

2 STAATILINE STABIILSUS LIHTSUSTATUD KÄSITLUSES

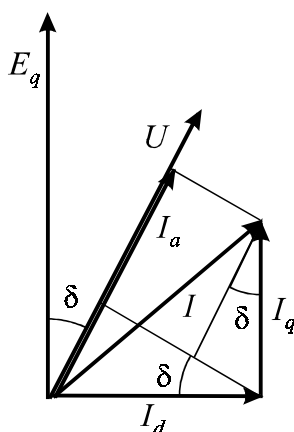
Siirdeprotsesse kirjeldatakse matemaatiliselt diferentsiaalvõrrandite abil. Käesolevas peatükis vaadeldakse staatilist stabiilsust aga lihtsustatult, lähtudes elektrisüsteemi püsitalitlusele vastavatest algebralistest võrranditest. Hiljem (peatükk 4) diferentsiaalvõrrandeid kasutades võib veenduda, et lihtsustatud käsitlesega saadud tulemused on küll piiratud, kuid mitte valed. Lihtsustatud käsitlese eeliseks on nähtuste hõlpsam füüsikaline tõlgendatavus.

2.1 Väljepoolustega sünkroonmasina nurkkarakteristik

Sünkroonmasina elektromagnetiline võimsus, s.o võimsus, mis sisaldab ka kadusid, on

$$P_e = P + rI^2 = UI_a + rI^2$$

kus P – võimsus masina klemmidel,
 I_a – voolu aktiivkomponent.



Joonis 2.1 Väljavõtte sünkroonmasina vektordiagrammist

Vektordiagrammist (joonis 2.1) saab

$$I_a = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta$$

Seega

$$P_e = U(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta) + r(I_d^2 + I_q^2) \quad (2.1)$$

Korrutades põhivõrrandid (1.6) vastavalt suurustega I_d ja I_q ning liites tulemused, saame

$$UI_d \sin \delta = x_q I_d I_q - r I_d^2$$

$$UI_q \cos \delta = E_Q I_q - x_q I_d I_q - r I_q^2$$

$$U(I_d \sin \delta + I_q \cos \delta) + r(I_d^2 + I_q^2) = E_Q I_q$$

Järelikult

$$\boxed{P_e = E_Q I_q} \quad (2.2)$$

Tulemus on üllatavalt kompaktne, kui panna tähele, et see arvestab ka aktiivtakistust r . Veelgi enam, võib näidata, et sama seos kehtib ka siirdeprotsesside ajal. Sünkroonmasina nurkkarakteristikut sellest seosest siiski ei saa, sest koos nurga δ muutumisega muutub ka elektromotoorjõud E_Q .

Kasutame seost (2.2) hiljem.

Pöördume tagasi seose (2.1) juurde ning võtame lihtsustatult $r = 0$. Põhivõrranditest (1.5) saame siis

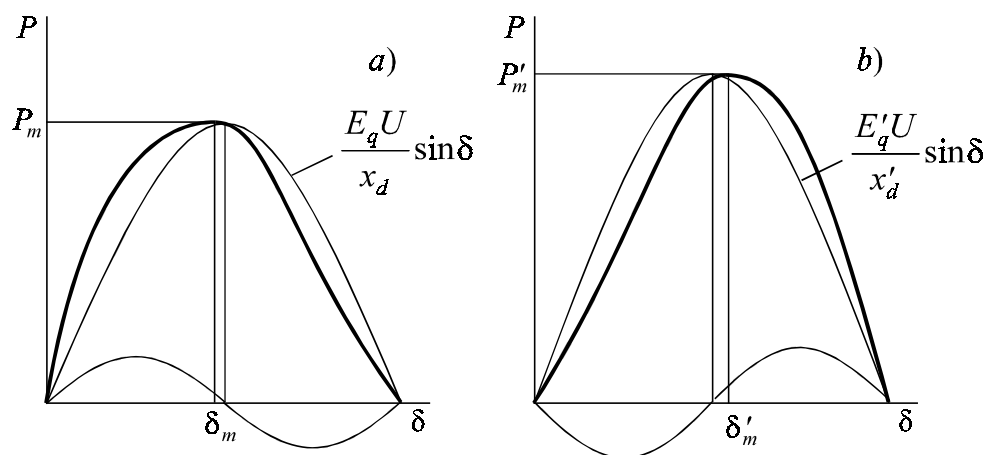
$$I_q = \frac{U \sin \delta}{x_q}, \quad I_d = \frac{E_q - U \cos \delta}{x_d}$$

mis asetatuna seosesse (2.1) annab peale teisendusi

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} U^2 \sin 2\delta \quad (2.3)$$

ning sümmeetriaprintsiipi ($E_q \Leftrightarrow E'_q, x_d \Leftrightarrow x'_d$) ära kasutades ka

$$P = \frac{E'_q U}{x'_d} \sin \delta + \frac{x'_d - x_q}{2x'_d x_q} U^2 \sin 2\delta \quad (2.4)$$



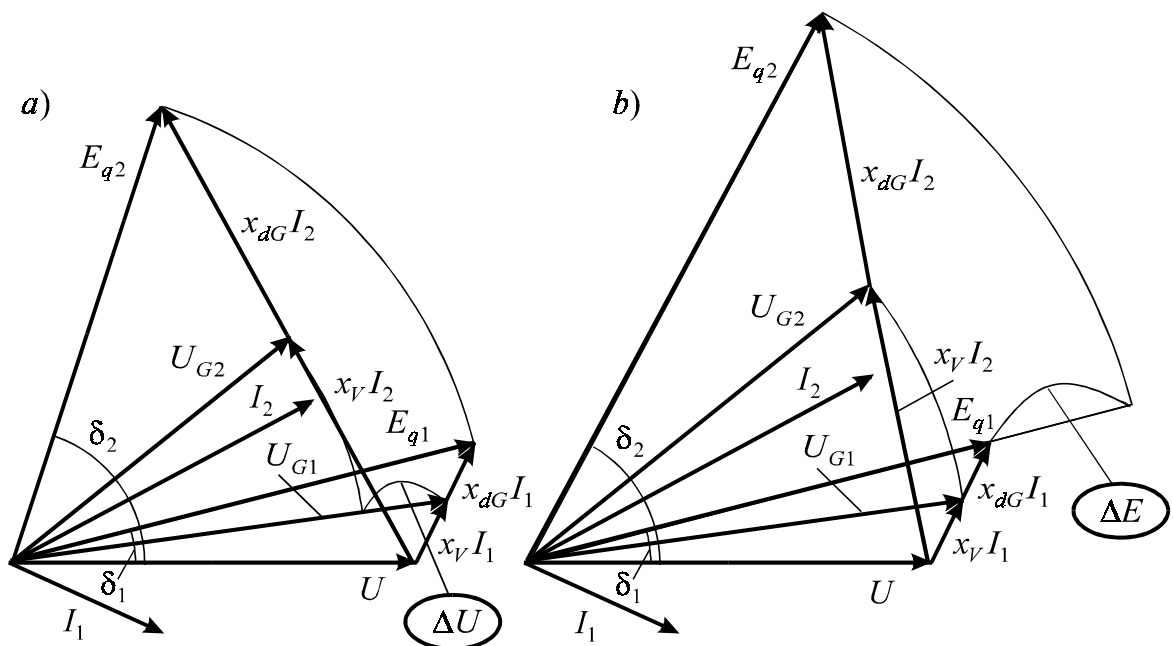
Joonis 2.2 Sünkroonmasina nurkkarakteristik tingimusel, et $E_q = \text{const}$ (a) ja $E'_q = \text{const}$ (b)

Nurkkarakteristikud joonisel 2.2 on saadud avaldiste (2.3) ja (2.4) kahe komponendi summana. Siinjuures tuleb arvestada, et turbogeneraatoritele $x_d = x_q > x'_d$ ja seega $E_q = \text{const}$ korral on karakteristiku teine komponent null, $E'_q = \text{const}$ puhul aga on teise komponendi amplituud negatiivne. Hüdrogeneraatoritel, kus $x_d > x_q \approx x'_q$, puudub karakteristiku teine komponent siis, kui $E'_q = \text{const}$. Veel on kasulik silmas pidada, et kuigi $E'_q < E_q$, on

$E'_q = \text{const}$ puhul $x'_d < x_d$ tõttu nurkkarakteristiku amplituud tundub suurem kui $E_q = \text{const}$ puhul. Näeme ka, et nurkkarakteristikute teine komponent, kui see erineb nullist, mõjub küll karakteristiku amplituudi nurgale (δ_m, δ'_m), kuid muudab vähe amplituudi (P_m, P'_m) ennast. Siit saab teha ühe olulise järelduse – *maksimaalvõimsuse ligikaudsel määramisel võib arvestamata jätta generaatori rootori mittesümmeetria ja seega kasutada aseskeeme (c) ja (d) jooniselt 1.15 sõltumata sünkroonmasina tüübist.*

2.2 Nurkkarakteristik generaatori konstantse klemmipinge puhul

Generaatori võimsuse suurenemisel kasvab pingelang ja alaneb klemmipinge. Selle säilitamiseks on vaja tõsta elektromotoorjõudu ergutusvoolu reguleerimise (tõstmise) teel (joonis 2.3).



Joonis 2.3 Generaatori elektromotoorjõu ja klemmipinge muutumine AER-i puudumisel (a) ja olemasolul (b)

Nurkkarakteristiku tuletamiseks tingimusel, et $U_G = \text{const}$, lähtume seosest (2.2), s.o

$$P_e = E_Q I_q$$

Selleks et elimineerida siin suurused E_Q ja I_q , kirjutame välja põhivõrrandid (1.6) kahel kujul, võttes $r = 0$

$$U \sin \delta = I_q x_q$$

$$U \cos \delta = E_Q - I_d x_q$$

ja

$$U_G \sin \delta_G = I_q x_{qG}$$

$$U_G \cos \delta_G = E_Q - I_d x_{qG}$$

$$U_G^2 = I_q^2 x_{qG}^2 + (E_Q - I_d x_{qG})^2$$

Asendades tulemusse voolukomponendid I_d ja I_q võrrandite esimesest kujust, saame

$$U_G^2 = \frac{U^2 \sin^2 \delta}{x_q^2} x_{qG}^2 + \left(E_Q + \frac{U \cos \delta - E_Q}{x_q} \right)^2$$

Kui tähistame lühiduse mõttes

$$h_q = \frac{x_{qG}}{x_q} = \frac{x_{qG}}{x_{qG} + x_V}$$

ja leiame elektromotoorjõu

$$E_Q = \frac{-h_q U \cos \delta + \sqrt{U_G^2 - h_q^2 U^2 \sin^2 \delta}}{1 - h_q}$$

siis saame

$$P = \frac{-h_q U \cos \delta + \sqrt{U_G^2 - h_q^2 U^2 \sin^2 \delta}}{1 - h_q} \times \frac{U \sin \delta}{x_q} \quad (2.5)$$

Veel võime leida seose elektromotoorjõu E_q ja nurga δ vahel, mis näitab, kuidas peab muutma elektromotoorjõudu E_q selleks, et säilitada konstantne klemmipinge. Kuna

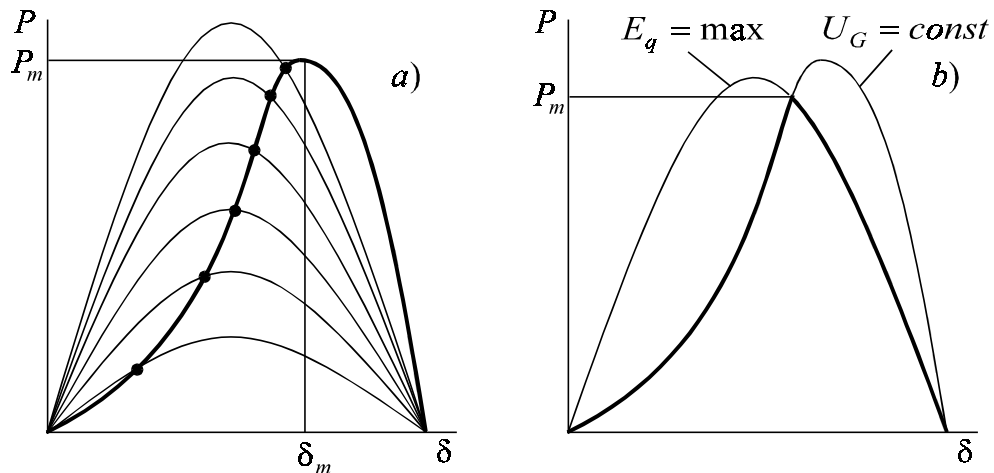
$$E_q = E_Q - (x_d - x_q) I_d$$

siis

$$E_q = \frac{-h_d U \cos \delta + \sqrt{U_G^2 - h_q^2 U^2 \sin^2 \delta}}{1 - h_d}$$

kus

$$h_d = \frac{x_{dG}}{x_d} = \frac{x_{dG}}{x_{dG} + x_V}$$



Joonis 2.4 Väline nurkkarakteristik mittepiiratud (a) ja piiratud (b) elektromotoorjõu korral

Nurkkarakteristikut konstantse klemmipinge korral nimetatakse ka *väliseks nurkkarakteristikuks*, konstantse elektromotoorjõu (E_q või E'_q) korral aga *ideaalseks nurkkarakteristikuks*. Välise nurkkarakteristiku võib graafiliselt moodustada punktide kaupa avaldise (2.3) alusel. Kvalitatiivselt võib välise karakteristiku konstrueerida ka ideaalsete nurkkarakteristikute järgi, võttes arvesse, et nurga suurenemisel tõuseb elektromotoorjõud E_q ja ka ideaalse karakteristiku amplituud (joonis 2.4 a). Välise nurkkarakteristiku amplituud vastab nurgale $\delta_G = 90^\circ$ ja seega $\delta > 90^\circ$. Joonisel 2.4 b on esitatud nurkkarakteristik juhul, kui saavutatakse ergutuse lagi.

2.3 AER-i mõju staatilisele stabiilsusele

Punktis 1.2 toodud definitsiooni kohaselt määrab süsteemi stabiilsuse tema käitumine talitluse väikeste häiringute korral. Kui klemmipinge on konstantne, tuleb arvestada ka ergutusregulaatori reageerimist väikestele häiringutele. Selle tunnuse järgi võib regulaatorid jaotada kolme liiki:

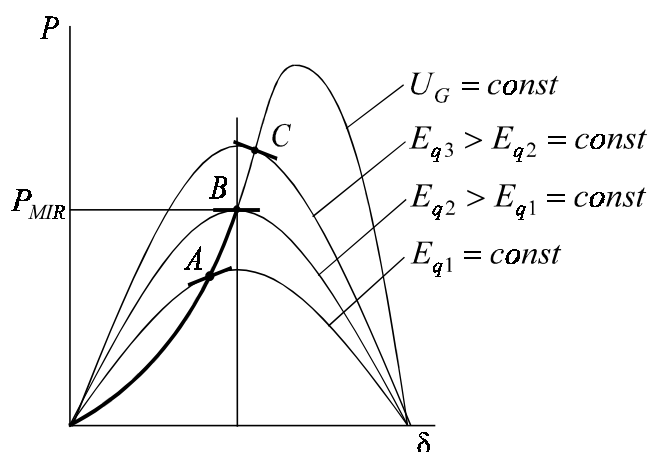
- inertsiaalregulaatorid
- proportsionaal- (nõrgatoimelised) regulaatorid
- tugevatoimelised regulaatorid

Inertsiaalregulaatoreid iseloomustab mittetundlikkuse tsoon. Tehniliselt on need regulaatorid elektromehaanilise konstruktsiooniga. Siia kuulub ka käsitsi reguleerimine. Väikestele häiringutele sellised regulaatorid ei reageeri, s.o häiringu ajal $E_q = \text{const}$.

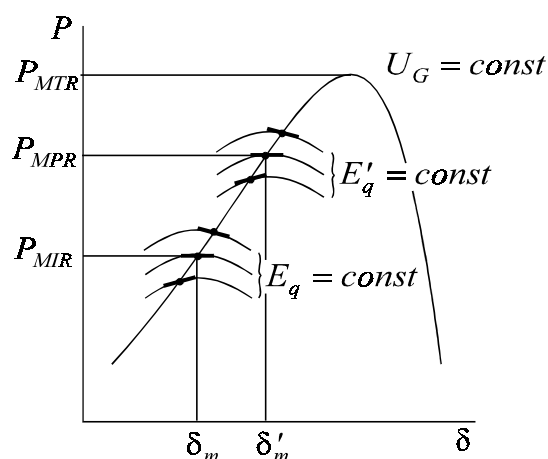
Proportsionaalregulaatorid reageerivad pinge ja voolu kõrvalekaldele sättesuurusel. Väikeste häiringute korral säilitavad sellised regulaatorid rootori aheldusvoo väärtuse, s.o $E'_q = \text{const}$.

Tugevatoimelised regulaatorid reageerivad peale pinge ja voolu (mõnel juhul ka nurga δ) kõrvalekallete veel nende suuruste esimesele ja teisele tuletisele ja säilitavad generaatori klemmpinge ka väikeste häiringute ajal. (Seda ja eespool toodud väidet proportsionaalregulaatori reageerimise kohta väikestele häiringutele vaadeldakse lähemalt 4. peatükis.)

Vaatame, mis toimub lihtsaimas elektrisüsteemis talitluse väikeste häiringute korral. Eeldagem esmalt, et AER on inertsiaalne tüüpi. Oletagem, et seisund vastab tööpunktile A (joonis 2.5). Kuna häiringu ajal $E_q = E_{q1} = \text{const}$, siis määrab elektrisüsteemi reageerimise ja ka stabiilsuse ideaalne nurkkarakteristik, mille kohaselt (kriteerium (1.3)) tööpunkt A on stabiilne. Analoogiliselt jõuame järelduseni, et tööpunkt C on mittestabiilne (siin $E_q = E_{q3} = \text{const}$) ja et piirjuhtumiks on tööpunkt B (kus $E_q = E_{q2} = \text{const}$) ning sellele vastav suurim võimsus P_{MIR} . Samal viisil, lähtudes nurkkarakteristikutest $E'_q = \text{const}$, võib leida stabiilsuse piiri P_{MPR} proportsionaalregulaatori korral. Tugevatoimelise regulaatori puhul ühtib maksimaalvõimsus P_{MTR} ilmselt välise nurkkarakteristiku amplituudiga, sest häiringu ajal säilib pinge generaatori klemmidel ja ka üks ja sama nurkkarakteristik.



Joonis 2.5 Staatile stabiilsuse piir inertsiaalregulaatori korral



Joonis 2.6 Staatile stabiilsuse piir inertsiaalregulaatori (P_{MIR}), proportsionaalregulaatori (P_{MPR}) ja tugevatoimelise regulaatori (P_{MTR}) korral

Arutelu tulemust illustreerib joonis 2.6. Pandagu tähele, et ideaalsete nurkkarakteristikute amplituudile vastav nurk δ_m või δ'_m , mis stabiilsuse seisukohast on kriitiline nurk, oleneb küll generaatori tüübist (p 2.1), kuid $E_q = \text{const}$ korral on alati väiksem kui $E'_q = \text{const}$ puhul (turbogeneraatoritele

$\delta_m = 90^\circ$ ja $\delta'_m > 90^\circ$, hüdrogeneraatoritele $\delta_m < 90^\circ$ ja $\delta'_m = 90^\circ$) ning seega ka $P_{MTR} > P_{MPR} > P_{MIR}$.

Ülaltoodud arutluste tulemused on kokku võetud tabelis 2.1. Pandagu tähele, et kõik regulaatorid tagavad generaatori konstantse klemmipinge talitluse aeglase muutuste korral. Seega asuvad ka kõik võimalikud tööpunktid väliskarakteristikul. Väikese häiringu ajal kehtiv nurkkarakteristik sõltub aga regulaatori tüübist ja lähteseisundist, kuid häiringu piiratuse tõttu tööpunkti asukoht säilib.

Tabel 2.1

AER-i reageerimine talitluse muutustele ja häiringutele

Regulaatori tüüp	Talitluse muutused	Väikesed häiringud	Stabiilsuse kriteerium
Inertsiaalregulaator Proportsionaalregulaator Tugevatoimeline regulaator	$U_G = const$	$E_q = const$ $E'_q = const$ $U_G = const$	$\frac{dP}{d\delta} > 0$ $\left \begin{array}{l} E_q = const \\ E'_q = const \\ U_G = const \end{array} \right.$

Tuletagem maksimaalvõimsuste väärtused ka kvantitatiivselt. Kõige lihtsam on seda teha tugevatoimelise regulaatori korral. Kuna pinged U ja U_G on konstantsed, siis

$$P_{MTR} = \frac{UU_G}{x_V} \quad (2.6)$$

Inertsiaalregulaatori puhul vaatleme esmalt juhtumit, kui tegemist on turbogeneraatoriga. Kuna siis

$$x_d = x_q, \quad h_d = h_q = h, \quad \delta_m = 90^\circ$$

saame avaldisest (2.5)

$$P_{MIR} = \frac{U\sqrt{U_G - h^2U^2}}{(1-h)x_d}$$

Et

$$(1-h)x_d = \left(1 - \frac{x_{dG}}{x_{dG} + x_V}\right)(x_{dG} + x_V) = x_V$$

siis

$$P_{MIR} = \frac{U_G U}{x_V} \sqrt{1 - \frac{h^2}{v^2}} = P_{MTR} \sqrt{1 - \frac{h^2}{v^2}}$$

kus $v = U_G / U$. Kuna $U_G \approx U$, saame

$$\boxed{P_{MPR} = P \approx P_{MTR} \sqrt{1 - h^2}} \quad (2.7)$$

Kui tegemist on hüdrogeneraatoriga ($x_d > x_q$), siis tuleb esmalt leida kriitiline nurk δ_m , lahendades võrrandi

$$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{E_q=c} = 0$$

ehk vastavalt (2.3)

$$\frac{E_q U}{x_d} \cos \delta + \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} U^2 \cos 2\delta = 0$$

Võrrandi lahendi δ_m võib leida numbriliselt. Asetades tulemuse avaldisse (2.5), saamegi otsitava maksimaalvõimsuse P_{MTR} . Ligikaudu, kui võtta $h = h_d$, kehtib ka siin valem (2.7).

Proportsionaalregulaatori korral, kus aluseks on karakteristikud $E'_q = \text{const}$, on avaldised sümmeetriaprintsiibi ($E_q \Leftrightarrow E'_q, x_d \Leftrightarrow x'_d$) tõttu sarnased ülaltoodutega, ainult et hüdrogeneraatori võib nüüd lugeda sümmeetriliseks ($x_q \approx x'_d$). Seega

$$\boxed{P_{MPR} = P_{MTR} \sqrt{\frac{1 - h'}{v^2}} \approx P_{MTR} \sqrt{1 - h'^2}} \quad (2.8)$$

kus

$$h' = \frac{x'_{dG}}{x'_d} = \frac{x'_{dG}}{x'_{dG} + x_v}$$

Turbogeneraatori korral ($x_d > x'_d$) tuleb lahendada võrrand

$$\left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{E'_q=c} = 0$$

ehk (2.4) järgi

$$\frac{E'_q U}{x'_d} \cos \delta + \frac{x'_d - x_q}{x'_d x_q} U^2 \cos 2\delta = 0$$

mis annab kriitilise nurga δ'_m ning viimane asetatuna avaldisse (2.5) otsitava maksimaalvõimsuse. Ligikaudu kehtib siin ka valem (2.8).

Lõpuks olgu märgitud, et keskmistes tingimustes (keskmise pikkusega liinide korral) saaksime generaatori nimivõimsuse P_{NG} suhtes

$$P_{MIR} \approx P_{NG}, \quad P_{MPR} > P_{NG}, \quad P_{MTR} > P_{NG}$$

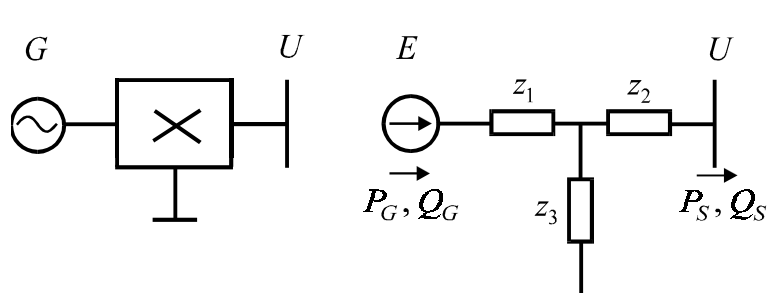
Arvestades aga vajalikku 10–20% stabiilsuse varu, siis

$$P_{MIR} < P_{NG}, \quad P_{MPR} \approx P_{NG}, \quad P_{MTR} > P_{NG}$$

Seega tuleb keskmistes tingimustes generaatorid varustada proportsionaal-regulaatoritega.

2.4 Nurkkarakteristik keeruka sideme korral

Keeruka sideme ekvivalentse generaatori ja konstantse pingega lattide vahel lihtsaimas elektrisüsteemis moodustavad sellised elemendid, mis aseseemis on asendatavad konstantse takistusega. Teatavasti on selline aseseem teisendatav Π - või T-kujuliseks (joonis 2.7).



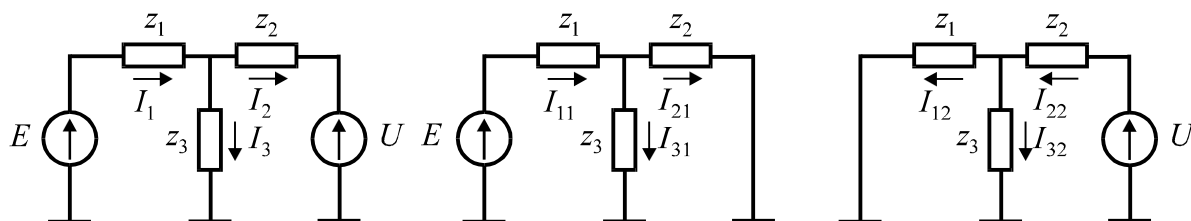
Nurkkarakteristiku tuletamiseks tingimusel, et $E = \text{const}$, rakendame superpositsiooniprintsiipi (joonis 2.8). Siin

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

$$\underline{I}_2 = -\underline{I}_{22} + \underline{I}_{21}$$

Joonis 2.7 Lihtsaime elektrisüsteemi põhimõtte- ja aseseem keeruka sideme korral

$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{E}}{\underline{z}_{11}}, \quad \underline{I}_{21} = \frac{\underline{E}}{\underline{z}_{21}}, \quad \underline{I}_{22} = \frac{\underline{U}}{\underline{z}_{22}}, \quad \underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}}{\underline{z}_{12}}$$



Joonis 2.8 Voolu I_1 , I_2 ja I_3 superpositsioon

Olgu märgitud, et takistusi z_{11} ja z_{22} ning z_{12} ja z_{21} nimetatakse vastavalt oma- ja vastastikusteks takistusteks. Lähemalt tuleb nende takistuste määramisest juttu järgmises peatükis. Siin ilmselt

$$\underline{z}_{11} = \underline{z}_1 + \frac{\underline{z}_2 \underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3}, \quad \underline{z}_{22} = \underline{z}_2 + \frac{\underline{z}_1 \underline{z}_3}{\underline{z}_1 + \underline{z}_3}, \quad \underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 + \frac{\underline{z}_1 \underline{z}_2}{\underline{z}_3}$$

Niisiis

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{z}_{11}} - \frac{\underline{U}}{\underline{z}_{12}}, \quad \underline{I}_2 = -\frac{\underline{U}}{\underline{z}_{22}} + \frac{\underline{E}}{\underline{z}_{21}}$$

$$S_G = P_G + jQ_G = \underline{E} \underline{I}_1^* = \underline{E} \left(\frac{\underline{E}^*}{\underline{z}_{11}^*} - \frac{\underline{U}^*}{\underline{z}_{12}^*} \right) = \frac{\underline{E} \underline{E}^*}{\underline{z}_{11}^*} - \frac{\underline{E} \underline{U}^*}{\underline{z}_{12}^*}$$

$$S_S = P_S + jQ_S = \underline{U} \underline{I}_2^* = \underline{U} \left(-\frac{\underline{U}^*}{\underline{z}_{22}^*} + \frac{\underline{E}^*}{\underline{z}_{21}^*} \right) = -\frac{\underline{U} \underline{U}^*}{\underline{z}_{22}^*} + \frac{\underline{U} \underline{E}^*}{\underline{z}_{21}^*}$$

Kui pingvektor asetada reaalteljele ja eraldada takistuste reaali- ja imaginaar-
osad

$$\underline{U} = U, \quad \underline{E} = E \angle \delta, \quad \underline{z}_{ij} = z_{ij} \angle \psi_{ij}, \quad \psi_{ij} = \arctg \frac{x_{ij}}{r_{ij}}$$

saame

$$P_G + jQ_G = \frac{E^2}{z_{11} \angle -\psi_{11}} - \frac{E \angle \delta U}{z_{12} \angle -\psi_{12}} = \frac{E^2}{z_{11}} \angle \psi_{11} - \frac{EU}{z_{12}} \angle (\delta + \psi_{12})$$

$$P_S + jQ_S = -\frac{U^2}{z_{22} \angle -\psi_{22}} + \frac{E \angle -\delta U}{z_{12} \angle -\psi_{12}} = -\frac{U^2}{z_{22}} \angle \psi_{22} + \frac{EU}{z_{12}} \angle (-\delta + \psi_{12})$$

millest omakorda

$$P_G + jQ_G = \frac{E^2}{z_{11}} [\cos \psi_{11} + j \sin \psi_{11}] - \frac{EU}{z_{12}} [\cos(\delta + \psi_{12}) + j \sin(\delta + \psi_{12})]$$

$$P_S + jQ_S = -\frac{U^2}{z_{22}} [\cos \psi_{22} + j \sin \psi_{22}] + \frac{EU}{z_{12}} [\cos(-\delta + \psi_{12}) + j \sin(-\delta + \psi_{12})]$$

$$P_G = \frac{E^2}{z_{11}} \cos \psi_{11} - \frac{EU}{z_{12}} \cos(\delta + \psi_{12})$$

$$P_S = -\frac{U^2}{z_{22}} \cos \psi_{22} + \frac{EU}{z_{12}} \cos(-\delta + \psi_{12})$$

$$Q_G = \frac{E^2}{z_{11}} \sin \psi_{11} - \frac{EU}{z_{12}} \sin(\delta + \psi_{12})$$

$$Q_S = -\frac{U^2}{z_{22}} \sin \psi_{22} + \frac{EU}{z_{12}} \sin(-\delta + \psi_{12})$$

Asendades takistuste nurgad ψ vastavate täiendusnurkadega $\alpha = 90^\circ - \psi$, saame

$$P_G = \frac{E^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{EU}{z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}) \quad (2.9)$$

$$P_S = -\frac{U^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{EU}{z_{12}} \sin(\delta + \alpha_{12})$$

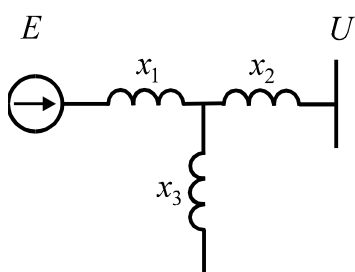
$$Q_G = \frac{E^2}{z_{11}} \cos \alpha_{11} - \frac{EU}{z_{12}} \cos(\delta - \alpha_{12})$$

$$Q_S = -\frac{U^2}{z_{22}} \cos \alpha_{22} + \frac{EU}{z_{12}} \cos(\delta + \alpha_{12})$$

2.5 Skeemiparameetrite mõju nurkkarakteristikule

Vaatleme nurkkarakteristikute kuju kolmel keeruka sideme erijuhtumil. Paneme tähele, et eelmises punktis saadud tulemuste kohaselt on $E = \text{const}$ korral nurkkarakteristik alati sinusoid, mis aga võib olla nihutatud koordinaatide alguspunkti suhtes.

2.5.1 Keerukas induktiivside on esitatud joonisel 2.9. Sellele vastavad avaldised on järgmised:



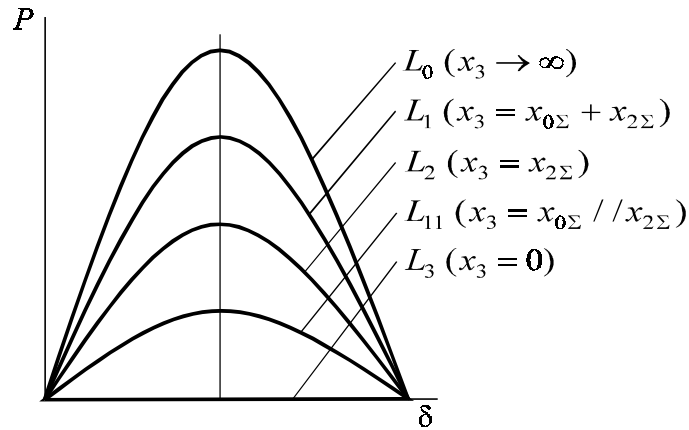
Joonis 2.9 Keerukas induktiivside

$$P_G = P_S = \frac{EU}{x_{12}} \sin \delta, \quad x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_3}$$

$$P_m = \frac{EU}{x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_{12}}}$$

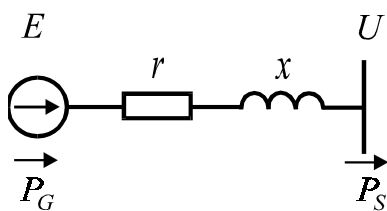
Vaadeldav aseskeem tekib näiteks lühise ajal. Nurkkarakteristikutelt (joonis 2.10) näeme, et lühise ajal (s.o läbi lühisepunkti) ülekantava võimsuse

maksimum on piiratud, kuid mittersümmeetriliste lühiste korral ei ole see null. Püsilühise esinemise tõenäosus on siiski väike. Siin kasutame saadud tulemused ära dünaamilise stabiilsuse uurimisel.



Joonis 2.10 Nurkkarakteristiku sõltuvus lühise liigist

2.5.2 Side, mis sisaldab pikiaktiivtakistust (joonis 2.11), esineb loomulikult siis, kui arvestame aktiivtakistuse olemasolu. Siin



Joonis 2.11 Side pikiaktiivtakistusega

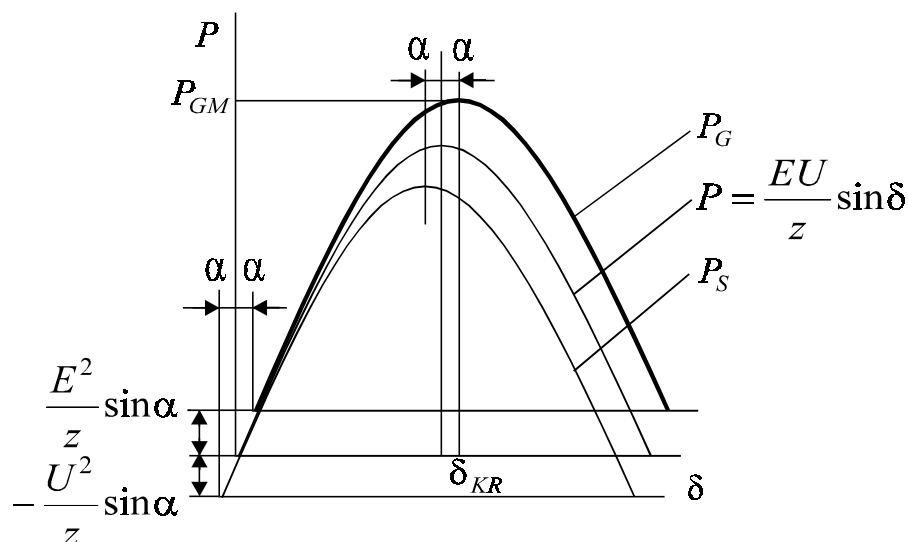
$$z_{11} = z_{22} = z_{12} = z$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{12} = \alpha$$

$$P_G = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta - \alpha)$$

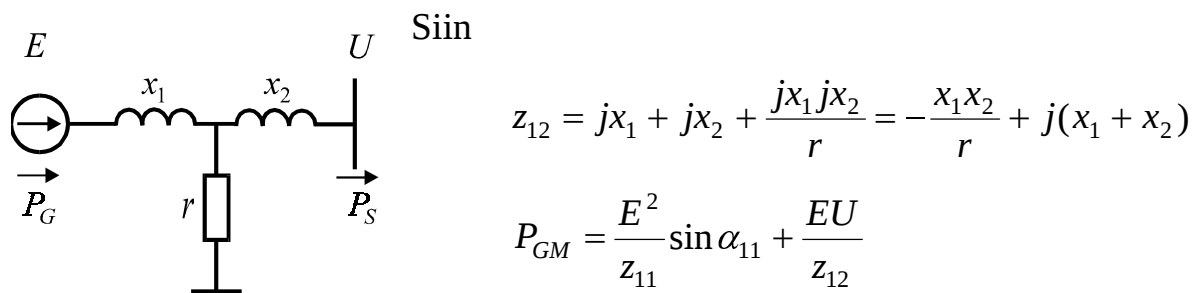
$$P_G = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z} \sin(\delta - \alpha)$$

$$P_{GM} = \frac{E^2}{z} \sin \alpha + \frac{EU}{z}$$



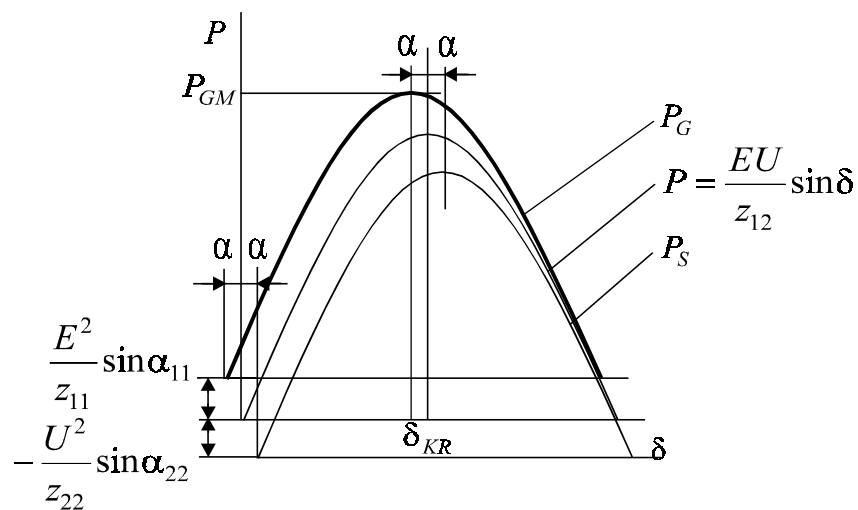
Dünaamilise stabiilsuse vaatlemisel tuleb selline aseskeem ette nn dünaamilisel pidurdamisel. Joonisel 2.12 esitatud kõverate alusel järeldame, et pikiaktiivtakistus nihutab nurkkarakteristiku $P_G = f(\delta)$ üles ja paremale suuremate nurkade suunas. Arvestades, et süsteemi stabiilsuse määrab nimelt see karakteristik, võime tõdeda, et *aktiivtakistuse mittearvestamine tekitab vea lubatud suunas*, kuna sel juhul on tegelik stabiilsusvaru suurem kui arvutuslik.

2.5.3 Side, mis sisaldab põikaktiivtakistust (joonis 2.13) tekib, kui generaatori klemmidele on ühendatud kohalik (konstantse takistusega) aktiivkoormus. Ka generaatori dünaamiline pidurdamine võib olla teostatud selle skeemi järgi.



Joonis 2.13 Side põikaktiivtakistusega

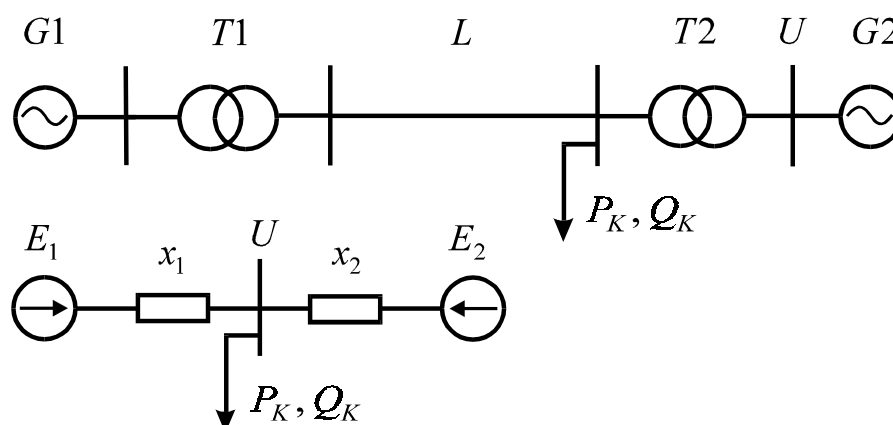
Vaadeldavas lülituses põhjustab aktiivtakistus samuti nurkkarakteristiku $P_G = f(\delta)$ ja seega ka suurima võimsuse tõusu. Nüüd nihkub nurkkarakteristik aga vasakule (joonis 2.14) väiksemate nurkade suunas, mis on oluline generaatori dünaamilisel pidurdamisel.



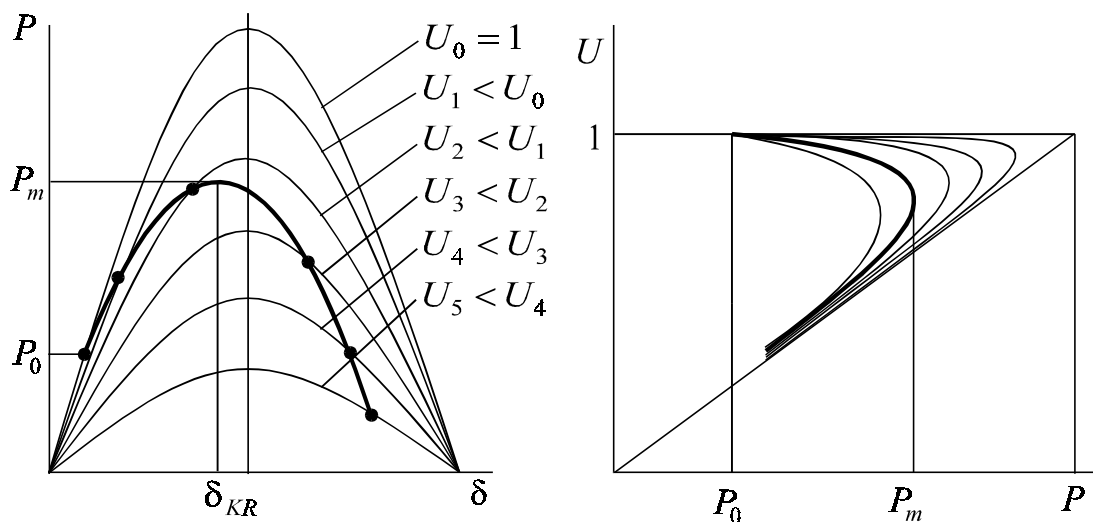
Joonis 2.14 Nurkkarakteristik põikaktiivtakistuse korral

2.6 Tarbijate mõju elektrisüsteemi stabiilsusele

2.6.1 Tegelik nurkkarakteristik. Vaatleme elektrisüsteemi, mis sisaldab kahte lõpliku võimsusega ekvivalentset generaatorit ning ühe sõlme suvalise iseloomuga (mitte tingimata konstantse takistusega) koormusega (joonis 2.15). Vaatleme, milliseks kujuneb nurkkarakteristik $P_1 = f(\delta_1)$ tingimusel, et elektromotoorjõud E_1 ja E_2 on konstantsed. Kuna koormuslattice pinge U ei ole siin enam konstantne, vaid väheneb koos ülekantava võimsuse (voolu) suurenemisega, siis saab **tegelikku nurkkarakteristiku** joonisel 2.16 näidatud kujul. Ilmselt on ülekantava võimsuse P_1 maksimum seda madalam, mida enam langeb pinge U võimsuse P_1 kasvamisel. Seda illustreerib ilmekalt sõltuvus $U = f(P_1)$, mis on toodud joonisel 2.16.



Joonis 2.15 Kahte lõpliku võimsusega generaatorit sisaldava elektrisüsteemi põhimõtte- ja aseskeem



Joonis 2.16 Tegelik nurkkarakteristik ja sõltuvus $U = f(P)$

Pingekadu ΔU , mis teatavasti on arvutatav valemiga

$$\Delta U = \frac{rP + xQ}{U}$$

sõltub muuhulgas tarbijate iseloomust. Kui eeldada, et pinge langemisel tarbija reaktiivvõimsus järsult langeb, siis jääb piiratuks nii ülekantav reaktiivvõimsus kui ka pingekadu, seda enam, et reaktiivtakistus x on tavaliselt tunduvalt suurem aktiivtakistusest r . Niisiis, mida suuremad on suhted

$$\frac{\Delta Q}{\Delta U} \Rightarrow \frac{dQ}{dU}, \quad \frac{\Delta P}{\Delta U} \Rightarrow \frac{dP}{dU}$$

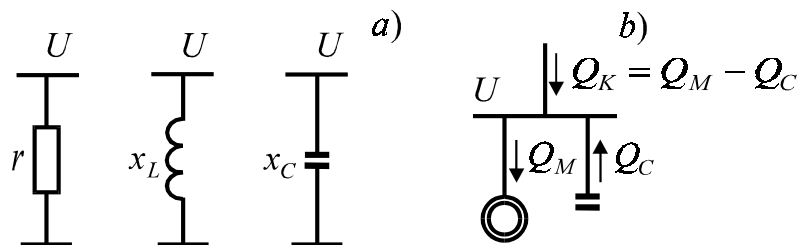
seada väiksem on lõppkokkuvõttes pingekadu ja seda kõrgem võimsuse tegelik maksimum.

2.6.2 Koormuse pingetundlikkus. Tuletisi dP/dU ja dQ/dU nimetatakse **koormuse pingetundlikkuseks**. Need on leitavad koormuse staatiliste karakteristikute $P_K = P_K(U)$ ja $Q_K = Q_K(U)$ alusel. Vaatleme, millised on pingetundlikkused erineva iseloomuga koormuste korral. Konstantse takistusega koormuse võimalikud aseseemid on joonisel 2.17 a. Vastavad staatilised karakteristikud ja pingetundlikkused on järgmised:

$$P_K = \frac{U^2}{r}, \quad \frac{dP_K}{dU} = 2 \frac{U}{r} = 2 \frac{P_K}{U} = 2 \left|_{\substack{U=1 \\ P_K=1}}, \quad \frac{dQ_K}{dU} = 0$$

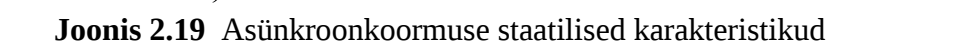
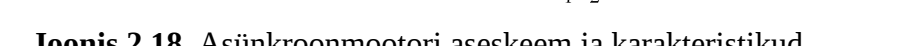
$$Q_K = \frac{U^2}{x_L}, \quad \frac{dQ_K}{dU} = 2 \frac{U}{x_L} = 2 \frac{Q_K}{U} = 2 \left|_{\substack{U=1 \\ P_K=1}}, \quad \frac{dP_K}{dU} = 0$$

$$Q_K = -\frac{U^2}{x_C}, \quad \frac{dQ_K}{dU} = -2 \frac{U}{x_C} = -2 \frac{Q_K}{U} = -2 \left|_{\substack{U=1 \\ P_K=1}}, \quad \frac{dP_K}{dU} = 0$$



Joonis 2.17 Konstantse takistusega koormuse aseseemid (a) ja reaktiivvõimsuse kompenseerimise skeem (b)

Pingetundlikkuse numbrilised väärtused on eespool esitatud suhtelistes ühikutes nimitingimustel. Peatugem pikemalt juhtumil, kus koormus on asendatav mahtuvusliku takistusega. Praktiliselt on siis tegemist reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks ülesseatud kondensaatoritega. Valemitest selgub, et pinge-



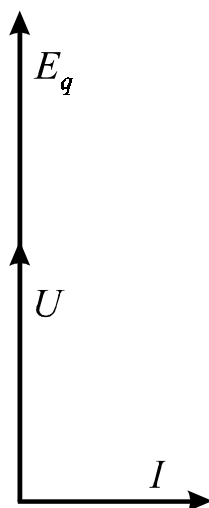
© M. Meldorf 27

vastav komponent Q_s aga võrdeliselt nende voolude ruuduga. Järelikult väheneb pinge tõusmisel. Mootori aktiivvõimsus sõltub töömasinast ja seega pöörlemiskiirusest. Kuna pöörlemiskiirus muutub vähe, siis on ka aktiivvõimsuse staatiline karakteristik peaaegu horisontaalne (joonis 2.19 b). Asünkroonmootori pingetundlikkus dQ_K / dU sõltub pingest ja on nimipinge piirkonnas umbes 2. Pinge langedes langeb ka pingetundlikkus ja saavutab nulli pingel umbes $0,7U_N$. Aktiivvõimsuse järgi on asünkroonmootori pingetundlikkus väike $dP_K / dU \approx 0$.

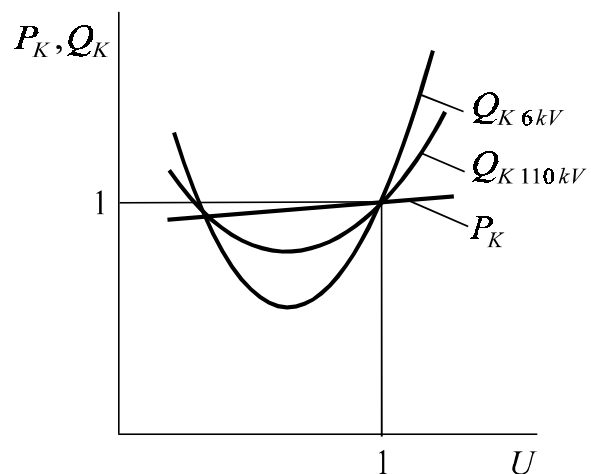
Sünkroonkompensaatori reaktiivvõimsuse sõltuvuse pingest saab tuletada sünkroonmasina põhiseostest, kui võtta arvesse, et aktiivvõimsus puudub, s.t voolu ja pinge vaheline nurk on 90° (joonis 2.20). Siin

$$I = \frac{E_q - U}{x_d}, \quad Q_K = -UI = -\frac{E_q U}{x_d} + \frac{U^2}{x_d}$$

$$\frac{dQ_K}{dU} = \frac{2U - E_q}{x_d}, \quad \frac{dP_K}{dU} = 0$$



Joonis 2.20 Sünkroonkompensaatori vektordiagramm



Joonis 2.21 Üldistatud koormuse staatilised karakteristikud

Pandagu tähele, et koormuse puhul loetakse positiivseks tarbitavat võimsust, genereeriv võimsus on siis negatiivne. Tuletatud seos näitab, et sünkroonkompensaatori pingetundlikkus sõltub elektromotoorjõu E_q väärtusest. Kuna tavaliselt $E_q > 2U$, siis on pingetundlikkus negatiivne ja sünkroonkompensaatoreid tuleb lugeda stabiilsuse seisukohalt mittesooovitavateks nii nagu kondensaatoreidki. Järeldus on aga õige vaid juhul, kui puudub AER. Viimase olemasolul püüab sünkroonkompensaator vastavas sõlmes pinget säilitada ja pingetundlikkust pole võimalik määrata (pingetundlikkus läheneb

lõpmatusel). AER-iga varustatud (nii nagu see alati ka on) sünkroonkompensaator on stabiilsust tõstev seade.

Elektrisüsteemi sõlmekoormus, millest lähtutakse stabiilsuse tegelikul määramisel, koosneb suure hulga tarbijate võimsuste summast. Enamasti on ülekaalus asünkroonkoormus (umbes 60%), kuid küllaltki suur on ka konstantse aktiivtakistusega tarbijate osatähtsus, sest nende hulka kuuluvad näiteks elektriühjud ja alaldid. Hõõglampidel on samuti vaid aktiivvõimsus, kuid hõõgniidi takistuse muutumise tõttu ei ole pingetundlikkus mitte 2 vaid 1,6. Kirjeldatud erinevate tarbijate võimsuste summat nimetatakse **üldistatud koormuseks** ja selle kohta on käsiraamatutes toodud vastavad tüüp-karakteristikud (joonis 2.21). Siin

$$\frac{dP_K}{dU} = 0,6; \quad \left. \frac{dQ_K}{dU} \right|_{6kV} = 2,3; \quad \left. \frac{dQ_K}{dU} \right|_{110kV} = 1,6$$

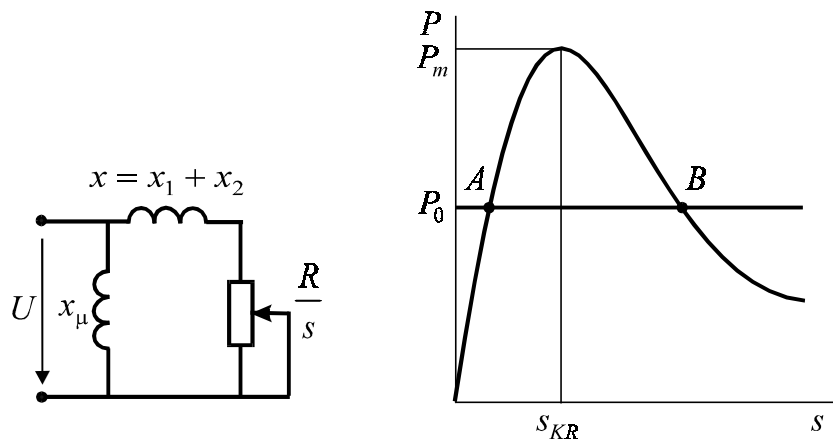
Näeme, et reaktiivvõimsuse staatiline karakteristik sõltub muuhulgas sellest, millisel pingeastmel koormust mõõdetakse. See on seletatav asjaoluga, et mõõdetuna kõrgemal pingeastmel loetakse koormuse hulka ka reaktiivvõimsuse kompensaatorite võimsus ning kaod liinides ja trafodes.

2.7 Koormuse stabiilsus

Eespool nägime, et elektrienergia tarbijad võivad avaldada mõju elektrisüsteemi stabiilsusele, s.o generaatorite sünkroonsele tööle. Mittestabiilseks võib aga osutuda koormus ise, täpsemalt, pöörlevad masinad. Juhul kui tegemist on sünkroonmootoritega, on probleem sarnane generaatoritega – ebasoodsates tingimustes võivad mootorid sünkronismist välja langeda. Kuna sünkroonmootoritele kehtivad samad vektordiagrammid ja analüütilised seosed kui generaatoritelegi, siis on ka stabiilsuse tingimused sarnased. Tähele tuleb panna vaid võimsuse suunda (märki), mida koormuse käsitlemisel loetakse vastupidiseks genereeriva võimsuse suunaga.

Asünkroonmootorid teatavasti sünkroonselt ei pöörle ja seega ei saa sünkronismist välja langeda. Küll aga võivad asünkroonmootorid ootamatult seiskuda, mis on ka mittestabiilsuse ilming. Joonisel 2.18 toodud asünkroonmootori asiskeemi võime ligikaudu asendada nii nagu joonisel 2.22 näidatud. Sellele vastavalt leiame

$$P_K = rI^2 = \frac{U^2}{x^2 + \left(\frac{R}{s}\right)^2} \frac{R}{s}, \quad P_K = \frac{U^2 R s}{x^2 s^2 + R^2}$$



Joonis 2.22 Asünkroonmootori aseskeem ja karakteristik

Valemist tulenev asünkroonmootori karakteristik on joonisel 2.22. Sellele on kantud ka töömasina karakteristik P_0 , mida esimeses lähenduses võib lugeda sõltumatuks mootori töökiirusest (libistusest). Nii nagu lihtsaima elektrisüsteemi korral tekib ka siin kaks tööpunkti, millest punktile A vastav seisund on stabiilne, punktile B vastav seisund aga mitte. Seega määrab asünkroonmootori võimsuse (stabiilsuse) piiri ära tema karakteristiku maksimum, mis eespool toodud seoste kohaselt on

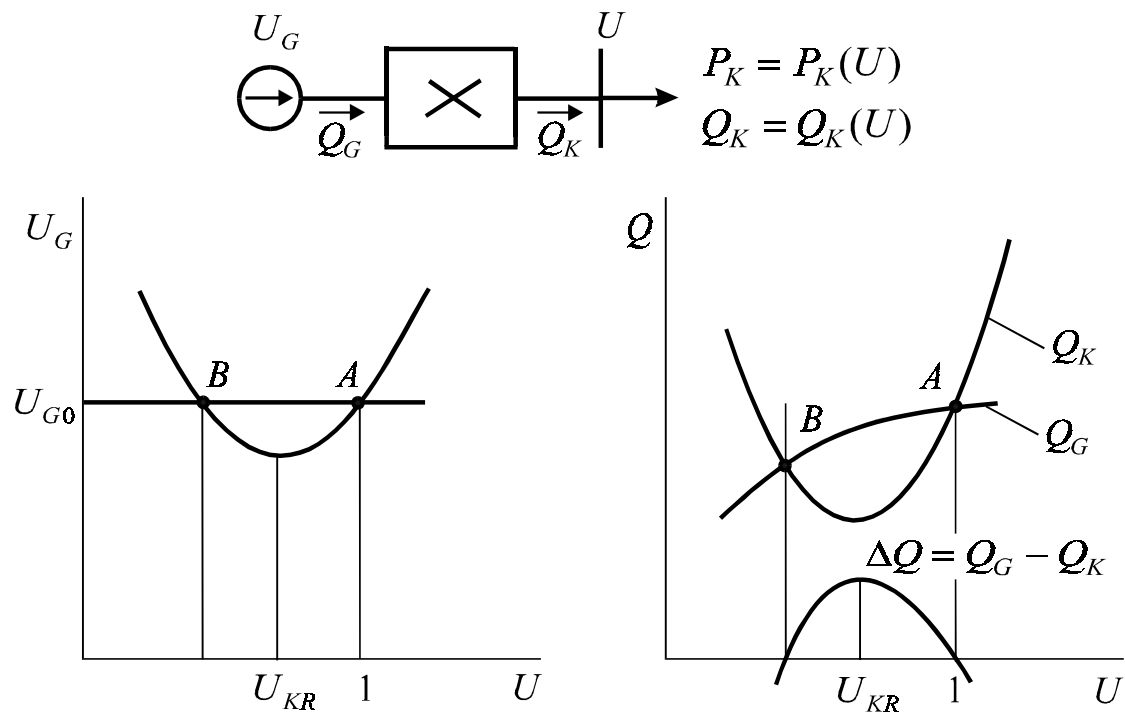
$$\frac{dP_K}{ds} = U^2 R \frac{R^2 - x^2 s^2}{(x^2 s^2 + R^2)^2} = 0$$

$$s_{KR} = \frac{R}{x}, \quad P_m = \frac{U^2}{2x}$$

Maksimaalvõimsuse P_m suhteline väärtus nimivõimsuse suhtes sõltub masina tüübist ja on enamikul masinatel umbes 2. Seega, kui asünkroonmootor töötab nimivõimsusel, tekib mittestabiilsus siis, kui pinge langeb alla 0,7, sest siis $P_m < P_N$. Kuna 30% pingelang jaotusvõrgus on vähetõenäoline (vaatleme püsitalitust), jääb mulje, et asünkroonkoormuse mittestabiilsust praktiliselt ei esine. Selline järeldus kehtib vaid juhul, kui pinge masina klemmidel on konstantne (sõltumatu mootori talitlusest). Tegelikult on mootori ja praktiliselt konstantse pingega lattide vahel alati ülekandeseadmed (liinid, trafod), millel esineb pingekadu. Nimetatud seadmete (välis)takistuse x_v võib ilmselt liita mootori takistusega x . Korrates arutelu, saame asünkroonmootori maksimaalvõimsuseks

$$\boxed{P_m = \frac{U^2}{2(x + x_v)}} \quad (2.10)$$

Jõuame järeldusele, et asünkroonkoormuse stabiilsus sõltub nii pingeniivoost jaotusvõrgus kui ka jaotusvõrgu takistusest. Kui viimane on suur (võrreldav koormuse takistusega), siis on asünkroonkoormuse mittestabiilsuse ilmingud võimalikud.



Joonis 2.23 Koormussõlme skeem ja karakteristikud

Asünkroonkoormuse stabiilsust seose (2.10) alusel praktiliselt kontrollida on raske, sest koormussõlme kuulub üldjuhul suur hulk erineva iseloomuga tarbijaid. Koormuse stabiilsuse üle võib aga otsustada ka (üldistatud) staatilistest karakteristikutest lähtudes. Joonisel 2.23 on koormussõlme üldskeem ja sellele vastavad sõltuvused $U_G = U_G(U)$ ja $Q_G = Q_G(U)$. Kuna püsitalitlusel on nii pinged kui võimsused tasakaalus, saame jällegi kaks tööpunkti stabiilse (A) ja mittestabiilse (B) seisundiga. Vastavalt võime välja kirjutada ka stabiilsuse tingimused

$$\boxed{\frac{dU_G}{dU} > 0 \quad \text{või} \quad \frac{d\Delta Q}{dU} < 0} \quad (2.11)$$

Üldjuhul käsitletakse koormuse stabiilsust elektrisüsteemi pinge stabiilsuse osana, mida vaadeldakse viiendas peatükis.