ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1964

Seria: ELEKTRYKA z. 19 Nr kol. 120

WŁADYSŁAW PASZEK
Katedra Maszyn Elektrycznych

JAN WALICHIEWICZ
Katedra Matematyki B

POSPIESZNE ODWZBUDZANIE TURBOGENERATORA PRZY POMOCY OPORNOŚCI GASZĄCEJ

Streszczenie. Przedstawiono analizę pośpiesznego odwzbudzenia turbogeneratora przy przełączeniu obwodu wzbudzenia na opór gaszący. Rozpatrzono przypadek biegu jałowego generatora, obciążenia mocą bierną oraz trójfazowe zwarcie nieustalone.

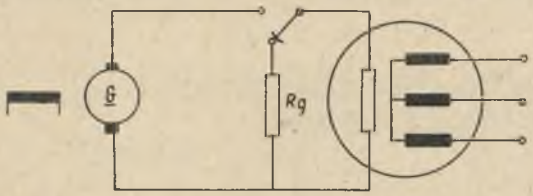
1. Układ pospiesznego odwzbudzania

Układ pospiesznego odwzbudzania generatora synchronicznego stanowi ważne uzupełnienie jego zabezpieczeń. Pospieszne odwzbudzanie powoduje szybkie zanikanie strumienia magnetycznego w generatorze. Towarzyszy temu zanikanie napięcia na zaciskach twornika oraz prądów w zamkniętych obwodach stojana. Zadaniem układu pospiesznego odwzbudzania jest:

a) ograniczyć skutki zwarcia w stojanie i w urządzeniach objętych strefą działania zabezpieczeń różnicowych generatora,
b) zmniejszyć wzrost napięcia generatora po zakłóceniowym wyłączeniu generatora z sieci energetycznej.

Stosuje się różne sposoby odwzbudzania polegające na: włączaniu opornika gaszącego, zmianie biegunowości napięcia wzbudnicy lub też łączące zmianę biegunowości napięcia wzbudzenia z włączeniem oporu gaszącego.

Włączenie oporu gaszącego realizuje się najczęściej przez wtrącenie oporu gaszącego w obwodach uzwojenia wzbudzenia przy jednoczesnym odłączeniu źródła napięcia wzbudzenia, rys.1 .



Rys. 1. Układ AGP z równoległym oporem gaszącym

W wyniku zmiany konfiguracji obwodu wzbudzenia powstaje na zaciskach uzwojenia magneśnicy generatora napięcie o biegunowości przeciwnej aniżeli przy pracy normalnej. To przeciwne napięcie powoduje zmniejszenie strumienia maszyny. Pożądane jest, aby to napięcie posiadało możliwie stałą wartość równą wartości dopuszczalnej dla uzwojenia wzbudzenia.

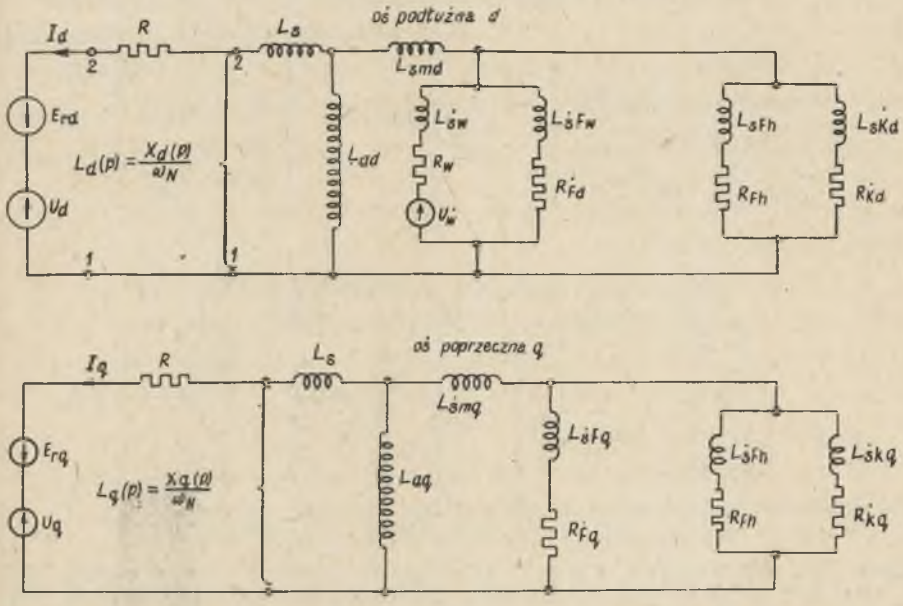
Taki warunek mogą spełniać układy ze zmienną opornością gaszenia i układy wykorzystujące zmianę biegunowości napięcia wzbudzenia przy pospiesznym odwzbudzeniu. Maksymalna wartość napięcia na zaciskach magneśnicy jest ograniczona wytrzymałością dielektryczną uzwojenia wzbudzenia generatora. Przy stałym napięciu na zaciskach uzwojenia wzbudzenia równym wartości dopuszczalnej otrzymuje się najszybszy przebieg odwzbudzenia.

W przypadkach zastosowania układu pospiesznego odwzbudzania polegającego na włączeniu do obwodu wzbudzenia stałej oporności gaszącej, napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia nie jest stałe. Zależąc proporcjonalnie od prądu w obwodzie wzbudzenia maleje ono w miarę nasilenia prądu w czasie procesu odwzbudzania. Przebiegi pospiesznego odwzbudzenia przy pomocy stałej oporności gaszącej odbiegają zatem silnie od przebiegów optymalnych.

2. ANALIZA PRZEBIEGÓW NIEUSTALONYCH W CZASIE ODWZBUDZANIA

2.1. Schemat zastępczy

Z powodu utrudnienia analizy stanów nieustalonych maszyny synchronicznej przy uwzględnieniu złożoności obwodów magneśnicy z litym rdzeniem posługujemy się chętniej uproszczonymi schematami zastępczymi magneśnicy, w których obwody prądów wirowych są zastąpione dwoma obwodami sprzężonymi odpowiadającymi podstawowej strudze prądów wirowych o dużej stałej czasowej i strudze przypowierzchniowej (o małej stałej czasowej). Ten uproszczony schemat zastępczy dla osi podłużnej magneśnicy jest przedstawiony na rys. 2. Magneśnica posiada zatem cztery



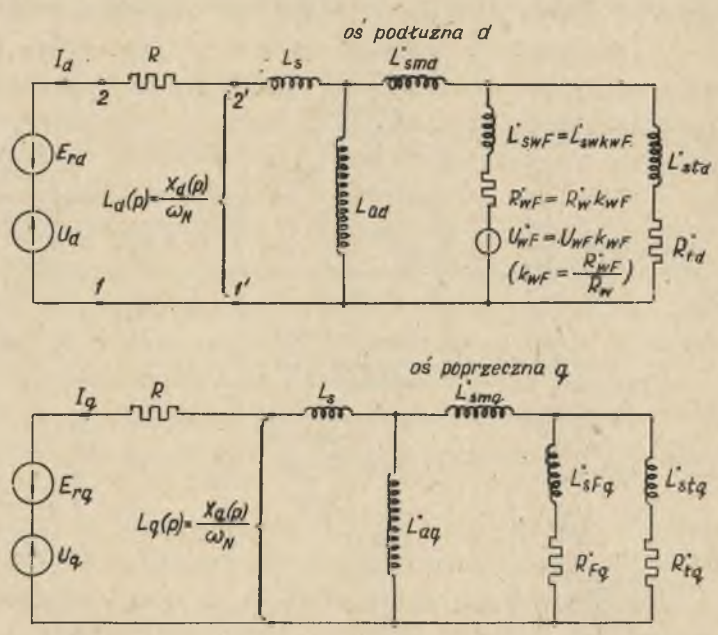
Rys.2a. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej w osi d i

zastępcze obwody w osi podłużnej. W normalnych przypadkach pracy zachodzi w przybliżeniu podobieństwo elektromagnetyczne

gałęzi wzbudzenia i gałęzi podstawowej strugi prądów wirowych jak również gałęzi klatki tłumiącej i przypowierzchniowej strugi prądów wirowych, to znaczy że możemy napisać

$$\frac{L_{sw}}{R_w} \approx \frac{L_{sF}}{R_F} \quad \text{oraz} \quad \frac{L_{sFh}}{R_{Fh}} \approx \frac{L_{sk}}{R_k},$$

na skutek czego można sprowadzić obwody magneśnicy do dwu zastępczych obwodów: zastępczego obwodu wzbudzenia "wF" oraz obwodu tłumiącego "td" rys. 2 b . Podobnie otrzymuje się dwa zastępcze obwody magneśnicy w osi poprzecznej.



Rys. 2b. Równoważny schemat zastępczy maszyny synchronicznej w osi d i q przy podobieństwie elektromagnetycznym gałęzi magneśnicy

Konsekwencją takiego uproszczenia są dwuwykładnicze przebiegi nieustalone składowej periodycznej prądu w fazach a,b,c twornika przy zwarciach.

Impedancja operatorowa maszyny synchronicznej o dwóch zastępczych obwodach magneśnicy widziana od strony punktów 1-2 na schemacie zastępczym

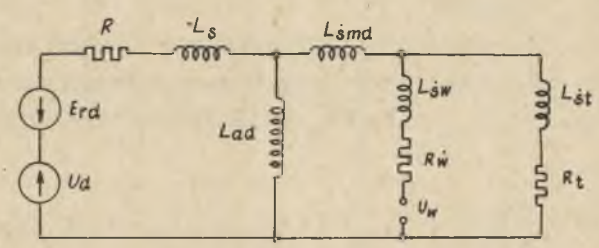
$$Z_{d,q}(p) = R + \frac{P}{\omega_N} X_{d,q}(p) \ , \qquad (1)$$

gdzie

R - oporność jednej fazy obwodu uzwojenia twornika,

$X_{d,q}$ P - reaktancja operatorowa w osi d bądź q maszyny, jest podstawowym operatorem maszyny synchronicznej potrzebnym w analizie stanów nieustalonych. Przy analizie przebiegów nieustalonych występujących przy pospiesznym odwzbudzaniu będą wykorzystane schematy zastępcze dla osi podłużnej generatora. Reaktancję operatorową można obliczyć przy pomocy impedancji $Z^*(p)$ widzianej od strony zacisków 1-2

$$X_d(p) = Z^*(p)\frac{\omega_N}{p} = \omega_N\left(L_s + \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{\frac{p}{pL'_{sw}+R'_w} + \frac{1}{pL'_{std}+R'_{td}}}}\right.$$



Rys.2c. Uproszczony schemat zastepczy maszyny synchronicznej w osi d 2 zastępczych obwodów magneśnicy

Po usunięciu ułamków piętrowych otrzymuje się w wyniku przekształceń algebraicznych

$$X_d(p) = X_d \frac{1 + p\,(T'_{wF}+T'_{td}) + p^2\, T'_{wF}\, T'_{td}\,\sigma'}{1 + p\,(T_{wF}+T_{td}) + p^2\, T_{wF}\, T_{td}\,\sigma}, \qquad (2)$$

gdzie

T_{wF}, T_{td} - oznaczają stałe czasowe obwodu "wF" i "td" przy otwartym tworniku (przy przerwie obwodu twornika na schemacie zastępczym .

Stałe czasowe T' oznaczają stałe czasowe tych obwodów. obliczone przy idealnie zwartym tworniku o zerowej oporności czynnej (przy bocznikowaniu indukcyjności L_{ad} przez indukcyjność rozproszenia L_s)

σ - oznacza ogólny współczynnik rozproszenia między obwodem "wF" i "td" przy otwartym tworniku.

$$\sigma = 1 \frac{X_{am}^2}{X_{wF} X_{td}},$$

$$X_{am} = X_{ad} + X_{smd},$$

σ' - oznacza współczynnik rozproszenia przy idealnie zwartym tworniku (przy uwzględnieniu bocznikowania indukcyjności L_{ad} przez L_s na schemacie zastępczym)

$$\sigma' = 1 - \frac{X_{am}^2}{X_{wF} X_{td}},$$

$$X'_{am} = X_{am} - \frac{X_{ad}^2}{X_d},$$

$$X'_{wF} = X_{wF} - \frac{X_{ad}^2}{X_d},$$

$$X'_{td} = X_{td} - \frac{X_{ad}^2}{X_d},$$

$$X_d = X_{ad} + X_s ,$$

$$T_{wF} = \frac{X'_{wF}}{\omega_N R'_{wF}} = \frac{X_{am} + X'_{swF}}{\omega_N \; R_{wF}} ,$$

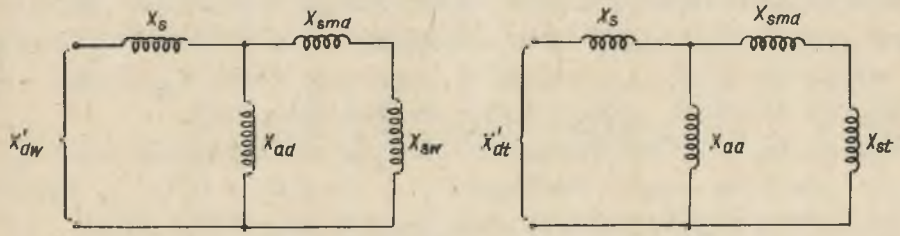
$$T_{td} = \frac{X'_{td}}{\omega_N R'_{td}} = \frac{X_{am} + X_{std}}{\omega_N \; R'_{td}}$$

Przy zwartym tworniku stałe czasowe obwodu "wF" i "td" maleją do wartości

$$T'_{wF} = T_{wF} \frac{X'_{dwF}}{X_d} ,$$

$$T'_{td} = T_{td} \frac{X_{dtd}}{X_d} ,$$

przy czym X'_{dwF}, X'_{dtd} oznaczają reaktancje przejściowe obliczone ze schematu zastępczego przy uwzględnieniu tylko obwodów "wF" bądź "td" magneśnicy przy pominięciu oporności czynnych rys. 3 :



Rys. 3. Schemat mnemotechniczny dla obliczeń reaktancji przejściowej X'_{dw} i X'_{dt}

$$X'_{dwF} = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{smd} + X_{swF}}} = X_d - \frac{X^2_{ad}}{X_{wF}} ,$$

$$X'_{dtd} = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{smd} + X_{std}}} = X_d - \frac{X^2_{ad}}{X_{td}} .$$

Trójmiany kwadratowe licznika i mianownika reaktancji operatorowej można przedstawić w postaci czynników pierwiastków tych trójmianów

$$X_d(p) = X_d \frac{(1+pT_d')(1+pT_d'')}{(1+pT_{do}')(1+pT_{do}'')}, \tag{3}$$

przy czym

$$T_{do}', T_{do}'' = \frac{1}{2}\left[T_{wF} + T_{td} \pm \sqrt{(T_{wF} + T_{td}) - 4T_{wF}T_{td}\sigma}\right]$$

i analogicznie

$$T_d', T_d'' = \frac{1}{2}\left[T_{wF} + T_{td}' \pm \sqrt{(T_{wF}' + T_{td}') - 4T_{wF}'T_{td}'\sigma'}\right].$$

Reaktancja operatorowa uporządkowana według czynników pierwiastkowych jest najbardziej przydatną postacią tej reaktancji do obliczeń przebiegów nieustalonych. Dwuwykładnicze przebiegi nieustalone zanikają bowiem według stałych czasowych przebiegów przejściowych T_{do}' (przy otwartym tworniku) bądź T_d' (przy zwartym tworniku) i przebiegów podprzejściowych T_{do}'' (przy otwartym tworniku) lub T_d'' (przy zwartym tworniku).
Uwzględniając silne sprzężenie obwodów elektrycznych magneśnicy $\sigma \approx 0{,}03 - 0{,}08$ (turbogen.), $\sigma \approx 0{,}07 - 0{,}12$ (hydrogen.) otrzymuje się przybliżoną relację na stałe czasowe

$$T_{do}' \approx T_{wF} + T_{td}, \qquad T_d' = T_{wf}' + T_{td}',$$

$$T_{do}'' \approx \frac{T_{wF}\,T_{td}\sigma}{T_{do}'}, \qquad T_d'' = \frac{T_{wF}'\,T_{td}'\sigma'}{T_d'}. \tag{4}$$

Jako naturalna właściwość obwodów zachodzi zawsze $T_{do}' > T_d' \gg T_{do}'' > T_d''$.

Na skutek małego ogólnego współczynnika rozproszenia, nierówność środkowa rozdzielająca stałe czasowe przebiegów przejściowych i podprzejściowych jest bardzo silnie zaakcentowana (>>)

Uwzględniając definicję reaktancji przejściowej $X'_d \overset{def}{=} X_d \frac{T'_d}{T'_{do}}$,

otrzymuje się przy uwzględnieniu relacji przybliżonych

$$X'_d \approx X'_{dwF} \frac{T_{wF}}{T_{wF} + T_{td}} + X'_{dtd} \frac{T_{td}}{T_{wF} + T_{td}} \tag{5}$$

Reaktancja przejściowa wstępna (reaktancja podprzejściowa)

$$X_d\,(p \to \infty) = X''_d = X_d \frac{T'_d\,T''_d}{T'_{do}\,T''_{do}} = X_d \frac{T'_{wF}\,T'_{td}\,\sigma'}{T''_{wF}\,T''_{td}\,\sigma} \tag{6}$$

Stałe czasowe przebiegów podprzejściowych i przejściowych figurujące w reaktancji operatorowej są parametrami maszyny, których znajomość jest konieczna do analizy.

Dwoma innymi podstawowymi operatorami maszyny synchronicznej jest transmitancja G(p) oraz H (p)

$$G(p) = \frac{U_{N\,max}}{U_{wj}} \cdot \frac{1 + p\,T_{std}}{(1+pT'_{do})(1+pT''_{do})}, \tag{7}$$

$$H(p) = k_{wF} \frac{1+pt_{td}}{(1+pT'_{do})(1+pT''_{do})} + \frac{1 - k_{wF}}{1+pT_{\sigma wF}},$$

w których figurują oprócz wyżej wyjaśnionych parametrów jeszcze

$$T_{std} = \frac{L'_{std}}{R'_{td}},$$

$$T_{td} = \frac{L'_{td}}{R'_{td}},$$

U_{wj} - napięcie wzbudzenia przy znamionowym biegu jałowym maszyny

$k_{wF} = \frac{R_{wF}^{*}}{R_w}$.

Operatory $Z_{d,q}(p)$ oraz $G(p)$, $H(p)$ wchodzą w równanie opisujące elektromagnetyczny stan nieustalony maszyny. Przy zerowych warunkach początkowych i stałej prędkości wirowania

$$\begin{aligned} \omega_N \psi_d(p) &= - I_d(p) X_d(p) + U_N(p) G(p), \\ \omega_N \psi_q(p) &= - I_q(p) X_q(p), \\ \hat{\hat{U}}(p) &= (p + j\omega) \hat{\hat{\psi}}(p) - \hat{\hat{I}}(p) R, \\ I_w(p) &= H(p) \frac{U_w(p)}{R_w} + \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_N} G(p) I_d(p). \end{aligned} \tag{8}$$

Jeśli nie interesuje nas pobór prądu ze źródła wzbudzenia, znajomość operatora $H(p)$ jest zbyteczna. Operator ten posiada 3 bieguny (3 miejsca zerowe mianownika) natomiast pozostałe operatory $X_{d,q}(p)$ i $G(p)$ tylko 2 bieguny. Jeśli napięcie wzbudzenia zależy od prądu wzbudzenia maszyny otrzymuje się skomplikowanie równań opisujących, ponieważ operator $H(p)$ o wielorianie 3-stopnia w mianowniku powiększy stopień równań charakterystycznych. Typowy przykład takiego skomplikowania równań otrzymuje się przy pospiesznym odwzbudzaniu polegającym na wtrąceniu dodatkowej oporności w obwód uzwojenia wzbudzenia. Oporność dodatkowa R_g w obwodzie wzbudzenia zmniejsza stałą czasową obwodu wzbudzenia na skutek czego nie zachodzi już podobieństwo elektromagnetyczne gałęzi L_{sw}, $R_w + R_g$ i L_{sF}, R_F w schemacie zastępczym.

Przy powiększonej oporności obwodu wzbudzenia operatory $X_d(p)$, $G(p)$, $H(p)$ ulegają komplikacji, ponieważ mianownik tych operatorów jest wielomianem stopnia trzeciego.

$$X_d(p) = X_d \frac{L_3(p)}{M_3(p)} = X_d \frac{(1+pt'_d)(1+pt''_d)(1+pT''_d)}{(1+pT'_{do})(1+pT''_{do})(1+pT'''_{do})} . \qquad (9)$$

Współczynniki wielomianów $L_3(p)$ oraz $M_3(p)$ zależą od elementów obwodów magneśnicy na schemacie zastępczym. Oznaczywszy kolejno obwody "w", "F", "td" numerami 1, 2, 3, otrzymuje się

$$M_3(p) = 1 + p(T_1+T_2+T_3) + p^2(T_1T_2\,\sigma_{12}+T_2T_3\,\sigma_{23}+T_1T_3\,\sigma_{13}) +$$

$$+ p^3\, T_1T_2T_3\left(\sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{23} - 2 + 2\frac{L^3_{am}}{L_1L_2L_3}\right)$$

i analogicznie

$$L_3(p) = 1 + p(T'_1+T'_2+T'_3) + p^2(T'_1T'_2\,\sigma'_{12} + T'_2T'_3\,\sigma'_{23} + T'_1T'_3\,\sigma'_{13}) +$$

$$+ p^3\, T'_1T'_2T'_3\left(\sigma'_{12} + \sigma'_{13} + \sigma'_{23} - 2 + \frac{L'^3_{am}}{L'_1L'_2L'_3}\right).$$

Ogólny współczynnik rozproszenia dwóch obwodów magneśnicy

$$\sigma_{ij} = 1 - \frac{X^2_{am}}{X_iX_j} \qquad i, j = 1, 2, 3$$

Stała czasowa T_1 obwodu wzbudzenia zależy od oporności dodatkowej R_g

$$T_1 = T_w \frac{R_w}{R_w+R_g} = T_w \frac{1}{1+K} ,$$

gdzie

$k = \frac{R_g}{R_w}$ - krotność oporu gaszącego względem oporności uzwojenia wzbudzenia.

$$H(p) = \frac{1 + p(T_2+T_3) + p^2 T_2 T_3 \sigma_{23}}{M_3(p)}$$

$$G(p) = \frac{1 + p(T_{s2} + T_{s3}) + p^2 [T_2 T_3 \sigma_{23} - T_2 T_{s3} - T_3 T_{s3} + T_{s1}(T_{s2}+T_{s3})]}{M_3(p)}$$

przy czym T_{s1}, T_{s2}, T_{s3} - oznaczają stałe czasowe

$$\frac{L_{s1}}{R_1}, \quad \frac{L_{s2}}{R_2}, \quad \frac{L_{s3}}{R_3}.$$

Posłużenie się wyżej podanymi równaniami jest możliwe jeśli znane są wszystkie elementy schematu zastępczego.

Wyznaczenie wszystkich elementów schematu zastępczego na drodze pomiarowej jest utrudnione. Często kosztem dokładności obliczeń rezygnuje się z przyjęcia trzech zastępczych obwodów magneśnicy i zastępuje się je tylko dwoma obwodami: obwodem wzbudzenia "w" i obwodem tłumiącym "t" tak sprzężonymi by dawały takie same stałe czasowe przebiegów przejściowych przy dowolnie dobranej oporności dodatkowej i takie same przebiegi podprzejściowe przy normalnej pracy maszyny jak w przypadku uwzględnienia schematu o trzech obwodach magneśnicy (rys. 2c).

Jako parametry znane zakładamy stałe czasowe T'_{do}, T'_{do}, T'_d, T''_d oraz podobne parametry przy odwzbudzaniu maszyny w stanie jałowym przy otwartym tworniku T'_{go}, T''_{go} oraz przy zwartym tworniku T'_g T''_g przy przyjętej w czasie pomiaru dowolnej wartości oporu gaszącego k. Warunkiem założonej zbieżności wyników jest

zatem odpowiedniość wielomianu licznika i mianownika reaktancji operatorowej maszyny

$$X_d \frac{(1+pT'_d)(1+pTd'')}{(1+pT'_{do})(1+pT''_{do})} = X_d \frac{1+p(T'_w+T'_t)+p^2T'_wT'_t\sigma'}{1+p(T_w+T_t)+p^2T_wT_t\sigma},$$

gdzie

$$T'_w = T_w \frac{X'_{dw}}{X_d},$$

$$T'_t = T_t \frac{X'_{dt}}{X_d}$$

Stąd w otwartym tworniku z porównania stałych czasowych przebiegów przejściowych

$$T_w + T_t = T'_{do} + T''_{do} \approx T'_{do}$$

$$\frac{T_w}{1+k} + T_t = T'_{go} + T''_{go} \approx T'_{go} \tag{10}$$

otrzymuje się stałe czasowe T_w i T_t, których znajomość jest potrzebna do obliczeń przebiegów nieustalonych przy dowolnej krotności oporności gaszącej.

Z porównania stałych czasowych przebiegów podprzejściowych przy k=1 można otrzymać współczynnik rozproszenia σ z równania

$$T_w T_t \sigma = T'_{do} T'_{do},$$

który można sprawdzić na podstawie równania $\frac{T_w}{1+k} T_t \sigma = T'_{go} T''_{go}$ przy $k \neq 1$.

Z porównania stałych czasowych przebiegów przejściowych przy zwartym tworniku T'_d i T''_g otrzymuje się wartości reaktancji przejściowych X'_{dw}, X'_{dt}

$$T'_w + T'_t = T'_d + T''_d \approx T'_d,$$

$$\frac{T'_w}{1+k} + T'_t = T'_g + T''_g \approx T'_g,$$

$$\frac{X'_{dw}}{X_d} = \frac{T'_w}{T_w}, \quad \frac{X'_{dt}}{X_d} = \frac{X'_t}{T_t}.$$

Z porównania stałych czasowych przebiegów podprzejściowych przy zwartym tworniku otrzymuje się

$$\sigma = \frac{T'_d\, T''_d}{T'_w\, T'_t},$$

który można sprawdzić na podstawie równania $\sigma = \dfrac{T'_g\, T''_g}{\frac{T'_w}{1+k}\, T'_t}$

Parametry konieczne do analizy przebiegów nieustalonych przy pospiesznym odwzbudzaniu można najprościej wyznaczyć na podstawie oscylogramu odwzbudzania przy otwartym tworniku w stanie jałowym T'_{go} T''_{go}, i przy zwartym tworniku wychodząc ze zwarcia ustalonego (T'_g T''_g). Łącznie z podstawowymi stałymi czasowymi T'_{do}, T''_{do} oraz T'_d, T''_d stałe czasowe T'_{go}, T''_{go} oraz T'_g, T''_g, wyznaczają wielkości potrzebne w analizie przebiegów nieustalonych w czasie odwzbudzania przy dowolnej krotności oporności gaszącej.

Dla orientacyjnych obliczeń można przyjęć w przybliżeniu dla turbogeneratorów

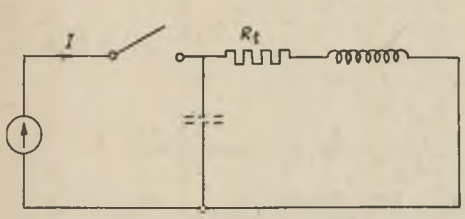
$$\frac{T_t}{T_w} \approx 0{,}35 \text{ (dla turbogeneratorów)}$$

$$X'_{dw} \approx X'_d$$

$$X'_d < X'_{dt} < X''_d$$

2.2. Napięcie łuku

Rozpatrzmy modelowy obwód zawierający napięcie U, opór czynny R i indukcyjność L z wyłącznikiem w stanie załączonym (rys.4).



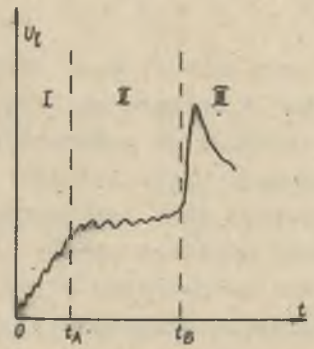
Rys. 4. Otwarcie wyłącznika w obwodzie R,L

Po przerwaniu za pomocą wyłącznika obwodu prądu stałego zawierającego dużą indukcyjność, przebieg napięcia między stykami można rozpatrywać w trzech przedziałach czasowych. W pierwszym przedziale bezpośrednio po rozdzieleniu się styków zapala się łuk i napięcie łuku, w miarę wydłużania się łuku, szybko rośnie aż do wartości szczytowej.

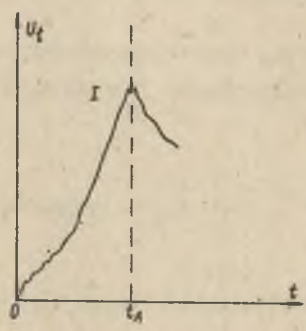
W drugim przedziale napięcie łuku posiada w przybliżeniu stałą wartość, która jest niewiele mniejsza od wartości szczytowej w pierwszym przedziale. Napięcie to zależy głównie od dejonizujących własności komory łukowej wyłącznika. Prąd przerywany przez wyłącznik maleje na skutek rozproszenia się energii obwodu w łuku. Po zmniejszeniu się prądu do małej wartości następuje zgaśnięcie łuku w wyłączniku czemu towarzyszy nagły wzrost napięcia między stykami wyłącznika. Ten wzrost następuje w trzecim przedziale czasowym. Napięcie między stykami po przerwaniu łuku jest napięciem pierwotnym wyłącznika. Wartość tego napięcia zależy od zdolności wyłączalnej wyłącznika i od parametrów R,L,C obwodu. Jeżeli wyłącznik jest zbudowany do trudniejszych warunków wyłączeniowych to może nie wystąpić drugi etap przebiegu napięcia.

Na rys. 5a przedstawiono przebieg napięcia w trzech etapach, a na rys.5b napięcie przy dwuetapowym przebiegu.

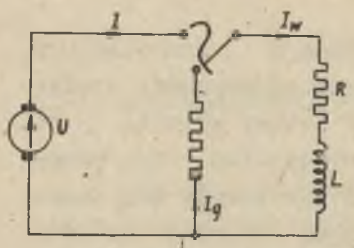
Przy zastosowaniu wyłącznika w układzie z oporem gaszącym (rys. 6) zestyk roboczy odłącza źródło napięcia prądu stałego.



Rys. 5a. Przebieg napięcia między stykami wyłącznika w trzech etapach



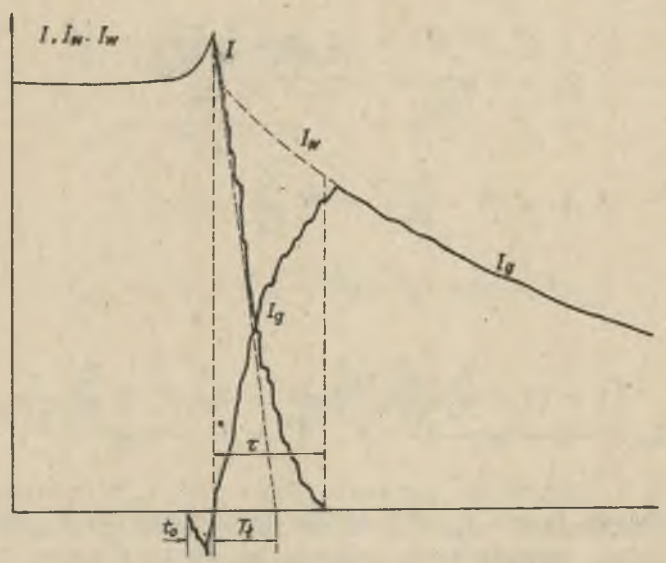
Rys. 5b. Przebieg napięcia między stykami wyłącznika w dwóch etapach



Rys. 6. Otwarcie wyłącznika AGP w obwodzie R,L

Prąd płynący w obwodzie przechodzi do gałęzi zawierającej opór gaszący, załączony przed łukowym rozdzieleniem się styków roboczych wyłącznika. Przebiegi łączeniowe ulegają zmianie na skutek innej konfiguracji elementów obwodu w porównaniu z poprzednim prostym obwodem (rys.7) Prąd I płynący przez wyłącznik maleje w przybliżeniu wykładniczo ze stałą czasową T_l.

Przy analizie przebiegów nieustalonych można zwykle pominąć wpływ zmienności oporu łukowego i uważać że przejście prądu do gałęzi oporu gaszącego odbywa się natychmiast po zadziałaniu wyłącznika AGP. Skomplikowane przebiegi prądów w równoległym połączeniu oporów R_l i R_g można zatem uprościć przyjmując, że od chwili początkowej odwzbudzenia prąd wzbudzenia I_g przepływa przez opór gaszący.



Rys. 7. Przebieg prądu w czasie otwarcia wyłącznika AGP w obwodzie R, L

2.3. Przebiegi nieustalone odwzbudzenia generatora na biegu jałowym

Wypadkowy prąd wzbudzenia

$$I_w(p) = \frac{p\,T_f(p\sigma\,T_t + 1)}{p^2\,T_fT_t\sigma + p(T_f + T_t) + 1}\,I_{wo}\,, \qquad (12)$$

gdzie

$T_f = \frac{T_w}{1+k}$, I_{wo} - początkowy prąd wzbudzenia

Po przejściu na postać czasową

$$I_w(t) = I_{wo}\,\frac{T_f}{\sigma T_fT_t(p_1-p_2)}\left[(\sigma T_fT_tp_1+1)\,e^{p_1t} - (\sigma T_fT_tp_2-1)\,e^{p_2t}\right].$$

p_1p_2 - pierwiastki wielomianu mianownika

$$p_1 = -\frac{1}{T_{go}}, = \frac{-(T_f+T_t) + T_f\sqrt{\Delta}}{2\,\sigma\,T_f\,T_t},$$

$$p_2 = -\frac{1}{T_{go}} = \frac{-(T_f+T_t) - T_f\sqrt{\Delta}}{2\,\sigma\,T_f\,T_t},$$

$$\Delta = \left(1 + \frac{T_1}{T_f}\right)^2 - 4\sigma\frac{T_t}{T_f}$$

Stąd

$$I_w(t) = I_{wo}\left[\frac{1 + \left(1 - \frac{T_t}{T_f}\right)\frac{1}{\sqrt{\Delta}}}{2}\, e^{-\frac{t}{T_{go}}} + \frac{1 - \left(1 - \frac{T_t}{T_f}\right)\frac{1}{\sqrt{\Delta}}}{2}\, e^{-\frac{t}{T_{go}}}\right]. \quad (13)$$

W przebiegu prądu I_w (t) można wyodrębnić dwie składowe, z których jedna przejściowa zanika ze stałą czasową T'_{go} a druga (podprzejściowa) ze stałą czasową T''_{go}

$$I_w(t) = I_{w1}\, e^{-\frac{t}{T'_{go}}} + I_{w2}\, e^{-\frac{t}{T''_{go}}}$$

Dla przybliżonego wyznaczenia początkowych wartości składowych I_{w1} oraz I_{w2} wyprowadzimy oznaczenia

$$\frac{T_t}{T_f} = \alpha, \quad \vartheta = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{(1+\alpha)^2 - 4\sigma\alpha}}.$$

Uwzględniając, że $\sigma \ll 1$ otrzymuje się $\vartheta \approx \frac{1}{1+\alpha}$.

Stąd

$$I_{w1} = \frac{1 + (1-\alpha)\vartheta}{2} I_{wo} \approx \frac{1}{1+\alpha} I_{wo},$$

$$I_{w2} = \frac{1 - (1-\alpha)\vartheta}{2} I_{wo} \approx \frac{\alpha}{1+\alpha} I_{wo}.$$

Podobnie wyznaczamy w przybliżeniu stałe czasowe T'_{go} i T''_{go} uwzględniając nierówność $\sigma \ll 1$.

$$T'_{go} = \frac{2\sigma\vartheta}{(1+\alpha)\vartheta - 1} T_t \approx (1+\alpha) T_f ,$$

$$T''_{go} = \frac{2\sigma\vartheta}{(1+\alpha)\vartheta + 1} T_t \approx \frac{\sigma}{1+\alpha} T_t .$$

Stąd

$$T'_{go} \approx T_f + T_t \approx (T'_{do} - T_t) \frac{1}{1+k} + T_t , \qquad (14)$$

$$T''_{go} \approx \frac{\sigma}{1+\alpha} T_t \approx \frac{T''_{do} T'_{do}}{T'_{do} + T_t k}$$

Stała czasowa T'_{go} jest stałą czasową dominującą w przebiegu zanikania prądu I_w oraz strumienia głównego generatora. Wpływ oporności gaszącej R_g na zmniejszenie tej stałej jest tym silniejszy im mniejszy jest udział obwodów tłumiących magneśnicy w stałej czasowej T'_{do}. Zbadanie wpływu oporu gaszącego na stałą czasową T'_{go} jest podstawą do wstępnego doboru opornika R_g. Przy silnych obwodach tłumiących w bloku litym wirnika zwiększenie oporu gaszącego powyżej pewnej wartości daje już niewielkie skrócenie czasu odwzbudzania. Możemy sporządzić wykres fukcji $T'_{go} = f(k)$ dla danych stałych czasowych T'_{do} i T_t, aby ocenić wpływ oporności gaszącej na dominującą stałą czasową T'_{go}.

Przebieg napięcia na naciskach uwzojenia magneśnicy jest jednocześnie przebiegiem napięcia na oporniku gaszącym i wynosi

$$U_w(t) = k R_w I_w(t) = k R_w I_{wo} \left(\frac{1}{1+\alpha} e^{-\frac{t}{T'_{go}}} + \frac{\alpha}{1+\alpha} e^{-\frac{t}{T''_{go}}} \right)$$

Największa wartość napięcia U_{max} występuje zaraz po zgaśnięciu łuku w wyłączniku AGP. Przy odwzbudzaniu w czasie biegu jałowego generatora, czas trwania łuku τ wynosi około 0,02 s.

Uwzględniając uproszczenie przebiegu prądu w czasie palenia się łuku i przyjmując, że składowa I_{w1}, która zanika ze stałą czasową T'_{go} zmienia nieznacznie swoją wartość w czasie palenia się łuku otrzymujemy wyrażenie na maksymalną wartość napięcia na oporze gaszącym

$$U_{g\,max} \approx \left(1+\alpha\, e^{-\frac{T}{T''_{go}}}\right)\frac{k\,R_w\,I_{wo}}{1+\alpha}, \tag{15}$$

które jest w przybliżeniu równe maksymalnemu napięciu na uzwojeniu wzbudzenia.

Prąd I_t w obwodzie tłumiącym

$$I_t(p) = I_{wo}\frac{L_{am}}{R_t}\frac{p}{p^2\,T_f T_t\,\sigma + p(T_f+T_t)+1} \tag{16}$$

Po przejściu na postać czasową

$$I_t(t) = I_{wo}\frac{L_{am}}{R_t(p_1-p_2)}\left(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}\right)$$

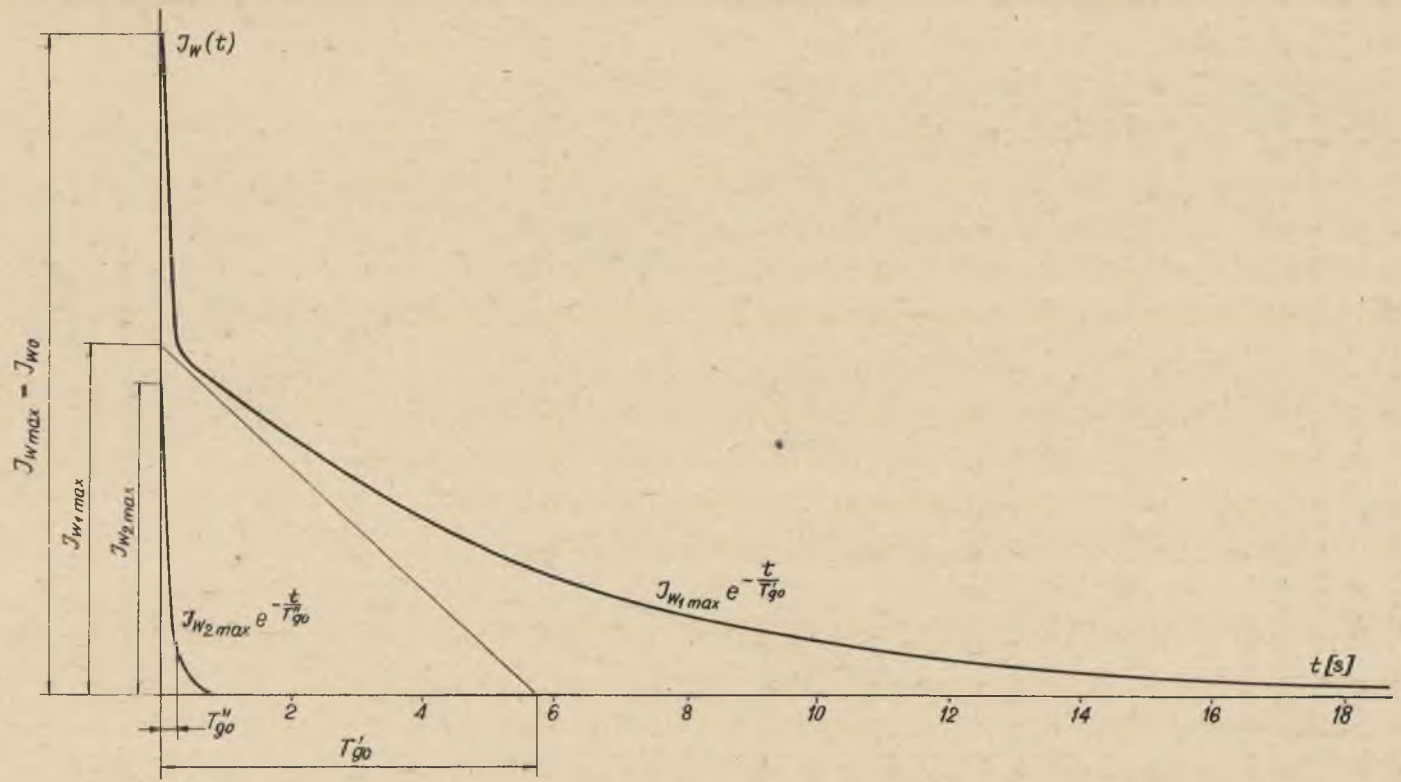
Po wprowadzeniu zależności otrzymanych przy obliczeniu przebiegu prądu I_w

$$I_t(t) = I_{wo}\frac{L_{am}}{R_t\,T_t\sqrt{\Delta}}\left(e^{-\frac{t}{T'_{go}}} - e^{-\frac{t}{T''_{go}}}\right) =$$

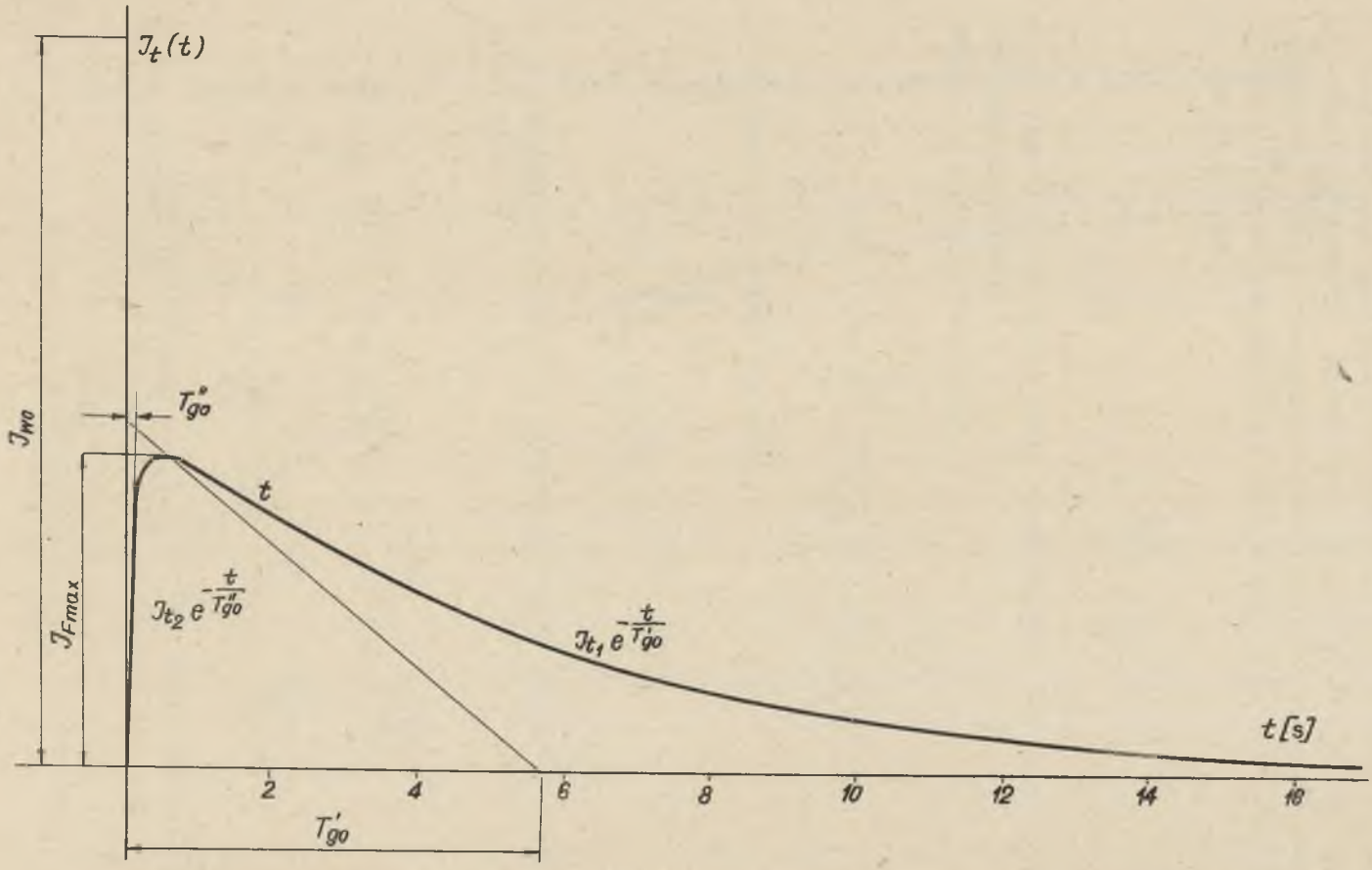
$$= I_{wo}\frac{L_{am}}{L_t}\alpha\,\nu\left(e^{-\frac{t}{T'_{go}}} - e^{-\frac{t}{T''_{go}}}\right).$$

Można przyjąć, że

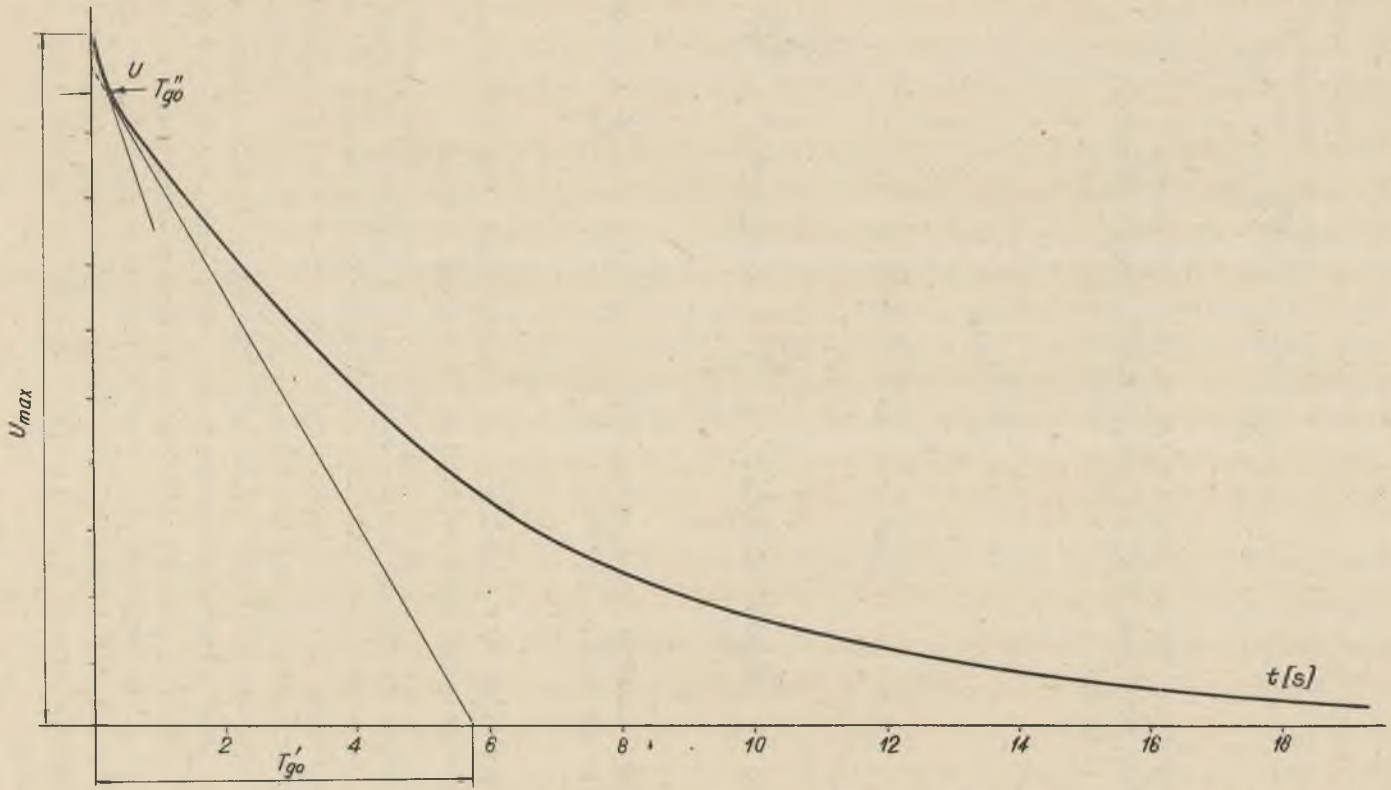
$$\frac{L_{am}}{L_t} \approx 1\,.$$



Rys.8. Przebieg prądu $I_w = f(t)$ przy odwzbudzaniu turbogeneratora z biegu jałowego



Rys.9. Przebieg prądu $I_t = f(t)$ przy odwzbudzaniu turbogeneratora z biegu jałowego



Rys.10. Przebieg napięcia na zaciskach turbogeneratora przy odwzbudzaniu z biegu jałowego

Stąd

$$I_t(t) \approx I_{wo}\alpha\vartheta\left(e^{-\frac{t}{T'_{go}}} - e^{-\frac{t}{T''_{go}}}\right) \tag{17}$$

Znając przebiegi prądu $I_w(t)$ oraz $I_t(t)$ można wyznaczyć przebieg napięcia $U(t)$ na zaciskach twornika generatora przy biegu jałowym

$$U(t) = \frac{I_{ad}(t)}{J_{wj}} U_{N\,max}$$

$$I_{ad}(t) = I_w(t) + I_t(t)$$

$$U(t) \approx I_{wo}\frac{U_{N\,max}}{I_{wj}}\left[\frac{1+(1+\alpha)\vartheta}{2} e^{-\frac{t}{T'_{go}}} + \frac{1-(1+\alpha)\vartheta}{2} e^{-\frac{t}{T''_{go}}}\right] \tag{18}$$

Przebiegi prądów I_w, I_t oraz napięcia U przy $k = \frac{R_g}{R_w} = 2$ przedstawiono na rys.8, 9, 10.

2.4. Przebiegi nieustalone przy odwzbudzaniu generatora w stanie jałowym przy współpracy z siecią sztywną

Nieustalone przebiegi prądu wzbudzenia i napięcia na oporze gaszącym są takie same jak przy odwzbudzaniu generatora o zwartym tworniku. Z tego powodu pomiary przebiegu prądu wzbudzenia w celu wyznaczenia stałych czasowych T'_g i T''_g można przeprowadzić alternatywnie przy uprzednio zwartym tworniku (zwarcie następuje przy odwzbudzonej maszynie) bądź przy współpracy generatora z siecią praktycznie sztywną przy zerowej czynnej mocy oddawanej. Przy współpracy z siecią sztywną o napięciu U_s ustalony prąd bierny twornika jest równy $\frac{U_s}{X_d}$. Przy małej reaktancji synchronicznej $X_d < 1$ prąd ten może być większy od znamionowego.

Analiza prądu wzbudzenia jest analogiczną jak w przypadku otwartego obwodu twornika. Zmienia się tylko konfiguracja schematu zastępczego na skutek czego w miejsce stałych czasowych T_w, T_t, T'_{do}, T'_{go}, T''_{go} występują stałe czasowe odpowiednie T'_w, T'_t, T'_d, T'_g, T''_g.

$$I_w(p) = \frac{p\,T'_f\,(p\sigma'\,T'_1 + 1)}{p^2\,T'_f\,T'_t\sigma' + p(T'_f+T'_t)+1}\,I_{wo} \tag{19}$$

Stąd

$$I_w(t) = I_{wo}\left[\frac{1}{1+\alpha'}\,\frac{1}{1+\alpha}\,e^{-\frac{t}{T'_g}} + \frac{\alpha'}{1+\alpha'}\,e^{-\frac{t}{T''_g}}\right], \tag{20}$$

przy czym

$$\alpha' = \frac{T_t}{T_f}$$

$$T_g' \approx (1+\alpha')\,T'_f \approx (T'_d - T'_t)\,\frac{1}{1+k} + T_t'$$

$$T''_g \approx \frac{\sigma'}{1+\alpha'}\,T'_t \approx \frac{T'_d\,T''_d}{T'_d+T_t k}\,.$$

Przybliżoną wartość napięcia na uzwojeniu wzbudzenia otrzymuje się wstawiając w miejsce t czas palenia się łuku

$$U_{g\,max} \approx \left(1+\alpha' e^{-\frac{\tau}{T'_g}}\right)\frac{k\,R_w\,I_{wo}}{1+\alpha'} \tag{21}$$

2.5. Przebiegi nieustalone przy odwzbudzaniu generatora wstępnie obciążonego w stanie nieustalonego zwarcia symetrycznego

Przy nieustalonym zwarciu symetrycznym generatora wstępnie obciążonego zaburzeniowy przebieg prądu wzbudzenia w przypadku stałego napięcia wzbudzenia

$$I_{wz}(t) = I_{wj}\frac{T_w'}{T_d'}\frac{U}{U_N}\frac{X_d-X_d'}{X_d'}\left\{\cos\delta\left[e^{-\frac{t}{T_d'}} - \left(1-\frac{T_{std}}{T_d''}\right)e^{-\frac{t}{T_d''}}\right] - \frac{T_{std}}{T_d''}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(\omega t+\delta)\right\}. \tag{22}$$

Prąd wzbudzenia

$$I_w(t) = I_{wz}(t) + I_{wo}$$

gdzie

U - napięcie generatora przed zwarciem,

U_N - znamionowe napięcie generatora (wartość skuteczna),

I_{wo} - prąd wzbudzenia przy obciążeniu przed zwarciem,

δ - kąt mocy przed zwarciem,

$$tg\delta = \frac{X_q\cos\varphi}{1+X_q\sin\varphi},$$

$$T_{std} = \frac{L_{std}}{R_t} \approx 0{,}85\ T_d'',$$

$$\frac{T_w'}{T_d'} \approx \frac{T_w}{T_{do}'}\ \left(\text{w przypadku turbogeneratorów } \frac{T_w'}{T_{do}'} \approx \frac{1}{1{,}35}\right).$$

T_a-stała czasowa przebiegów aperiodycznych w fazach twornika. Przy pominięciu przebiegu podprzejściowego otrzymuje się zaburzeniowy prąd wzbudzenia z nieznacznym nadmiarem. Przy takim

uproszczeniu otrzymuje się dwie składowe: składową aperiodyczną $I_{wa}(t)$ i periodyczną $I_{wp}(t)$.

$$I_{wza}(t) = I_{wj} \frac{T_w'}{T_d'} \frac{U}{U_N} \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cos\delta \, e^{-\frac{t}{T_d'}}$$

$$I_{wa}(t) = I_{wza}(t) + I_{wo}$$

$$I_{wp}(t) = I_{wj} \frac{T_w'}{T_d'} \frac{U}{U_N} \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cos(\omega t + \delta) \frac{T_{std}}{T_d''} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

W przypadku odwzbudzenia generatora przy nieustalonym zwarciu symetrycznym zadziałanie wyłącznika AGP nastąpi ze zwłoką t_1 względem początkowej chwili zwarcia. W odcinku czasu t_1 zaburzeniowy prąd wzbudzenia ma przebieg wyżej obliczony. Wtrąceniu oporności gaszącej do obwodu wzbudzenia towarzyszy zmiana konfiguracji schematu zastępczego, na skutek czego zmieniają się stałe czasowe przebiegów aperiodycznych prądu wzbudzenia z T_d', T_d'', do T_g', T_g''. Jednocześnie na skutek tej zmiany zmienia się również udział składowych aperiodycznych przejściowych i podprzejściowych oraz składowej periodycznej w łącznym prądzie wzbudzenia. Przy upraszczającym założeniu, że udział tych składowych nie ulega dużym zmianom, można przedstawić wypadkowy prąd wzbudzenia jako superpozycję prądu obliczonego w rozdziale poprzednim (przy odwzbudzaniu generatora o zwartym tworniku) i prądu zwarciowego wytworzonego przez zwarcie nieustalone, w którym uwzględniono zmianę stałych czasowych przebiegów przejściowych w momencie zadziałania AGP. Dla $t > t_1$

$$I_{wza}(t) \approx I_{wj} \frac{T_w'}{T_d'} \frac{U}{U_N} \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \cos\delta \, e^{t_1\left(\frac{1}{T_g'} - \frac{1}{T_d'}\right)} e^{-\frac{t}{T_g'}}$$

$$I_{wp}(t) \approx I_{wj} \frac{T_w'}{T_d'} \frac{U}{U_N} \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \frac{T_{std}}{T_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega t + \delta) \qquad (23)$$

Wypadkowy przebieg prądu wzbudzenia dla $t > t_1$

$$I_w(t) \approx I_{wo}\left[\frac{1}{1+\alpha'} e^{-\frac{t-t_1}{T_g'}} + \frac{\alpha'}{1+\alpha'} e^{-\frac{t-t_1}{T_g''}}\right] +$$

$$+ I_{wj} \frac{U}{U_N} \frac{T_w'}{T_d'} \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \left[\cos\delta \, e^{-\left(\frac{t_1}{T_d'} + \frac{t-t_1}{T_g'}\right)} - \frac{T_{std}}{T_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot\right.$$

$$\left. \cdot \cos(\omega t + \delta)\right] \qquad (24)$$

Przebieg napięcia na oporniku gaszącym

$$U_g(t) = R_g I_w(t)$$

Przyjmując uproszczenie, że napięcie łuku wyłącznika wprowadza do obwodu wzbudzenia oporność równą w przybliżeniu oporności dodatkowej otrzymamy na oporze gaszącym maksymalne napięcie $U_{g\,max}$ przy podstawieniu w miejsce t czasu $\Delta t = t_1 + \tau$ będącego sumą zwłoki t_1 czasu palenia się łuku τ. Napięcie to jest w przybliżeniu równe maksymalnemu przepięciu na uzwojeniu wzbudzenia.

$$U_{g\,max} \approx k R_w I_{wo} \left\{ \frac{1+\alpha' e^{-\frac{\tau}{T_g'}}}{1+\alpha'} + \frac{I_{wj}}{I_{wo}} \frac{T_w'}{T_d'} \frac{U}{U_N} \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \left[\right.\right.$$

$$\left.\left. \left[\cos\delta \, e^{-\left(\frac{t_1}{T_d'} + \frac{\tau}{T_g'}\right)} - \frac{T_{std}}{T_d''} e^{-\frac{\Delta t}{T_a}} \cos(\omega \Delta t + \delta)\right]\right\} \qquad (25)$$

Wyrażenie ujęte w nawias graniasty można oszacować przyjmując niekorzystny przypadek sumowania się składowej periodycznej, że składowa aperiodyczna w chwili Δt

$$U_{g\,max} \approx k\,R_w\,I_{wo}\left\{\frac{1+\alpha' e^{-\frac{\tau}{T'_g}}}{1+\alpha'} + (1{,}1 \ldots 1{,}4)\right.$$

$$\left.\frac{I_{wi}}{I_{wo}}\frac{T'_w}{T'_d}\frac{U}{U_N}\frac{X_d - X'_d}{X'_d}\cos\delta\, e^{-\left(\frac{t_1}{T'_d} + \frac{\tau}{T'_g}\right)}\right\} \qquad (26)$$

Należy zwrócić uwagę, że czas palenia się łuku τ zależy od wartości prądu wzbudzenia. Rośnie on przy wzroście prądu. Przy przejściu od biegu jałowego od obciążenia i zwarcia nieustalonego wynosi on w przybliżeniu 0,02 ... 0,04 ... 0,06 s.

3. ZAKRES DOŚWIADCZALNYCH BADAŃ PRZEBIEGÓW ODWZBUDZENIA

Badania doświadczalne przebiegów odwzbudzenia wymagają szeregu uzupełnień w celu uściślenia obliczeń przepięć i charakteru przebiegów nieustalonych. Badania te można podzielić na cztery grupy,

1. Badania mające na celu wyznaczenie elementów schematu zastępczego. Przy posłużeniu się przybliżeniem dwóch sprzężonych obwodów magneśnicy chodzi o wyznaczenie stałych czasowych T_w i T_t oraz reaktancji X'_{dw} i X'_{tw}. Przy posłużeniu się schematem zastępczym o trzech obwodach magneśnicy liczba elementów koniecznych do wyznaczenia, rośnie.

2. Badania mające na celu określenie czasu palenia się łuku τ i wyznaczenie średniego napięcia łuku. Upraszczające przyjęcie, że łuk wtrąca do obwodu wzbudzenia oporność zastępczą w przybliżeniu równą oporności gaszącej jest bardzo niepewne. Raczej korzystniej będzie posłużyć się pewnym stałym średnim napięciem łuku. W konsekwencji niepewny jest wzór na obliczenie maksymalnego napięcia na uzwojeniu wzbudzenia.

3. Badania mające na celu określenie przebiegów nieustalonych i napięcia na uzwojeniu wzbudzenia przy niesymetrycznych zwarciach wewnętrznych generatora.

4. Zbadanie wpływu regulacji wzbudzenia na przebieg odwzbudzenia.

Rękopis złożono w redakcji w marcu 1964 r.

LITERATURA

[1] Adkins B.: Obszczaja teorija elektriczeskich maszin. Moskwa 1960.

[2] Cholewicki T.: Analiza obwodów elektrycznych WNT Warszawa 1962.

[3] Hill J.R.: Field suppression of turbo-alternators P.I.E.E. Part - A. 1950.

[4] Hore R.A.: Testing of field circuit - breakers The Electrical Journal 1958.

[5] Praca zbiorowa: Wybrane zagadnienia turbogeneratorów dużej mocy. Inst. Energetyki, Warszawa 1962.

СКОРОСТНОЕ РАЗВОЗБУЖДЕНИЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОМОЩИ ДЕМПФЕРНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье приведен анализ скоростного развозбуждения турбогенератора при переключении цепи возбуждения на демпферное сопротивление.
Рассмотрен случай холостого хода генератора, нагрузки реактивной мощностью, а также убарные трехфазные короткие замыкания.

THE RAPID DE-EXCITATION OF THE TURBO-GENERATOR
BY THE DAMPER RESISTENCE

Summary

Analysis of rapid de-excitation of the Turbo-generator at the change of the damper resistance in the excitation circuit The cases of the no-load running of the generator, reactive power loading and the unsteady threephase faults, were examined.