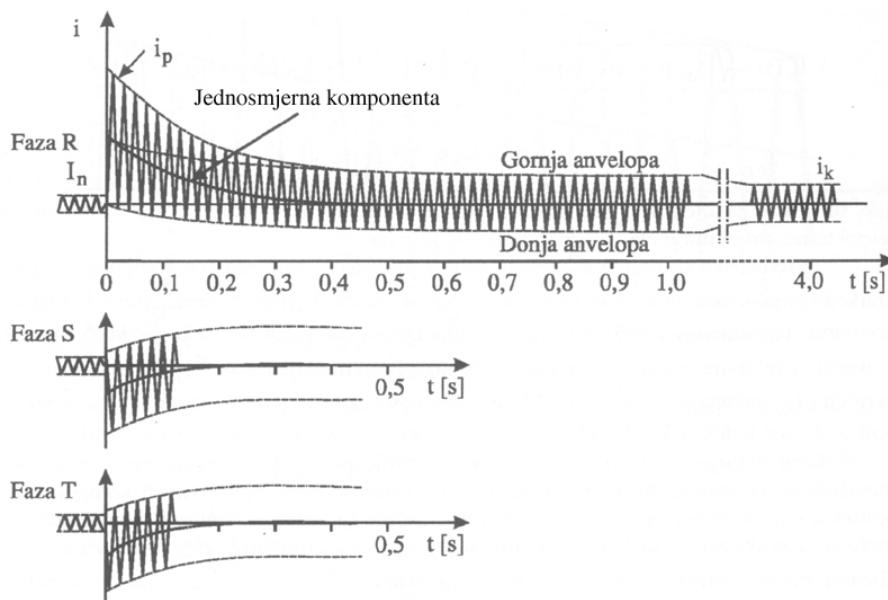


Naizmjenična komponenta struje troplnog kratkog spoja

Trenutna vrijednost struje troplnog kratkog spoja neopterećenog generatora u fazi a:

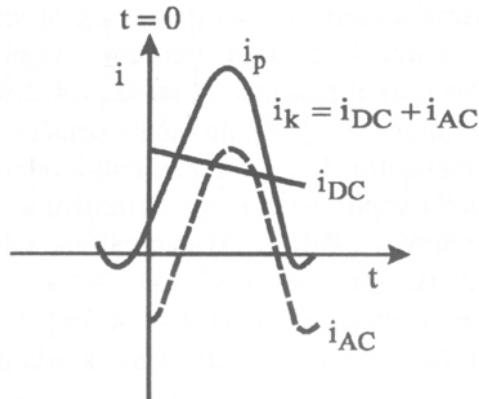
$$i_a''(t) = \sqrt{2}E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_o t + \theta_o)$$

$$- \frac{1}{2} \sqrt{2}E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(2\omega_o t + \theta_o) + \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_d} \right) \cos \theta_o \right] e^{-\frac{t}{T_d}}$$



Tipičan izgled oscilograma struje troplnog kratkog spoja u fazama sinhronog generatora

$$i_k(t) = i_{AC}(t) + i_{DC}(t)$$



Naizmjenična (i_{AC}) i jednosmjerna (i_{DC}) komponenta struje kratkog spoja neposredno nakon kvara

Iz (1.22) je za naizmjeničnu komponentu i_{AC} očigledno da njena amplituda opada od početne subtranzijentne vrijednosti

$$I_m'' = \sqrt{2} I_k'' = \frac{\sqrt{2} E_a(0)}{X_d''} \quad \text{za } t = 0 \quad (1.27)$$

do krajnje sinhrone vrijednosti

$$I_m' = \sqrt{2} I_k' = \frac{\sqrt{2} E_a(0)}{X_d'} \quad \text{za } t = \infty \quad (1.28)$$

Ako se definiše prva amplituda tranzijentne struje relacijom

$$I_m' = \sqrt{2} I_k' = \frac{\sqrt{2} E_a(0)}{X_d'} \quad (1.29)$$

kao i amplitude jednosmjerne komponente (pri $X_d'' \approx X_q''$)

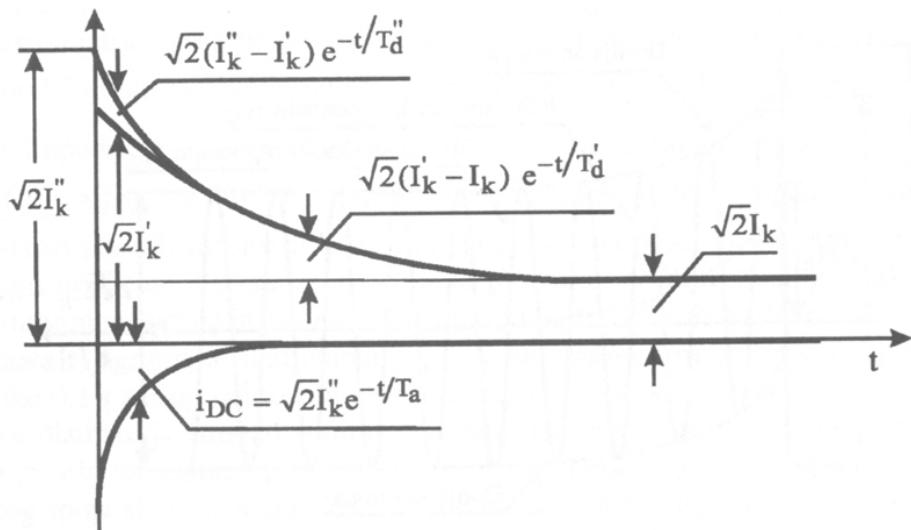
$$I_{DCm} = \frac{\sqrt{2} E_a(0)}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} = \sqrt{2} I_k'' e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1.30)$$

onda je moguće izraz za ukupnu struju kratkog spoja (1.22) predstaviti kao:

$$i''_a(t) = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_k \right] \cos(\omega_o t + \theta_o) - \sqrt{2} I_k e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \theta_o$$

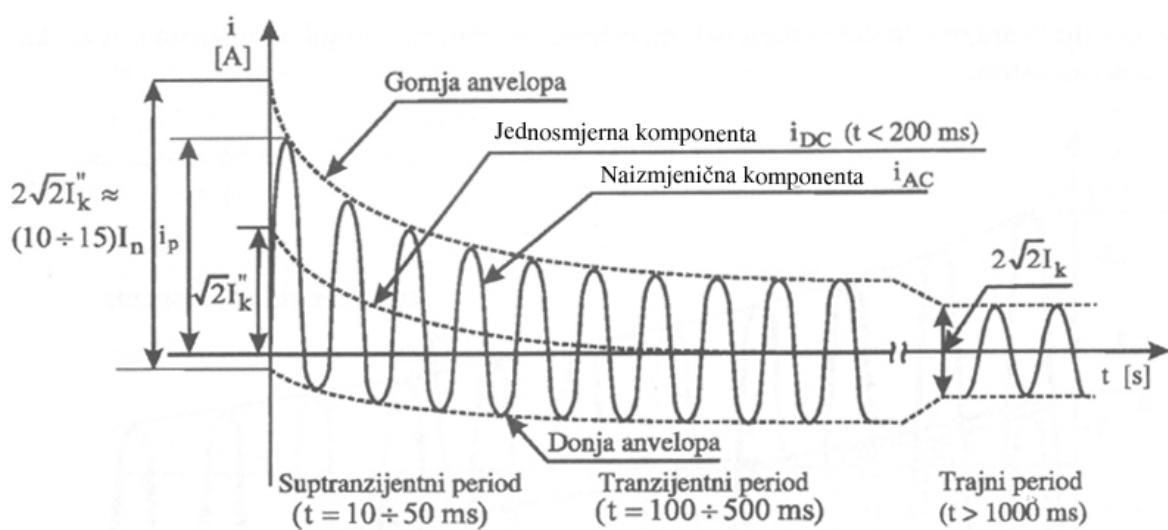
(1.31)

Na Sl. 1.6 prikazane su AC i DC komponente struje, pri čemu je, radi jasnoće, AC komponenta predstavljena samo sa envelopama.



Sl. 1.6 AC i DC komponente struje kratkog spoja

Na Sl. 1.7 ilustrovana je promjena asimetrične struje kratkog spoja sa izraženom DC komponentom.



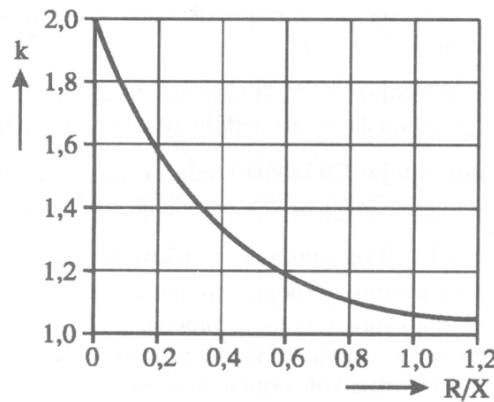
Sl. 1.7 Karakteristična kriva promjene asimetrične struje kratkog spoja

Udarna struja se izračunava preko obrasca:

$$i_p = k \sqrt{2} I_k''$$

gdje je k udarni koeficijent koji zavisi od odnosa R/X ukupne impedanse grane preko koje se napaja kvar.

$$k = 1,02 + 0,98 e^{-3(R/X)}$$



Dijagram udarnog koeficijenta k u funkciji odnosa R/X

Efektivna vrijednost ukupne (asimetrične) struje kvara definiše se kao:

$$\begin{aligned} I_k(t) &= \sqrt{I_{AC}^2(t) + I_{DC}^2(t)} = \\ &= \left\{ \left[\sqrt{2}(I_k'' - I_k') e^{-t/T_d''} + \sqrt{2}(I_k' - I_k) e^{-t/T_d'} + \sqrt{2}I_k \right]^2 + (\sqrt{2}I_k'' e^{-t/T_a})^2 \right\}^{1/2} \end{aligned}$$

Približna kvantifikacija uticaja predopterećenja generatora u subtranzijentnom i tranzijentnom periodu može se izvesti polazeći od relacije [1.14]:

$$\begin{aligned} I_k'' &= I_{k_o}'' + I \sin(\delta + \varphi) \\ I_k' &= I_{k_o}' + I \sin(\delta + \varphi) \\ I_k &= I_{k_o} + I \sin(\delta + \varphi) \end{aligned} \tag{1.38}$$

gdje su sa indeksom o označene vrijednosti struja kratkog spoja neopterećenog generatora. Prema Sl. 1.10 sa δ je označen ugao između fazora napona V i ems E , a φ je fazni stav struje I .

Struja I_k'' se, saglasno (1.38), može izraziti kao:

$$I_k'' = \left[1 + \frac{I}{I_{ko}} \sin(\delta + \varphi) \right] I_{ko} \quad (1.39)$$

kojoj se, imajući u vidu (1.27), može dati oblik:

$$I_k'' = \left[1 + \frac{IX_d''}{V} \sin(\delta + \varphi) \right] \frac{V}{X_d''} \quad (1.40)$$

Izraz u uglastoj zagradi određen je režimskim parametrima mašine u uslovima prije kvara (veličinama V, I, δ, φ) i konstruktivnim parametrom, reaktansom

$$X_d'' = x_d'' \frac{U_n}{I_n} \quad (1.41)$$

Za tipične režime generatora sa $V=U_n$, $I=I_n \cos \varphi = 0,8 - 0,9$ (ind.) i $\delta \approx 20 - 40^\circ$ i srednje vrijednosti $x_d'' = 0,1 - 0,2$, izraz u zagradi ima vrijednosti između 1,08 – 1,12, pa se u prosjeku može računati sa vrijednošću 1,1. Sada je

$$I_k'' = 1,1 \frac{U_n}{X_d''} \quad (1.42)$$

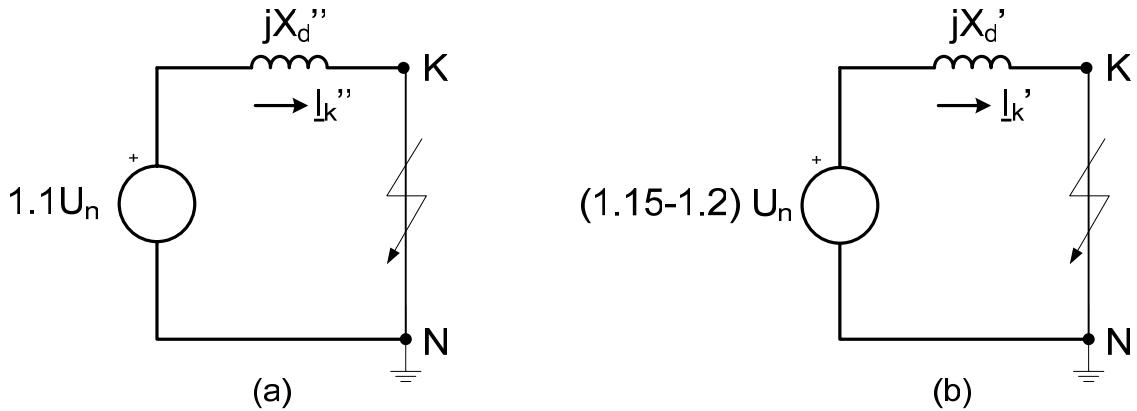
U skladu sa (1.38) i (1.40) može se pisati

$$E'' = V + X_d'' I \sin(\delta + \varphi) = V + X_d'' I_d \neq V + X_d'' I \quad (1.43)$$

Dakle, ems (1.43) preko koje se mogu sa sigurnošću procijeniti struje kvara u subtranzijentnom periodu nije identična (ali jeste bliska) ems mašine iza subtranzijentne reaktanse X_d'' , računatoj sa punom strujom opterećenja I jer je

$$I_d = I \sin(\delta + \varphi) < I \quad (1.44)$$

Prema (1.42) struja I_k'' se može izračunati iz ekvivalentne šeme na Sl. 1.11a, pa je ta šema primjenljiva u početnom subtranzijentnom periodu $t \in (0, \frac{T_d''}{5})$.



Sl. 1.11 Približne zamjenske šeme za određivanje I_k'' (a) i I_k' (b)

Sličnim postupkom se može izvesti približna relacija za izračunavanje I_k' koja uzima u obzir preopterećenje generatora.

$$I_k' = \left[1 + \frac{I X_d'}{V} \sin(\delta + \varphi) \right] \frac{V}{X_d'} \quad (1.45)$$

Pri naprijed navedenim karakterističnim dijapazonima režimskih parametara, kao i pri dijapazonu promjene relativne vrijednosti tranzijentne reaktanse $x_d' = 0,15 - 0,3$, za I_k' se dolazi do izraza

$$I_k' = (1,15 - 1,2) \frac{U_n}{X_d'} \quad (1.46)$$

Saglasno (1.46) struja I_k' se može odrediti iz ekvivalentne šeme na Sl. 1.11b.

Pored ostalih karakterističnih veličina pri kratkom spoju (na primjer, simetrična, nesimetrična rasklopna struja i trajna struja kratkog spoja) čije su definicije detaljnije izložene u [1.9], za praksu su posebno značajne S_k'' i I_{th} .

S_k'' je prema IEC Standardima 909 i 909-2 [1.10] *početna simetrična prividna snaga kratkog spoja*, određena izrazom:

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'' \quad (1.47)$$

Veličina S_k'' je uobičajena mjera za procjenu intenziteta kvara.

Druga karakteristična veličina I_{th} je *ekvivalentna kratkotrajna termička struja kratkog spoja*, određena izrazom

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{\tau_k} \int_0^{\tau_k} i_k^2(t) dt} = \sqrt{\frac{A}{\tau_k}} \quad (1.48)$$

gdje je $A = \int_0^{\tau_k} i_k^2(t) dt$ toplotni impuls, a τ_k trajanje kratkog spoja.

I_{th} je struja mjerodavna za proračun toplotnih efekata struje kratkog spoja na provodnicima i električnoj opremi. To je ona računski konstantna struja koja bi tokom vremena τ_k izazvala isto zagrijavanje kao i promjenljiva struja kratkog spoja $i_k(t)$ iz (1.31). Prema IEC Standardu 865 [1.15] I_{th} se računa kao:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad (1.49)$$

gdje su m i n numerički faktori preko kojih se uvažavaju efekti jednosmjerne struje (m) i naizmjenične (n) komponente struje kratkog spoja.

Zad 1.

Na krajevima trofaznog sinhronog generatora u praznom hodu došlo je do trofaznog kratkog spoja pri uglu $\Theta = 0^\circ$. Karakteristični parametri generatora su:

$$x_d = 1; \quad x'_d = 0.3; \quad x''_d = 0.2; \quad T'_d = 2.8 \text{ s}; \quad T''_d = 0.04 \text{ s}; \quad T_a = 0.2 \text{ s}.$$

- a) Napisati izraz za vremensku promjenu efektivne vrijednosti naizmjenične komponente trofazne struje kratkog spoja koja teče u namotajima statora.
- b) Napisati izraz za vremensku promjenu jednosmjerne komponente trofazne struje kratkog spoja.
- c) Napisati izraz za najveću moguću efektivnu vrijednost struje kratkog spoja
- d) Napisati izraz za vremensku promjenu efektivne vrijednosti ustaljene komponente trofazne struje kratkog spoja.

Amplituda elektromotorne sile generatora u praznom hodu je $E_{\max} = \sqrt{2}$.

Rješenje:

Prema relaciji

$$\begin{aligned} i''_a(t) &= \sqrt{2}E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_o t + \theta_o) \\ &\quad - \frac{1}{2}\sqrt{2}E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d''} \right) \cos(2\omega_o t + \theta_o) + \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_d} \right) \cos \theta_o \right] e^{-\frac{t}{T_a}} \end{aligned}$$

a)

$$I_{AC}(t) = 1 \left[\left(\frac{1}{0.2} - \frac{1}{0.3} \right) e^{-\frac{t}{0.04}} + \left(\frac{1}{0.3} - \frac{1}{1} \right) e^{-\frac{t}{2.8}} + \frac{1}{1} \right] = 1 + 1.67 e^{-\frac{t}{0.04}} + 2.33 e^{-\frac{t}{2.8}}$$

b)

$$I_{DC}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot 1}{0.2} e^{-\frac{t}{0.2}} = 7.07 e^{-\frac{t}{0.2}}$$

c)

$$I_k(t) = \sqrt{I_{AC}^2(t) + I_{DC}^2(t)} = [za t = 0] = 8.66$$

d)

Ona se dobija za $t = \infty$, pa je

$$I = 1 \text{ (pri čemu je } I_{AC} = 1, \text{ a } I_{DC} = 0)$$

Zad 2.

Izračunati struju trofaznog kratkog spoja u prenosnoj šemi za kvar na krajevima generatora (mjesto K1). Poznati su sljedeći podaci:

$$S_n = 100 \text{ MVA};$$

$$x_d = 1.2;$$

$$x'_d = 0.3;$$

$$x''_d = 0.2;$$

$$x_q = 0.75;$$

$$U_{ns} = 15.75 \text{ kV; (linijski napon)}$$

$$x_\sigma = 0.1;$$

$$x''_q = 0.24;$$

$$x_i = 0.22;$$

$$T'_d = 1 \text{ s};$$

$$T''_d = 0.04 \text{ s};$$

$$T''_q = 0.04 \text{ s};$$

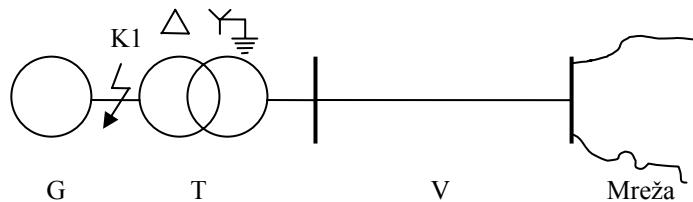
$$T_a = 0.15 \text{ s}.$$

Prije nastanka kvara generator je radio u režimu:

$$U = U_n$$

$$P = 100 \text{ MW}$$

$$\cos \varphi = 1.$$



Rješenje:

Reaktanse mašine se računaju na osnovu poznatih relativnih vrijednosti, i to prema jednačini:

$$X = x \frac{U_n^2}{S_n} = x \frac{15.75^2}{100} = x \cdot 2.49, \text{ pa je}$$

$$X_d = 2.98 \Omega;$$

$$X'_d = 0.745 \Omega;$$

$$X''_d = 0.495 \Omega;$$

$$X_d = 1.87 \Omega;$$

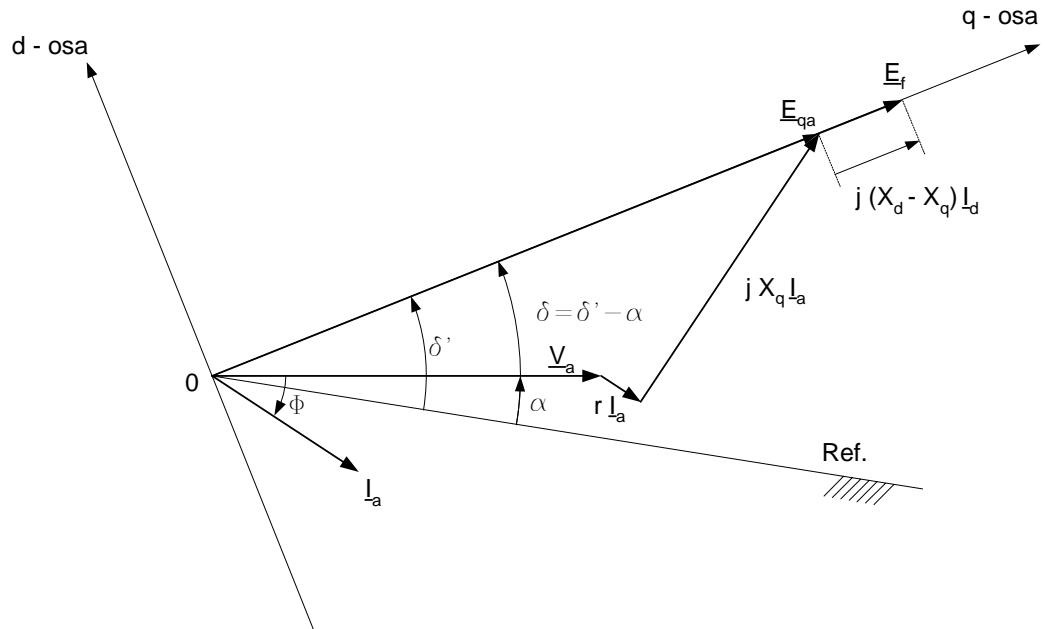
$$X''_q = 0.596 \Omega;$$

Vremenska promjena struje za kratak spoj na krajevima generatora se dobija prema jednačini:

$$i''_a(t) = \sqrt{2} E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_o t + \theta_o)$$

$$- \frac{1}{2} \sqrt{2} E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \cos(2\omega_o t + \theta_o) + \left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X'_d} \right) \cos \theta_o \right] e^{-\frac{t}{T_a}}$$

Kao što se vidi svi parametri su poznati osim režimskih ($E_a(0)$ i Θ_o), koji se određuju na osnovu vektorskog dijagrama mašine.



$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 15.75 \cdot 1} = 3.68 \text{ kA}$$

$$\Theta = \arctg \frac{X_q I \cos \varphi}{U + X_q I \cos \varphi} = \frac{1.87 \cdot 3.68 \cdot 1}{15.75 / \sqrt{3}} = 37^\circ$$

Kada se zanemareni aktivni otpori,(uzimajući u obzir da su U i I u fazi)

$$E = U \cos \Theta + X_d I_d = U \cos \Theta + X_d I \sin(\Theta + \varphi) = 13.85 \text{ kV.}$$

Sada je izraz za struju (za neopterećen generator),

$$i''_a(t) = \sqrt{2} E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_o t + \theta_o) \\ - \frac{1}{2} \sqrt{2} E_a(0) \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d''} \right) \cos(2\omega_o t + \theta_o) + \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_d} \right) \cos \theta_o \right] e^{-\frac{t}{T_d}}$$