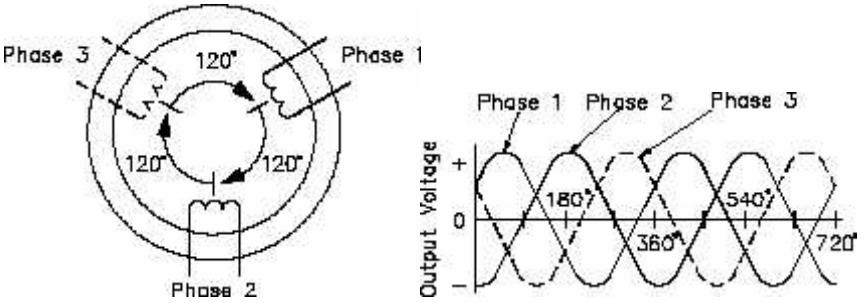
Trifazni sistemi (24)

Spoznali smo že primer dvofaznega sistema pri vrtilnem magnetnem polju, ki sta ga ustvarjala dva para prečno postavljenih tuljav s fazno zamaknjenim tokom za ¼ periode. Ugotovili smo, da bi tako ustvarjeno vrtilno magnetno polje ustvarjalo navor na kratko sklenjeno vrtljivo tuljavico in njeno vrtenje (laboratorijske vaje). Vrtenje tuljavice bi dosegli tudi, če bi vrtljivo tuljavo napajali s konstantnim tokom. V prvem primeru dobimo asinhrono vrtenje (tuljava se vrti z manjšo frekvenco kot je frekvenca vzbujanja), v drugem pa sinhrono (frekvenca vrtenja je enaka frekvenci vzbujanja). Možen pa je tudi obraten postopek: da se vrti magnet ali vrtljiva tuljava napajana z enosmernim tokom, v stranskih tuljavah pa se inducirajo napetosti, ki so fazno zamaknjene v skladu z lego tuljav. V že obravnavanem primeru bi dobili inducirane napetosti na tuljavah, ki bi bile fazno zamaknjene za četrtino periode. Z ustrezno priključitvijo dobimo dvofazni sistem napetosti. Na podoben način, le z uporabo treh parov navitij na fiksnem delu (statorju) okoli vrtečega dela (rotorja) z (elektro)magnetom, dobimo trifazni sistem napetosti. Za vrtenje rotorja uporabimo recimo vodno energijo (hidroelektrarne). Že Nikola Tesla je ugotovil, da ima trifazni sistem kar nekaj prednosti pred enosmernim, ki ga je v začetnem obdobju elektrifikacije promoviral Edison. Glavna prednost trifaznega sistema je bila lažji prenos energije na večje oddaljenosti, ki je bil v primeru Edisonovega enosmernega zaradi Ohmskih izgub na »omrežju« praktično onemogočen in omejen le na krajše razdalje. Poleg tega večfazni simetrični sistemi omogočajo dodatno zmanjšanje materiala, saj lahko en vodnik uporabimo skupno (povratni ali ničelni vodnik). V primeru, da je na simetrični trifazni sistem generatorjev priključeno simetrično trifazno breme, je vsota vseh faznih tokov v skupno spojišče enaka nič, kar pomeni, da v ničelnem vodniku ni toka. V takem primeru bi lahko ta vodnik »izpustili«, lahko pa ga obržimo za primer, ko breme ni popolnoma simetrično. V takem primeru bo tok v ničelnem vodniku različen od nič, vendar običajno še vedno manjši od tokov v faznih vodnikih. Premer ničelnega vodnika je v takih primerih lahko manjši od faznih vodnikov.

Sistem trifaznih napetosti.

V poglavju o vrtilnem polju smo spoznali, da je le-ta posledica krmiljenja sistema zasukanih tuljav s fazno zamaknjenim tokom. Ugotovili smo, da to polje omogoča vrtenje trajnega magneta ali kratkostične tuljavice, kar je osnova za razumevanje delovanja motorjev. Režim motorja lahko tudi obrnemo. Če namesto vzbujanja tuljav s tokom vrtimo rotor, se bo v tuljavah inducirala napetost. Če so tuljave zamanjene za določen kot, bomo dobili več virov napetosti s faznim zamikom določenim z kotom zamika tuljav. Če imamo sistem treh tuljav zavrtenih za kot 120^0, dobimo na izhodu tuljav napetosti, ki so fazno zamaknjene za kot 120^0.



Slika: Postavitev tuljav in generacija faznih napetosti.

Glej še:

http://www.k-wz.de/physik/threephasegenerator.html

http://en.wikipedia.org/wiki/Three-phase_electric_power

http://www.windpower.org/en/tour/wtrb/syncgen.htm

Zapis faznih napetosti.

V primeru trifaznega sistema bomo na sponkah parov tuljav, ki zajemajo šestine oboda statorja, dobili napetosti:

$$u_1 = U_m \cos(\omega t + \alpha),$$
$$u_2 = U_m \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right),$$
$$u_3 = U_m \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Trifazni sistem s takim zaporedjem faz imenujemo pozitiven, saj se kompleksorji napetosti izmenjujejo v smeri urinega kazalca. V nasprotnem primeru imamo opravka z negtivnim trifaznim sistemom. Mi bomo obravnavali na strani generatorjev le

simetrične trifazne sisteme, to so taki, katerih je amplituda vseh treh virov enaka, faze pa so zamaknjene za $\frac{2\pi}{3}$.

SLIKA: Trifazni sistem prikažemo kot tri generatorje z enako amplitudo in faznim zamikom za 1/3 periode $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$. Prikazana je vezava v »zvezdo«, pri kateri vežemo negativne sponke v skupno točko, ki jo ozemljimo.

Efektivne vrednosti in prikaz s kazalci.

Običajno si pri analizi vezij s trifaznimi sistemi pomagamo s kazalčnimi diagrami (kompleksorji), kjer običajno namesto amplitud napetosti in tokov uporabljamo efektivne vrednosti. Razlog je preprosto v tem, da sta v energetiki prenos in poraba moči izredno pomembni, ti pa sta direktno povezani z efektivnimi vrednostmi signalov. Za kompleksor napetosti v poljubni fazi bo torej efektivna vrednost napetosti enaka $U = U_{ef} = U_m / \sqrt{2}$.

Za kot α si lahko izberemo poljubno vrednost, saj gre v principu za časovno vrtenje treh fazno zamaknjenih kazalcev. Mi si bomo izbrali kot $\frac{\pi}{2}$, lahko pa bi si izbrali tudi drugega (pogosto je v uporabi tudi $\alpha = 0$). V primeru vezave v zvezdo je med ničelnim vodnikom in faznim vodnikom t.i. **fazna napetost**, torej bi lahko pisali tudi $U = U_f$. Nam vsem sta znani fazna napetost 230 V in medfazna napetost 400 V, ki jo dobimo iz domače vtičnice. Kompleksorji napetosti bodo torej

$$\underline{U}_1 = U_f e^{j\frac{\pi}{2}} = U_f e^{j90^0} \qquad (24.1)$$

$$\underline{U}_2 = U_f e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\frac{2\pi}{3}\right)} = U_f e^{-j\frac{\pi}{6}} = U_f e^{-j30^0} \tag{24.2}$$

$$\underline{U}_3 = U_f e^{j\left(\frac{\pi}{2}+\frac{2\pi}{3}\right)} = U_f e^{-j150^0} \tag{24.3}$$

Najlepše to prikažemo na sliki, kjer so kazalci zarotirani za $2\pi/3$ (za 120^0).

SLIKA: Kazalčni diagram faznih napetosti simetričnega pozitivnega trifaznega sistema.

Pogosto potrebujemo tudi zapise napetosti v obliki realnega in imaginarnega dela. Tedaj pišemo

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= jU_f \\ \underline{U}_2 &= U_f\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) \\ \underline{U}_3 &= U_f\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) \end{aligned} \tag{24.4}$$

Medfazne napetosti.

Pogosto se trifazne vire priključuje na breme tudi tako, da se uporabi medfazne napetosti. Te dobimo tako, da priključimo breme med sponke faznih napetosti. Matematičo jih dobimo z odštevanjem kompleksorjev, kot na primer

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = jU_f - U_f\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) = U_f\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{3}{2}\right) = \sqrt{3}U_f\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

(24.5)

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3 = U_f\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) - \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) = \sqrt{3}U_f \tag{24.6}$$

$$\underline{U}_{31} = \underline{U}_3 - \underline{U}_1 = U_f\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) - jU_f = \sqrt{3}U_f\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \tag{24.7}$$

Prikažimo medfazne napetosti še v kompleksni ravnini. Tu dobimo kompleksor medfazne napetosti preprosto s seštevanjem kazalcev dveh faznih napetosti pri čemer enemu obrnemo smer.

SLIKA: Prikaz faznih in medfaznih napetosti v kompleksni ravnini.

Tako iz matematičnega zapisa medfaznih napetosti, kot iz prikaza v kompleksni ravnini, lahko ugotovimo, da so medfazne napetosti za $\sqrt{3}$ večje od faznih ($U_{mf} = \sqrt{3}U_f$), kar lahko v določenih primerih (povečanje moči na bremenu) s pridom izkoriščamo (v drugih primerih pa lahko s tako vezavo uničimo napravo, ki je namenjena priključitvi na fazne napetosti).

Vezava bremen.

Najpogosteje se uporabljata dva načina vezave bremen na trifazni sistem. Poimenujemo ju **vezava v trikot** in **vezava v zvezdo**. V prvem primeru ločimo še vezavo v **zvezdo z ničelnim vodnikom** in **brez ničelnega vodnika**. Pri vezavi v trikot uporabimo za priklop bremena medfazne napetosti in ničelnega vodnika ne potrebujemo.

Vezava bremena v zvezdo z ničelnim vodnikom.

Ta vezava je morda najbolj enostavna za obravnavo, saj je vsako od bremen priključeno na eno od faznih napetosti. Fazni toki so zato

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} = \underline{U}_1 \underline{Y}_1$$
$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} = \underline{U}_2 \underline{Y}_2 \qquad (24.8)$$
$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3} = \underline{U}_3 \underline{Y}_3$$

Vsota teh tokov je tok v ničelnem vodniku

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \qquad (24.9)$$

Moč bremena je enaka vsoti moči posameznih bremen

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 , \qquad (24.10)$$

kjer posamezno moč lahko določimo z že znanimi zvezami. Npr, moč v fazi 1 je[1]

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = I_1^2 \underline{Z}_1 = U_1^2 \underline{Y}_1^* \qquad (24.11)$$

SLIKA: Vezava bremena na trifazni sistem v obliki trikot.

Primer: Trifazno breme, ki ga sestavljajo impedance $\underline{Z}_1 = 100\,\Omega$, $\underline{Z}_2 = (50 + j50)\,\Omega$, $\underline{Z}_3 = -j100\,\Omega$ priključimo na trifazni sistem 230/400 V v vezavi v zvezdo z ničelnim vodnikom. Določimo delovno moč bremena.

Izračun: Delovno moč lahko izračunamo na enak način, kot smo že spoznali pri enofaznih sistemih. Zopet imamo na razpolago dva načina. Pri prvem uporabimo zvezo $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ pri drugem pa $P = \mathrm{Re}\{\underline{S}\} = U^2\,\mathrm{Re}\{\underline{Y}^*\}$. V fazi 1 imamo le upor, moč na njem je $P_1 = \frac{(230\,\mathrm{V})^2}{100\,\Omega} = 529\,\mathrm{W}$. Za moč na bremenu v fazi 2 zapišemo

[1] Pri zapisu enačb za moč smo upoštevali (kot je v navadi pri obravnavi trifaznih sistemov) efektivne vrednosti tokov in napetosti. V primeru obravnave z maksimalnimi vrednostmi je potrebno izraze pomnožiti z 0,5.

impedanco $\underline{Z}_2 = 50\sqrt{2}e^{j\frac{\pi}{4}}\,\Omega$ in $\underline{Y}_2^* = \frac{1}{50\sqrt{2}}e^{j\frac{\pi}{4}}\,\mathrm{S} = \frac{1}{50\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + j\frac{\sqrt{2}}{2}\right)\mathrm{S}$. Realni del konjugirane admittance je zopet 1/100 Ω, torej bo moč $P_2 = \frac{(230\,\mathrm{V})^2}{100\,\Omega} = 529\,\mathrm{W}$. Delovna moč v fazi tri je enaka nič (je le jalova moč), vsota vseh delovnih moči pa je 1058 W.

Dodatno: Določimo navidezno moč na bemenu:

$$\underline{S}_1 = \frac{(230\,\mathrm{V})^2}{100\,\Omega} = 529\,\mathrm{VA}$$

$$\underline{S}_2 = \frac{(230\,\mathrm{V})^2}{50\sqrt{2}e^{-j45^0}\,\Omega} = 529(1+j)\,\mathrm{VA}$$

$$\underline{S}_3 = \frac{(230\,\mathrm{V})^2}{j100\,\Omega} = -j529\,\mathrm{VA}$$

$$\underline{S} = 1058\,\mathrm{VA}$$

Primer: Za podatke iz prejšnjega primera določimo tok v ničelnem vodniku.

Izračun: Tok v ničelnem vodniku je enak vsoti posameznih faznih tokov $\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$. Izračunati moramo torej vsak fazni tok posebej in jih sešteti:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{j230\,\mathrm{V}}{100\,\Omega} = j2{,}3\,\mathrm{A}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{230e^{-j30^0}\,\mathrm{V}}{50\sqrt{2}e^{j45^0}\,\Omega} = 3{,}25e^{-j75^0}\,\mathrm{A} \approx (0{,}84 - j3{,}14)\,\mathrm{A}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3} = \frac{230e^{-j150^0}\,\mathrm{V}}{100e^{-j90^0}\,\Omega} = 2{,}3e^{-j60^0}\,\mathrm{A} \approx (1{,}15 - j2)\,\mathrm{A}$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \approx (2 - j2{,}83)\,\mathrm{A}$$

Vezava bremena v zvezdo brez ničelnega vodnika.

Iz prejšnjega primera ugotovimo, da tok v ničelnem vodniku ni enak nič. Zakaj ni enak nič oziroma kakšna bremena bi morali imeti priključena, da bi bil enak nič? Odgovori si sam!

Kaj pa, če ničelnega vodnika ni, ali pa recimo izpade? Kakšne bodo razmere v tem primeru? Ali bo delovna moč še vedno enako velika?

Potencial zvezdišča. Razmere na bremenu vezanem v trikot brez ničelnega vodnika lahko analiziramo s poljubno metodo analize vezij. Najpreprosteje kar z metodo spojiščnih potencialov. En potencial ozemljimo, običajno tistega na strani spojišča generatorjev, potencial drugega pa določimo iz pogoja, da mora biti vsota vseh faznih tokov enaka nič:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \tag{24.12}$$

Slika: Vezava v trikot brez ničelnega vodnika.

Te toke izrazimo s tokovi skozi posamezne impedance bremena

$$-\left(\underline{V}^* - \underline{U}_1\right)\underline{Y}_1 - \left(\underline{V}^* - \underline{U}_2\right)\underline{Y}_2 - \left(\underline{V}^* - \underline{U}_3\right)\underline{Y}_3 = 0 \tag{24.13}$$

S preureditvijo dobimo

$$\underline{V}^*\left(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3\right) = \underline{U}_1\underline{Y}_1 + \underline{U}_2\underline{Y}_2 + \underline{U}_3\underline{Y}_3, \tag{24.14}$$

od koder je

$$\boxed{\underline{V}^* = \frac{\underline{U}_1\underline{Y}_1 + \underline{U}_2\underline{Y}_2 + \underline{U}_3\underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}}. \tag{24.15}$$

Temu potencialu rečemo **potencial zvezdišča**. Če imamo priključen ničelni vodnik, potem je seveda ta potencial enak nič in predstavlja točko v središču kompleksne ravnine. V nasprotnem primeru pa se ta točka premakne v neko drugo točko, napetosti na elementih pa so razlike med faznimi napetostmi in potencialom zvezdišča:

$$\underline{U}_{\underline{Z}_1} = \underline{U}_1 - \underline{V}^* \tag{24.16}$$

$$\underline{U}_{\underline{Z}_2} = \underline{U}_2 - \underline{V}^* \tag{24.17}$$

$$\underline{U}_{\underline{Z}_3} = \underline{U}_3 - \underline{V}^* \tag{24.18}$$

Ko izračunamo napetosti na impedancah bremena, je pot do izračuna tokov ali moči na elementih preprosta.

Primer: Določimo potencial zvezdišča in moči na elementih bremena iz primera 1 vezanih v zvezdo, če v tem primeru nimamo ničelnega vodnika (je odklopljen).

Izračun: Poiščemo potencial zvezdišča:

$$\underline{V}^* = \frac{\underline{U}_1\underline{Y}_1 + \underline{U}_2\underline{Y}_2 + \underline{U}_3\underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{\dfrac{j230\,\mathrm{V}}{100\,\Omega} + \dfrac{230e^{-j30^0}\,\mathrm{V}}{50\sqrt{2}e^{j45^0}\,\Omega} + \dfrac{230e^{-j150^0}\,\mathrm{V}}{100e^{-j90^0}\,\Omega}}{\dfrac{1}{100\,\Omega} + \dfrac{1}{50\sqrt{2}e^{j45^0}\,\Omega} + \dfrac{1}{100e^{-j90^0}\,\Omega}} = 230\,\mathrm{V}\frac{j + \dfrac{2}{\sqrt{2}}e^{-j75^0} + e^{-j60^0}}{1 + \dfrac{2}{\sqrt{2}}e^{j45^0} + j}$$

$$\underline{V}^* = (-21 - j120,6)\,\mathrm{V}$$

Moči na posameznih bremenih so torej

Matlab: S2=abs(230*(sqrt(3)/2-0.5j)-(-21-120.6j))^2/(50-50j)

$$\underline{S}_1 = \left|\underline{U}_1 - \underline{V}^*\right|^2 \underline{Y}_1^* = \left|j230 - (-21 - j120,6)\right|^2 \frac{1}{100\,\Omega} = 1233,9\ \mathrm{VA}$$

$$\underline{S}_2 = \left|\underline{U}_2 - \underline{V}^*\right|^2 \underline{Y}_2^* = \left|230\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) - (-21 - j120,6)\right|^2 \mathrm{V}^2 \frac{1}{(50 - j50)\,\Omega} = 485,13(1 + j)\ \mathrm{VA}$$

$$\underline{S}_3 = \left|\underline{U}_3 - \underline{V}^*\right|^2 \underline{Y}_3^* = \left|230\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) - (-21 - j120,6)\right|^2 \mathrm{V}^2 \frac{1}{j100\,\Omega} = -j317,65\ \mathrm{VA}$$

Ugotovimo lahko, da so se moči na elementih bremena spremenile. Navidezna moč je sedaj $\underline{S} \approx \underline{\underline{(1719 + j167,7)\ \mathrm{VA}}}$, torej je delovna moč enaka 1719 W, kar za 62,5 % več kot pri priključitvni z ničelnim vodnikom.

Komentar: Ugotovimo lahko, da se napetosti na posameznih elementih bremena lahko precej spremenijo ob izklopu ničelnega vodnika. To lahko predstavlja tudi problem v primeru, da napetost na elementu (ali pa moč) preseže dovoljeno vrednost.

SLIKA: Narišimo še potencial zvezdišča in kompleksorje napetosti na elementih bremena.

Vezava bremena v trikot.

Pri tej vezavi so elementi bremena priključeni na medfazne napetosti. V tej vezavi torej nimamo možnosti uporabe ničelnega vodnika. Napetosti na posameznih elementih bremena so za $\sqrt{3}$ večji od faznih napetosti: $U_{mf} = \sqrt{3}U_f$. Toki skozi posamezne impedance so torej določeni z medfaznimi napetostmi, npr:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_{12}}, \quad \underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_{23}}, \quad \underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}_{31}}.$$

Fazni toki pa so razlike teh tokov, npr:

$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$, itd.

Slika: Vezava bremena v trikot. Desno: Prikaz medfaznih napetosti s kompleksorji.

Primer: Zopet vzemimo elemente bremena iz primera 1: $\underline{Z}_1 = 100\Omega, \underline{Z}_2 = (50 + j50)\Omega, \underline{Z}_3 = -j100\Omega$ in ga v vezavi trikot priključimo na trifazni sistem 230/400 V. Določimo navidezno moč bremena.

Izračun: Zopet vzemimo formulo $\underline{S} = U^2\underline{Y}^*$, pri čemer so sedaj elementi bremena na medfazni napetosti, ki je za $\sqrt{3}$ večji od faznih, razlika v izračunu navidezne moči v prvem primeru in tem primeru so le v večji medfazni napetosti. Ker je za moč pomemben kvadrat napetosti, bo **moč v vezavi trikot za 3x večja od tiste pri vezavi v zvezdo z ničelnim vodnikom.** $S_\Delta = 3S_Y$.

$$\underline{S}_1 = \frac{(\sqrt{3}\cdot 230\,\mathrm{V})^2}{100\,\Omega} = 3\frac{(230\,\mathrm{V})^2}{100\,\Omega} = 1587\,\mathrm{VA}, \text{ itd..}$$

$$\underline{S} = 3\cdot 1058\,\mathrm{VA}$$

Simetrično breme.

Simetrično breme je posebno primerno tedaj, ko nimamo na razpolago ničelnega vodnika, saj ga v primeru simetričnega bremena niti ne potrebujemo (tok v ničelnem vodniku je enak nič). V primeru simetričnega bremena (vse impedance v posameznih fazah (ali medfazah) so enake) bodo bremenski toki zaostajali ali prehitevali fazne ali medfazne napetosti za isti fazni kot. To lahko prikažemo v kompleksni ravnini.

SLIKA: Prikaz napetosti in tokov v kompleksni ravnini pri simetričnem trifaznem bremenu.

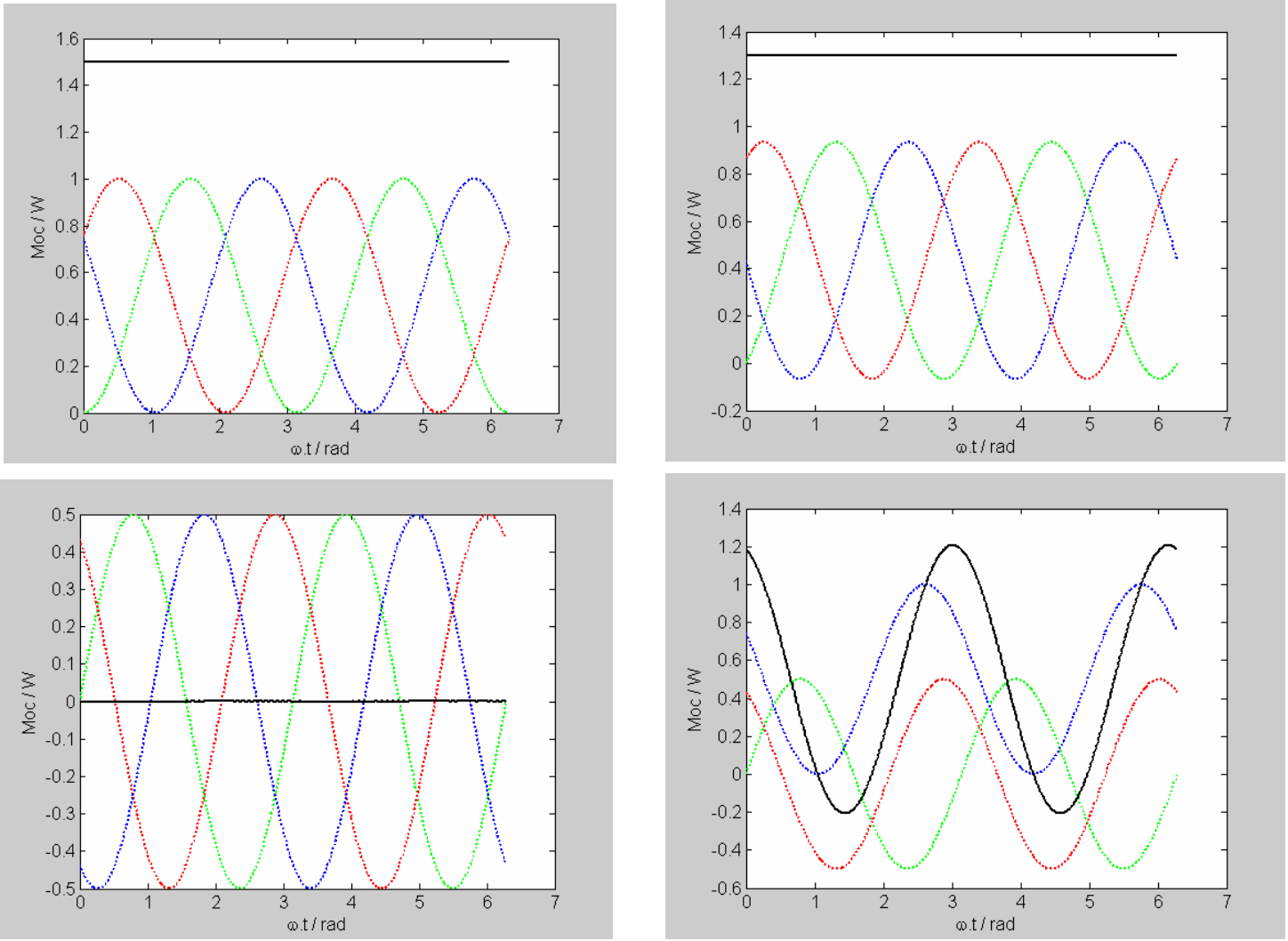
Trenutne moči na posameznih elementih bremena so:

$$p_1(t) = UI\cos(\omega t)\cdot\cos(\omega t+\beta)$$

$$p_2(t) = UI\cos(\omega t-\frac{2\pi}{3})\cdot\cos(\omega t+\beta-\frac{2\pi}{3})$$

$$p_3(t) = UI\cos(\omega t+\frac{2\pi}{3})\cdot\cos(\omega t+\beta+\frac{2\pi}{3})$$

Vsoto vseh teh moči lahko vidimo na sliki. **Za simetrično breme ugotovimo, da je trenutna moč konstantna** in enaka $p(t) = \frac{3}{2}UI\cos(\beta)$. Torej precej različna od enofaznega sistema, ko trenutna moč niha z dvojno frekvenco vira. .....



SLIKA: Na trifazni sistem je priključeno simetrično breme z vezavo v zvezdo z ničelnim vodnikom. a) Breme je ohmsko, b) breme je induktivnega značaja: $\underline{Z} = Ze^{j\frac{\pi}{6}}$, c) breme je čisto induktivno in d) breme je nesimetrično.Trenutna moč na posameznem elementu bremena niha z dvojno frekvenco vira (prikazana s črtkanimi črtami), celotna trenutna moč bremena je vsota trenutnih moči na posameznih elementih (polna črta). V primerih a in b je trenutna moč bremena konstantna (največja je v primeru čisto ohmskega bremena), v primeru c je delovna moč enaka nič, v primeru d breme ni simetrično zato trenutna moč niha z dvojno frekvenco osnovnega signala (toka ali napetosti).

Vprašanja za obnovo:

1) Kako dobimo sistem dvofaznih ali trifaznih napetosti?
2) Zapišite časovni potek napetosti trifaznih generatorjev.
3) Pozitiven in negativen trifazni sistem.
4) Prikaz trifaznih napetosti s kazalci: fazne in medfazne napetosti.
5) Vezava bremen:
    a. Zvezda z ničelnim vodnikom
    b. Zvezda brez ničelnega vodnika
    c. Trikot
6) Napetost na bremenih, fazni tok in tok skozi breme, moč na bremenu pri posamezni vezavi.
7) Napetost zvezdišča.
8) Simetrično breme. Trenutna moč.

Kolokvijske in izpitne naloge:

2. kolokvij 12.04.2001
izpit, 19. januar 2006
izpit, 23. junij 2005
kolokvij, 16. junij 2004
izpit, 24. junij 2004
Izpit, 10. marec 2006
Izpit, 11. 06. 2002

Izpit 20. 06. 2005
Izpit 28. 01. 2005
izpit, 4. februar 2005
Izpit, 28. avgust 2006
Izpit, 15. september 2006
Izpit, 15. september 2006
izpit, 16. aprila 2002
izpit 23. junija 2006
Izpit 26. 6. 2002
Izpit, 02. 12. 2003