

## ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ) Фебруар 2019.

Трофазни уљни енергетски трансформатор са номиналним подацима:  $S_n = 400 \text{ kVA}$ ,  $20/0.4 \text{ kV}$ ,  $50 \text{ Hz}$ , спрега  $\text{Dyn7}$ . У огледу кратког споја при номиналној струји измерено је  $U_k = 800 \text{ V}$ ,  $P_{kn} = 4800 \text{ W}$ . У огледу празног хода при номиналном напону измерено је:  $P_0 = 930 \text{ W}$ ,  $I_0 = 23 \text{ A}$ .

### И део

1. Нацртати шему веза и векторски дијаграм напона задатог трансформатора представљајући намотаје као калемове. .... (7)
2. Уколико би  $1/3$  навојака примара грешком била намотана у супротном смеру, колико би износила ефективна вредност струје празног хода и вредност губитака у гвожђу при номиналном напону напајања? Штајнмицов коефицијент је једнак 2. ....(12)
3. Израчунати параметре еквивалентног кола трансформатора са НН стране и скицирати шему са уписаним бројним вредностима свих електричних величина. ....(10)
4. Одредити снагу трофазне кондензаторске батерије коју треба везати на секундар како би пад напона, при номиналном оптерећењу на секундару, уз фактор снаге 0.8 (инд), био једнак нули. При прорачуну занемарити попречну компоненту пада напона. ....(10)
5. Снага загревања током првог дела огледа загревања **трофазног** двонамотајног трансформатора номиналне снаге  $50 \text{ MVA}$  у кратком споју (загревање укупном номиналном снагом губитака) износи  $P_{g \text{ tot}} = 264350 \text{ W}$ . Номинални губици у магнетном колу, измерени у огледу празног хода, износе  $P_0 = 15600 \text{ W}$ . Губици при номиналној струји у свакој од фаза намотаја НН и намотаја ВН, добијени прорачуном, износе: Цулови губици  $P_{LV/HV} = 22744 \text{ W} / 42239 \text{ W}$ , а додатни губици услед утицаја магнетног поља у коме се налазе проводници  $P_{\text{dod LV/HV}} = 2772 \text{ W} / 2870 \text{ W}$ .
  - а) Нацртати топлотну шему са три чвора (један чвор за намотај примара, један чвор за намотај секундара и један чвор за остале делове трансформатора – уље, језгро и суд) и три топлотна капацитета. .... (8)
  - б) За сваку од три вредности снаге инјектирања губитака у топлотној шеми написати колико износе у номиналном радном режиму рада трансформатора. .... (8)

### II део

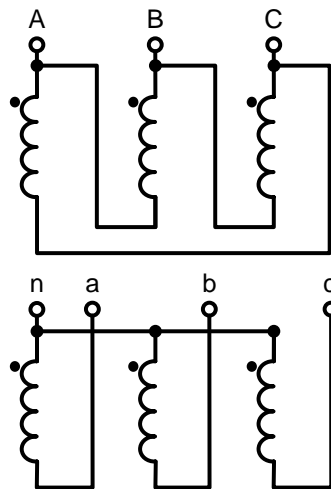
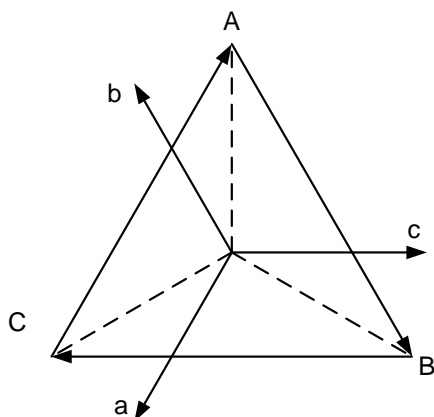
6. Увести апроксимацију стварног облика магнетног хистерезиса са две праве линије и на основу ње извести израз за максималну вредност струје при укључењу трансформатора у празном ходу. Потребно је графички или текстуално дефинисати сваку од величина које фигуришу у коначном изразу. ....(11)
7. Дати график на коме су приказани: расподела потенцијала у области чела пренапонског таласа, расподела потенцијала на крају пренапонског таласа и границе осцилације потенцијала у времену, у зависности од позиције дуж висине намотаја на чији један крај наилази пренапонски талас, док је други крај отворен. Скице дати за две вредности коефицијента који карактерише однос серијских и паралелних капацитета ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ), при чему је  $\alpha_1 \approx 3 \alpha_2$ . ....(11)
8. Нацртати шему монофазног аутотрансформатора и извести израз за однос пролазне и типске снаге. (9)
9. Дати трансформатор треба да ради паралелно са трансформатором спреге  $\text{Yd11}$ , исте номиналне снаге и напона кратког споја, преносног односа  $20/0.42 \text{ kV}$ . Приказати како треба међусобно повезати крајеве примара и секундара ова два трансформатора како би се имала минимална струја изједначења. Одредити вредност струје изједначења када трансформатори раде паралелно у празном ходу. ....(12)
10. Одредити фазне и линијске струје примара и секундара ако је између крајева А и С примара доведен напон ефективне вредности  $20 \text{ kV}$ , а на крајеве секундара је прикључено симетрично трофазно резистивно оптерећење отпорности  $R_p = 1 \Omega/\text{фази}$ . ....(12)

Испит траје 180 минута, а други колоквијум (питања 6-10) 120 минута. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед.

У Београду, 9. 2. 2019.

Проф. др Зоран Лазаревић  
Проф. др. Зоран Радаковић

1.



2. С обзиром на то да је напон напајања непромењен, укупан флуks по фази (намотају) биће исти. Међутим, с обзиром на то да је сада једна трећина навојака намотана у супротном смеру, флуks у језгру (флуks кроз навојак) неће бити исти:

$$\psi_1 = \frac{U_{1nf}}{2\pi f} = N_1 \Phi = \frac{2}{3} N_1 \Phi' - \frac{1}{3} N_1 \Phi' = \frac{1}{3} N_1 \Phi'$$

где је:

- $\psi_1$  – укупан флуks фазног намотаја примара (исти у оба случаја);
- $\Phi$  – флуks по навојку у случају када су сви навојци намотани у истом смеру;
- $\Phi'$  – флуks по навојку у случају када је 1/3 навојака намотана у супротном смеру.

Флуks по навојку ће у разматраном случају бити једнак:

$$\Phi' = 3\Phi$$

па ће и максимална индукција у гвожђу бити 3 пута већа него у оригиналном случају:

$$B'_m = 3B_m$$

Уз претпоставку да је засићење магнетског кола занемарљиво<sup>1</sup>, може се одредити нова вредност струје празног хода на основу следећих релација:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \frac{N_1 I_0}{R_\mu} \\ \Phi' = 3\Phi &= \frac{\frac{2}{3} N_1 I'_0 - \frac{1}{3} N_1 I'_0}{R_\mu} = \frac{N_1 I'_0}{3R_\mu} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I'_0 = 9I_0 = 207 \text{ A}$$

Добијена вредност струје празног хода сведена је на секундар. Како је очекивано да се трансформатор напаја са стране примара, пожељно је свести ову вредност на примарну страну, и тада она износи:

$$I'_{01f} = \frac{I'_0}{n} = \frac{207 \text{ A}}{20 / (0.4 / \sqrt{3})} = 2.39 \text{ A}$$

Вредност губитака у гвожђу сразмерна је квадрату индукције (с обзиром на то да је Штајнмицов коефицијент једнак 2):

$$P'_0 = P_0 \cdot \left( \frac{B'_m}{B_m} \right)^2 = 9P_0 = 8370 \text{ W}$$

<sup>1</sup> У реалности, ово је врло груба претпоставка, јер је индукција у магнетском колу 3 пута већа од вредности код оригиналног трансформатора, па би магнетско коло у овом случају било у дубоком засићењу, и струја празног хода би била веома велика, вероватно већа и од номиналне струје. Што се губитака у гвожђу тиче, они зависе од максималне вредности индукције, тако да ова претпоставка не утиче на тачност прорачуна губитака у гвожђу.

### 3. ПХ (изведен са нисконапонске стране):

$$R_a'' = \frac{U_{2nf}^2}{P_0/3} = \frac{(400/\sqrt{3})^2}{310} = 172 \Omega \Rightarrow I_{af}'' = \frac{U_{2nf}}{R_a''} = 1.342 \text{ A}$$

$$I_{\mu f}'' = \sqrt{I_{0f}''^2 - I_{af}''^2} = \sqrt{23^2 - 1.342^2} = 22.96 \text{ A}$$

$$X_{\mu}'' = \frac{U_{2nf}}{I_{\mu f}''} = \frac{400/\sqrt{3}}{22.96} = 10.06 \Omega$$

### КС (изведен са високонапонске стране):

$$R_k'' = \frac{P_{kn}}{3I_{2nf}^2} = 4.80 \text{ m}\Omega \Rightarrow R_1'' \approx R_2'' \approx \frac{R_k''}{2} = 2.40 \text{ m}\Omega$$

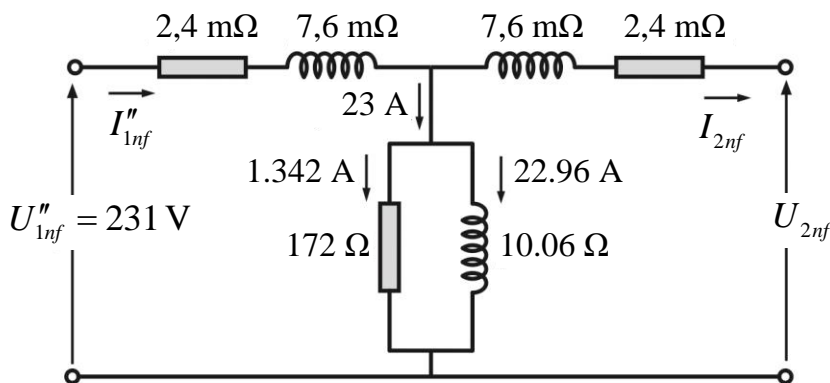
$$U_{kf} = U_k = 800 \text{ V (фазна вредност напона кратког споја са ВН стране)}$$

$$I_{1nf} = \frac{S_n}{3U_{1nf}} = 6.667 \text{ A}$$

$$Z_k'' = Z_k' \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{U_{kf}}{I_{1nf}} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{800}{6.667} \cdot \frac{1}{86.6^2} = 16 \text{ m}\Omega$$

$$X_k'' = \sqrt{Z_k''^2 - R_k''^2} = 15.26 \text{ m}\Omega \Rightarrow X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2}'' \approx \frac{X_k''}{2} = 7.63 \text{ m}\Omega$$

Заменска шема са параметрима и величинама сведеним на НН страну:



### 4. Оптерећење на крајевима секундару може се изразити као:

$$\underline{S}_p = P_p + jQ_p = 0.8 \cdot S_n + j0.6 \cdot S_n = (320 + j240) \text{ kVA}$$

Додавањем батерије кондензатора, мења се реактивна снага на крајевима секундару, тако да ће у том случају укупна комплексна привидна снага на крајевима секундару бити једнака:

$$\underline{S}_{p, \text{komp}} = P_p + j(Q_p - Q_C)$$

Пад напона, тј. његова подужна компонента, дат је као:

$$\Delta u \approx a = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi)$$

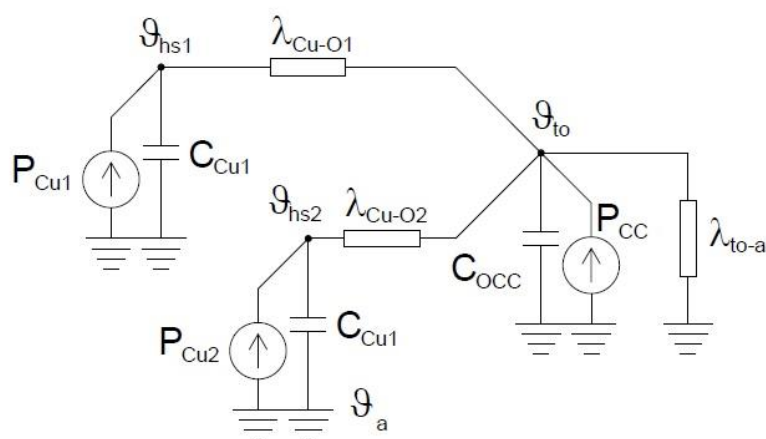
Из услова да је пад напона једнак нули, има се да треба да важи:

$$u_r \cos \varphi = -u_x \sin \varphi \Rightarrow \tan \varphi = -\frac{u_r}{u_x} \Rightarrow \frac{Q_p - Q_C}{P_p} = -\frac{u_r}{u_x} = -\frac{R_k}{X_k}$$

Вредности отпорности и реактансе кратког споја израчунате су у претходном задатку, па се има да је:

$$\frac{Q_p - Q_C}{P_p} = -0.3145 \Rightarrow Q_C = Q_p + 0.3145 \cdot P_p = \boxed{340.6 \text{ kvar}}$$

5. a)



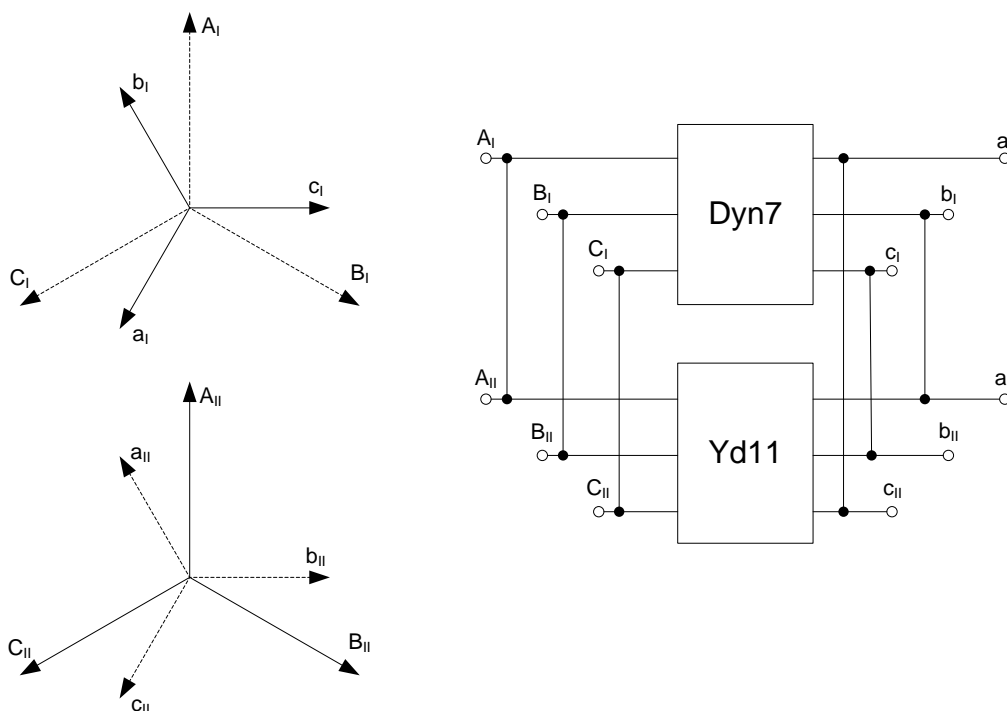
б)

$$P_{Cu1} = 3(P_{JLV} + P_{dodLV}) = 76548 \text{ W}$$

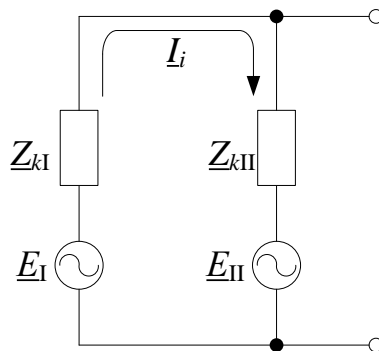
$$P_{Cu2} = 3(P_{JHV} + P_{dodHV}) = 135327 \text{ W}$$

$$P_{CC} = P_o + (P_{g\text{ tot}} - P_o - P_{Cu1} - P_{Cu2}) = 52475 \text{ W}$$

6. Почетак текста: Поглавље 6, страна 5 испод слике 6.3., до краја стране 7 + објашњење  $\Psi_m$  (трећа формула на страни 4.
7. Поглавље 6, Слика 6.23 и Слика 6.25.
8. Одељак 10.3., до израза за однос пролазне и типске снаге око средине стране 9.
9. Векторски дијаграми и шема веза прикључака примара и секундара датих трансформатора приказани су на слици.



С обзиром на то да се преносни односи датих трансформатора међусобно разликују, за анализу паралелног рада биће примењено еквивалентно коло дато на слици испод.



Параметри у еквивалентном колу представљају **еквивалентне фазне напоне** на страни секундара, и **импедансе еквивалентне звезде**, такође сведене на секундар. Активна компонента импеданси кратког споја биће занемарена, па величине еквивалентног кола имају следеће вредности:

$$E_I = \frac{U_{02}^I}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$$

$$E_{II} = \frac{U_{02}^{II}}{\sqrt{3}} = 242.5 \text{ V}$$

$$Z_{kI} = jX_{kI}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot Z_{BI}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{2f}^I}{I_{2lin}^I} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02}^I / \sqrt{3}}{S_{nI} / (\sqrt{3} U_{02}^I)} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_{02}^I)^2}{S_{nI}} = j16 \text{ m}\Omega$$

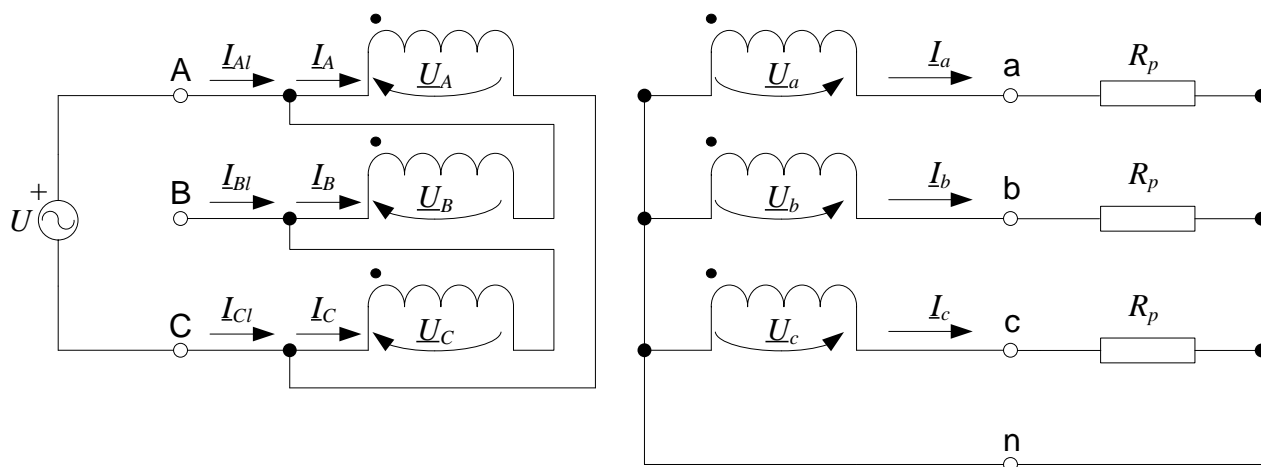
$$Z_{kII} = jX_{kII}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot Z_{BII}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{2f}^{II}}{I_{2lin}^{II}} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02}^{II} / \sqrt{3}}{[S_{nII} / (3U_{02}^{II})] \cdot \sqrt{3}} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_{02}^{II})^2}{S_{nII}} = j17.64 \text{ m}\Omega$$

При томе, напон кратког споја оба трансформатора једнак је  $u_k = U_k / U_{1n} \cdot 100 = 4\%$ . Приметити да су напони оба трансформатора у фази, захваљујући томе што су крајеви два трансформатора међусобно повезани тако да не постоји фазни раскорак између напона секундара.

На основу датог еквивалентног кола и добијених вредности напона и импеданси, лако се добија да је струја изједначења у празном ходу једнака:

$$I_i = \frac{E_I - E_{II}}{Z_{kI} + Z_{kII}} = \boxed{j341.85 \text{ A}}$$

**10.** Шема веза која одговара описаном режиму приказана је на слици испод.



Једначине физичке очигледности у фазном домену и у домену симетричних компоненти:

- Примар:

$$U_A = U \Rightarrow U_{1d} + U_{1i} = U$$

$$U_A + U_B + U_C = 0 \Rightarrow U_{10} = 0$$

$$I_{Bl} = 0 \Rightarrow I_B - I_C = 0 \Rightarrow (a^2 - a)I_{1d} + (a - a^2)I_{1i} = 0 \Rightarrow I_{1d} = I_{1i}$$

- Секундар:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= R_p I_a \\ U_b &= R_p I_b \\ U_c &= R_p I_c \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} U_{2d} + U_{2i} + U_{20} &= R_p (I_{2d} + I_{2i} + I_{20}) \\ a^2 U_{2d} + a U_{2i} + U_{20} &= R_p (a^2 I_{2d} + a I_{2i} + I_{20}) \\ a U_{2d} + a^2 U_{2i} + U_{20} &= R_p (a I_{2d} + a^2 I_{2i} + I_{20}) \end{aligned}$$

Дате напонске једначине секундара могу се свести на једноставнију форму једноставним математичким манипулацијама:

$$U_{2d} = R_p I_{2d}$$

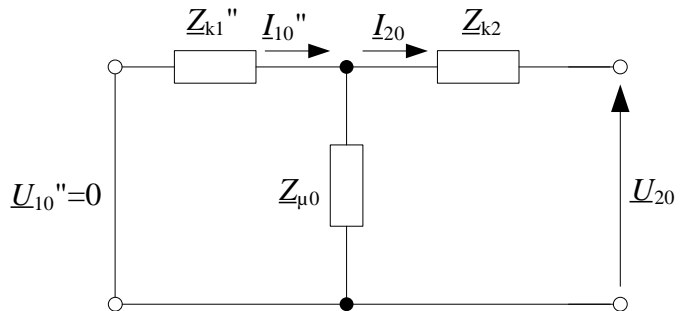
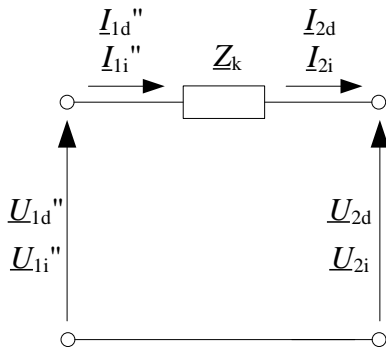
$$U_{2i} = R_p I_{2i}$$

$$U_{20} = R_p I_{20}$$

Напонске једначине трансформатора које повезују напоне примара и секундара у  $di0$  домену гласе (погледати еквивалентна кола за  $d$ ,  $i$  и  $0$  компоненту испод):

$$\left. \begin{aligned} U_{1d}'' - Z_k I_{2d} &= U_{2d} \\ U_{1i}'' - Z_k I_{2i} &= U_{2i} \\ U_{10}'' - Z_k I_{20} &= U_{20} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} U_{1d}'' &= (R_p + Z_k) I_{2d} \\ U_{1i}'' &= (R_p + Z_k) I_{2i} \\ 0 &= (R_p + Z_k) I_{20} \end{aligned}$$

одакле је  $I_{20} = 0$ . Дакле, у посматраном колу не постоје нулте компоненте напона и струја.



Даље, имајући у виду да је:

$$\left. \begin{aligned} I_a &= -I_A/n = -I_A'' \\ I_{2d} &= -I_{1d}'' \\ I_{2i} &= -I_{1i}'' \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_{2d} = I_{2i}$$

Знак минус је последица позиција хомологих крајева (погледати шему веза на почетку решења). Дакле, важи једнакост директне и инверзне компоненте струја секундара. Сада се на основу напонских једначина у домену симетричних компоненти има да је:

$$U_{1d}'' + U_{1i}'' = 2(R_p + Z_k) I_{2d} \Rightarrow I_{2d} = \frac{U_{1d}'' + U_{1i}''}{2(R_p + Z_k)} = \frac{U''}{2(R_p + Z_k)} \stackrel{R_p \gg Z_k}{\approx} \frac{U/n}{2R_p} = 115.47 \text{ A}$$

Фазне (истовремено и линијске) струје секундара су једнаке:

$$I_a = I_{2d} + I_{2i} = 2I_{2d} = 230.94 \text{ A}$$

$$I_b = a^2 I_{2d} + a I_{2i} = -I_{2d} = -115.47 \text{ A}$$

$$I_c = a I_{2d} + a^2 I_{2i} = -I_{2d} = -115.47 \text{ A}$$

Фазне струје примара:

$$I_A = I_{1d} + I_{1i} = -\frac{1}{n}(I_{2d} + I_{2i}) = -\frac{1}{n}I_a = -2.67 \text{ A}$$

$$I_B = a^2 I_{1d} + a I_{1i} = -\frac{1}{n}(a^2 I_{2d} + a I_{2i}) = -\frac{1}{n}I_b = 1.33 \text{ A}$$

$$I_C = a I_{1d} + a^2 I_{1i} = -\frac{1}{n}(a I_{2d} + a^2 I_{2i}) = -\frac{1}{n}I_c = 1.33 \text{ A}$$

Линијске струје

$$I_{Al} = I_A - I_B = -4 \text{ A}$$

$$I_{Bl} = I_B - I_C = 0 \text{ A}$$

$$I_{Cl} = I_C - I_A = 4 \text{ A}$$