:

$$X_z = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} + X_3 \quad (22)$$

$$R_z = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

Gdy w obwodzie szeregowo-równoległym znajduje się n -elementów równoległych i k -elementów szeregowych, zależności (22) przyjmują postać:

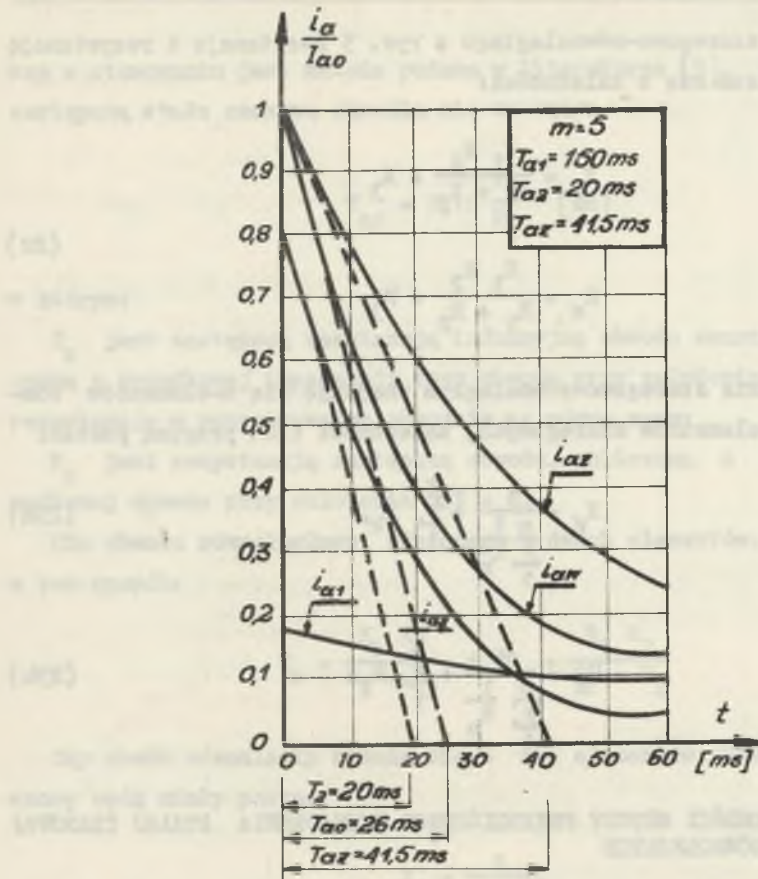
$$X_z = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{X_n}} + \sum_{k=1}^k X_k \quad (23a)$$

$$R_z = \frac{1}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{R_n}} + \sum_{k=1}^k R_k \quad (23b)$$

5. OCENA DOKŁADNOŚCI METODY PRZYBLIŻONEGO WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ W OBWODACH RÓWNOLEGLYCH

Stosowanie w obliczeniach metod uproszczonych zawsze wiąże się z pewnymi różnicami w wynikach uzyskanych metodami dokładnymi i przybliżonymi. Rezygnując z przeprowadzenia wyczerpującej analizy ilościowej dla większej ilości kombinacji obwodów równoległych czy szeregowo-równoległych, zwrócimy uwagę na pewne czynniki rzutujące na stopień dokładności przedstawionej metody.

Do analizy przyjęto obwód równoległy złożony z dwóch elementów, z których pierwszy charakteryzuje się stałą czasową $T_{a1} = 150$ ms (np. blok elektroenergetyczny dużej mocy), stała czasowa drugiego elementu natomiast wynosi $T_{a2} = 20$ ms (np. linia 220 kV). W pierwszym etapie analizy założono, że stosunek impedancji pierwszego elementu Z_1 do impedancji drugiego elementu Z_2 , oznaczony przez "m" wynosi 5.

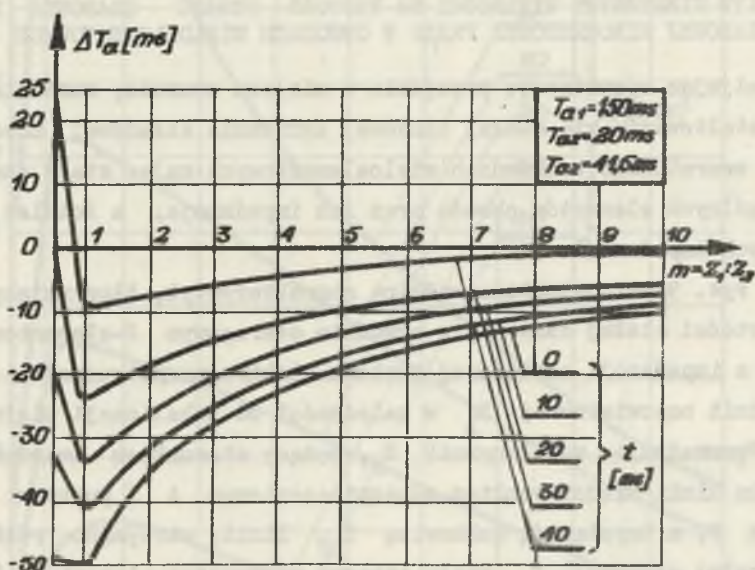


Rys. 6. Przebiegi składowych nieokresowych prądu zwarciego w obwodzie równoległym o $n = 2$

Na rys. 6 przedstawiono w sposób wykreślny wyniki obliczeń. Wypadkowa składowa nieokresowa prądu zwarciego i_{aw} składa się z dwóch przebiegów: z prądu i_{a1} , płynącego przez element pierwszy oraz z prądu i_{a2} przepływającego przez element drugi. Prąd i_{az} jest prądem zastępczym analizowanego układu, zanikającym ze stałą czasową zastępczą $T_{az} = 41,5$ ms, określoną z zależności (19) i (20). Prąd wypadkowy i_{aw} w każdej chwili posiada inną stałą czasową T_{ax} ; w chwili $t = 0$ stała ta wynosi $T_{a0} = 26$ ms.

Z porównania bezwzględnych wartości prądu i_{aw} , obliczonego metodą dokładną oraz prądu zastępczego i_{az} , określonego metodą przybliżoną wynika, że wartość tego ostatniego jest zawyżona (maksymalna różnica wynosi około 50%). To samo dotyczy wartości składowych nieokresowych T_{ax} i T_{az} .

Chcąc ocenić różnicę w wartościach stałych czasowych w różnych chwilach dla różnych wartości współczynnika m , przy $T_{a1} = \text{const}$ i $T_{a2} = \text{const}$, opracowano odpowiednie charakterystyki.



Rys. 7. Charakterystyki $\Delta T_a = f(m)$ przy $T_{a1} = 150 \text{ ms}$ i $T_{a2} = 20 \text{ ms}$ dla różnych czasów t

Na rys. 7 przedstawiono rodzinę charakterystyk $\Delta T_a = f(m)$, gdzie:

$$\Delta T_a = T_{az} - T_{ax} \quad (24)$$

Z wykresów wynika, że największa rozbieżność w wynikach wystąpi, gdy $m = 1$, tzn. $Z_1 = Z_2$. W miarę wzrostu wartości tego współczynnika błąd

obliczeniowy maleje. Dla wybranych wartości stałych czasowych T_{a1} i T_{a2} można ponadto wnioskować, że przy określonym stosunku $Z_1:Z_2$ wartość ΔT_a zmniejsza się z upływem czasu.

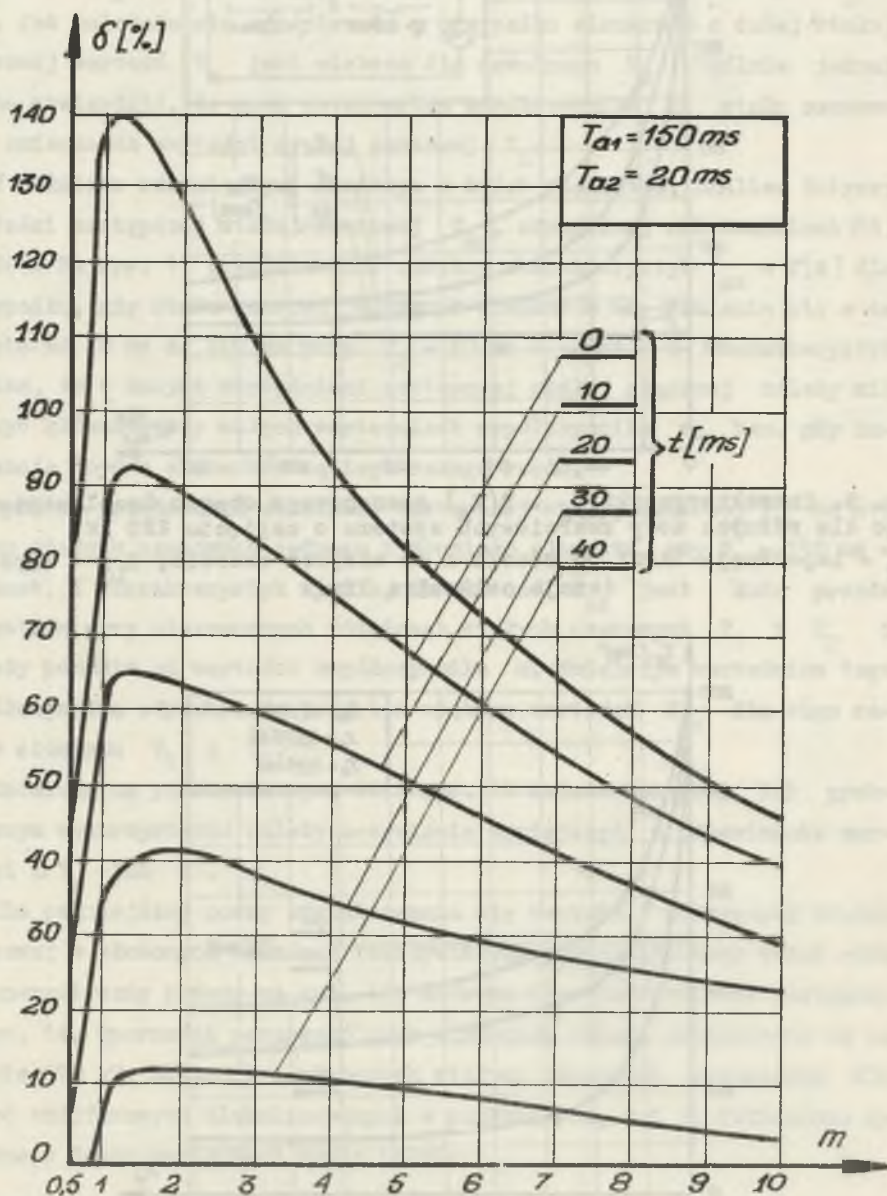
Na rys. 8 przedstawiono rodzinę charakterystyk, odpowiadających wartości procentowej różnicy δ w funkcji współczynnika m dla $t = 0 \dots 40$ ms. Współczynnik δ spełnia w tym przypadku zależność:

$$\delta = \frac{T_a}{T_{az}} \cdot 100\% \quad (25)$$

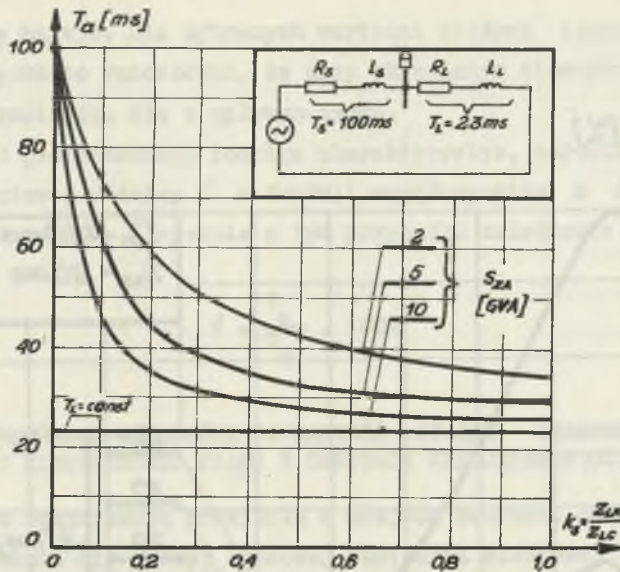
6. WPŁYW NIEKTÓRYCH WIELKOŚCI NA WARTOŚĆ STAŁEJ CZASOWEJ ZANIKANIA SKŁADOWEJ NIEOKRESOWEJ PRĄDU W OBWODACH WIELOELEMENTOWYCH

Pomijając rezystancję przejścia w miejscu zwarcia, zasadniczy wpływ na kształtowanie się stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu zwarciovego w obwodach wieloelementowych mają: stałe czasowe poszczególnych elementów obwodu oraz ich impedancja, a ściślej - stosunek tych impedancji.

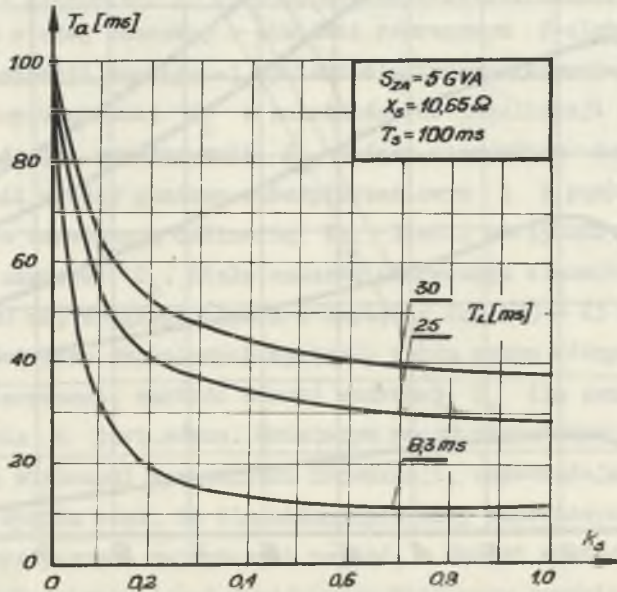
Na rys. 9 przedstawiono rodzinę charakterystyk, ilustrujących zmianę wartości stałej czasowej w obwodzie szeregowym 2-elementowym, złożonym z impedancji zastępczej systemu elektroenergetycznego i impedancji linii napowietrznej Z_L w zależności od lokalizacji miejsca zwarcia. Wprowadzając współczynnik K_s , będący stosunkiem impedancji Z_{AK} odcinka linii między punktem zabezpieczeniowym A i punktem zakłóceniu K, a impedancją całkowitą Z_{LC} linii, otrzymano różne wartości stałej czasowej T_a . Stałe czasowe pierwszego elementu (systemu) przyjęto 100 ms, drugiego (linii o napięciu 220 kV) - 23 ms. Dla różnych wartości mocy zwarciovych systemu, a tym samym różnych impedancji elementu pierwszego, wartość stałej czasowej T_a dla zwarcia w tym samym punkcie K jest różna. Mniejszymi mocami zwarciovymi, charakteryzującym się większymi wartościami impedancji, odpowiadają większe wartości T_a . Wynika stąd, że dla aktualnych mocy zwarciovych w układach elektroenergetycznych najwyższych napięć, z dużymi wartościami stałych czasowych należy się liczyć przede wszystkim przy zwarciach bliskich.



Rys. 8. Charakterystyki $\delta = f(m)$ przy $T_{a1} = 150$ ms i $T_{a2} = 20$ ms dla różnych czasów t



Rys. 9. Charakterystyki $T_a = f(K_s)$ szeregowego obwodu dwuelementowego dla różnych mocy zwarciowych systemu o napięciu 220 kV, Z_{LK} - impedancja linii od stacji A do miejsca zwarcia; Z_{LC} - impedancja całkowita linii



Rys. 10. Charakterystyki $T_a = f(K_s)$ szeregowego obwodu dwuelementowego dla $T_S = \text{const}$ i $X_S = \text{const}$, $T_L = \text{var}$.

Wpływ wartości stałych czasowych elementów obwodu uwidacznia się na rys. 10, na którym podano charakterystyki $T_a = f(K_S)$ dla $T_S = 100\text{ms} = \text{const}$ i $X_S = \text{const}$ przy różnych wartościach stałych czasowych T_L linii. Jak należało się spodziewać, w przypadku elementów o dużej stałej czasowej wartość T_a jest większa dla dowolnego K_S . Ogólnie jednak można stwierdzić, że wraz ze wzrostem współczynnika K_S stała czasowa T_a zmierza do wartości stałej czasowej T_L .

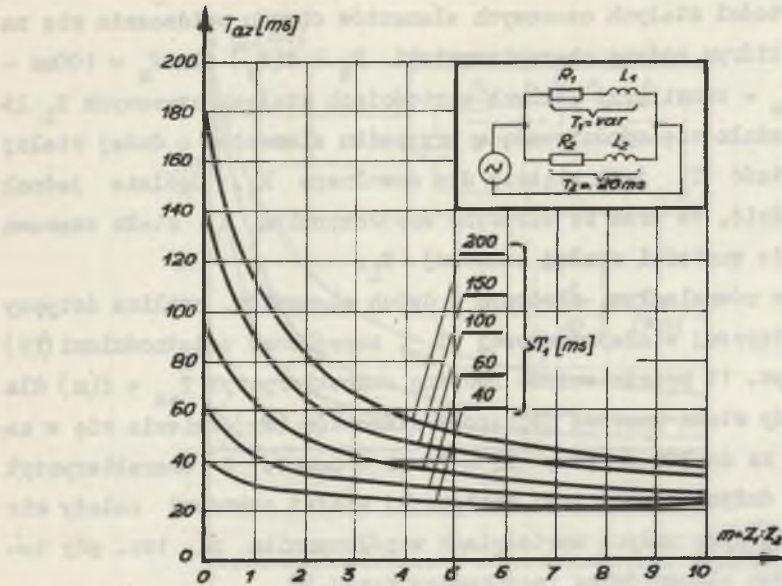
W układzie równoległym, złożonym z dwóch elementów, analiza dotyczy wartości zastępczej stałej czasowej T_{az} , określonej zależnościami (19) i (20). Na rys. 11 przedstawiono rodzinę charakterystyk $T_{az} = f(m)$ dla przypadku, gdy stała czasowa jednego z elementów (T_1) zmienia się w zakresie od 40 ms do 200 ms przy $T_2 = 20\text{ms} = \text{const}$. Z charakterystyk wynika, że z dużymi wartościami zastępczej stałej czasowej należy się liczyć głównie przy małych wartościach współczynnika m , tzn. gdy impedancje obydwu elementów są tego samego rzędu.

Rys. 12 przedstawia zależność zastępczej stałej czasowej T_{az} od stosunku stałych czasowych jednego i drugiego elementu, gdy $T_1 = 150\text{ms} = \text{const}$. Z charakterystyk wynika, że wartość T_{az} jest duża przede wszystkim przy nieznaczących różnicach stałych czasowych T_1 i T_2 i zależy ponadto od wartości współczynnika m . Mniejszym wartościom tego współczynnika odpowiadają przy tym większe wartości T_{az} dla tego samego stosunku T_1 i T_2 .

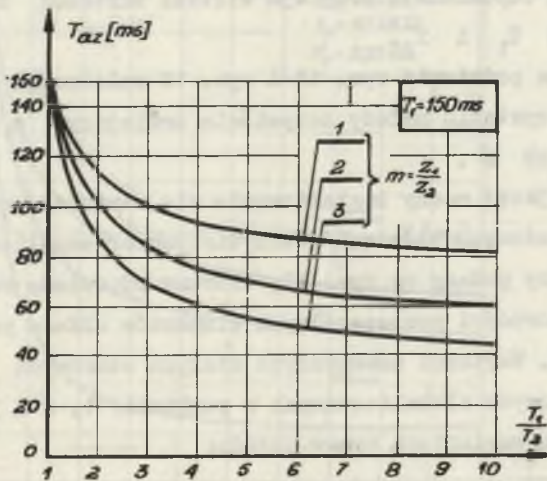
Omówione na podstawie rys. 11 i rys. 12 zależności przy ich praktycznym wykorzystaniu należy oczywiście zmniejszyć o odpowiednie wartości ΔT_a lub δ .

Dla pełniejszej oceny kształtowania się wartości zastępczej stałej czasowej w złożonych układach rzeczywistych przeanalizowano układ elektroenergetyczny podany na rys. 13, któremu odpowiada schemat zastępczy z rys. 14. Oporności poszczególnych elementów układu przeliczono na napięcie 110 kV. Wartości zastępczych stałych czasowych wyznaczono dla zwarć trójfazowych zlokalizowanych w punktach: 1, 2 i 3. Obliczenia wykonano w dwóch wariantach pracy układu:

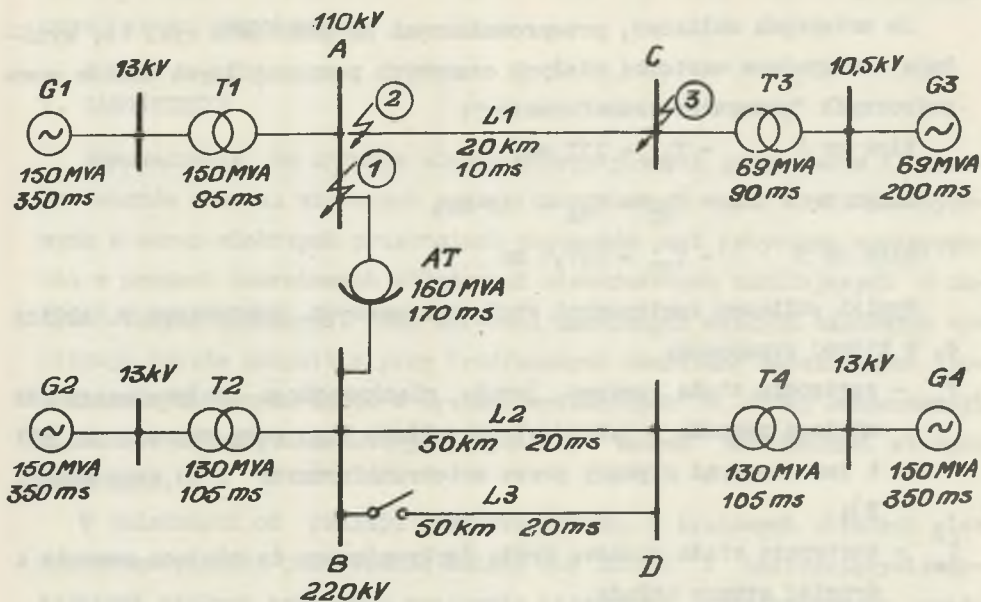
- a) przy wyłączonej linii L3 w stacji B;
- b) gdy linia L3 jest załączona.



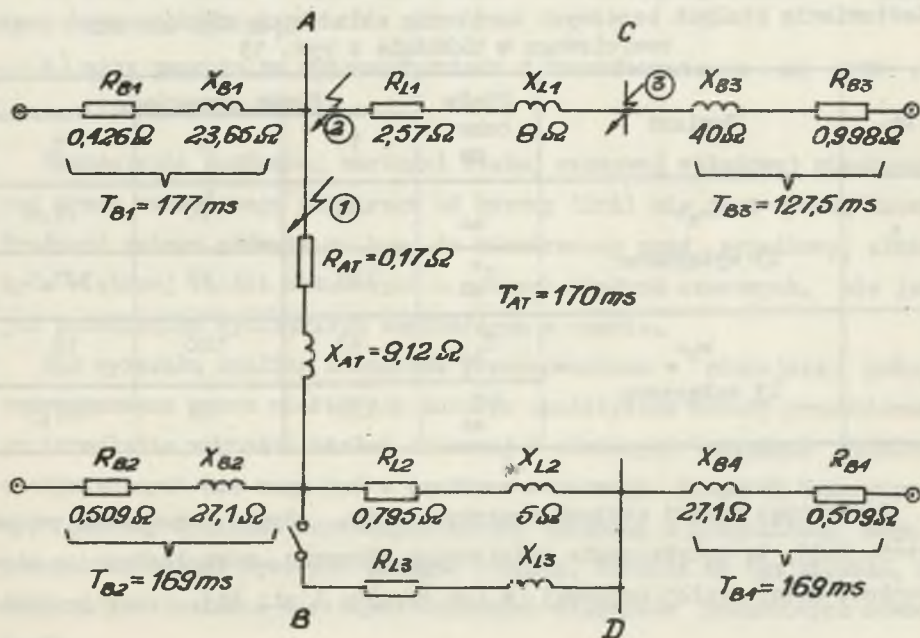
Rys. 11. Charakterystyki $T_{az} = f(m)$ dla $T_1 = \text{var}$ i $T_2 = \text{const}$



Rys. 12. Zależność zastępczej stałej czasowej T_{az} od stosunku $T_1:T_2$ przy $T_1 = 150 \text{ ms} = \text{const}$



Rys. 13. Schemat ideowy układu elektroenergetycznego



Rys. 14. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego z rys. 13

Ze wstępnych obliczeń, przeprowadzonych na podstawie rys. 14, wynikają następujące wartości stałych czasowych poszczególnych bloków energetycznych "generator-transformator":

$$\text{blok nr 1} \quad - T_{B1} = 177 \text{ ms,}$$

$$\text{bloki nr 2 i 4} \quad - T_{B2} = T_{B4} = 169 \text{ ms,}$$

$$\text{blok nr 3} \quad - T_{B3} = 127,5 \text{ ms}$$

Wyniki obliczeń zastępczych stałych czasowych zestawiono w tabelicy 4, w której oznaczono:

T'_{az} - zastępcza stała czasowa prądu nieokresowego dopływającego do miejsca zwarcia z jednej strony układu (np. przy zwarciu w pkt 1 jest to prąd płynący przez autotransformator A od szyn stacji B),

T''_{az} - zastępcza stała czasowa prądu dopływającego do miejsca zwarcia z drugiej strony układu.

Tabela 4

Zestawienie stałych czasowych zanikania składowych nieokresowych prądu zwarciovego w układzie z rys. 13

Lp.	Wariant	Stała czas. ms	Punkt zwarciovowy		
			1	2	3
1	"a" L3 wyłączona	T'_{az}	144	160	22,6
		T''_{az}	133	43	127,5
2	"b" L3 załączona	T'_{az}	93	120	18
		T''_{az}	133	43	127,5

Porównując wyniki stałych czasowych dla obydwu wariantów można stwierdzić, że przyłączenie dodatkowego elementu równoległego o stosunkowo małej stałej czasowej (w tym wypadku linii L3), powoduje obni-

żenie wartości zastępczej stałej czasowej zanikania składowej nieokresowej prądu zwarcioowego.

7. ZAKOŃCZENIE

Wprowadzanie do układów elektroenergetycznych generatorów i transformatorów o coraz większych mocach znamionowych oraz linii przesyłowych o coraz większych przekrojach przewodów jest przyczyną występowania w prądach zwarcioowych składowych nieokresowych zanikających z dużymi stałymi czasowymi. Duże wartości omawianych stałych czasowych występują przede wszystkim przy trójfazowych zwarciach metalicznych zlokalizowanych bezpośrednio w węzłach wytwórczych o dużej koncentracji elementów układu, charakteryzujących się dużymi wartościami stałych czasowych.

W zależności od rodzaju elementu układu, w krajowych układach elektroenergetycznych już obecnie należy się liczyć z następującymi wartościami stałych czasowych zanikania składowych nieokresowych prądu zwarcioowego:

- a) przy zwarciu na wyprowadzeniach z turbogeneratorów - rzędu 200 ... 350 ms;
- b) przy zwarciu na wyprowadzeniach z transformatorów od 100 ... 170 ms.

Wyznaczenie dokładnej wartości stałej czasowej składowej nieokresowej prądu zwarcioowego płynącego od strony linii nie jest sprawą łatwą. Trudność polega głównie na tym, że nieokresowy prąd wypadkowy, złożony z większej ilości składowych o różnych stałych czasowych, nie jest już przebiegiem wykładniczo zanikającym w czasie.

Jak wykazała analiza ilościowa przeprowadzona w niniejszej pracy, zaproponowane przez niektórych autorów analityczne metody przybliżonego określania wartości stałej czasowej w złożonych układach elektroenergetycznych nie mogą być w praktyce stosowane w sposób bezkrytyczny. Pomiedzy wynikami uzyskanymi metodą dokładną a przybliżoną mogą w pewnych warunkach wystąpić znaczne różnice. Różnice są tym większe, im większa jest różnica w stałych czasowych elementów połączonych równolegle.

LITERATURA

- [1] Wiszniewski A.: Uchyby dynamiczne zabezpieczeniowych przekładników prądowych. Przegląd Elektrotechniczny 1970 z. 6.
- [2] Żydanowicz J.: Wpływ składowej nieokresowej prądu zwarciovego na komparatory fazowe koincydencyjne do zabezpieczeń odległościowych. Archiwum Elektrotechniki 1969 z. 2.
- [3] Kończykowski S., Bursztyński J.: Podstawy teorii zwarć w układach elektroenergetycznych. PWN Łódź-Warszawa 1960, cz. I.
- [4] Bay H.H., Halama W., Noeller H.H., Zahorka R.: Verhalten von Stromwandlern und Distanzschutzrelais bei Kurzschlussströmen mit Gleichstromglied. ETZ-A 1967, z. 5.
- [5] Uljanow S.A.: Elektromagnitnyje pieredodnyje procesy w električeskich sistemach. Energija 1964.
- [6] Praca zbiorowa: Informator Energetyka, WNT 1969.
- [7] Klooppel F.W., Fiedler H.: Kurzschluss in elektrischen Anlagen. VEB Verlag Technik Berlin 1965.
- [8] Rikh V.N.: Generalised operating characteristics of e.h.v. transmission lines. Proceedings of I.E.E. 1968, z. 6.
- [9] Canay M., Werren L.: Beitrag zum Problem des Abschaltens von asymmetrischen Stosskurzschlussströmen ohne Nulldurchgänge. Brown Boveri Mitteilungen 1970 z. 8/9.

В. ВИНКЛЕР, А. ШИГРОДСКИ
Кафедра Электроэнергетики
Силезского Политехнического Института
Гливице

ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКИХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С о д е р ж а н и е

В работе проведена оценка значений постоянных времени основных элементов электроэнергетической системы: турбогенераторов, трансформаторов и автотрансформаторов, а также линий электропередачи высокого напряжения. Представлены основные выражения, разрешающие определить значения постоянных времени данного элемента. Представлены диаграммы иллюстрирующие формирование средних значений постоянных времени генераторов и трансформаторов в зависимости от их номинальных мощностей. Разработан табличный способ составления значений постоянных времени для некоторых типов вышеуказанных машин.

Из составления вытекает, что наибольшие единицы, работающие в отечественной электроэнергетической системе, характеризуются следующими значениями постоянных времени:

турбогенераторы - 200...350 мсек;
трансформаторы и автотрансформаторы - 100 ... 170 мсек
блоки генератор-трансформатор - 100 ... 170 мсек.

Максимальные актуальные значения постоянных времени элементов очень большой мощности, работающих в электроэнергетических системах других стран, составляют соответственно:

турбогенераторы - от 400 ... 800 мсек;
трансформаторы - от 120 ... 150 мсек;
блоки генератор-трансформатор мощности 750 Мва - 290 мсек.

Постоянные времени воздушных линий напряжением 220 кВ и 400 кВ работающих в отечественной электроэнергетической системе составляют от 12 ... 30 мсек. Наибольшее в мире актуальное значение постоянной времени линии составляет 73,4 мсек. Это канадская линия напряжением 735 кВ Manicougan-Montreal (четыре провода на одну фазу).

Вычисление постоянных времени затухания аperiodических составляющих токов короткого замыкания систем, в состав которых входят многие совместно работающие элементы, это не легкая задача.

В работе представлены способы точного вычисления процесса аperiodической составляющей для трех элементарных цепей: последовательного, параллельного и смешанного соединения элементов электроэнергетической системы. Результаты этих вычислений были сравнены с результатами вычислений приближенным аналитическим методом, предложенным одним из авторов. Как следует из количественного анализа, приближенные методы не всегда могут применяться некритично. Между результатами обоих методов выступает некоторая разница. Разница эта тем больше, чем больше разница в постоянных времени отдельных элементов соединенных параллельно.

В последней части работы приведена оценка влияния некоторых величин на значение постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока двухэлементных цепях, в особенности последовательных и параллельных.

Установлено, что значение постоянной времени замещения зависит от отношения импеданса элементов и их постоянных времени.

ОПИСАНИЕ РИСУНКОВ

- Рис. 1. Пределы значений постоянных времени затухания аperiodических составляющих турбогенераторов в зависимости от их номинальной мощности
- Рис. 2. Средние значения постоянных времени трансформаторов и автотрансформаторов.
- Рис. 3. Средние значения постоянных времени линий высокого напряжения
- Рис. 4. Электроэнергетический блок генератор-трансформатор (а) и соответствующая ему схема замещения (б)
- Рис. 5. Смешанная цепь трех элементов электроэнергетической системы
- Рис. 6. Процесс аperiodических составляющих тока короткого замыкания в параллельной цепи с $n = 2$
- Рис. 7. Характеристики $\Delta T_a = f(m)$ при $T_{a1} = 150$ мсек и $T_{a2} = 20$ мсек для различных времени t .
- Рис. 8. Характеристики $\delta = f(m)$ при $T_{a1} = 150$ мсек и $T_{a2} = 20$ мсек для различных времен
- Рис. 9. Характеристика $T_a = f(K_S)$ последовательной двухэлементной цепи для разных мощностей короткого замыкания системы при напряжении 220 кв
 Z_{LK} - импеданс линии от подстанции А до места к.з
 Z_{LC} - полный импеданс линии
- Рис. 10. Характеристики $T_a = f(K)$ последовательной двухэлементной цепи для $T_S = \text{const}$ и $X_S = \text{const}$ $T_L = \text{var}$.
- Рис. 11. Характеристики $T_{az} = f(m)$ для $T_1 = \text{var}$ и $T_2 = \text{const}$
- Рис. 12. Зависимость постоянной времени замещения T_{az} от отношения $T_1:T_2$ при $T_1 = 150$ мсек = const
- Рис. 13. Принципиальная схема электроэнергетической системы
- Рис. 14. Схема замещения электроэнергетической системы согласно рис. 13.

W. WINKLER, A. PRZYGRÓDZKI
Chair of Electrical Power Systems
Technical University of Gliwice

TIME CONSTANTS OF DECAY OF FAULT CURRENT DIRECT
COMPONENT IN POWER SYSTEMS

S u m m a r y

The estimate of time constants values of power system basic elements turbogenerators, transformers, auto - transformers and extra high voltage transmission lines is carried out in the paper. There are given essential relations which enable time constants determining of individual element. The diagrams presented illustrate time constants mean values of generators and transformers according to their rated power. The list of time constants values for certain types of the machines mentioned above is tabularly compiled and it shows that biggest units in our state power system have following time constants values:

turbogenerators - 200 350 ms

transformers and auto - transformers - 100 170 ms

generator - transformer units - 100 170 ms

Maximum values of time constants of extra big power elements operating in power systems of foreign countries are following:

turbogenerators - from 400 to 800 ms

transformers - from 120 to 150 ms

750 MVA generator - transformers unit - 290 ms

Time constants of 220 kV and 400 kV overhead transmission lines in our state power system reach values from 12 to 30 ms. The biggest in the world, at the present moment, time constant value of transmission line is 73,4 ms. This is the 735 kV line Manicougan - Montreal in Canada (four wires in one phase).

The calculating of time constants of decay of resultant fault current direct components in system consisting of many cooperating elements is not easy. In the paper there are discussed methods of accurate calculating of direct component course for three basic circuits: series, parallel and series - parallel connections of power system elements. The results of calculations are compared with those obtained by means of approximate analytical method proposed by one of the authors. Quantitative analysis shows that simplified methods not always may be used indiscriminately. There are certain differences between results of two methods and they are becoming greater as the difference between time constants of individual parallel connected elements is getting greater. In the last part of the paper there is presented the estimate of certain quantities influence on time constant of decay of fault current direct component value in systems consisting of two elements, particularly in series and parallel circuits. It was found that equivalent time constant value depends mainly on elements impedances ratio and their time constants.

FIGURES DESCRIPTIONS

- Fig. 1. The range of time constants values of decay of direct components for turbogenerators according to their rated power
- Fig. 2. Mean values of time constants for transformer and auto - transformers
- Fig. 3. Mean values of time constants for extra high voltage transmission lines
- Fig. 4. Generator - transformer unit (a) and corresponding equivalent scheme (b)
- Fig. 5. Series - parallel circuit of three elements of power system
- Fig. 6. Fault current direct components transients in parallel circuit of $n = 2$
- Fig. 7. Characteristic of $\Delta T_a = f(m)$ for $T_{a1} = 150$ ms and $T_{a2} = 20$ ms for different values of time t

Fig. 8. Characteristics of $\delta = f(m)$ for $T_{a1} = 150$ ms and $T_{a2} = 20$ ms for different values of time t

Fig. 9. Characteristics of $T_s = f(K_s)$ for series two - element circuit for different fault power values in 220 kV system

Z_{IK} - line impedance from station A to fault point

Z_{LC} - total line impedance

Fig. 10. Characteristics of $T_a = f(K_s)$ for series two - element circuit for $T_s = \text{constant}$ and $X_s = \text{constant}$, $T_L = \text{variable}$

Fig. 11. Characteristics of $T_{az} = f(m)$ for $T_1 = \text{variable}$ and $T_2 = \text{constant}$

Fig. 12. Equivalent time constant T_{az} as a function of $T_1:T_2$ ratio, for $T_1 = 150$ ms = constant

Fig. 13. Single - line diagram of power system

Fig. 14. Equivalent diagram of power system from Fig. 13 (Rys. 13)