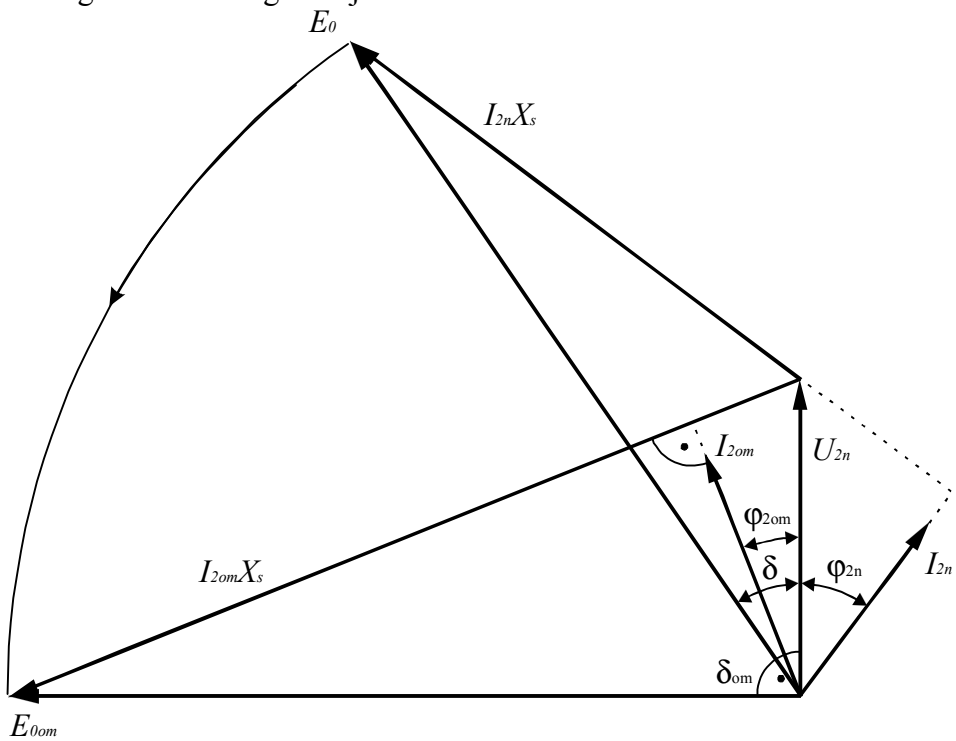
Naloga:

Sinhronski generator s cilindričnim rotorjem (turbo generator) ima nazivno moč S_n = 94 MVA, nazivno napetost na priključnih sponkah U_{2n} = 10.5 kV, nazivno frekvenco f = 50 Hz, nazivni faktor delavnosti toka $\cos\varphi_{2n}$ =0.8 ter relativno sinhronsko reluktano X_{sr} =1.8. Generator obratuje paralelno na omrežju nazivne napetosti in frekvence in je nazivno obremenjen.

a) Narišite v relativnem merilu kazalčni diagram za nazivno obremenitev z upoštevanjem linearizirane karakteristike (nezasičen stroj). Določite (grafično in analitično) relativni iznos inducirane napetosti E_{0r}.
b) Generator obratuje na togem nazivnem omrežju (U_2 = konstantna) in je nazivno vzbujan. Vzbujalni tok se ne spreminja. Moč turbine počasi povečujemo. Koliko veliko moč ima turbina, tik preden generator pade iz sinhronizma z omrežjem (električne in mehanske izgube zanemarimo)? Narišite kazalčni diagram tega obratovalnega stanja.

Rešitev:

Kazalčna diagrama
- nazivnega obratovalnega stanja in
- omahnega obratovalnega stanja.



a) Analitični izračun:

$$E_{0r} = \sqrt{(U_{2nr} + I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_{2n})^2 + (I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_{2n})^2}$$

$U_{2nr} = U_{2r}$ = 1 (100%) ... relativna nazivna napetost
I_{2nr} = 1 ... relativni nazivni tok

$Z_{nr} = \dfrac{U_{2nr}}{I_{2nr}} = 1$ ... relativna nazivna impedanca

$X_{sr} = \dfrac{X_s}{Z_n} = \dfrac{X_s \cdot I_{2n}}{U_{2n}}$ ... relativna sinhronska reluktanca

$E_{0r} = \dfrac{E_0}{U_{2n}}$ ... relativna inducirana napetost nezasičenega stroja (linearna karakteristika)

$$E_{0r} = \sqrt{(1+1\cdot 1.8\cdot 0.6)^2 + (1\cdot 1.8\cdot 0.8)^2} = \underline{\underline{2.53}}$$

E_{0r} lahko odčitamo iz kazalčnega diagrama v merilu!

b) Če v celoti zanemarimo izgube (električne in mehanske) je mehanska moč pogonske turbine P_{meh} enaka električni delovni moči, ki jo generator odda v omrežje:

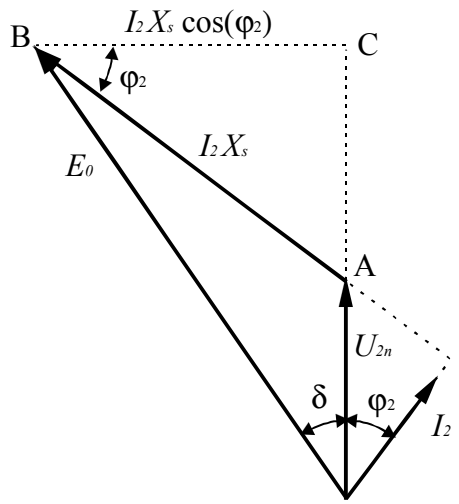
$$P_{meh} = P_2.$$

Električna delovna moč P_2 je:

$$P_2 = m \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 .$$

m ... število faz

Iz kazalčnega diagrama je razvidno, da je razdalja $\overline{\mathrm{BC}}$ sorazmerna $I_2 \cdot X_s \cdot \cos\varphi_2$.



Zavisi od inducirane napetosti E_0 in kolesnega kota δ:

$$I_2 \cdot X_s \cdot \cos\varphi_2 = E_0 \cdot \sin\delta .$$

Torej bo :

$$I_2 \cdot \cos\varphi_2 = \frac{E_2}{X_s} \cdot \sin\delta .$$

Pravkar dobljeni izraz vstavimo v izraz za izračun električne moči in dobimo:

$$P_2 = m \cdot \frac{E_0 \cdot U_2}{X_s} \cdot \sin\delta .$$

nazivna moč generatorja je:

$$S_{2n} = m \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} .$$

Razmerje delovne in nazivne moči bo:

$$\frac{P_2}{S_{2n}} = \frac{m \cdot E_0 \cdot U_2}{m \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \cdot X_s} \cdot \sin\delta = \frac{U_2}{U_{2n}} \cdot \frac{E_0}{U_{2n}} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n} \cdot X_s} \cdot \sin\delta .$$

$\frac{U_2}{U_{2n}} = U_{2r}$ ... relativna napetost na sponkah generatorja

$\frac{E_0}{U_{2n}} = E_{0r}$ ... relativna inducirana napetost (nezasičenega stroja)

$\frac{U_{2n}}{I_{2n} \cdot X_s} = \frac{Z_n}{X_s} = \frac{1}{X_{sr}}$ ... recipročna vrednost relativne sinhronske reaktance

$$\boxed{\frac{P_2}{S_{2n}} = \frac{U_{2r} \cdot E_{0r}}{X_{sr}} \cdot \sin\delta}$$

Generator omahne pri $\delta = \pi/2$ ($P_2 = P_{meh} = P_{om}$):

$$\sin\delta = \sin(\pi/2) = 1,$$

$$\frac{P_{om}}{S_{2n}} = \frac{U_{2r} \cdot E_{0r}}{X_{sr}} = \frac{1 \cdot 2.53}{1.8} = 1.41 ,$$

$$P_{om} = 1.41 \cdot S_{2n} = 1.41 \cdot 94 \cdot 10^6 = \underline{\underline{132\ \mathrm{MW}}}$$

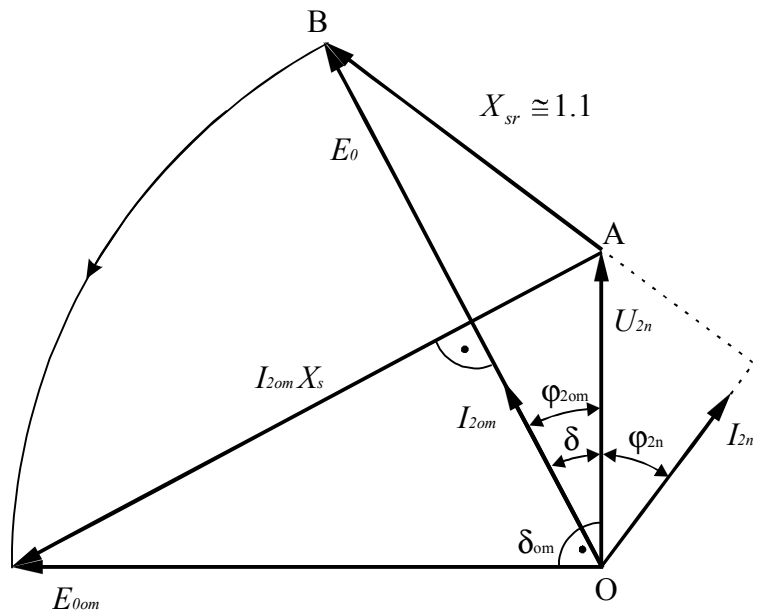
Naloga:

Sinhronski generator s cilindričnim rotorjem ima nazivne podatke: 5 MVA, 4360 V, 50 Hz, $\cos\varphi_{2n} = 0.8$. Pri obratovanju na nazivnem togem omrežju in nazivni obremenitvi je vzbujalni tok I_1 naravnan na 190% vzbujalnega toka za prazen tek!

a) Določite relativno sinhronsko reaktanco!
b) Kako velika je mehanska moč pri kateri nazivno vzbujen generatorja pade iz sinhronizma z nazivnim omrežjem?

Rešitev:

a) Kazalčni diagram:
Če je generator vzbujan s tokom $I_{1n} = 1.9 \cdot I_1$ (linearizirana karakteristika praznega teka), je tudi inducirana napetost $E_{0nr} = 1.9 \cdot E_{0r}$, kar pomeni , da bo $\overline{OB} \cong 1.9 \cdot \overline{OA}$



Iz kazalčnega diagrama za nazivno obratovalno stanje velja:

$$E_{0r}^{\ 2} = (U_{2nr} + I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_{2n})^2 + (I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_{2n})^2,$$

$$E_{0r}^{\ 2} = U_{2nr}^{\ 2} + 2 \cdot U_{2nr} \cdot I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_{2n} + (I_{2nr} \cdot X_{sr})^2 \cdot (\sin^2\varphi_{2n} + \cos^2\varphi_{2n}),$$

$$(I_{2nr} \cdot X_{sr})^2 + 2 \cdot U_{2nr} \cdot I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_{2n} - E_{0r}^{\ 2} + U_{2nr}^{\ 2} = 0,$$

$U_{2nrI} = 1$
$I_{2nr} = 1$
$\sin\varphi_{2n} = 0.6$
$E_{0r} = 1.9$

$$1 \cdot X_{sr}^{\ 2} + 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot X_{sr} \cdot 0.6 - 1.9^2 + 1^2 = 0,$$

$$X_{sr}^{\ 2} + 1.2 \cdot X_{sr} \cdot 0.6 - 2.61 = 0,$$

$$X_{sr(1)} = \underline{\underline{1.123}},$$

$X_{sr(2)} < 0$: ni fizikalna rešitev!

b)

$$P_{om} = \frac{U_{2nr} \cdot E_{0omr}}{X_{sr}} \cdot S_{2n} = \frac{1 \cdot 1.9}{1.123} \cdot 5 \cdot 10^6 = \underline{\underline{8.46\,\text{MW}}}$$

$E_{0omr} = E_{0nr} = 1.9$ (nazivni vzbujalni tok)

<u>Naloga:</u>

Sinhronski generator s podatki: 10 MVA, 10.5 kV, 50 Hz, $\cos\varphi_{2n} = 0.7$ obratuje na nazivnem togem omrežju. Pri nazivni obremenitvi je vzbujalno navitje termično maksimalno izkoriščeno (vzbujalni tok $I_1 = I_{1max}$).

a) Določite moč generatorja, če se spremeni faktor delavnosti toka od nazivne vrednosti $\cos\varphi_{2n}$ na vrednost $\cos\varphi_2 = 0.5$!

Koliko se mora spremeniti vzbujalni tok I_1,

b) če se bremenski tok zmanjša na $I_2 = 0.25 \cdot I_{2n}$ pri $\cos\varphi_{2n}$,
c) če se bremenski tok zmanjša na $I_2 = 0.5 \cdot I_{2n}$ pri $\cos\varphi_2 = 1$?

Rešitev:

Vzbujalno navitje je termično maksimalno izkoriščeno, kar pomeni, da je vzbujalni tok I_1 maksimalen možen! Večanje vzbujalnega toka ni možno, zato tudi napetost E_0 (linearna karakteristika praznega teka) ostane nespremenjena $E_{0r}' = E_{0r}$.

a) Nazivna obremenitev:

$$E_{0nr} = \sqrt{(U_{2nr} + I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_{2n})^2 + (I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_{2n})^2},$$

$$E_{0nr} = \sqrt{(1 + 1 \cdot 1.2 \cdot 0.714)^2 + (1 \cdot 1.2 \cdot 0.7)^2} = 2.04.$$

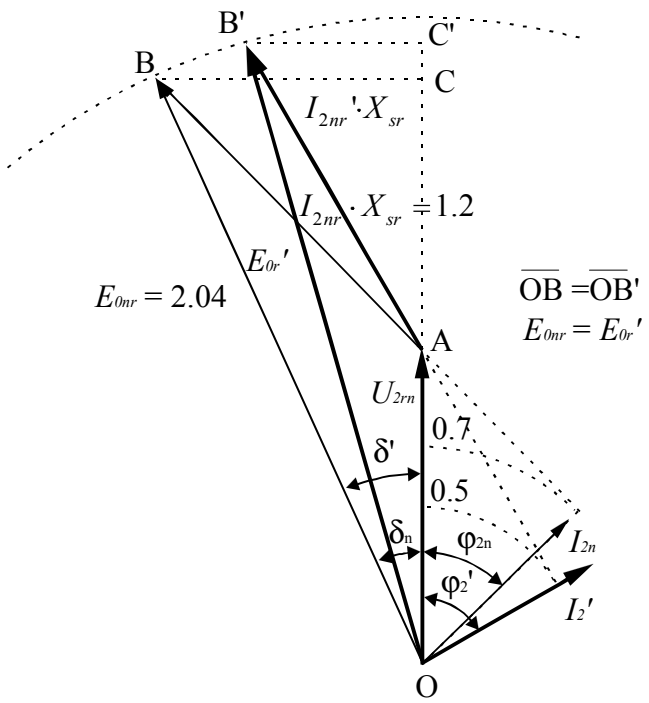
Kolesni kot:

$$\delta_n = \arctan \frac{I_{2nr} \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_{2n}}{U_{2nr} + I_{2nr} \cdot X_{sn} \cdot \sin\varphi_{2n}},$$

$$\delta_n = \arctan \frac{1 \cdot 1.2 \cdot 0.7}{1 + 1 \cdot 1.2 \cdot 0.714} = \arctan(0.45239) = 24.34^0,$$

$$\varphi_{2n} = \arccos 0.7 = 45.6^0,$$

$$\varphi_2 = \arccos 0.5 = 60^0,$$



$$E_{0r}'^2 = (U_{2nr} + I_{2r}' \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_2')^2 + (I_{2r}' \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_2')^2,$$

$$E_{0r}'^2 = (1 + I_{2r}' \cdot 1.2 \cdot 0.866)^2 + (I_{2r}' \cdot 1.2 \cdot 0.5)^2,$$

$$I_{2r}'^2 + 1.44 \cdot I_{2r}' - 2.194 = 0,$$

$$I_{2r(1)}' = 0.927,$$

$I_{2r(2)}' < 0$ ni fizikalna rešitev.

Razmerje moči:

$$\frac{S_2'}{S_{2n}} = \frac{m \cdot U_{2n} \cdot I_2'}{m \cdot U_{2n} \cdot I_{2n}} \quad \Rightarrow \quad S_2' = \frac{I_2'}{I_{2n}} \cdot S_{2n} = I_{2r}' \cdot S_{2n} = 0.927 \cdot 10 \cdot 10^6 = \underline{\underline{9.27\ \mathrm{MW}}}\,.$$

Kolesni kot:

$$\delta' = \arctan \frac{I_{2r}' \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_2'}{U_{2nr} + I_{2r}' \cdot X_{sn} \cdot \sin\varphi_2'} = \arctan \frac{0.927 \cdot 1.2 \cdot 0.5}{1 + 0.927 \cdot 1.2 \cdot 0.866} = \underline{\underline{15.8^0}}$$

b)

$$I_2' = 0.25 \cdot I_{2n}, \qquad \cos\varphi_2' = \cos\varphi_{2n}\,,$$

$$I_1' = I_{1n} \cdot \frac{E_{0r}'}{E_{0nr}},$$

E_{0nr} =2.04 (iz točke a),

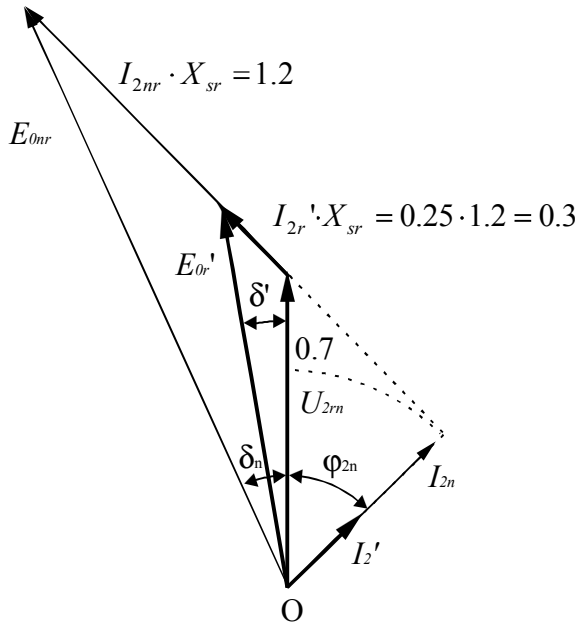
$$E_{0r}' = \sqrt{(U_{2nr} + I_{2r}' \cdot X_{sr} \cdot \sin\varphi_2')^2 + (I_{2r}' \cdot X_{sr} \cdot \cos\varphi_2')^2}\,,$$

$$E_{0r}' = \sqrt{(1 + 0.25 \cdot 1.2 \cdot 0.714)^2 + (0.25 \cdot 1.2 \cdot 0.7)^2} = \underline{\underline{1.23}}\,.$$

Vzbujalni tok:

$$I_1' = I_{1n} \cdot \frac{1.23}{2.04} = \underline{\underline{0.604 \cdot I_{1n}}}\,.$$

Vzbujalni tok se mora zmanjšati na 0.604 nazivnega!



$$\delta' = \arctan\frac{I_{2r}'\cdot X_{sr}\cdot\cos\varphi_2'}{U_{2nr}+I_{2r}'\cdot X_{sn}\cdot\sin\varphi_2'} = \arctan\frac{0.25\cdot 1.2\cdot 0.7}{1+0.25\cdot 1.2\cdot 0.714} = \underline{\underline{9.8^0}}\,.$$

c)

$$I_2' = 0.25\cdot I_{2n}, \qquad \cos\varphi_2' = 1,$$

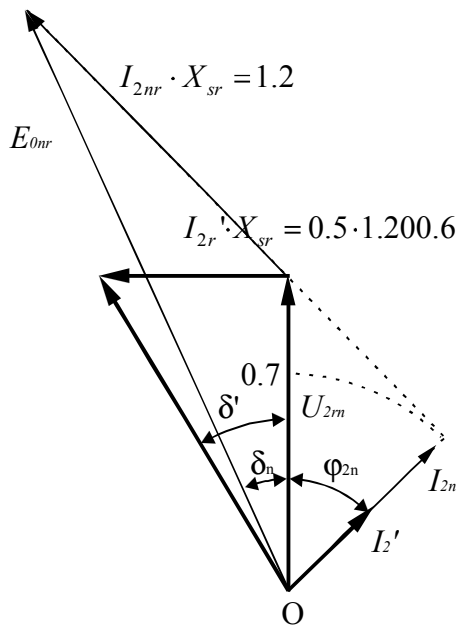
$$E_{0r}' = \sqrt{(U_{2nr}+I_{2r}'\cdot X_{sr}\cdot\sin\varphi_2')^2+(I_{2r}'\cdot X_{sr}\cdot\cos\varphi_2')^2}\,,$$

$$E_{0r}' = \sqrt{(1+0)^2+(0.5\cdot 1.2\cdot 1)^2} = \underline{\underline{1.17}}\,.$$

Vzbujalni tok:

$$I_1' = I_{1n}\cdot\frac{1.17}{2.04} = \underline{\underline{0.57\cdot I_{1n}}}\,.$$

Vzbujalni tok se mora zmanjšati na 0.57 nazivnega!



$$\delta' = \arctan\frac{I_{2r}'\cdot X_{sr}}{U_{2nr}} = \arctan\frac{0.5\cdot 1.2}{1} = \underline{\underline{31^0}}\,.$$

Navitja:

Narišite navijalno shemo, določite navijalno razpredelnico in izračunajte faktorje navitij osnovne harmonske komponente inducirane napetosti za trifazni stroj, ki ima na statorju N =24 enakomerno razporejenih utorov in:
a) $2p = 4$, širina tuljav $s = 5$ utorovih delitev,
b) $2p = 4$, širina tuljav $s = 4$ utorove delitve.
Navitje je v obeh primerih dvoplastno zankasto (vse tuljave so enake). Izračunajte medfazno napetost za stik Y, če je v vsaki tuljavi Z =10 ovojev, v vsaki stranici ovoja pa se inducira temenska vrednost napetosti e_{1max} = 10 V. Izračunajte faktorje navitij pete (ν=5) in sedme (ν=7) višje harmonske komponente!

Rešitev:

Polova delitev (št. utorov na en pol):

$$\tau_p = \frac{N}{2 \cdot p} = \frac{24}{4} = 6 \quad \text{utorovih delitev.}$$

Geometrični kot med dvema sosednjima utoroma:

$$\alpha_g = \frac{360^0}{N} = \frac{360^0}{24} = 15^0{}_{geom}\,.$$

Električni kot induciranih napetosti dveh sosednjih utorov:

$$\alpha_e = p \cdot \alpha_g = 2 \cdot 15^0 = 30^0{}_{el}\,.$$

Število utorov na pol in fazo:

$$q = \frac{\tau_p}{m} = \frac{N}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2 \quad \text{utorovi delitvi.}$$

Faktor navitja osnovne harmonske komponente napetosti je:

$$f_{n1} = f_{p1} \cdot f_{s1}\,.$$

f_{p1} ... pasovni faktor navitja:

$$f_{p1} = \frac{\sin(q \cdot \frac{\alpha_e}{2})}{q \cdot \sin\frac{\alpha_e}{2}} = \frac{\sin(2 \cdot \frac{30}{2})}{2 \cdot \sin\frac{30}{2}} = 0.966\,.$$

f_{s1} ... faktor skrajšanega koraka navitja (faktor tetivljenja):

$$f_{s1} = \sin(\frac{s}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}).$$

Primer a):

$$f_{s1} = \sin(\frac{s}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}) = \sin(\frac{5}{6} \cdot \frac{\pi}{2}) = 0.966,$$

$$f_{n1} = 0.933.$$

Primer b):

$$f_{s1} = \sin(\frac{s}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}) = \sin(\frac{4}{6} \cdot \frac{\pi}{2}) = 0.866,$$

$$f_{n1} = 0.836.$$

Inducirana napetost:
Če navitje zvežemo v stik zvezda bo $U = \sqrt{3} \cdot U_f$.
Napetost ene faze pa je:

$$U_f = (2 \cdot p \cdot q) \cdot Z \cdot \frac{e_{1\max}}{\sqrt{2}} \cdot f_{n1} \quad \text{enoplastno navitje}$$

$2 \cdot p \cdot q$ ... število vseh tuljav, ki sodelujejo pri induciranju napetosti pri enoplastnem navitju,
Z ... število ovojev v tuljavici,
e_{1max} ... temenska vrednost inducirane napetosti v eni stranici tuljavice
f_{n1} ... faktor navitja osnovne harmonske komponente

Pri dvoplastnem navitju moramo podvojiti število vseh stranic tuljav, ki sodelujejo pri induciranju napetosti, zato bo:

$$U_f = 2 \cdot (2 \cdot p \cdot q) \cdot Z \cdot \frac{e_{1\max}}{\sqrt{2}} \cdot f_{n1}.$$

Primer a):

$$U_f = 2 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 2) \cdot 10 \cdot \frac{10}{\sqrt{2}} \cdot 0.933 = \underline{\underline{1056\ \text{V}}}.$$

Medfazna napetost (stik Y):

$$U = \sqrt{3} \cdot U_f = \sqrt{3} \cdot 1056 = \underline{\underline{1828\ \text{V}}}.$$

Primer b):

$$U_f = 2\cdot(2\cdot 2\cdot 2)\cdot 10\cdot\frac{10}{\sqrt{2}}\cdot 0.836 = \underline{\underline{946\ \mathrm{V}}}\,.$$

Medfazna napetost (stik Y):

$$U = \sqrt{3}\cdot U_f = \sqrt{3}\cdot 946 = \underline{\underline{1638\ \mathrm{V}}}\,.$$

Primer a):
ν=5:

$$f_{p5} = \frac{\sin(q\cdot\nu\cdot\frac{\alpha_e}{2})}{q\cdot\sin\frac{\nu\cdot\alpha_e}{2}} = \frac{\sin(2\cdot 5\cdot\frac{30}{2})}{2\cdot\sin\frac{5\cdot 30}{2}} = 0.2588\,,$$

$$f_{s5} = \sin(\frac{s}{\tau_p}\cdot\frac{\nu\cdot\pi}{2}) = \sin(\frac{5}{6}\cdot\frac{5\cdot\pi}{2}) = 0.2588\,,$$

$$f_{n5} = \underline{\underline{0.067}}\,.$$

ν=7:

$$f_{p7} = \frac{\sin(2\cdot 7\cdot\frac{30}{2})}{2\cdot\sin\frac{7\cdot 30}{2}} = -0.2588\,,$$

$$f_{s7} = \sin(\frac{5}{6}\cdot\frac{7\cdot\pi}{2}) = 0.2588\,,$$

$$f_{n7} = \underline{\underline{-0.067}}\,.$$

Primer b):
ν=5:

$$f_{p5} = \frac{\sin(q\cdot\nu\cdot\frac{\alpha_e}{2})}{q\cdot\sin\frac{\nu\cdot\alpha_e}{2}} = \frac{\sin(2\cdot 5\cdot\frac{30}{2})}{2\cdot\sin\frac{5\cdot 30}{2}} = 0.2588\,,$$

$$f_{s5} = \sin(\frac{s}{\tau_p}\cdot\frac{\nu\cdot\pi}{2}) = \sin(\frac{4}{6}\cdot\frac{5\cdot\pi}{2}) = -0.866\,,$$

$$f_{n5} = \underline{\underline{-0.224}}\,.$$

ν=7:

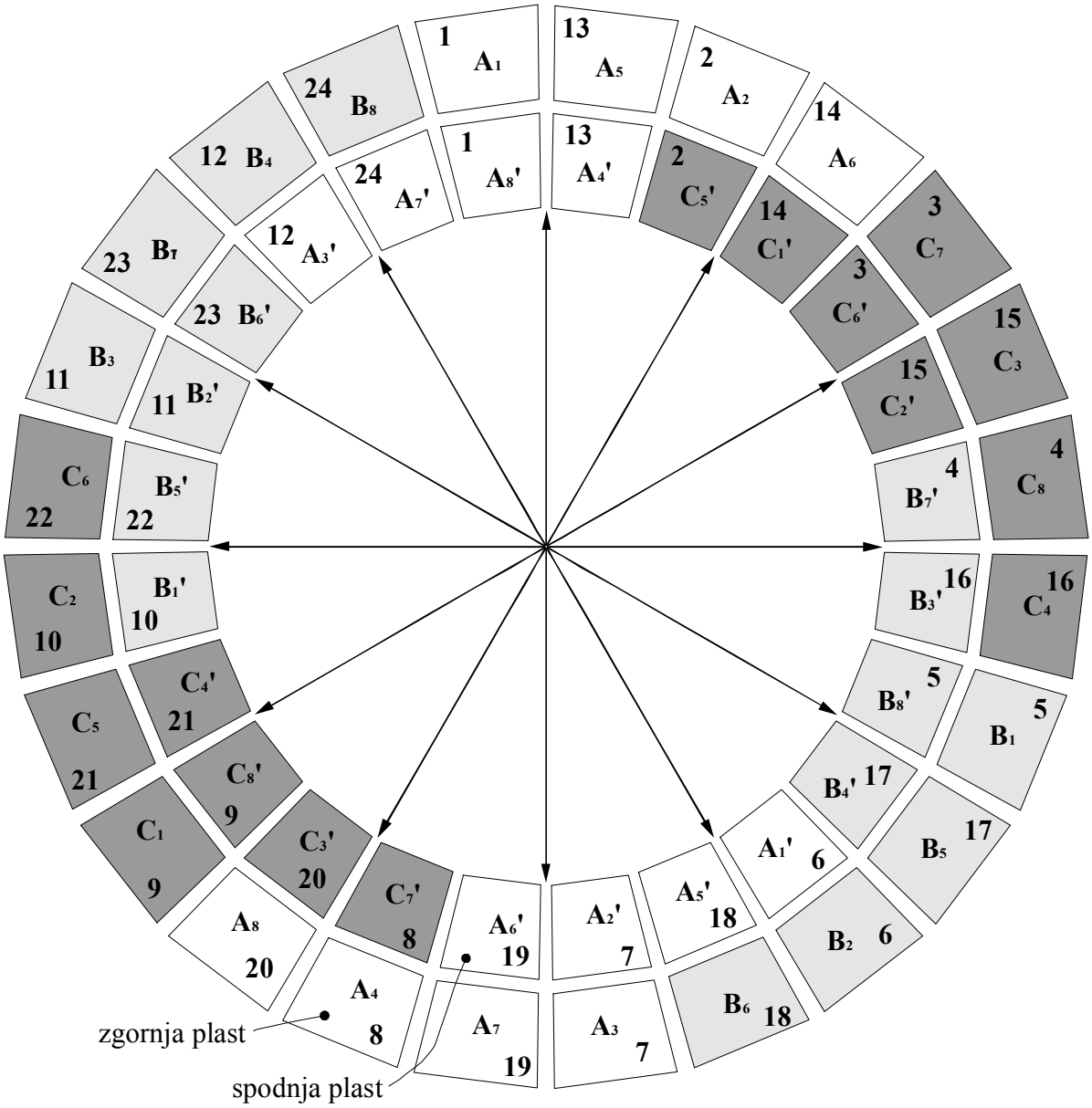
$$f_{p7} = \frac{\sin(2 \cdot 7 \cdot \frac{30}{2})}{2 \cdot \sin \frac{7 \cdot 30}{2}} = -0.2588,$$

$$f_{s7} = \sin(\frac{4}{6} \cdot \frac{7 \cdot \pi}{2}) = 0.669,$$

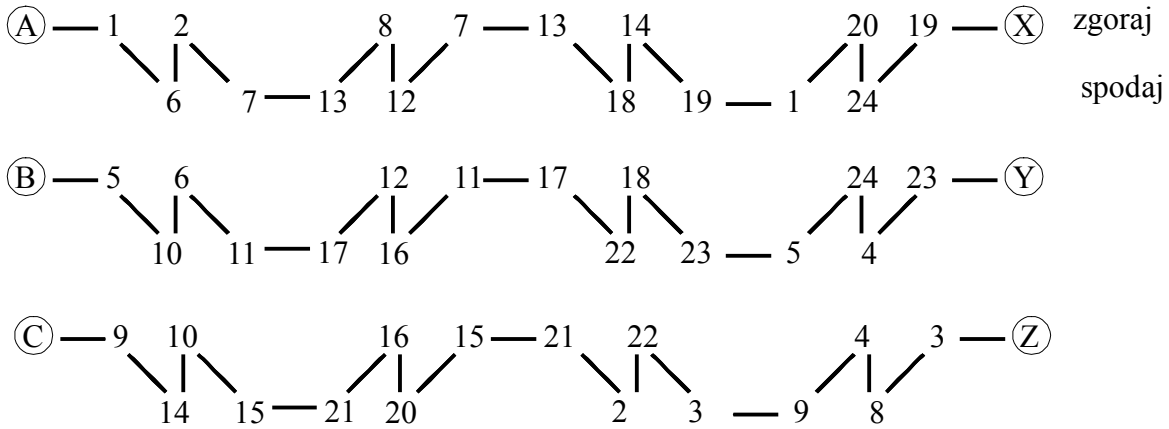
$$f_{n7} = \underline{\underline{-0.173}}.$$

a) $s = 5$, $s < \tau_p$

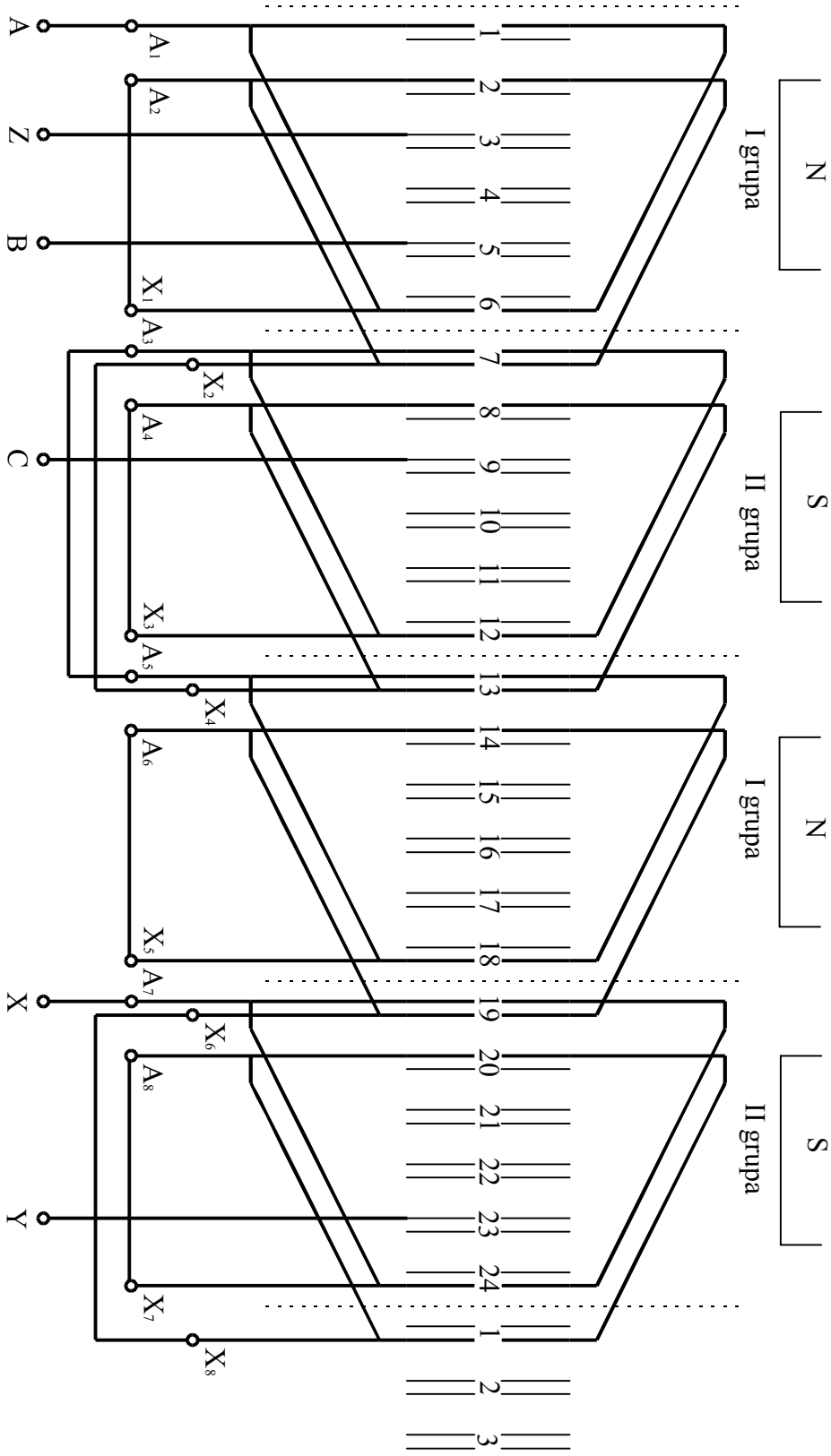
Utorovna zvezda induciranih napetosti:



Navijalna razpredelnica:

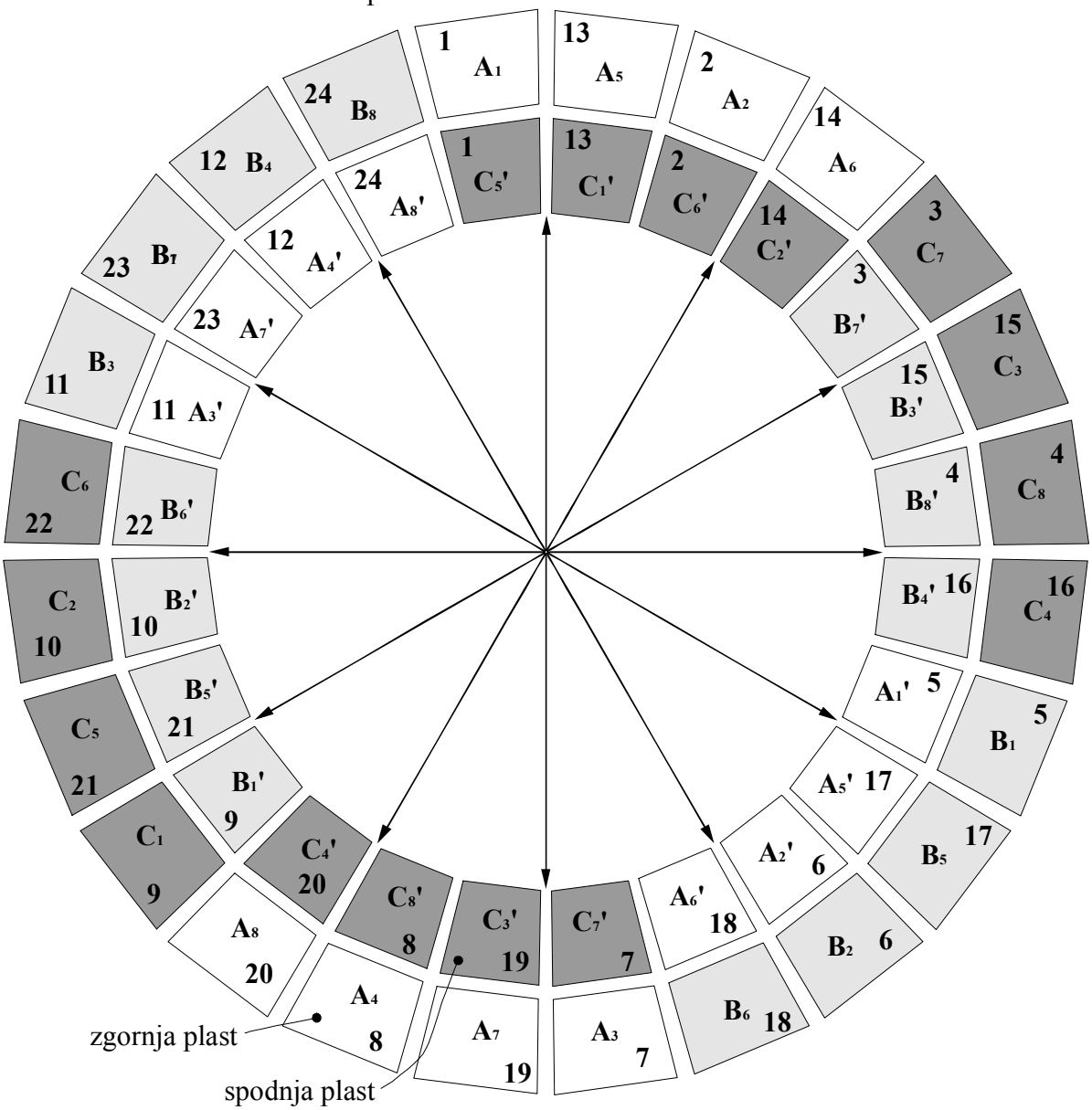


Navijalna Shema:

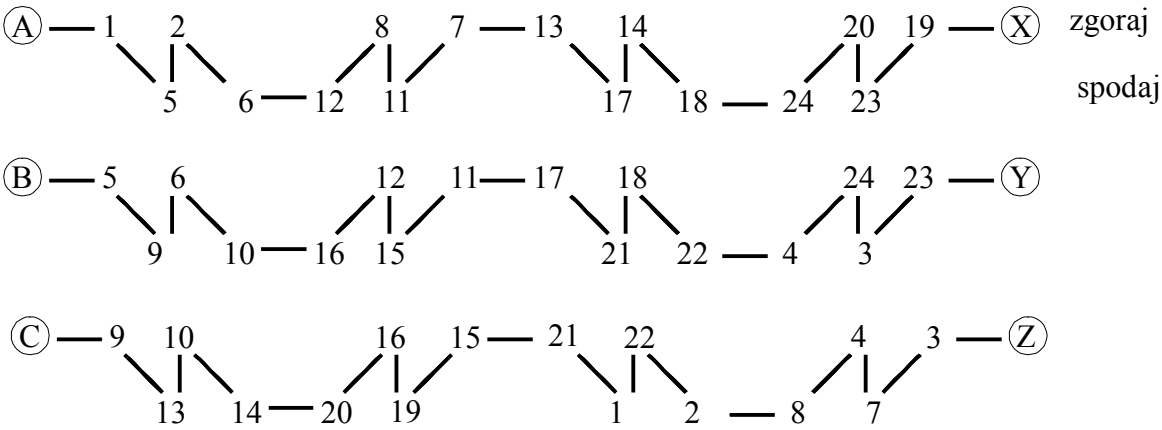
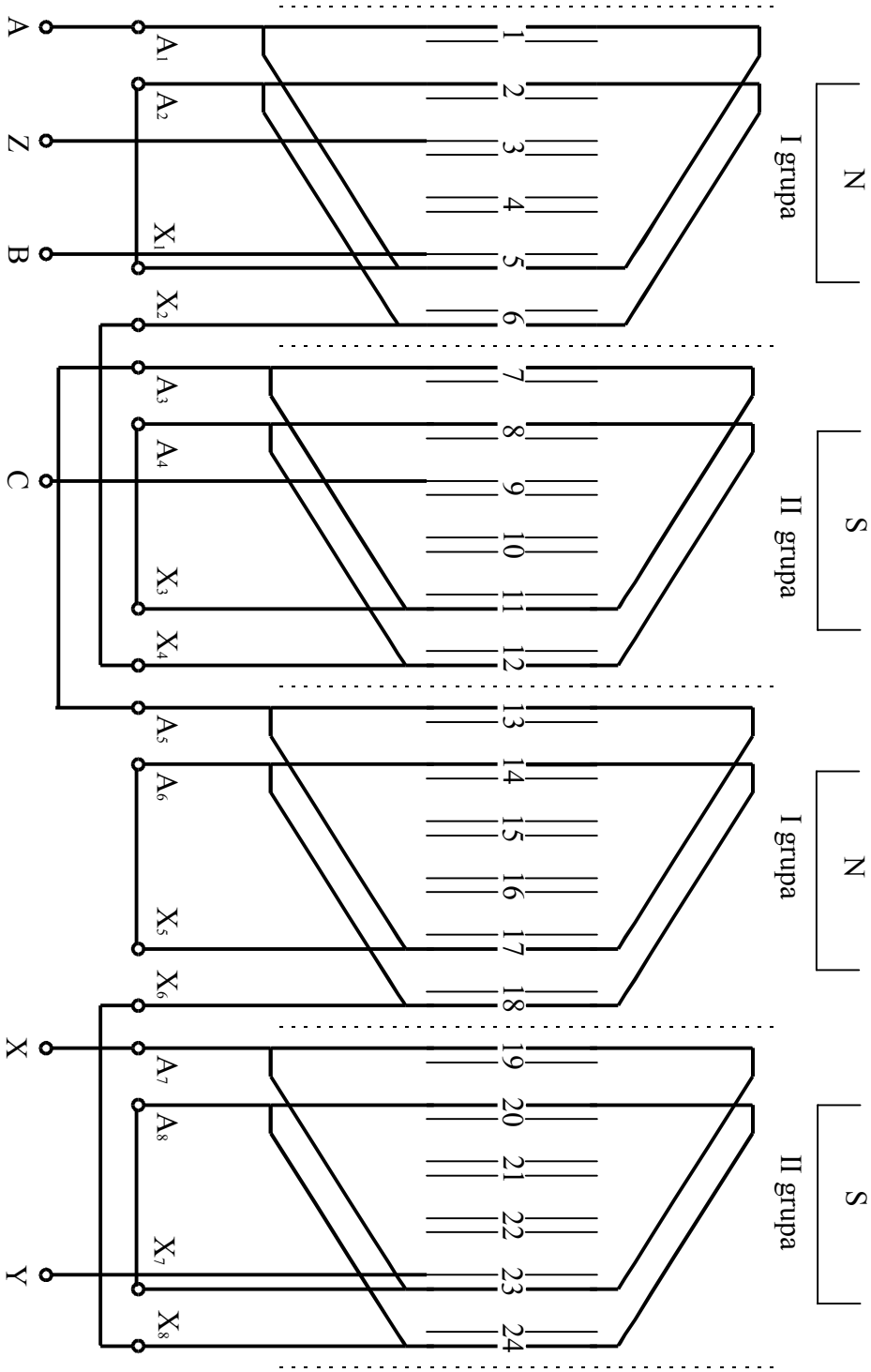


b) $s = 4$, $s < \tau_p$

Utorovna zvezda induciranih napetosti:



Navijalna razpredelnica:



Navijalna shema: