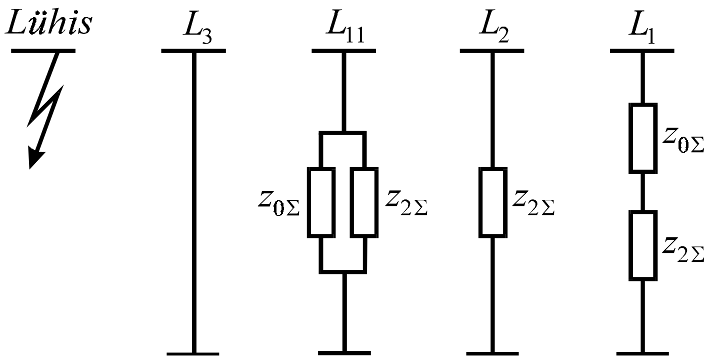
3 DÜNAAMILINE STABIILSUS

3.1 Dünaamilise stabiilsuse määramise lähtekohad

Dünaamiline stabiilsus on elektrisüsteemi võime taastada lähteseisund (või sellele lähedane seisund) peale suuri häiringuid. *Dünaamiline stabiilsus on alati seotud konkreetsete häiringutega*, milleks võivad olla järsud koormustõuked, skeemi põhielementide kommutatsioon või lühised.

Elektrisüsteemi stabiilsust kontrollitakse tavaliselt lühistele, sest need on ühteaegu nii ohtlikud kui ka tõenäosed (eriti mittesümmeetrilised lühised). Veendume, et stabiilsuse kontrollimisel tuleb arvestada ainult mittesümmeetriliste lühisvoolude *pärijärgnevuskomponente*. Tõepoolest, null- ja vastujärgnevuskomponendid indutseerivad generaatorites magnetvälju, mis pöörlevad generaatori rootori suhtes vastupidises suunas ja tekitavad seetõttu momente, mis muudavad märki vastavalt 100 ja 200 korda sekundis. On selge, et rootori suure inertsi tõttu ei saa sellised momendid praktiliselt mõjutada rootori liikumist olenemata nende suurusest ja põhjustada sünkronismist väljalangemist.



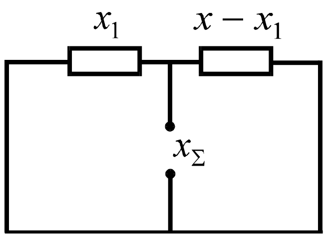
Joonis 3.1 Asekeemi šundi sõltuvus lühise liigist

Lühise liigist sõltub pärijärgnevuskomponendi šunt, mis moodustub aseskeemi summaarsest null- ja vastujärgnevustakistusest (joonis 3.1). On selge, et mida väiksem on šundi takistus, seda suuremad on lühisvoolud ja nende mõju generaatori rootori liikumisel (lähemalt punktis 3.3.3). Seega on süsteemi stabiilsusele kõige ohtlikumad kolmefaasilised ja kõige kergemini talutavad ühefaasilised lühised.

Lühise asukoha mõju üle võib otsustada takistuste $z_{0\Sigma}$ ja $z_{2\Sigma}$ suuruse järgi. Ilmselt on need takistused maksimaalsed, kui lühise asukohaks on null- või vastujärgnevusskeemi keskpunkt (joonis 3.2), sest

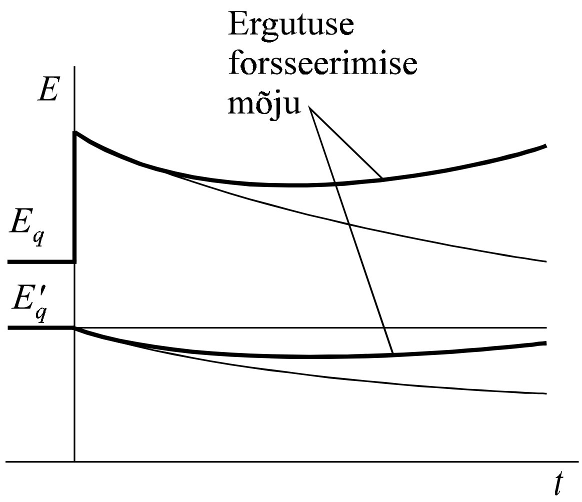
$$x_\Sigma = \frac{x_1(x - x_1)}{x}, \quad \frac{dx_\Sigma}{dx_1} = \frac{x - 2x_1}{x} = 0$$

$$x_{\Sigma\,\max} = \frac{x}{2}$$



Joonis 3.2 Päri- või nulljärgnevustakistuse sõltuvus lühise liigist

Kuigi nimetatud keskpunkti on raske määrata, võib ometigi teha ühe olulise järelduse – lühis elektriliini otspunktis on kindlasti ohtlikum kui lühis liini muudes punktides. *Seega on praktiliselt vaja kontrollida võimalike lühiste mõju ainult elektriliini otspunktides ja trafo klemmidel*.



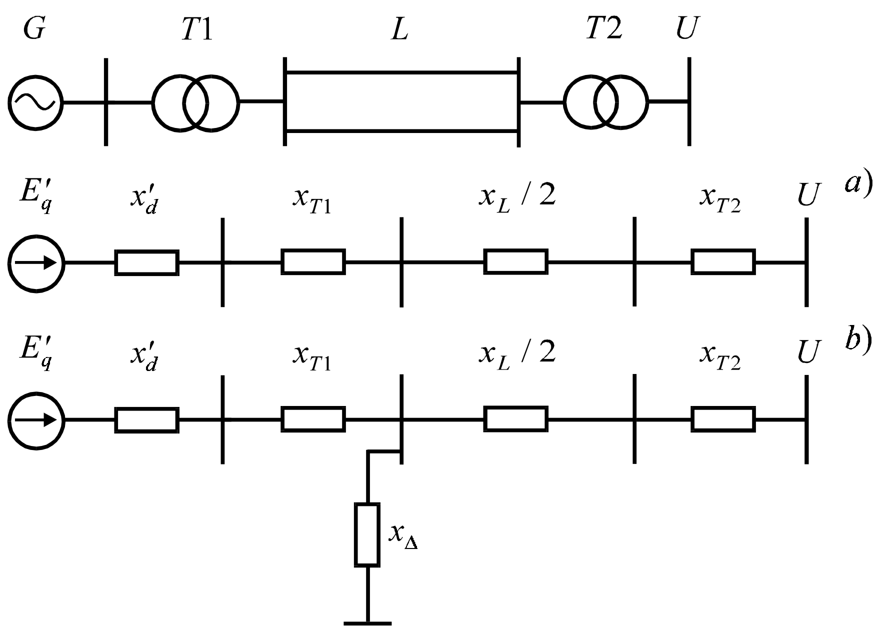
Joonis 3.3 Elektromotoorjõudude muutumine talitluse järsul muutumisel

Dünaamilise stabiilsuse arvutused taanduvad üldjuhul küllaltki töömahukale mittelineaarsete diferentsiaalvõrrandite numbrilisele lahendamisele. Arvutuste mahtu võib oluliselt vähendada, kui lugeda mööduv elektromotoorjõud E_q' konstantseks. Teatavasti on see elektromotoorjõud proportsionaalne rootori aheldusvooga, millel on suur inerts. Seetõttu ei saa E_q' muutuda hüppeliselt. Ka hiljem (s.o ajavahemikus 1–2 sekundit) jääb E_q' muutus piiratuks (joonis 3.3). Siirdeprotsesside lihtsustatud arvutus, kus E_q' loetakse konstantseks, annab piisavalt täpse tulemuse rootorite esimese võnke ajaks. Loomulikult on aseskeemides siis generaatorite mööduvad takistused x_d' (joonis 1.15 d).

3.2 Pindade reegel

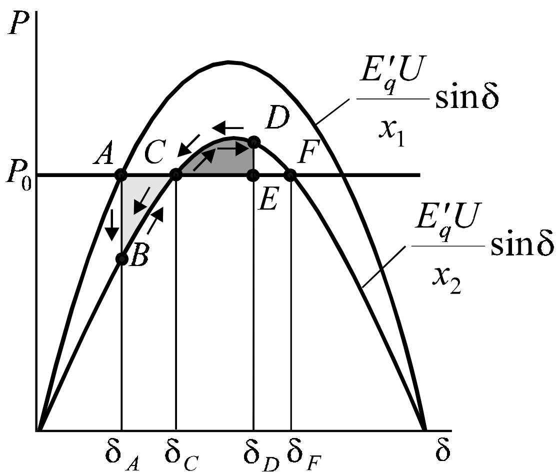
Vaatleme taas lihtsaimat elektrisüsteemi ja püüame jõuda selgusele, mis juhtub, kui elektriliini ühe ahela alguses tekib püsilühis. Lühise eelse ja lühise aja aseskeemid ja nurkkarakteristikud on toodud joonistel 3.4 ja 3.5. Aseskeemide summaarsed takistused on ilmselt

$$x_1 = x_d' + x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2}, \quad x_2 = x_1 + \frac{(x_d' + x_{T1})(x_L / 2 + x_{T2})}{x_\Delta}$$



Joonis 3.4 Lihtsaima elektrisüsteemi põhimõtteskeem ja aseskeemid normaalolukorras (a) ja lühise ajal (b)

Joonisel 3.5 kajastatud siirdeprotsess algab tööpunktist A ja lõpeb uue seisundi kujunemisega vastavalt tööpunktile C. Seega on siirdeprotsess antud tingimustes stabiilne.



Joonis 3.5 Siirdeprotsessi kulg lühise ajal

Kuidas kontrollida stabiilsust arvutuslikult? Selleks on ilmselt vaja võrrelda kineetilise energia väärtusi, mis generaatori rootor (koos turbiini rootoriga) saab kiirenemisel ja annab ära pidurdumisel. Siirdeprotsess on stabiilne siis, kui kiirenemisel saadud energia ehk **kiirendusenergia** on väiksem võimalikust energiakaost rootori pidurdumisel ehk **suurimast pidurdusenergiast**. Nimetatud kineetilise energia väärtused A_K ja A_{PM}, mida graafiliselt kujutavad vastavad pindalad koordinaadistikus $P-\delta$, on vaadeldava näite puhul arvutatavad järgmiselt:

$$A_K = \int_{\delta_A}^{\delta_C} \Delta M d\delta \approx \int_{\delta_A}^{\delta_C} \Delta P d\delta = f_{ABC} = f_K$$

$$A_{PM} = \int_{\delta_C}^{\delta_F} \Delta M d\delta \approx \int_{\delta_C}^{\delta_F} \Delta P d\delta = f_{CDF} = f_{PM}$$

sest

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega} \approx \frac{\Delta P}{\Omega_0} = \Delta P$$

kus Ω ja Ω_0 on rootori pöörlemise tegelik kiirus ja nimikiirus. Faktiline pidurdusenergia on stabiilse siirdeprotsessi puhul võrdne kiirendusenergiaga

$$A_P = A_K = \int_{\delta_C}^{\delta_D} \Delta M d\delta \approx \int_{\delta_C}^{\delta_D} \Delta P d\delta = f_{CDE}$$

Seega on dünaamilise stabiilsuse kriteeriumiks

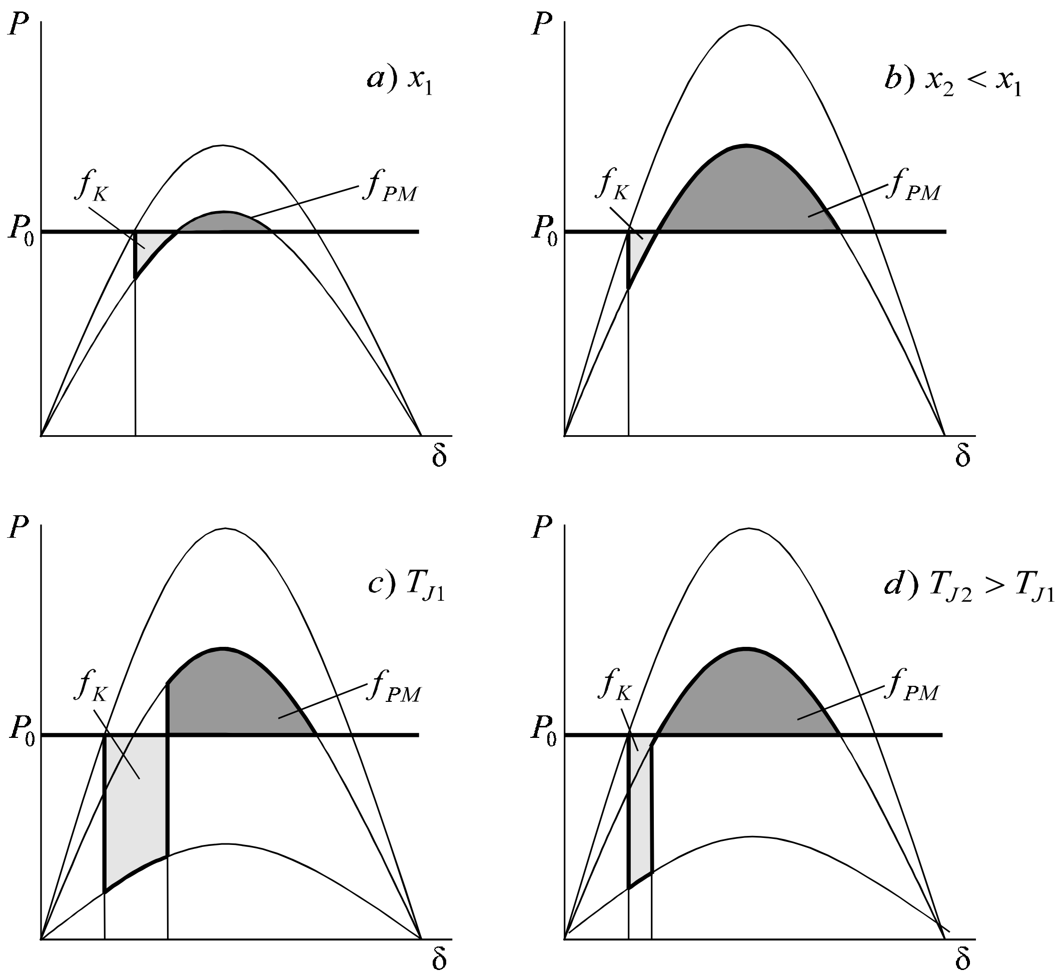
$$A_K < A_{PM} \ ehk \ f_K < f_{PM}$$

Graafilisest ettekujutusest lähtudes võib väita, et dünaamilise stabiilsuse kontrollimiseks lihtsaimas energiasüsteemis on vaja leida ja võrrelda **kiirenduspindala** ning **suurimat pidurduspindala** (meie näidetes f_{ABC} ja f_{CDF}). Keerukate häiringute korral (automaatne taaslülitus) võivad nimetatud pindalad koosneda mitmest üksteisega seostamata segmendist. Pandagu veel tähele, et kiirendus- ja pidurduspindala praktilisel määramisel on vaja teada nurga δ väärtusi. Automaatikaseadmete (releekaitse, taaslülitusautomaat jm) rakendamisel on aga praktiliselt teada vaid vastavad sätteajad. Seega tuleb üldjuhul tunda sõltuvust $\delta = \mathrm{f}(t)$, mis saadakse generaatori rootori liikumise diferentsiaalvõrrandi lahendamise teel.

3.3 Dünaamilisele stabiilsusele mõjuvad tegurid

Pindalade meetod lihtsaima elektrisüsteemi dünaamilise stabiilsuse määramiseks võimaldab teha järeldusi mitmesuguste elektromehaanilisi siirdeprotsesse mõjutavate tegurite kohta. Esialgu võime arutleda vaid kvalitatiivselt, sest nõutavate pindalade leidmiseks on enamasti vaja teada sõltuvust $\delta = \mathrm{f}(t)$, mille arvutamist käsitleme punktis 3.6. Allpool püüame siiski võtta arvesse, et konstantse jääkvõimsuse korral on generaatori rootori liikumine ühtlaselt kiirenev, sest kehtib sõltuvus $\delta = \delta_0 + ct^2$.

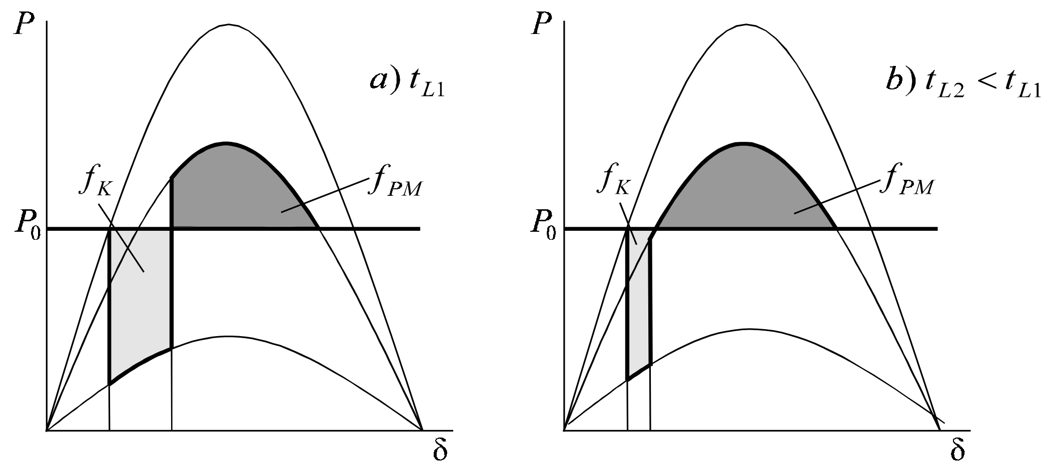
3.3.1 Süsteemiparameetrite mõju. Dünaamilist stabiilsust mõjutavateks süsteemiparameetriteks on takistuse x kõrval generaatori rootori inertsimoment, mis esitatakse inertsikonstandi T_J kujul (p 3.4). Takistuse vähenemisel tõusevad nurkkarakteristikute amplituudid, mille tõttu väheneb kiirenduspindala ja suureneb pidurduspindala (joonis 3.6 a ja b). Rootori inertsi suurenemisel väheneb nurga δ juurdekasv vaadeldava ajavahemiku vältel. Vastavalt väheneb ka kiirenduspindala (joonis 3.6 c ja d). Talitluse häiringutena on näites silmas peetud kommutatsiooni (a ja b) ning mittesümmeetrilist lühist sellele järgneva avariilise elemendi (näiteks liiniahela) väljalülitamisega (c ja d). Süsteemiparameetrite x ja T_J soovitavaid muutusi võib saavutada, kui suurendada paralleelsete seadmete (generaatorid, liinid, trafod) arvu või nende nimivõimsust. Mõeldavad on ka seadmete konstruktsiooni muudatused. Kõik nimetatud abinõud on seotud suurte kulutustega.



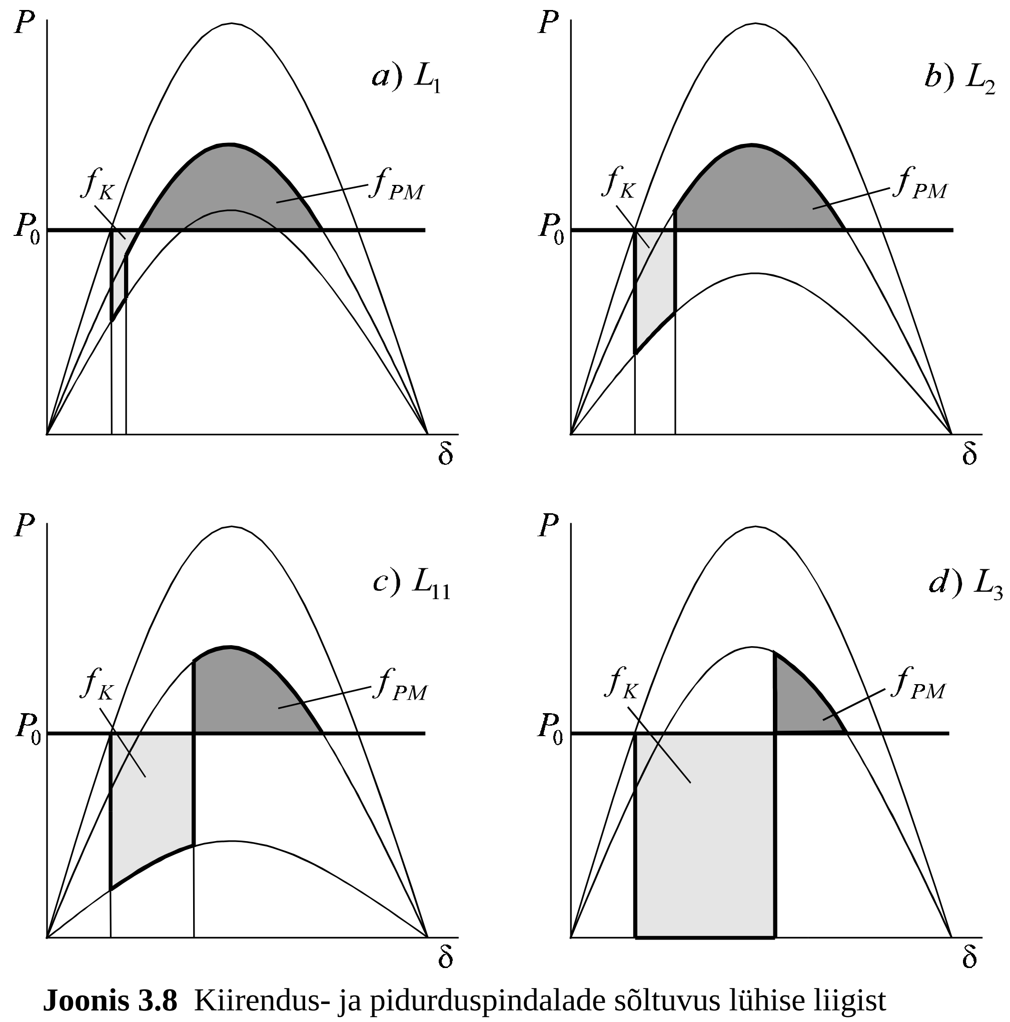
Joonis 3.6 Kiirendus- ja pidurduspindalade sõltuvus süsteemiparameetrite väärtusest

3.3.2 Lühise kestuse mõju illustreerib joonis 3.7. On ilmne, et lühise kestuse piiramine vähendab järsult kiirenduspindala, sest nurga juurdekasv toimub esimeses lähenduses ruutsõltuvuse kohaselt. Kiiretoimelise releekaitse kasutamine ongi üks põhilisi dünaamilise stabiilsuse tõstmise mooduseid.

3.3.3 Lühise liigi mõju väljendub lühise ajal kehtiva nurkkarakteristiku amplituudi väärtuses (joonis 3.8). Seetõttu on dünaamilise stabiilsuse seisukohalt kõige kergemini talutavad ühefaasilised lühised ja kõige raskemini kolmefaasilised lühised.

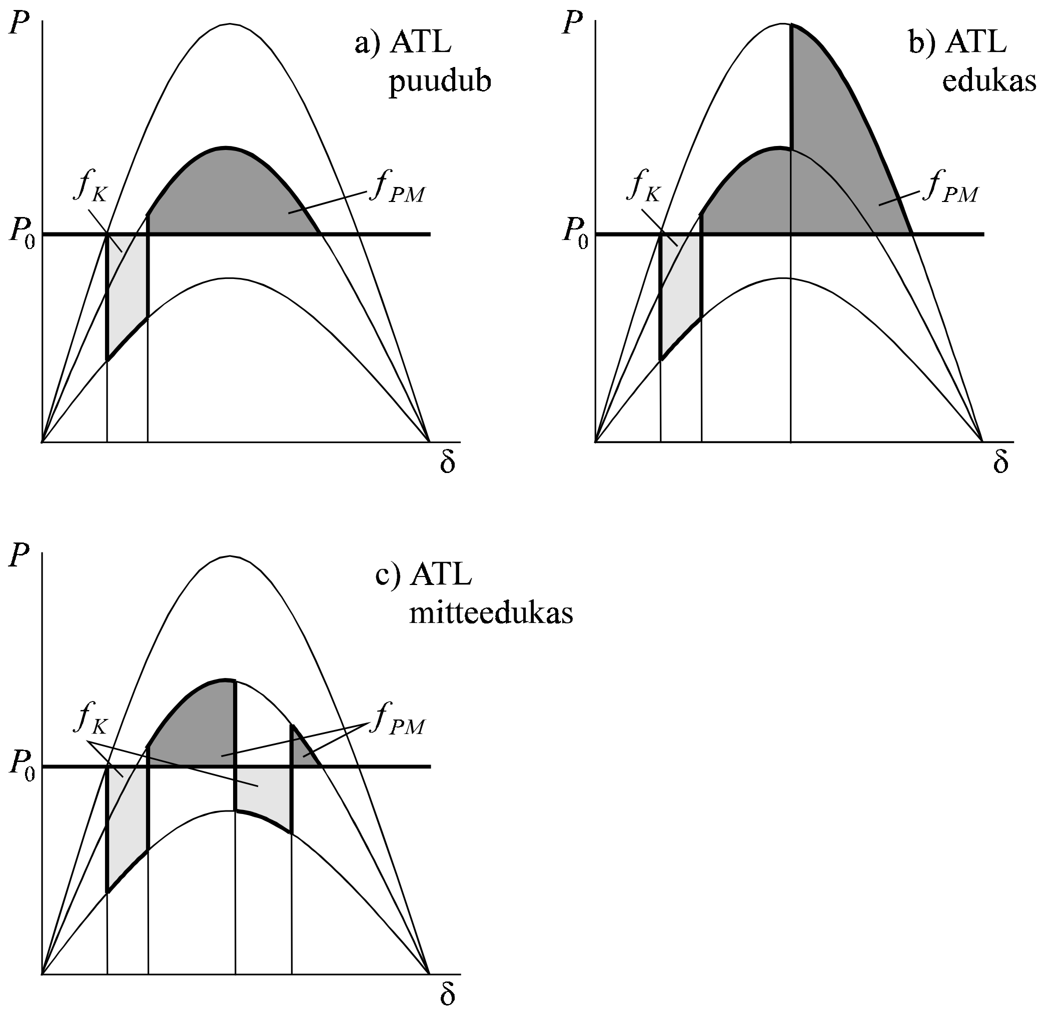


Joonis 3.7 Kiirendus- ja pidurduspindalade sõltuvus lühise kestusest



Joonis 3.8 Kiirendus- ja pidurduspindalade sõltuvus lühise liigist

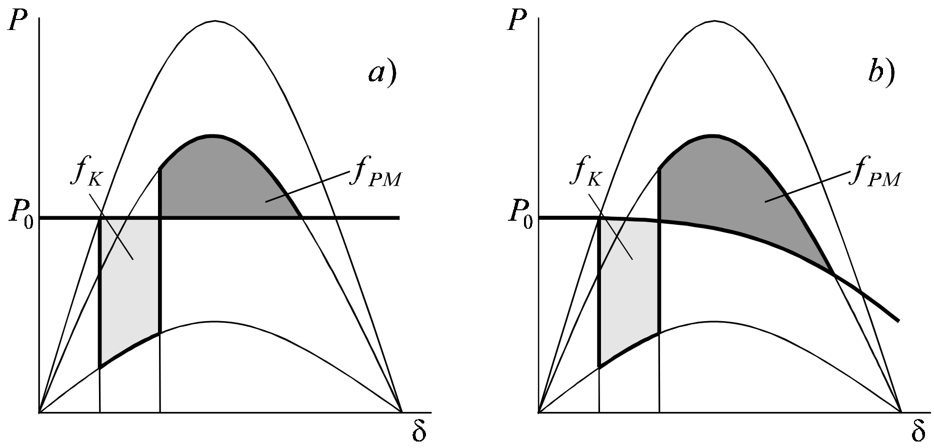
3.3.4 Automaattaaslülituse (ATL) mõju sõltub lülituse edukusest. Eduka taaslülituse korral on pidurduspindala suurem võrreldes juhtumiga, kui ATL puudub (joonis 3.9 a ja b). Mitteedukas ATL, vastupidi, suurendab kiirenduspindala ja vähendab pidurduspindala (joonis 3.9 a ja c). Kuna enamik taaslülitusi on edukad (õhuliinidel umbes 70%), siis tuleb ATL-i rakendamist ka dünaamilise stabiilsuse seisukohalt lugeda soovitavaks.



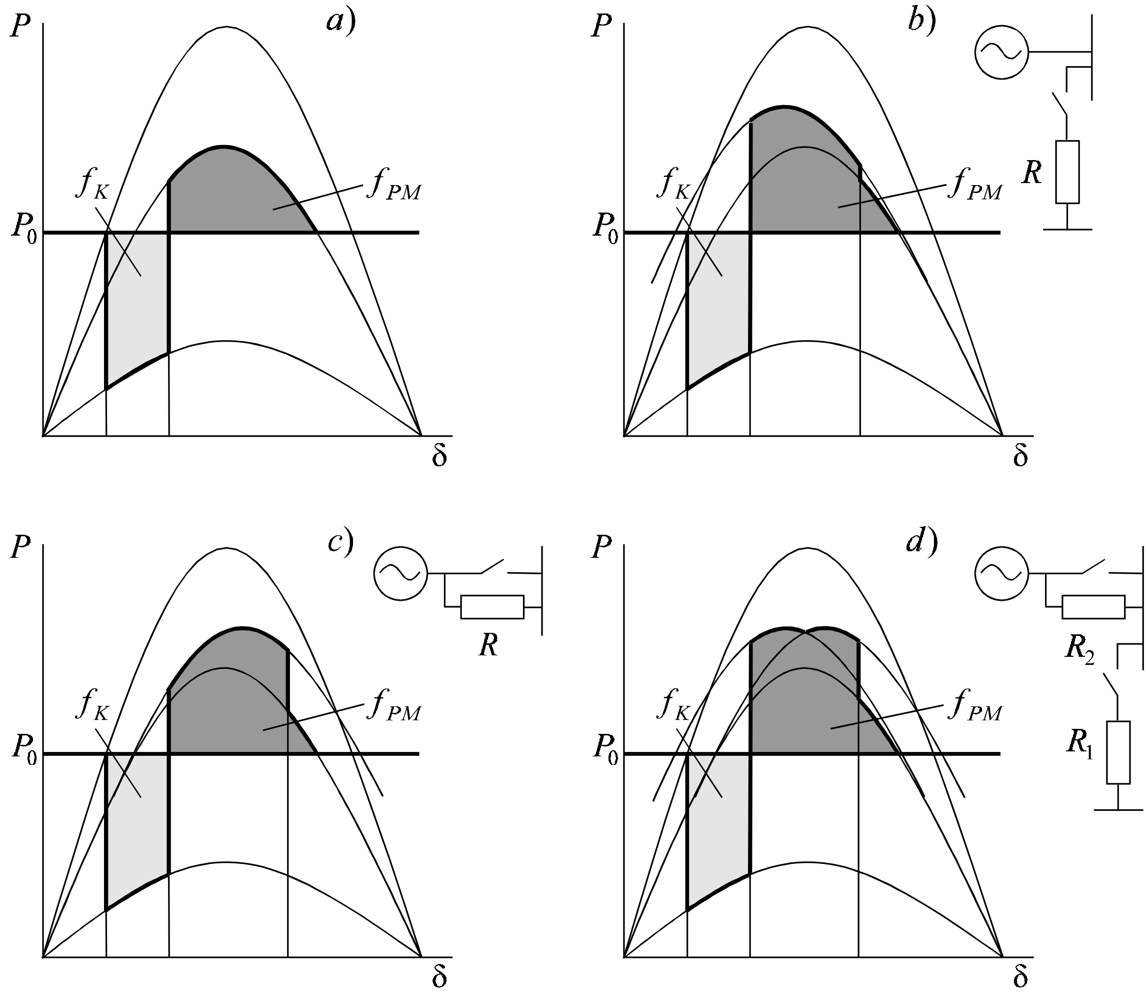
Joonis 3.9 Kiirendus- ja pidurduspindalade sõltuvus ATL-i edukusest

3.3.5 Turbiini automaatse kiirusregulaatori (AKR) mõju väljendub võimsuse P_0 vähenemises rootori kiirenemise ajal. Kui arvestada, et generaatori rootori ohtlik kiirenemine toimub suhteliselt lühikeses ajavahemikus (umbes 1 sekund), siis ei suuda tavalised auruturbiini kiirusregulaatorid (ammugi mitte hüdroturbiini regulaatorid) sellele reageerida. Võimalik on aga konstrueerida erilisi kiiretoimelisi regulaatoreid, mis toimivad juba mõne kümnendiksekundi vältel. Nende rakendamine nõuab ka turbiini konstruktsiooni muutmist. Seega on tegemist eriliste auruturbiinidega. Turbiini kiiretoimelise reguleerimise mõju illustreerib joonis 3.10. Võimsuse P_0 vähenemine sõltuvalt nurgast δ on siin kaudne, sest turbiini regulaator reageerib rootori pöörlemiskiiruse, mitte nurga muutumisele.

3.3.6 Generaatori elektriline pidurdamine seisneb piisava võimsusega aktiivtakisti lülitamises generaatori klemmidele. Lülitamine toimub kas piki- või põikskeemi kohaselt. Punktis 2.5 veendusime, et mõlemal juhul nurkkarakteristik tõuseb ning nihkub nurga δ suhtes. Nihkumine toimub nurga vähenemise suunas, kui pidurdustakisti on põiklülituses, ja nurga suurenemise suunas pikilülituse korral. Seega on saavutatav efekt suurim siis, kui esmalt kasutada põik- ja seejärel pikilülitust (joonis 3.11 d). Igal juhul suurendab elektriline pidurdamine pidurduspindala, kui takisti sisse- ja väljalülitamise momendid on valitud õigesti (joonis 3.11 b, c ja d).



Joonis 3.10 Kiirendus- ja pidurduspindalade sõltuvus AKR-i toimest



Joonis 3.11 Kiirendus- ja pidurduspindalade sõltuvus generaatori elektrilisest pidurdamisest

3.4 Generaatori rootori liikumise diferentsiaalvõrrand

Eespool veendusime, et lihtsaima elektrisüsteemi dünaamilise stabiilsuse kontrollimiseks on üldjuhul vaja teada generaatori rootori nurga muutumist ajas, s.o sõltuvust $\delta = \mathrm{f}(t)$. Veelgi enam peab nimetatud sõltuvust oskama arvutada keerulise elektrisüsteemi korral, kus pindalade meetod pole rakendatav ja dünaamilise stabiilsuse määramine toimub rootorite vastastikuste asendite jälgimise alusel.

Funktsioon $\delta = \mathrm{f}(t)$ saadakse generaatori rootori liikumise diferentsiaalvõrrandi lahendina. Viimane on sisuliselt Newtoni teine seadus, mis pöörlevale rootorile on esitatav kujul

$$Jp^2\Gamma = M_M - M_E \tag{3.1}$$

kus J – rootori inertsimoment,

Γ – mehaaniline nurk, s.o nurk rootori telje ja liikumatu telje vahel,

M_M ja M_E – generaatori elektriline ja mehaaniline moment.

Teisendame võrrandi (3.1) meile sobivale kujule. Selleks võtame arvesse, et

$$\Gamma = \frac{\psi}{q}, \quad q = \frac{\omega_0}{\Omega_0}$$

kus q – pooluspaaride arv,

ψ – elektriline nurk,

ω_0 ja Ω_0 – rootori elektriline ja mehaaniline sünkroonkiirus.

Ilmselt

$$\psi = \omega_0 t + \delta$$

millest saame

$$p\psi = \omega_0 + p\delta = \omega$$

$$p^2\psi = p^2\delta = p\omega$$

Asendades võrrandis (3.1) nurga Γ, leiame

$$Jp^2\delta = (M_M - M_E)q$$

$$Jp^2\delta = (M_M - M_E)\frac{\omega_0}{\Omega_0}$$

Lähme üle suhtelistele ühikutele, arvestades, et baasvõimsus $S_B = M_B\Omega_0$

$$\frac{Jp^2\delta\Omega_0^2}{S_B\omega_0} = \frac{M_M - M_E}{M_B}$$

Tähistades

$$\frac{J\Omega_0^2}{S_B} = T_J$$

ja lugedes momendid edaspidi esitatuks suhtelistes ühikutes, saame

$$\boxed{\frac{T_J}{\omega_0} p^2\delta = M_M - M_E \text{ ehk } \frac{T_J}{\omega_0} p^2\delta \approx P_0 - P} \tag{3.2}$$

Suhtelist inertsimomenti T_J, mille mõõtühikuks on sekund, nimetatakse **inertsikonstandiks**. Seda suurust võib ka füüsikaliselt tõlgendada. Nimelt on inertsikonstant T_J võrdne ajaga, mida on vaja, et viia rootori kiirus nullist kuni sünkroonkiiruseni, kui rootorile on rakendatud moment $M = 1$ (näiteks $M_M = 1$ ja $M_E = 0$), s.o $M = M_B$. Inertsikonstandi võib leida *hoomomendi* GD^2 [tm^2] alusel järgmiselt:

$$T_{JN} = \frac{\frac{GD^2}{4g}\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2}{102 S_N} = 2{,}74 \frac{GD^2 n^2 10^{-6}}{S_N} \text{ [sek]}$$

kus S_N – nimivõimsus [MVA],

n – pöörlemiskiirus [p/min].

Kui inertsikonstant on antud nimivõimsuse suhtes, s.o

$$T_{JN} = \frac{J\Omega_0^2}{S_N}$$

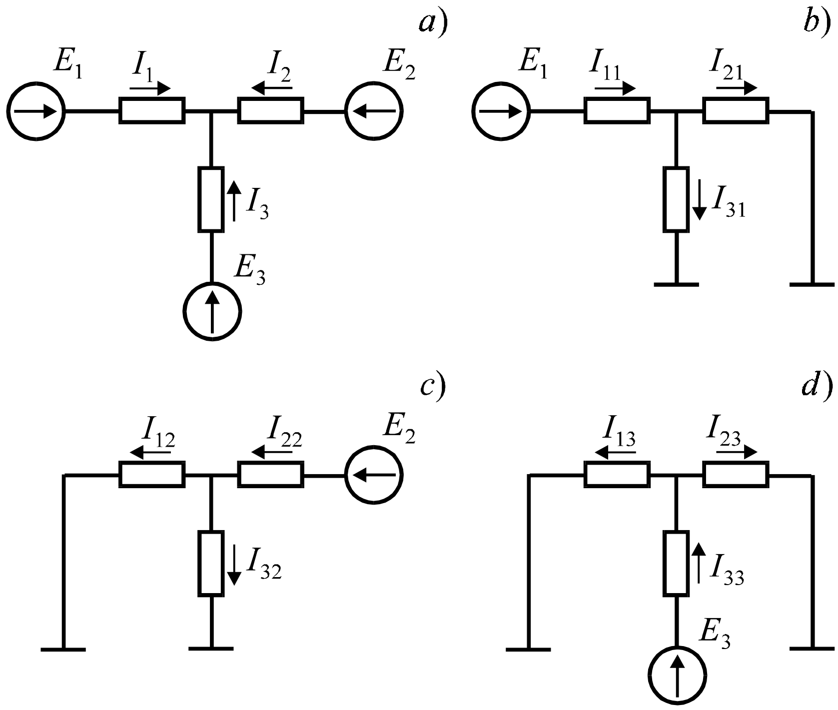
siis tuleb see taandada baasvõimsusele järgmiselt:

$$T_{JB} = T_{JN}\frac{S_N}{S_B}$$

Inertsikonstandi väärtus nimivõimsuse suhtes on umbes 1,0 turbogeneraatoritele ja 0,7 hüdrogeneraatoritele. Stabiilsuse arvutustes tuleb generaatori inertsikonstandile lisada turbiini inertsikonstant, sest nende rootorid on jäigalt seotud. Turbiini inertsikonstant on üldjuhul väiksem kui generaatoril.

3.5 Võimsuse määramine superpositsioonimeetodil

Rootori liikumise diferentsiaalvõrrandi lahendamisel tuleb arvesse võtta generaatori võimsuse sõltuvust nurgast δ. Lihtsaima süsteemi korral kujutab see sõltuvus endast meile juba tuttavat nurkkarakteristikut. Allpool tuletame vastava avaldise üldjuhu jaoks, eeldades, et kõik elektromotoorjõud ja takistused on konstantsed. Praktiliselt tähendab see, et generaatoritele seatakse vastavusse aseskeem elektromotoorjõuga $E'_q = const$ ja takistusega x'_d ning koormus asendatakse konstantse takistusega.



Joonis 3.12 Elektrisüsteemi aseskeem a ja osaskeemid b, c ja d

Rakendame nii nagu punktis 2.4 superpositsiooniprintsiipi. Esmalt vaatleme kolme generaatoriga süsteemi (joonis 3.12). Ilmselt

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{12} - \underline{I}_{13}$$

kus

$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{11}}, \quad \underline{I}_{12} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{z}_{12}}, \quad \underline{I}_{13} = \frac{\underline{E}_3}{\underline{z}_{13}}$$

millest

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{11}} - \frac{\underline{E}_2}{\underline{z}_{12}} - \frac{\underline{E}_3}{\underline{z}_{13}}$$

ja

$$\underline{S}_1 = \underline{E}_1 \overset{*}{\underline{I}}_1 = \underline{E}_1 (\overset{*}{\underline{I}}_{11} - \overset{*}{\underline{I}}_{12} - \overset{*}{\underline{I}}_{13}) = \frac{\underline{E}_1 \overset{*}{\underline{E}}_1}{\overset{*}{\underline{z}}_{11}} - \frac{\underline{E}_1 \overset{*}{\underline{E}}_2}{\overset{*}{\underline{z}}_{12}} - \frac{\underline{E}_1 \overset{*}{\underline{E}}_3}{\overset{*}{\underline{z}}_{13}}$$

Tähistades

$$\underline{E}_i = E_i \angle \delta_i, \quad \underline{z}_{ij} = z_{ij} \angle \psi_{ij}, \quad \delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

saame

$$\underline{S}_1 = \frac{E_1^2}{z_{11}} \angle \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \angle (\delta_{12} + \psi_{12}) - \frac{E_1 E_3}{z_{13}} \angle (\delta_{13} + \psi_{13})$$

Siit aktiivvõimsus

$$P_1 = \frac{E_1^2}{z_{11}} \cos \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \cos (\delta_{12} + \psi_{12}) - \frac{E_1 E_3}{z_{13}} \cos (\delta_{13} + \psi_{13})$$

Võttes kasutusele täiendusnurgad $\alpha_{ij} = 90^\circ - \psi_{ij}$, leiame

$$P_1 = \frac{E_1^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 E_3}{z_{13}} \sin (\delta_{13} - \alpha_{13})$$

Viimast avaldist võib üldistada *n* ekvivalentse generaatoriga süsteemi kohta järgmiselt:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) + \ldots + \frac{E_1 E_n}{z_{1n}} \sin (\delta_{1n} - \alpha_{1n})$$

$$P_2 = \frac{E_2 E_1}{z_{21}} \sin (\delta_{21} - \alpha_{21}) + \frac{E_2^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22} + \ldots + \frac{E_2 E_n}{z_{2n}} \sin (\delta_{2n} - \alpha_{2n})$$

. . . .

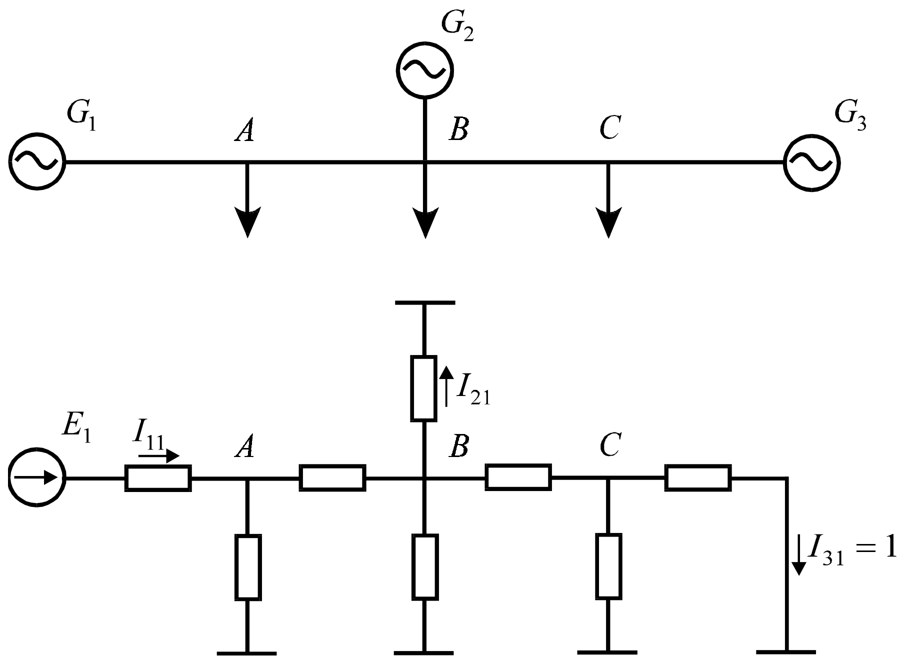
$$P_n = \frac{E_n E_1}{z_{n1}} \sin (\delta_{n1} - \alpha_{n1}) + \frac{E_n E_2}{z_{n2}} \sin (\delta_{n2} - \alpha_{n2}) + \ldots + \frac{E_n^2}{z_{nn}} \sin \alpha_{nn}$$

Tuletatud valemites $z_{ij} = z_{ji}$ ja $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$, sest $\underline{z}_{ij} = \underline{z}_{ji}$ (selles veendume allpool), ning $\delta_{ij} = -\delta_{ji}$.

Vaatleme nüüd, kuidas arvutada oma- ja vastastikuseid takistusi $\underline{z}_{ij}$. Allpool on toodud kaks lihtsat meetodit. *Ühikvoolude meetod* põhineb tõsiasjal, et oma- ja vastastikused takistused sõltuvad ainult skeemi takistustest, mitte aga voolust ja elektromotoorjõududest. Seega võib mingi elektromotoorjõu väärtuse ette anda (ülejäänud elektromotoorjõud on siis nullid), leida voolu jagunemine ning vastavalt valemile $\underline{z}_{ij} = \underline{E}_j / \underline{I}_{ij}$ arvutada takistused. Korrates sama tegevust järjekorras kõikide elektromotoorjõududega, saamegi otsitavad takistuste väärtused. Radiaalse skeemi korral on otstarbekam ette anda üks voolukomponentide väärtus ning, liikudes arvutustega vaadeldavast harust mittenullise elektromotoorjõu poole, leida ülejäänud voolukomponendid ja lõpuks ka selle elektromotoorjõu väärtus. Joonisel 3.13 esitatud skeemi puhul on näiteks otstarbekas ette anda voolukomponent $\underline{I}_{31} = 1$, seejärel arvutada järjekorras $\underline{U}_C$, $\underline{I}_{BC}, \ldots, \underline{E}_1$ ning lõpuks

$$\underline{z}_{11} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{11}}, \underline{z}_{12} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{21}}, \underline{z}_{13} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{31}}$$

Analoogiliselt on leitavad ülejäänud takistused.



Joonis 3.13 Elektrisüsteemi aseskeem (a) ja osaskeem (b)

Transfiguratsioonimeetod seisneb skeemi teisendamises täielikku hulknurka (joonis 3.14). Kui siin võtta näiteks $E_1 > 0$ ja $E_2 = E_3 = E_4 = 0$, siis

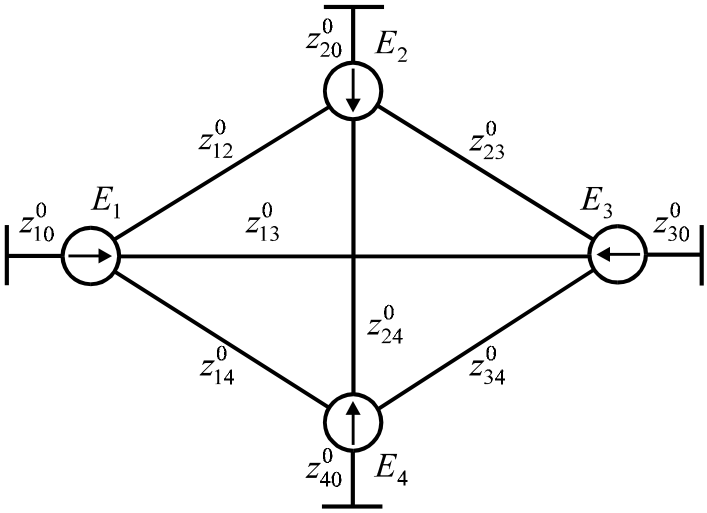
$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{12}^0} + \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{13}^0} + \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{14}^0} + \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{10}^0}$$

$$\underline{I}_{21} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{z}_{12}^0}$$

millest

$$\underline{z}_{11} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{11}} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{z}_{12}^0} + \frac{1}{\underline{z}_{13}^0} + \frac{1}{\underline{z}_{14}^0} + \frac{1}{\underline{z}_{10}^0}}, \quad \underline{z}_{12} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{I}_{21}} = \underline{z}_{12}^0$$

Seega on omatakistuse $\underline{z}_{ii}$ saamiseks vaja paralleelselt liita kõik elektromotoorjõuga E_i ühendatud harude takistused. Vastastikune takistus on aga võrdne skeemi vastava haru takistusega, mis kinnitab ka väite, et $\underline{z}_{ij} = \underline{z}_{ji}$.



Joonis 3.14 Elektrisüsteemi teisendatud aseskeem

3.6 Järjestikuste intervallide meetod

Asugem nüüd generaatori rootori liikumisvõrrandit lahendama. See võrrand saadi punktis 3.4 mittelineaarse diferentsiaalvõrrandi kujul

$$\frac{T_J}{\omega_0} p^2 \delta = P_0 - P = \Delta P$$

Mittelineaarsus seisneb siin selles, et generaatori elektriline võimsus P on siinusfunktsiooni kaudu seotud muutujaga δ. Lihtsaimas süsteemis annab selle seose nurkkarakteristik. Keerulises süsteemis on muutujaid enam kui üks. Vastavad seosed tuletati eelmises punktis.

Mittelineaarsel diferentsiaalvõrrandil puudub enamasti üldlahend, s.o võimalus lahendi üldkuju analüütiliselt esitada. Selliseid võrrandeid saab lahendada ainult numbriliselt konkreetsete algtingimuste kohaselt. Rootori liikumisvõrrandi puhul on siiski olemas üks lineaarne erijuhtum nimelt siis, kui generaatori klemmidel on kolmefaasiline lühis ja sellest tulenevalt elektriline võimsus $P = 0$. Liikumisvõrrand saab siis kuju

$$\frac{T_J}{\omega_0} p^2 \delta = P_0$$

Viimase lahend on ilmselt

$$\delta = \delta_0 + \frac{\omega_0 P_0}{2T_J} t^2$$

mis nurga mõõtmisel kraadides saab kuju

$$\delta = \delta_0 + \frac{180 f P_0}{2T_J} t^2$$

Üldjuhul, kui $P \neq 0$, tuleb rootori liikumisvõrrand lahendada numbriliselt. Selleks jaotatakse vaadeldav ajavahemik (1...2 sek) väikesteks ajaintervallideks t = 0,05…0,1 sek ja leitakse nurga juurdekasv igas ajaintervallis. Esimese ajaintervalli jaoks tingimusel, et kiirendus on konstantne, saadakse

$$\Delta\delta_1 = \alpha_0 \frac{\Delta t^2}{2}$$

kus α_0 on kiirendus esimese ajaintervalli alguses. Kiirenduse väärtuse saame rootori liikumisvõrrandist

$$\alpha_0 = p^2 \delta_0 = \frac{\Delta P_0 \omega_0}{T_J}$$

Seega

$$\Delta\delta_1 = \Delta P_0 \frac{\Delta t^2 \omega_0}{2T_J}$$

Esitades nurga kraadides, saame

$$\Delta\delta_1 = \frac{180 \Delta t^2 \omega_0}{\pi T_J} \cdot \frac{\Delta P_0}{2} = \frac{360 f \Delta t^2}{T_J} \cdot \frac{\Delta P_0}{2}$$

Tähistades

$$k = \frac{360 f \Delta t^2}{T_J}$$

leiame

$$\Delta\delta_1 = k \frac{\Delta P_0}{2}$$

Seega on nurga δ väärtus esimese ajaintervalli lõpus

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1$$

Nurga juurdekasv teise ajaintervalli vältel on

$$\Delta\delta_2 = v_1 \Delta t + \alpha_1 \frac{\Delta t^2}{2}$$

kus v_1 on rootori pöörlemiskiirus ja α_1 kiirendus esimese ajaintervalli lõpus. Kiirus v_1 on konstantse kiirenduse korral esimeses ajaintervallis

$$v_1 = \alpha_0 \Delta t$$

Kuna kiirendus ajaintervalli vältel tegelikult muutub, siis saame täpsema tulemuse, kui võtame

$$v_1 = \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2}\Delta t$$

Seega

$$\Delta\delta_2 = \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2}\Delta t^2 + k\frac{\Delta P_1}{2}$$

Kuna eespool nägime, et

$$\alpha_0 \frac{\Delta t^2}{2} = \Delta\delta_1 = k\frac{\Delta P_0}{2}$$

siis ka

$$\alpha_1 \frac{\Delta t^2}{2} = k\frac{\Delta P_1}{2}$$

Seega

$$\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + k\Delta P_1$$

ja

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta_2$$

Saadud tulemus kehtib ilmselt ka kõigi järgnevate ajaintervallide kohta

$$\boxed{\Delta\delta_i = \Delta\delta_{i-1} + k\Delta P_{i-1}} \qquad (3.3)$$

Kui ajaintervalli alguses toimub häiringu muutus (näiteks lühise väljalülitamine), siis on tegemist kahe jääkvõimsuse ΔP väärtusega ΔP_{i-1}^{-0} ja ΔP_{i-1}^{+0}. Täpsustuseks võib võtta

$$\Delta P_{i-1} = \frac{\Delta P_{i-1}^{-0} + \Delta P_{i-1}^{+0}}{2}$$

Kui seda tingimust rakendada esimese ajaintervalli kohta, siis laieneb üldvalemi (3.3) kehtivus ka sellele ajaintervallile, sest $\Delta P_0^{-0} = 0$.

Keeruka elektrisüsteemi korral tuleb igas ajaintervallis leida nurkade juurdekasvud kõikidele ekvivalentsetele generaatoritele, sest eelmises punktis leitud seoste kohaselt on mingi vaadeldava generaatori elektriline võimsus määratud süsteemi kõigi generaatorite nurkade väärtustega, s.o

$$P_i = P_i(\delta_1, \delta_2, ..., \delta_n)$$

Teisisõnu, tegemist on rootorite liikumise diferentsiaalvõrrandisüsteemiga, mille kõik võrrandid tuleb lahendada samal ajal. Muus osas vastab arvutuste käik ülaltoodule.

Eespool kirjeldatud generaatori rootori liikumisvõrrandi lahendamiseeskiri, mida nimetatakse **järjestikuste intervallide meetodiks**, annab ligikaudse tulemuse nii nagu muudki diferentsiaalvõrrandite numbrilise lahendamise võtted. Vea põhjustab siin eeldus, et rootori kiirendus ajaintervalli vältel ei muutu. Lahendi täpsuse tõstmiseks tuleb ajaintervallide kestust vähendada, mis tähendab, et ajaintervallide arv ja seega ka vajalik arvutustöö suureneb.

3.7 Dünaamilise stabiilsuse määramise kord

Eespool (p 3.2) nägime, et lihtsaima elektrisüsteemi dünaamilist stabiilsust saab määrata tingimusest, mis põhineb generaatori rootori kiirendus- ja pidurdus-energiate võrdlemisel. Nimetatud tingimusi on võimalik üldistada ka kahe ekvivalentse generaatoriga süsteemi kohta. Keerukatele süsteemidele, mis sisaldavad kolm või enam generaatorit, dünaamilise stabiilsuse kriteerium seni puudub[1]. Selliste süsteemide stabiilsust määratakse ainult generaatorite rootorite liikumise jälgimise teel – süsteem on stabiilne, kui rootoritevahelised nurgad jäävad piiratuks.

Võib tunduda, et mainitud viisil dünaamilist stabiilsust määrata on lihtne – tuleb vaid lahendada generaatorite liikumisvõrrandid. Tegelikult on olukord keerukam. Kõigepealt ei ole millegagi ette määratud, kui pikka ajavahemikku tuleb vaadelda. Keerukas süsteemis võivad generaatorid sünkronismist välja langeda hiljem, mitte tingimata rootorite esimesel võnkel. Piisavalt pika ajavahemiku käsitlemist takistavad peale suurte arvutustööde veel kuhjuvad vead, mida tehakse nurkade juurdekasvude arvutamisel igas ajaintervallis. Vigade allikaks on ka liikumisvõrrandite koostamisel tehtud lihtsustused. Kokku võttes on dünaamiline stabiilsus küll põhimõtteliselt määratav kõverate $\delta_i = \mathrm{f_i}(t)$ (i = 1,…, n) alusel, kuid õige järelduse tegemiseks peab olema praktilisi kogemusi.

Generaatorite liikumisvõrrandite lahendamise kord sõltub suurel määral kasutatavatest eeldustest. *Lihtsustatud arvutustel*, kus generaatorite mööduv elektromotoorjõud E_q' ja koormuste takistused z_K loetakse konstantseks, määratakse stabiilsus järgmiselt.

[1] Matemaatikast on teada nn Ljapunovi meetod diferentsiaalvõrrandi lahendite stabiilsuse määramiseks. Selle meetodi rakendamisvõimalusi elektrisüsteemi stabiilsuse määramisel uuritakse.

- Arvutatakse häiringueelne normaalseisund, millest leitakse iga ekvivalentse generaatori võimsus P_{0i}, mööduv elektromotoorjõud E'_{qi} ja rootori nurk δ_{0i} (i = 1,…, n).
- Koostatakse vastu- ja nulljärgnevusskeemid ja leitakse vastavad summaarsed takistused $z_{0\Sigma}$ ja $z_{2\Sigma}$ lühispunkti suhtes, kui häiringuks on mittesümmeetriline lühis.
- Arvutatakse oma- ja vastastikused takistused z_{ij} kõigi häiringu vältel esinevate skeemide kohta.
- Leitakse generaatorite elektrilised võimsused j-inda ajaintervalli alguses P_{ij} ning vastavad jääkvõimsused

$$\Delta P_{ij} = P_{0i} - P_{ij}$$

- Arvutatakse nurkade juurdekasvud vaadeldavas ajaintervallis ning leitakse nurkade uued väärtused

$$\Delta\delta_{ij} = \Delta\delta_{ij-1} + k_i \Delta P_{ij}$$

$$\delta_{ij} = \delta_{ij-1} + \Delta\delta_{ij}$$

Kahte viimasena mainitud tegevust jätkatakse seni, kuni võib teha järeldusi elektrisüsteemi stabiilsuse kohta. Skeemimuutuste (lühise väljalülitamine, taaslülitus jms) korral vahetatakse oma- ja vastastikuste takistuste väärtused. Seejuures määratakse vaadeldava ajaintervalli jääkvõimsus kummastki skeemist tuleneva jääkvõimsuse keskmisena (p 3.6). Pandagu tähele, et see reegel kehtib ka esimese ajaintervalli kohta. Arvestada tuleb, et eeldustest $E'_q = const$, $z_K = const$ tulenevad vead kuhjuvad niivõrd, et nurkade arvutamine enam kui generaatorite ühe võnke ulatuses muutub praktiliselt mõttetuks.

Dünaamilise stabiilsuse täpsustatud määramisel on eeltooduga võrreldes järgmised erinevused.

- Mööduvat elektromotoorjõudu ei loeta konstantseks, mille tõttu generaatorid on esindatud nn täielike diferentsiaalvõrranditega (p 4.3).
- Diferentsiaalvõrrandid (5...6 iga generaatori kohta) lahendatakse numbriliselt (ajaintervallide kaupa), kuid intervallide kestused on suurusjärgu võrra väiksemad, sest elektromagnetilised protsessid rootoris, mida nüüd samuti vaadeldakse, kulgevad tunduvalt kiiremini rootori mehaanilise liikumisega võrreldes. Diferentsiaalvõrrandite numbriliseks lahendamiseks rakendatakse täiuslikumaid meetodeid, näiteks Runge-Kutta meetodit.
- Arvestatakse AER-i mõju (eriti ergutuse forsseerimist).
- Arvestatakse turbiini momendi muutusi, sealhulgas kiiretoimelise AKR-i mõju.
- Süsteemi seisund (generaatorite elektrilised võimsused) iga ajaintervalli alguses arvutatakse üldmeetodil, lähtudes mittelineaarsetest võrguvõrranditest, sest koormuste takistusi z_K ei loeta konstantseks, millest tulenevalt pole

võimalik määrata oma- ja vastastikuseid takistusi ning seega ka punktis 3.4 tuletatud seoseid.

- Koormusi arvestatakse staatiliste või dünaamiliste karakteristikute kujul.

3.8 Koormuse dünaamiline stabiilsus

Koormus, täpsemalt pöörlevad masinad, võib häiringute korral, näiteks lühise puhul toitevõrgus, osutuda mittestabiilseks. Sünkroonmootorid hakkavad häiringu tõttu võnkuma ning tekib oht, et nad langevad sünkronismist välja, asünkroonmootorid võivad aga seiskuda. Vaatleme allpool lähemalt asünkroonmootorite stabiilsuse probleeme, sest sünkroonmootorite dünaamilist stabiilsust määratakse samal viisil kui generaatoritel.

Asünkroonmootori rootori liikumisvõrrandi tuletamisel lähtume sünkroonmasina võrrandist, mis on saadud Newtoni seadustest ja on seega üldkehtiv. Rootori kiirendus tuleb avaldada vaid libistuse kaudu, sest nurk δ ei ole asünkroonmasina juures määratud. Kuna

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

siis

$$\omega = \omega_0 - s\omega_0$$

ja

$$p\omega = \omega_0 ps$$

Võrrandi (3.3) alusel, arvestades ka momentide märki, saame järgmise tulemuse:

$$T_J ps = M_M - M \tag{3.4}$$

kus M_M on töömasina moment, M aga mootori elektriline moment, mille saime punktis 2.7 kujul

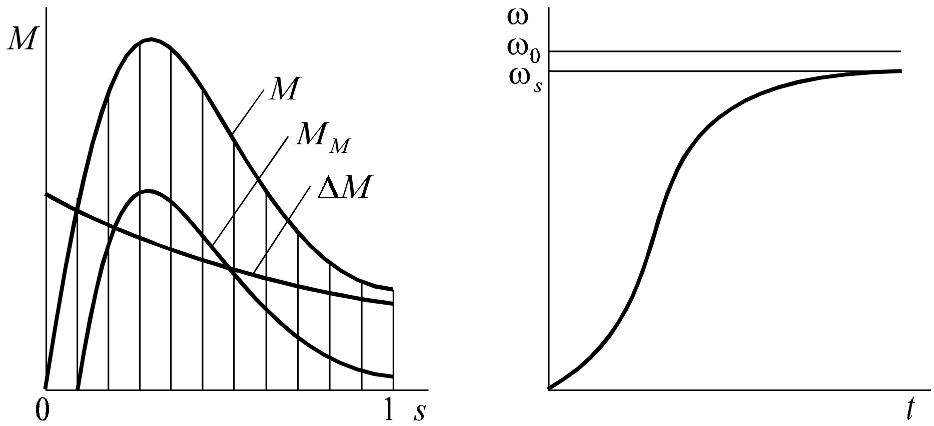
$$M = \frac{U^2 Rs}{R^2 + (xs)^2}$$

Seega on asünkroonmootori (rootori) liikumisvõrrand esimest järku mittelineaarne diferentsiaalvõrrand. Kuna esimest järku diferentsiaalvõrrandil ei saa olla perioodilisi lahendeid, siis kinnitab tulemus tuntud tõsiasja, et asünkroonmootorid ei võngu. Võrrandi (3.4) mittelineaarsuse tõttu võib seda lahendada vaid numbriliselt. Kuna võrrand on esimest järku, pruugib selles diferentsiaalid asendada lõplike juurdekasvudega ja leida nende väärtused intervallide kaupa. Võrrandi (3.4) järgi saame

$$T_J \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i} = -\Delta M_i \qquad (3.5)$$

kus Δt_i ja Δs_i – i-nda ajaintervalli kestus ja vastav libistuse juurdekasv,

$\Delta M_i = M_i - M_{mi}$ – elektrilise ja mehaanilise momendi vahe vaadeldavas ajaintervallis.



Joonis 3.15 Asünkroonmootori isekäivitusprotsess

Vaadelgem näiteks asünkroonmootori isekäivitusprotsessi arvutamist. Siin on otstarbekas jagada väikesteks intervallideks mitte aeg, vaid libistus (joonis 3.15). Lähtudes algseisust $s_0 = 1$ $(\omega = 0)$, leiame momentide keskmise vahe esimeses intervallis ΔM_1. Seejärel saame valemist (3.5) vastava aja juurdekasvu Δt_1 ning arvutame libistuse, aja ja kiiruse väärtused intervalli lõpus

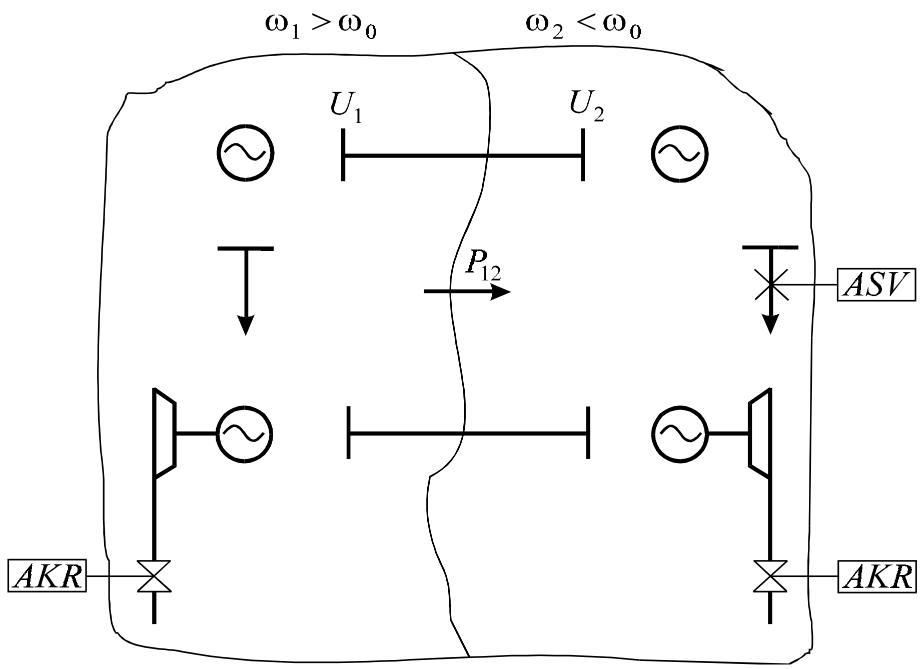
$$s_1 = 1 - \Delta s_1, \quad t_1 = \Delta t_1, \quad \omega_1 = \omega_0 (1 - s_1)$$

Arvutust kordame kõikide järgnevate intervallide kohta, kuni mootor saavutab töökiiruse ω_s.

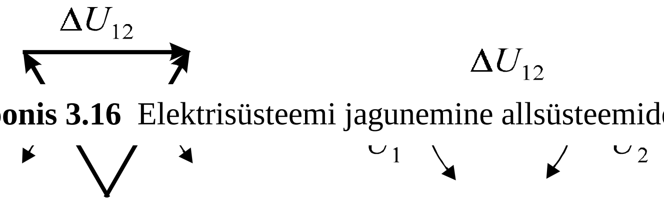
Asünkroonmootori isekäivitustingimustel on otsene seos koormuse stabiilsusega. Nimelt on siis, kui asünkroonmootorid on isekäivituvad, tagatud koormuse dünaamiline stabiilsus. Tõepoolest, häiringu (näiteks lühise) korral pinge toitevõrgus langeb ja mootorid pidurduvad. Pinge taastumisel on olukord halvim siis, kui kõik mootorid on vahepeal seiskunud, olles seega käivitusolukorras. Kui mootorid sellistes tingimustes käivituvad, siis on kindel, et nende talitlus taastub ka kergemate häiringute korral. Enamasti on isekäivitustingimused rahuldatud vaid siis, kui ühel ajal lülitatakse sisse piiratud arv mootoreid. Elektrisüsteemi koormussõlme kuuluvate kõigi mootorite käivitamisel ei pruugi see nii olla. Seetõttu on koormuse dünaamilise stabiilsuse kontroll vajalik.

3.9 Resulteeruva stabiilsuse mõiste

Elektrisüsteemi generaatorite sünkroonse töö lakkamist võib vähemalt avarii algperioodil ette kujutada nii, et süsteem on jagunenud kaheks erineva sagedusega pöörlevaks osaks (allsüsteemiks). Kui võimsuse ülekanne enne avariid toimus esimesest allsüsteemist teise (joonis 3.16), siis asünkroontalitluses, kus võimsuse ülekanne praktiliselt puudub, on esimeses allsüsteemis genereeriva võimsuse ülekaal ja teises defitsiit. Sagedus esimeses süsteemiosas tõuseb ja teises langeb. Sageduse muutusele reageerivad mõne aja pärast (mõni sekund) turbiinide kiirusregulaatorid, mis püüavad võimsust kummaski allsüsteemis tasakaalustada. Kindlasti õnnestub see esimeses allsüsteemis, teises võib aga tekkida tarvidus koormuse sagedusjärgseks väljalülitamiseks (ASV), kui seal generaatorite suurim võimsus osutub koormusest väiksemaks. Kui võimsuste tasakaal on saavutatud, taastub ka sagedus ja asünkroonselt pöörelnud süsteemiosad tõmbuvad taas sünkronismi. Sellist sünkronismi taastumist nimetatakse elektrisüsteemi **resulteeruvaks stabiilsuseks**. Selle kõrval nimetatakse vaadeldud “tavalist” dünaamilist stabiilsust ka **sünkroonseks stabiilsuseks**.



Resulteeruva stabiilsuse tagamist võib takistada üks seik – *asünkroonse talitluse lubatavus*. Nimelt, kui vaadelda mõnda liini või muud süsteemi elementi, mis ühendab erineva sagedusega töötavaid allsüsteeme, siis pöörlevad ka vastavad pingevektorid erineva kiirusega ja nendevaheline nurk muutub pidevalt (joonis 3.17). Tekib pulseeriv vool, mille suurim väärtus on võrreldav kolmefaasilise lühise vooluga. Niivõrd suur vool võib kahjustada süsteemi seadmeid (generaatorid, trafod) ja, mis eriti oluline, kujutab tugevat häiringut seni veel sünkroonselt töötavatele allsüsteemidele. Teisisõnu, asünkroonne talitlus võib põhjustada avarii laienemise kuni süsteemi täieliku kustumiseni välja, mis on eriti raske elektrisüsteemi avarii. Kokku võttes võib tõdeda, et elektrisüsteemi resulteeruva stabiilsuse tagamine on igati soovitav, kui vaid vahepealne asünkroonne talitlus on lubatud.



Joonis 3.16 Elektrisüsteemi jagunemine allsüsteemideks

Joonis 3.17 Liini pingelangu muutumine asünkroontalitluses