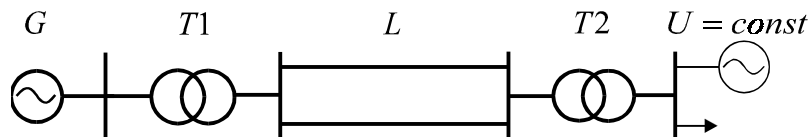


1 PÕHIMÕISTED

1.1 Nurkkarakteristik

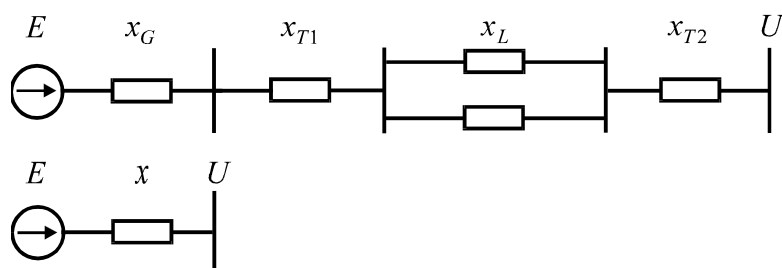
Vaatleme **lihtsaimat elektrisüsteemi** (joonis 1.1), mis koosneb elektrijaamast (ekvivalentsest generaatorist), ülekandeseadmetest (liinid, trafod) ja lõpmata võimsast energiast vastuvõtvast elektrisüsteemist, mida iseloomustab konstantne pinge U lattidel, sõltumata vaadeldava elektrijaama talitlusest.



Joonis 1.1 Lihtsaima elektrisüsteemi põhimõtteskeem

Asendades skeemi elemendid lihtsaima võimaliku aseskeemiga, s.o reaktiivtakistusega, saame kogu lihtsaima elektrisüsteemi aseskeemi ja sellest tuleneva ekvivalentse aseskeemi joonisel 1.2 esitatud kujul, kus

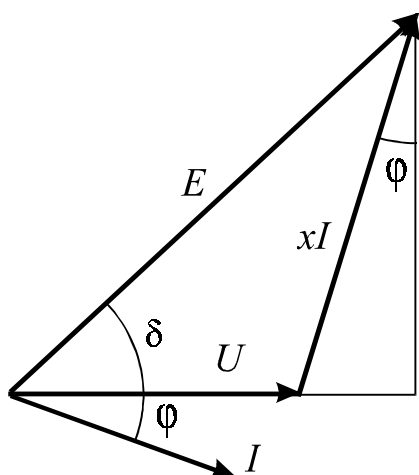
$$x = x_G + x_{T1} + x_L / 2 + x_{T2}$$



Joonis 1.2 Lihtsaima elektrisüsteemi aseskeem

Koostame aseskeemile ja seega ka lihtsaimale elektrisüsteemile vastava vektor-diagrammi (joonis 1.3), millest on lihtne tuletada järgmised seosed¹:

¹ Siin ja edaspidi on tegemist suhteliste ühikutega.



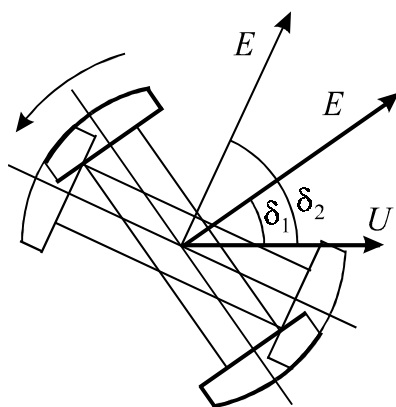
$$E \sin \delta = xI \cos \varphi \left| \frac{U}{x} \right.$$

$$\frac{EU}{x} \sin \delta = IU \cos \varphi$$

$$\boxed{P = \frac{EU}{x} \sin \delta} \quad (1.1)$$

Joonis 1.3 Lihtsa elektrisüsteemi vektordiagramm

Ekvivalentse generaatori (elektrijaama) võimsuse P muutmisel, mis tekitatakse turbiini klappide (juhtaparaadi) avamisega või sulgemisega, jääb süsteemi takistus x ilmselt muutumatuks. Eelduste kohaselt on muutumatud ka pinge U vastuvõtva süsteemi lattel ning kui puudub automaatne ergutusregulaator (AER), siis ka elektromotoorjõud E . Näiteks generaatori võimsuse kasvamisel suureneb elektromotoorjõu ja pinge vaheline nurk δ ning vastupidi, kui võimsus kahaneb, siis nurk δ väheneb. Seega



Joonis 1.4 Generaatori nurga muutumine

$$P_1 = \frac{EU}{x} \sin \delta_1, \quad P_2 = \frac{EU}{x} \sin \delta_2$$

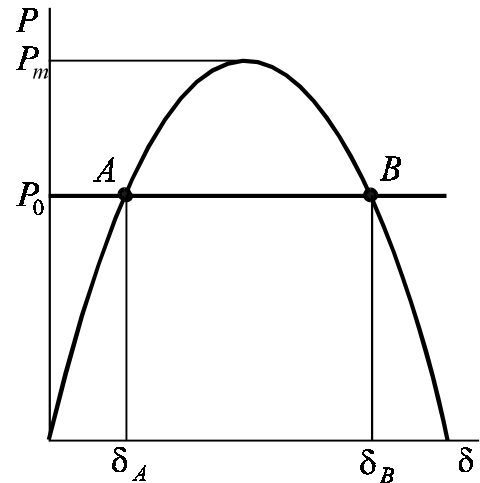
Teatavasti jääb elektromotoorjõu vektor 90° maha teda põhjustavast magnetvoo vektorist. Seega langeb elektromotoorjõu vektor alati generaatori põiktelge (joonis 1.4). Võib ette kujutada, et elektromotoorjõu vektor on jäigalt seotud generaatori rootoriga. Rootori (mehaanilise) nurga muutumisel muutub vastavalt ka vektori E asend ja nurk δ . Seega on nurgal δ nii elektriline kui mehaaniline sisu, millest tuleneb selle nurga eriline

koht elektromehaaniliste siirdeprotsesside kirjeldamisel, sest ta seob elektrilisi ja mehaanilisi suurusi. Lihtne on järeldada, et rootori mehaanilise inertsitõttu ei saa nurk δ muutuda hüppeliselt.

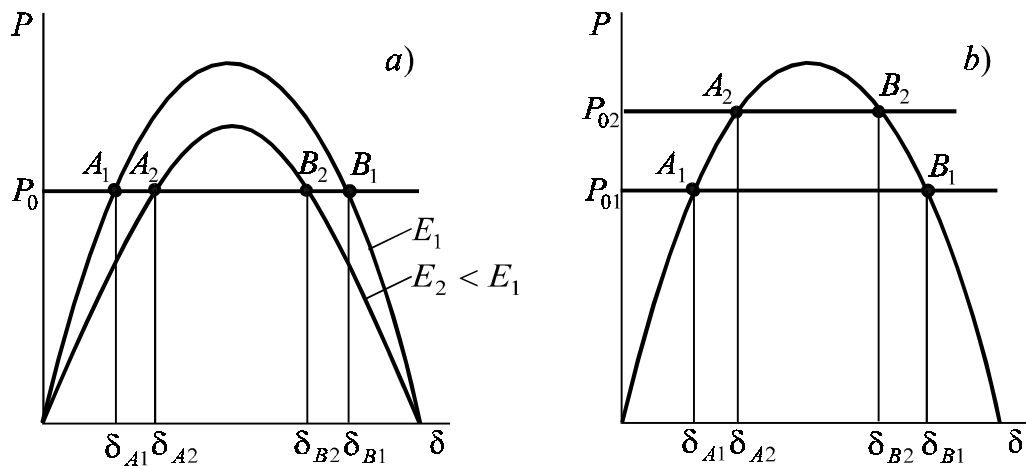
Sõltuvust $P = f(\delta)$ nimetatakse **nurkkarakteristikuks**. Kui suurused E , U ja x on muutumatud, siis seose (1.1) kohaselt on nurkkarakteristik sinusoid (joonis 1.5) amplituudiga

$$P_m = \frac{EU}{x} \quad (1.2)$$

Esitades samas koordinaadistikus veel turbiini karakteristiku, mis ei sõltu nurgast δ , saame kaks tööpunkti A ja B . Need vastavad lihtsaima elektrisüsteemi võimalikele seisunditele, sest püsitalitluses peavad generaatori ja turbiini võimsused olema võrdsed (kadusid siinkohal ei arvestata).



Joonis 1.5 Lihtsaima elektrisüsteemi nurkkarakteristik



Joonis 1.6 Tööpunktide nihkumine, kui muutuvad elektromotoorjõud (a) ja turbiini võimsus (b)

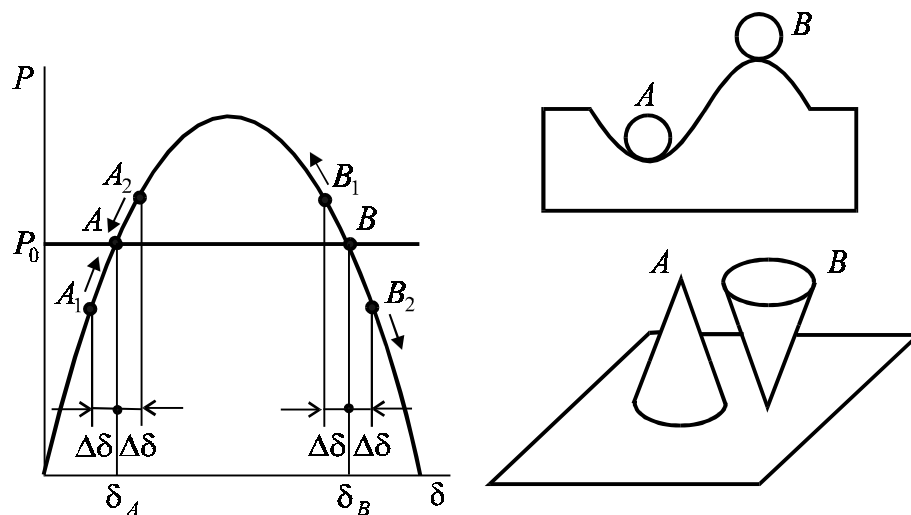
Kui muuta generaatori elektromotoorjõudu (ergutusvoolu reguleerimise teel), muutub nurkkarakteristiku amplituud ja tööpunktid (joonis 1.6 a). Tööpunktid nihkuvad ka turbiini võimsuse P_0 muutumise korral (joonis 1.6 b). Piirjuhtumil, kui $P_0 = P_m$, langevad tööpunktid A ja B kokku. Kui turbiini võimsust veelgi tõsta (või elektromotoorjõu väärtust vähendada), tekib olukord, kus tööpunktid ja püsiv talitus hoopis puuduvad. Siit võib teha järelduse, et lihtsaimas elektrisüsteemis ekvivalentsest generaatorist (elektrijaamast) vastuvõtvasse süsteemi ülekantav võimsus ei saa ületada suurimat väärtust P_m . Viimane on määratud (1.2) nii generaatori (E , x_G) kui ka ülekandeseadmete (x_{T1} , x_L , x_{T2}) parameetritega.

1.2 Staatilise stabiilsuse mõiste

Staatiline stabiilsus on elektrisüsteemi võime jätkata sünkroonset tööd peale talitluse väikseid häiringuid.

Vaatleme süsteemi seisundit, mis vastab tööpunktile A (joonis 1.7), ja oletame, et generaatori elektriline võimsus mingil põhjusel veidi väheneb (nurk δ väheneb), turbiini võimsus jääb aga samaks. Teiste sõnadega, oletame, et tööpunkt nihkub punktist A punkti A_1 . Tekkinud ebalalansi tõttu (generaator annab energiat välja vähem, kui saab turbiinilt) generaatori rootor kiireneb, nurk δ suureneb ja tööpunkt nihkub taas punkti A , kus valitseb tasakaal. Analoogiliselt taastub seisund, kui tööpunkt mingil põhjusel nihkub punktist A punkti A_2 .

Olukord on teine, kui vaadeldav seisund vastab tööpunktile B . Kui tööpunkt nihkub punktist B punkti B_1 , siis annab generaator välja rohkem energiat, kui turbiinilt saab. See võib toimuda ainult rootori kineetilise energia arvel ning pidurdab rootorit. Tulemuseks on nurga δ vähenemine ja tööpunkti edasine eemaldumine lähtepunktist B . Ka siis, kui tööpunkt nihkub häiringu mõjul punktist B punkti B_2 , ei taastu lähteseisund. *Järelikult on tööpunktile A vastav süsteemi seisund staatiliselt stabiilne, tööpunktile B vastav seisund aga mitte.*



Joonis 1.7 Stabiilsete (A) ja mittestabiilsete (B) seisundite näiteid

Staatiliselt stabiilseid või mittestabiilseid seisundeid ei kohta mitte ainult elektrisüsteemis. Kaks näidet mehaaniliste süsteemide stabiilse A ja mittestabiilse B oleku kohta on joonisel 1.7.

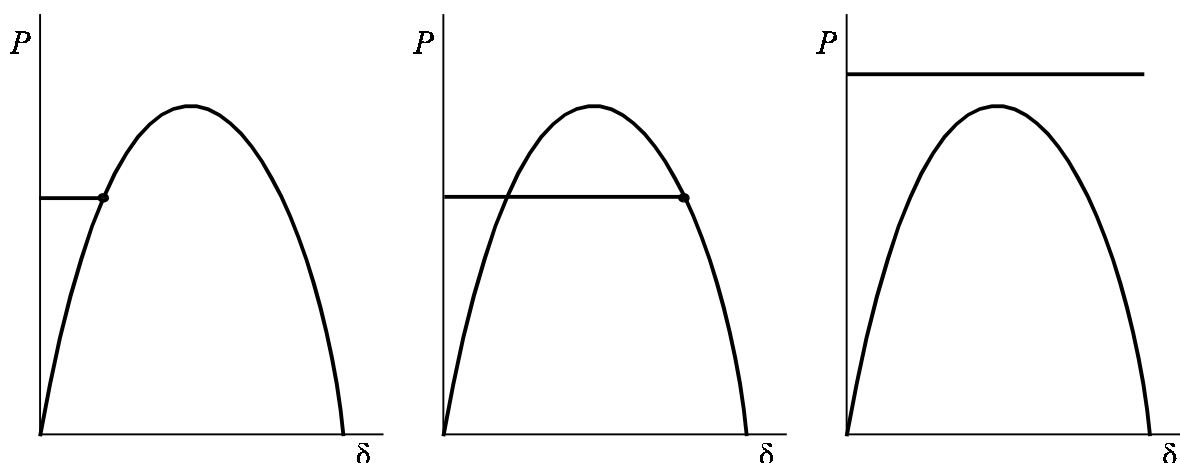
Võime tuletada ka staatilise stabiilsuse matemaatilise tingimuse (kriteeriumi). Kuna stabiilsed tööpunktid asetsevad nurkkarakteristiku tõusval osal, siis saab stabiilsuse kriteeriumiks

$$\boxed{\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0 \quad \text{ehk} \quad \frac{dP}{d\delta} > 0 \quad \text{ehk} \quad \delta < 90^\circ} \quad (1.3)$$

Mõistagi kehtib tuletatud kriteerium ainult lihtsaima elektrisüsteemi korral ja sedagi tingimusel, et elektromotoorjõud E (muidugi ka pinge U ja takistus x) on konstantne, puudub AER.

Tulemusi saab üldistada ka keerulisele elektrisüsteemile, kus nagu lihtsaimaski süsteemis võib üldjuhul esineda kolm olukorda (joonis 1.8):

- seisund on olemas (saab arvutada) ja stabiilne
- seisund on olemas, kuid mittestabiilne
- seisund puudub



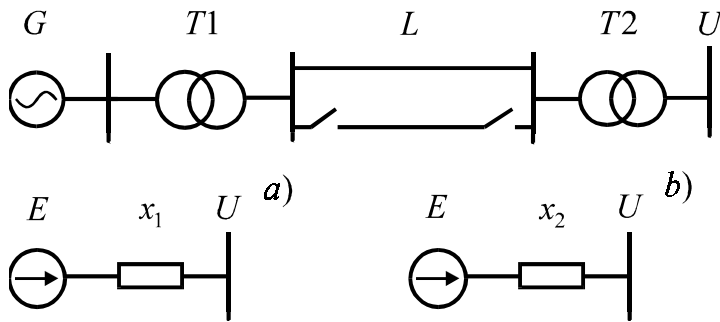
Joonis 1.8 Võimalikud tulemused lihtsaima elektrisüsteemi seisundi määramisel

Erinevalt lihtsaimast süsteemist kohtab keerulises süsteemis seisundi mitmesust – samadel lähtetingimustel võib arvutuste tulemus näidata erinevaid stabiilseid või mittestabiilseid seisundeid.

1.3 Dünaamilise stabiilsuse mõiste

Dünaamiline stabiilsus on elektrisüsteemi võime taastada peale suuri häiringuid lähteseisund või sellele lähedane seisund. Häiringuteks, mis võivad põhjustada dünaamilist mittestabiilsust, on

- lühised
- elektrisüsteemi põhielementide kommutatsioon
- järsud koormustõuked

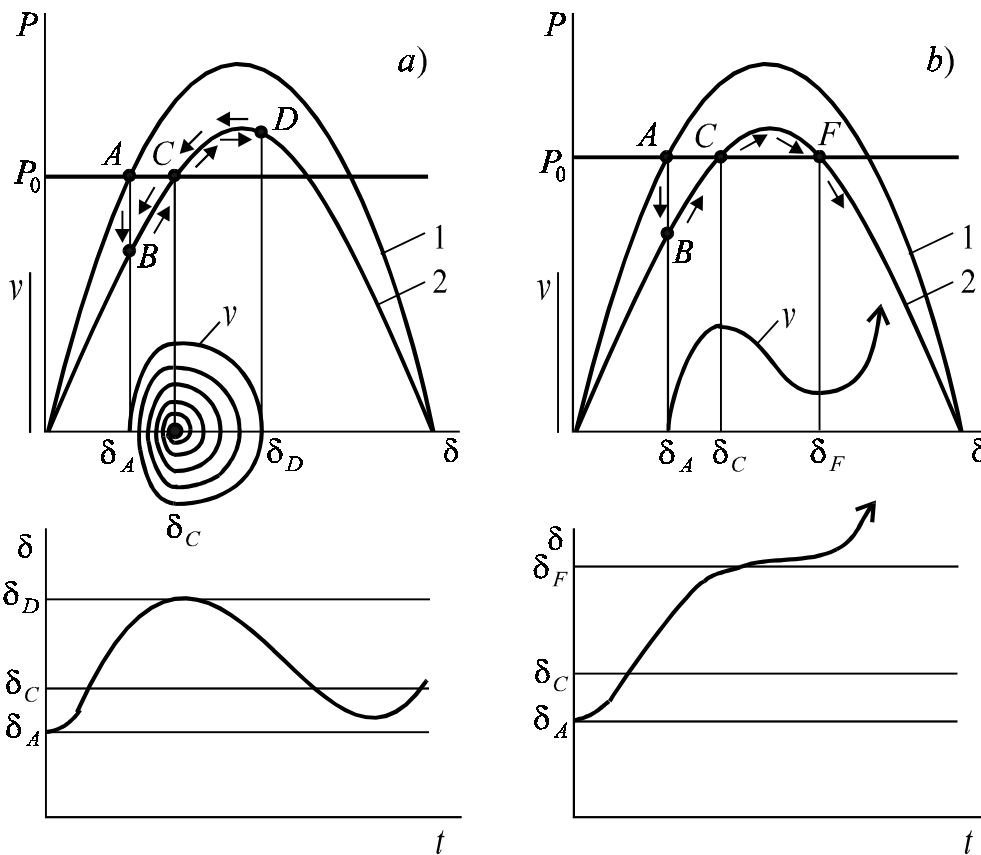


Vaatame, mis võib juhtuda lihtsaimas elektrisüsteemis, kui lülitatakse välja kaheahe- lalise liini üks ahel. Häiringu tulemusena (joonis 1.9) muutub süsteemi aseskeem, täpsemalt, vastav summaarne takistus:

Joonis 1.9 Elektrisüsteemi aseskeem enne (a) ja pärast (b) kommutatsiooni

$$x_1 = x_G + x_{T1} + x_L / 2 + x_{T2}$$

$$, \quad x_2 = x_G + x_{T1} + x_L + x_{T2}$$



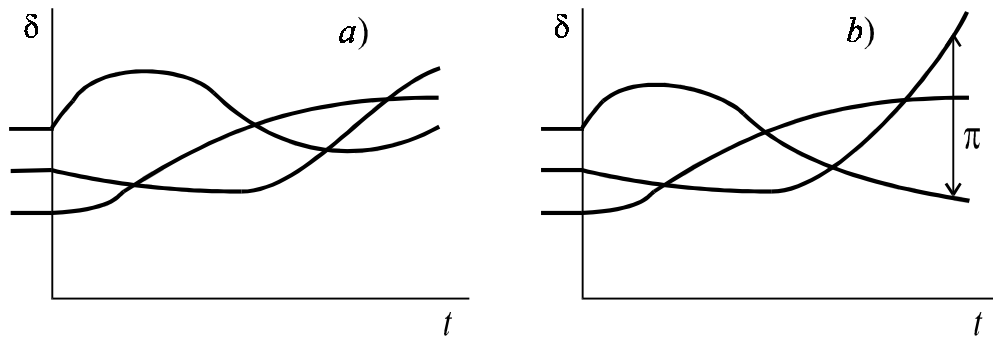
Joonis 1.10 Elektrisüsteemi stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess

Jälgime, kuidas liigub tööpunkt ja muutub süsteemi seisund. Lähteseisund vastab tööpunktile A karakteristikul 1 (joonis 1.10 a). Lülituse tulemusena suureneb hüppeliselt aseskeemi takistus ($x_2 > x_1$) ja nurkkarakteristik 1 asendub (1.1) kohaselt madalama nurkkarakteristikuga 2. Mehaaniline inertts ei lase nurgal δ hetkeliselt muutuda ja seega saab uueks tööpunktiks punkt B. Siin on generaatori elektriline võimsus väiksem kui mehaaniline võimsus P_0 (turbiini võimsus jääb muutumatuks), mille tõttu generaatori rootor kiireneb ja nurk δ hakkab kasvama. Vastavalt nihkub ka tööpunkt punktist B punkti C

poole. Punktis C on elektriline ja mehaaniline võimsus tasakaalus, kuid rootori inertsitõttu nurga suurenemine jätkub, kuni elektriline võimsus saab omakorda suuremaks mehaanilisest ja rootori suhteline kiirus v hakkab vähenema. Mõnda aega on see kiirus veel positiivne (rootor pöörleb kiiremini kui staatori magnetväli) ja nurk suureneb edasi. Punktis D muutub rootori liikumise suhteline kiirus nulliks. Kuna kiirendus on endiselt negatiivne, sest elektriline võimsus ületab mehaanilise võimsuse, siis muutub kiirus negatiivseks, nurk δ hakkab vähenema ja tööpunkt nihkub tagasi punkti C . Kuna punktis C ei saa tööpunkt rootori inertsitõttu peatuda, jätkub liikumine lähtepunkti B suunas. Liikumine peatub sedapuhku punktis B ja kogu protsess kordub. On tekkinud perioodiline protsess, milles mehaaniliselt võngub generaatori rootor ja muutuvad elektrilised parameetrid (võimsus, vool, generaatori pinge jm). Elektrilised ja mehaanilised kaod summutavad selle protsessi aga teatud aja (mõni sekund) möödudes ning saabub püsiseisund, mis vastab tööpunktile C . Seega on tegemist stabiilse siirdeprotsessiga.

Vaatleme olukorda, kus turbiini võimsus P_0 on veidi suurem (joonis 1.10 b). Esialgu kulgeb siirdeprotsess analoogiliselt vaadelduga – positiivne **jääkvõimsus** (mehaanilise ja elektrilise võimsuse vahe) kiirendab rootorit, tööpunkt liigub punktist B punkti C ja sealt rootori inertsitõttu edasi. Kuna rootori kiirenemine on nüüd suurema jääkvõimsuse tõttu intensiivsem, pidurdumine aga nõrgem, siis võib juhtuda, et liikumine jätkub punktini F ja edasi. Punktis F muutub jääkvõimsuse ja seega ka rootori kiirenduse märk taas positiivseks ning nurga δ kasv jätkub nüüd pidurdamatult. Seega võib tõdeda, et antud tingimustes on siirdeprotsess mittestabiilne (generaator langeb sünkronismist välja).

Keerulises elektrisüsteemis, mis sisaldab mitu elektrijaama (ekvivalentset generaatorit), on stabiilne töö võimalik, kui generaatorite rootoritevaheline nurk ei muutu liiga suureks, ei ületa näiteks 180° . Kui häiringu tulemusena tekkinud siirdeprotsessis generaatorite rootorid liiguvad nii, et nendevaheline maksimaalne nurk jääb piiratuks (joonis 1.11 a), siis võib siirdeprotsessi lugeda stabiilseks, vastasel juhul aga mitte. Olgu märgitud, et generaatorite rootorite nurkade keskväärtuse trend viitab sageduse muutumisele süsteemis, mis isenesest ei põhjusta mittestabiilsust.



Joonis 1.11 Stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess keerukas elektrisüsteemis

Peatume veidi staatilise ja dünaamilise stabiilsuse hindamise probleemidel. Eespool toodud definitsioonid võisid jätta mulje, et praktiliselt on vaja kontrollida vaid dünaamilist stabiilsust, sest kui süsteem osutub stabiilseks peale suuri häiringuid, siis peab ta seda olema ka väikeste häiringute korral. Tegelikult kontrollitakse staatilist ja dünaamilist stabiilsust järgmistel põhjustel siiski eraldi.

- Staatiline stabiilsus peab olema tagatud elektrisüsteemi kõikide realiseeritavate seisundite korral. Teisisõnu, *staatiline stabiilsus ongi seisundi realiseeritavus*.
- Vajadus dünaamilise stabiilsuse tagamiseks tuleneb majanduslikest kaalutlustest, sest dünaamiline stabiilsus sõltub konkreetse häiringu raskusest ja esinemissagedusest. On mõeldav, et mõne raske ja vähetõenäoise häiringu korral, näiteks kolmefaasiline lühis põhivõrgus, on majanduslikult otstarbekam elektrisüsteemi sünkroonne töö iga kord taastada, selle asemel et rakendada abinõusid mittestabiilsuse vältimiseks.
- Stabiilsuse arvutamisel nii nagu muudegi elektrisüsteemi talitluse arvutuste korral tehakse paramatult oletusi ja lihtsustusi. Seetõttu võib juhtuda, et arvutuslikult stabiilse siirdeprotsessi järgne (avariijärgne) seisund ei ole tegelikult realiseeritav, ei ole staatiliselt stabiilne.

Kokku võttes tõdegem, et elektrisüsteemis maksimaalselt võimalik ülekantav võimsus (elektrisüsteemi läbilaskevõime) võib olla määratud nii staatilise kui dünaamilise stabiilsuse tagamise tingimuste järgi või tuleneda muudest tingimustest (kuumenemine, ergutuse lagi jm).

1.4 Sünkroonmasinate põhiseoseid

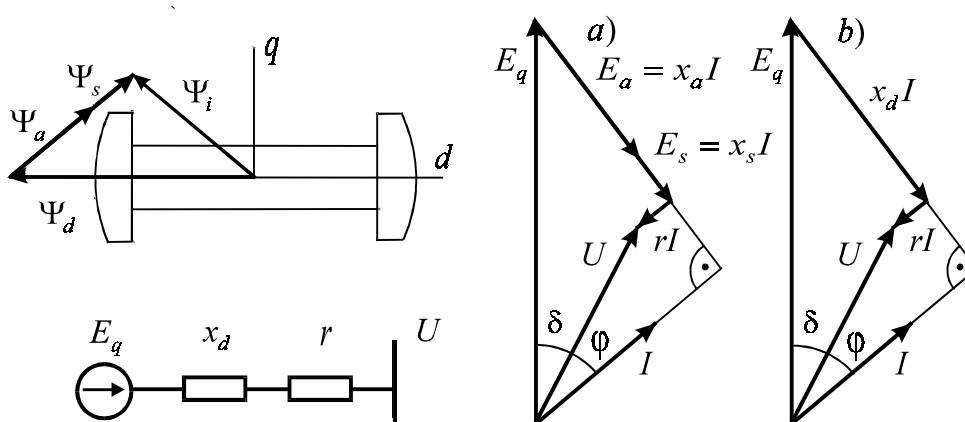
Käesolevas punktis tuletame sünkroonmasinate põhiseoseid, mis on vajalikud elektrisüsteemi stabiilsuse käsitlemisel. Kuigi need seosed on lugejale tuttavad elektrimasinate kursusest, on neid otstarbekas korrata muuhulgas selleks, et osutada tähelepanu vaadeldavate suuruste tähistamisele, mis stabiilsuse uurimisel on mõneti erinevad.

1.4.1 Peitpoolustega sünkroonmasina vektordiagramm joonisel 1.12 on koostatud järgmistel põhimõtetel. Ergutusvool rootorimähises kutsub esile aheldusvoo Ψ_d , mis indutseerib staatorimähises elektromotoorjõu E_q . Suletud (ülekanadeseadmete ja tarbijate kaudu) staatoriahela korral tekib selles vool I , mis omakorda tekitab ankrureaktsiooni aheldusvoo Ψ_a ja puistevoo Ψ_s . Need indutseerivad elektromotoorjõud E_a ja E_s . Kui võtta arvesse veel pingelangu staatorimähise aktiivtakistusel rI , on tulemuseks generaatori klemmipinge U .

Saadud vektordiagrammi (1.12 a) teisendamiseks tuletame meelde mõned põhiseosed

$$E = -\frac{d\Psi}{dt}, \quad \Psi = LI, \quad E = \omega\Psi, \quad x = \omega L, \quad E = xI$$

kus L on vaadeldava ahela induktiivsus. Tähistades $x_a + x_s = x_d$, saamegi lõplikul (1.12 b) kujul vektordiagrammi. Takistusi x_a , x_s ja x_d nimetatakse **ankrureaktsiooni**, **puiste-** ja **sünkroontakistuseks**, elektromotoorjõudu E_q aga **sünkroonelektromotoorjõuks**.



Joonis 1.12 Peitpoolustega sünkroonmasina vektordiagrammid ja aseskeem

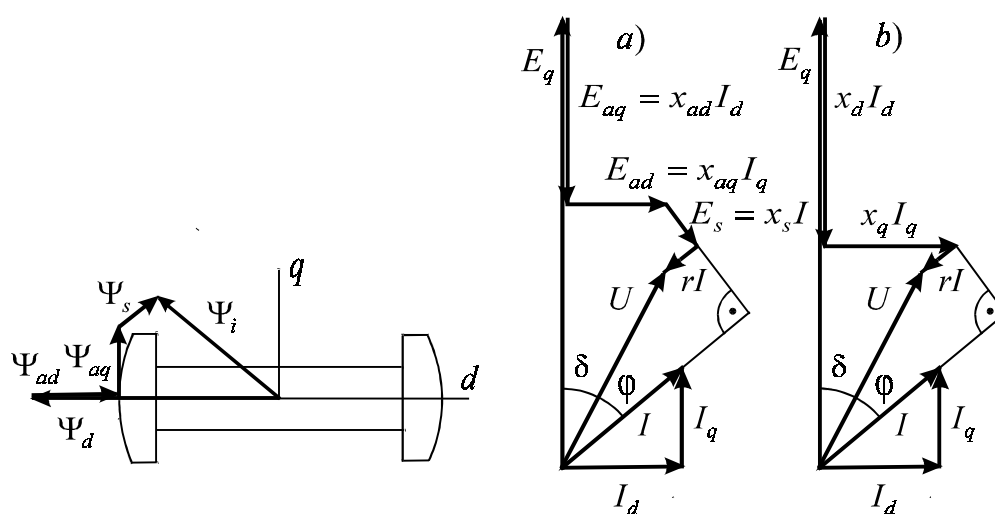
Joonisel 1.12 toodud aseskeem, mis vastab vektordiagrammile (b), on ka peitpoolustega sünkroonmasina aseskeem. Kui seda võrrelda aseskeemiga joonisel 1.2 ja võtta $r = 0$, võib seose (1.1) ümber kirjutada kujul

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta \quad (1.4)$$

Tuletatud seos kehtib ka kogu lihtsaima elektrisüsteemi kohta, kui pinge U on vastuvõtva elektrisüsteemi lattide pinge ja takistust x_d lugeda generaatori x_{dG} ja välise (liinid, trafod) x_V takistuse summaks, s.o

$$x_d = x_{dG} + x_V$$

1.4.2 Väljepoolustega sünkroonmasina vektordiagramm. Eespool vaadeldud vektordiagramm kehtib põhimõtteliselt mis tahes sünkroonmasinale. Raskusi tekib aga selle diagrammi praktilisel rakendamisel väljepoolustega masinale. Rootori mittesümmeetrilisuse tõttu sõltub väljepoolustega masina ankrureaktsiooni takistus x_a aheldusvoo Ψ_a suunast. Kuna see langeb kokku voolu I suunaga, mis aga praktiliste ülesannete lahendamisel on otsitav, siis osutub sellise vektordiagrammi koostamine võimatuks. Märgitud raskuse ületamiseks jaotame voolu I komponentideks I_d ja I_q , mis langevad piki- ja põikteljele (joonis 1.13). Vastavalt võime vaadelda ka ankrureaktsiooni aheldusvoo komponente Ψ_{ad} ja Ψ_{aq} ning nende indutseeritud elektromotoorjõude E_{aq} ja E_{ad} . Muus osas langeb vektordiagramm kokku peitpoolustega sünkroonmasina vektordiagrammiga. Kuna piki- ja põiksuunalised ankrureaktsioonitakistused x_{ad} ja x_{aq} on konstantsed ja seega teada, võib vektordiagrammi ka praktiliselt rakendada.



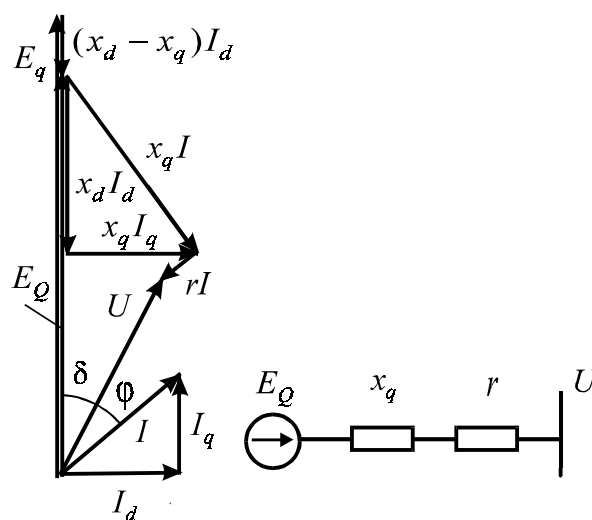
Joonis 1.13 Väljepoolustega sünkroonmasina vektordiagrammid

Vektordiagrammi (joonis 1.13 a) lihtsustamiseks jaotame kaheks komponendiks ka elektromotoorjõu E_s ning võtame kasutusele **piki-** ja **põiksünkroontakistused**

$$x_d = x_{ad} + x_s, \quad x_q = x_{aq} + x_s$$

Saame vektordiagrammi (1.13 b). Et sellele ei vasta aseskeemi, teeme matemaatilise teisenduse nii, nagu on näidatud joonisel 1.14. Siin on vektorist E_q lahutatud vektor $I_d(x_d - x_q)$. Tulemuseks on vektor E_Q , mida nimetatakse **fiktiivseks**

elektromotoorjõuks, ning selle aseskeem.



Joonis 1.14 Väljepoolustega sünkroonmasina vektordiagramm ja aseskeem

Väljepoolustega sünkroonmasina vektordiagrammid on kehtivad ka peitpoolustega masinale, millele $x_d = x_q$. Siit tuleneb muuhulgas, et peitpoolustega masina puhul $E_q = E_Q$.

1.4.3 Sünkroonmasina põhiseosed saab, kui projekteerida vektordiagrammid piki- ja põikteljele. Seejuures piisab, kui vaadelda ainult väljepoolustega masinat, kuna selle vektordiagrammid on üldistatavad ka peitpoolustega masinale. Veel tuleb kokku leppida telgede ja nurga lugemise positiivse suuna suhtes. Telgede suunad on näidatud joonistel 1.12 ja 1.13. Nurka on stabiilsuse vaatlemisel kombeks lugeda pinge vektorist vastupäeva. Pandagu tähele, et nurga φ väärtus on siis induktiivse iseloomuga koormuse korral negatiivne!

Projekteerides vektordiagrammid rootori piki- ja põikteljele joonistelt 1.13 b ja 1.14, saame sünkroonmasina põhivõrrandid kujul

$$\left. \begin{aligned} U \sin \delta &= x_q I_q - r I_d \\ U \cos \delta &= E_q - x_d I_d - r I_q \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{aligned} U \sin \delta &= x_q I_q - r I_d \\ U \cos \delta &= E_Q - x_d I_d - r I_q \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Nimetatud vektordiagrammidest võib tuletada veel mõne abiseose

$$I_d = I \cos(90^\circ - \delta + \varphi) = I \sin(\delta - \varphi)$$

$$I_q = I \sin(90^\circ - \delta + \varphi) = I \cos(\delta - \varphi)$$

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2$$

$$E_Q = E_q - (x_d - x_q) I_d$$

Joonisel 1.14 toodud aseskeemist saab

$$\underline{E}_Q = \underline{U} + (r + jx_q) \underline{I}$$

Viimane seos on kasulik vektordiagrammide praktilisel konstrueerimisel, sest elektromotoorjõu E_Q suund (nurk) ühtib elektromotoorjõu E_q suunaga.

1.4.4 Mööduv elektromotoorjõud. Sünkroonmasinas vaadeldavate aheldusvoogude hulgas on eriline koht *ergutusmähise (rootori) aheldusvoolul* Ψ_r , millel on suur elektromagnetiline inerts. Seda aheldusvoogu võib vaadelda koosnevana kahest komponendist

$$\Psi_r = \Psi_{rr} + \Psi_{ra}$$

kus Ψ_{rr} on tekitatud rootorivoolu (ergutusvoolu) I_r poolt, Ψ_{ra} aga voolu poolt staatori kõigis kolmes faasis. Ilmselt

$$\Psi_{rr} = L_r I_r$$

kus L_r on ergutuskontuuri induktiivsus.

Komponendi Ψ_{ra} tuletamiseks peab arvestama staatorivoolu ajalist ja ruumilist nihet tema kolmes faasis. Tulemuseks, mille saamist siinkohal ei vaadelda, on

$$\Psi_{ra} = -\frac{3}{2} M_{ar} I_d$$

kus M_{ar} on ergutusmähise ja staatori ühe faasi vastastikune induktiivsus. Esitatud seos on mõneti ebamugav, sest ergutusvool tekitab staatorimähises aheldusvoo

$$\Psi_d = M_{ar} I_r$$

Niisiis ei kehti viimasele kahele seosele vastastikkuse printsiip ($\Psi_1 = MI_2, \Psi_2 = MI_1$), millega oleme harjunud liikumatute ahelate korral.

Nimetatud printsiibi taastamiseks teeme muutujate vahetuse, mida nimetatakse ka *rootori taandamiseks staatorile*. Võtame kasutusele uued muutujad

$$\bar{I}_r = \frac{2}{3} I_r, \quad \bar{M}_{ar} = \frac{3}{2} M_{ar}, \quad \bar{L}_r = \frac{3}{2} L_r$$

Järelikult

$$\Psi_d = \bar{M}_{ar} \bar{I}_r \quad (1.7)$$

$$\Psi_{ra} = -\bar{M}_{ar} I_d$$

$$\Psi_r = \bar{L}_r \bar{I}_r - \bar{M}_{ar} I_d$$

Kuna aheldusvoog Ψ_d indutseerib staatoris elektromotoorjõu E_q , siis (1.7) järgi kehtib

$$E_q = \omega \bar{M}_{ar} \bar{I}_r$$

Leides siit rootori voolu I_r , saame

$$\Psi_r = \bar{L}_r \frac{E_q}{\omega \bar{M}_{ar}} - \bar{M}_{ar} I_d \quad \left| \frac{\omega \bar{M}_{ar}}{\bar{L}_r} \right.$$

$$\Psi_r \frac{\omega \bar{M}_{ar}}{\bar{L}_r} = E_q - \frac{\omega \bar{M}_{ar}^2}{\bar{L}_r} I_d$$

Võttes kasutusele **mööduva elektromotoorjõu** ja **mööduva takistuse**

$$E'_q = \Psi_r \frac{\omega \bar{M}_{ar}}{\bar{L}_r}, \quad x_d - x'_d = \frac{\omega \bar{M}_{ar}^2}{\bar{L}_r}$$

saame

$$E'_q = E_q - (x_d - x'_d) I_d$$

Kuna

$$E_q = E_Q - (x_d - x_d) I_d$$

siis ka

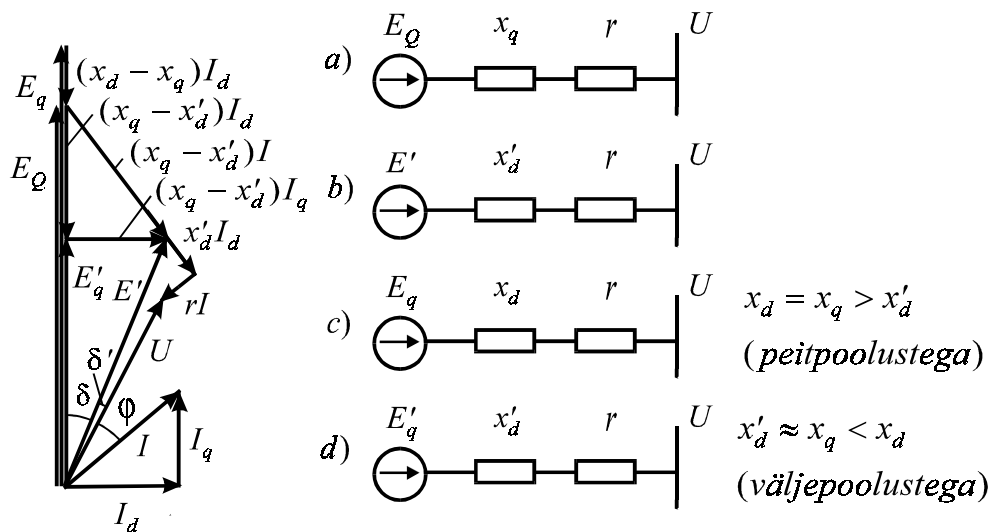
$$E'_q = E_Q - (x'_d - x_q) I_d$$

Kuna mööduv elektromotoorjõud on võrdeline rootori aheldusvooga, siis on tal ka viimase põhiomadus – suur inerts, millest tulenevalt ei saa näiteks elektromotoorjõud E'_q muutuda hüppeliselt.

Asendades eespool saadud suurused E_q või E_Q põhivõrranditesse (1.5) või (1.6), saame veel ühe põhivõrrandi kuju

$$\left. \begin{aligned} U \sin \delta &= x_q I_q - r I_d \\ U \cos \delta &= E'_q - x'_d I_d - r I_q \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Võrreldes võrrandeid (1.5) ja (1.8), näeme, et nad on sümmeetrilised, sest vaja on asendada $E_q \Rightarrow E'_q$ ja $x_q \Rightarrow x'_d$ või vastupidi. Sama omadus säilib ka mis tahes põhivõrrandite alusel tuletatud avaldistel.



Joonis 1.15 Sünkroonmasina vektordiagramm ja aseskeemid

Elektromotoorjõule E'_q võib leida asukoha ka vektordiagrammis (joonis 1.15). Kuna üldjuhul pole võimalik koostada aseskeemi, mis sisaldaks seda elektromotoorjõudu, tuletame matemaatiliselt veel ühe elektromotoorjõu E' , nii nagu on näidatud joonisel 1.15. Viimasele vastab aseskeem (b) samal joonisel.

1.4.5 Sünkroonmasina elektromotoorjõud ja aseskeemid. Selleks et orienteeruda sünkroonmasina võimalikes elektromotoorjõududes ja aseskeemides, tõdeme esmalt, et elektromotoorjõude kui arvutuslikke suurusi võib sünkroonmasinas vaadelda piiramatul hulgal. Küsimus on vaid selles, millisest elektromotoorjõust tuleks lähtuda ühe või teise ülesande lahendamisel. Edaspidiseks on kasulik meeles pidada järgmist.

- Sünkroonelektromotoorjõud E_q on proportsionaalne ergutusvooluga; kui AER puudub, on E_q konstantne.
- Fiktiivne elektromotoorjõud E_Q sõltub talitlusest ega ole seetõttu teada praktilistes ülesannetes, küll aga võib sellest elektromotoorjõust lähtuda mitmesuguste seoste tuletamisel.

- Mööduv elektromotoorjõud E'_q on proportsionaalne rootori aheldusvooga, sellest tulenevalt toimub tema muutumine suhteliselt suure inertsiga.
- Elektromotoorjõudu E' kasutatakse käesolevas kursuses ainult niivõrd, kuivõrd see ühtib elektromotoorjõuga E'_q (hüdrogeneraatorid).
- Joonisel 1.15 esitatud aseskeemid (a) ja (b) on kasutatavad nii peit- kui väljepoolustega sünkroonmasinatele.
- Peitpoolustega sünkroonmasinatele (turbogeneraatoritele) kehtib $x_q = x_d > x'_d$ ning seega ka aseskeem (c) joonisel 1.15.
- Väljepoolustega sünkroonmasinatele (hüdrogeneraatoritele) kehtib $x_d > x_q \approx x'_d$ ning aseskeem (d).

Olgu lõpuks märgitud, et eespool vaadeldud lihtsad seosed on ligikaudsed, kuna nad ei kajasta magnetahelate küllastumist. Ka ei kehti need seosed siirdeprotsesside ajal. Sellele vaatamata võimaldavad vaadeldud seosed aru saada siirdeprotsesside füüsikast ja teha ligikaudseid arvutusi.