

Elektrisüsteemi asümmeetrilised talitlused.

Märksõnad: sümmeetriline, asümmeetriline talitus, Fortescue teisendus, sümmeetrilised komponendid, järgnevusimpedantsid, järgnevusaseskeemid, asümmeetrilised lühisvoolud

ES asümmeetriliste talitluste analüüs ja arvutus.

Teema on tihedalt seotud elektrisüsteemi (ES) releekaitse (RK) valdkonnaga, sest RK peab funktsioneerima adekvaatselt nii süsteemi sümmeetriliste kui asümmeetriliste talitluste puhul. Kõige tihedamini esinevad rikked on just asümmeetrilise lühised, sellest tulenevalt nii süsteemi elementide kaitseplaanide koostamisel, kui sätestuse valikul ja RK rakendumiste hindamisel on asümmeetriliste talitluste käsitus ja analüüs möödapääsematu. Võrgu asümmeetriliste talitluste arvutamiseks ja analüüsiks on ajalooliselt juba ammu (1918), C.L. Fortescue poolt välja töötatud nn sümmeetriliste komponentide meetod (SKM), mille olemus seisneb spetsiaalse koordinaatide teisenduse rakendamises, ehk üleminekus talitusparameetrite faasikoordinaatide süsteemilt $[V_a, V_b, V_c]$ nn järgnevuskoordinaatide süsteemile $[V_1, V_2, V_0]$. Kui faasikoordinaatides võrguelementide faasisuurused $[V_a, V_b, V_c]$ on omavahel seotud vastastikuste induktiivsuste kaudu (ka sümmeetriliste elementide puhul) siis järgnevuskoordinaatide süsteemis järgnevussuurused $[V_1, V_2, V_0]$ sümmeetrilises elemendis omavahel seotud ei ole. Tulemusena järgnevussuuruste süsteemis arvutamisel tekib küll 3 järgnevus skeemi ja võrku, kuid need on seotud ainult asümmeetrilise rikke kohas, tulemusena (eriti ühekordse rikke esinemisel) on talitusparameetrid arvutatavad ja analüüsitavad tunduvalt lihtsamini. Lisaks analüüsi võimalustele on osa sümmeetrilisi komponente (nulljärgnevussuurused) lihtsalt väljafiltreeritavad juba digitaalsete vahenditega ning nende kasutamisele põhineb rida väga efektiivseid kaitseid, näiteks nn nulljärgnevuskaitseid jne vt K4. Järgnevas ongi ülevaade sümmeetriliste komponentide meetodist ja rakendusest asümmeetriliste lühiste arvutamisel.

Kirjandust probleemi klassikalisest käsitlusest:

K1: [Wagner, Evans](#)

K2: [E. Clarke I](#) ; [E. Clarke II](#)

K3: [Back to basics...](#)

K4: [Järgnevuskoordinaatide rakendustest releekaitstes...](#)

K5: [100 aastat ...](#)

Sisukord.

0. Elektrisüsteemi ebasümmeetrilised talitlused. Üldist	2
1. Fortescue teisendused	4
2. Võrguelementide kirjeldus faasikoordinaatides ja järgnevuskoordinaatides.	9
3. Võrguelementide modelleerimine faasi ja järgnevussuuruste vallas. järgnevusparameetrite määramine	13
3.1. Sünkroonmasina mudel faasi- ja järgnevuskoordinaatides .	
3.2. 3f liinilõigu mudelid ja parameetrid.	
3.3. Trafode mudelid faasi ja järgnevuskoordinaatides .	
3.4. Sümmeetrilise 3f koormuse mudel faasi ja järgnevuskoordinaatides.	
4. Võrgu järgnevusaseskeemid	33
5. Valemite ja seoste tuletamine asümmeetriliste lühiste parameetrite määramiseks. Üldist	38
5.1 F-m lühis	
5.2 F-F lühis	
5.3 F-F-m lühis	
5.4 Rakendusnäide	46

Koostas :
Vello Zupsmann
zups.ve@gmail.com

Elektrisüsteemi ebasümmeetrilised talitlused.

Üldist.

Elektrisüsteem (ES) on oma olemuselt pidevalt funktsioneeriv dünaamiline süsteem.

Elektrisüsteemi käsitluses tehakse vahet nn passiivsel osal, milleks on **seadmed** ja seadmete kompleksid, ja aktiivsel osal milleks on elektrisüsteemis toimuvad elektrienergia tootmise, ülekande ja tarbimise elektro magnetilised ja mehhaanilised **protsessid**.

Aktiivosa iseloomustab ES funktsioneerimist= talitlemist.

Passiivosa põhielemendid on generaatorid, ülekandeliinid trafod ja tarbijad. Neid iseloomustavad erineva täpsusega mudelid ja nendega seotud parameetrid ehk passiivparameetrid (põhiliselt erinevad impedantsid). Passiivosas võib eristada nn aktiivelemente -generaatoreid mis on võimelised mingi primaarenergia muundama elektrienergiaks ja seega esile kutsuma kõik mainitud el. magnetilised protsessid.

ES funktsioneerimise eesmärk on elektrienergia tootmine ja ülekandmine tarbijateni. Funktsionaalselt kuuluvad süsteemi koosseisu ka tarbijad, st paljudel juhtudel tuleb käsitleda ES kui tarbimine – tootmine süsteemi. ES funktsioneerimisel=talitlemisel, süsteemis toimuvaid elektromehhaanilisi ja elektromagnetilisi protsesse iseloomustatakse vastavate parameetritega nn talitusparameetritega (näit sõlmede pinged, harude voolud,sagedus jne).

Mingile aja momendile vastavate talitusparameetrite komplekti, nimetatakse süsteemi olekuks = seisundiks (iseloomustab täielikult protsessi antud aja momendil). Olekuparameetrite vahelisi seoseid nimetatakse olekuvõrranditeks või protsessi mudeliks.

Tingituna koormusolukordade muutustest ja mitmesugustest häiretest on ES olek pidevas muutumises, mis võivad olla suhteliselt väikesed ja aeglased või väga suured ja kiired, nende käsitlusvõimalused on täiesti erinevad ning seetõttu talitusprotsessides eristataksegi vähemalt kahte alaliiki

- püsiprotsessid, püsitalitus see on talitus kus talitusparameetrid muutvad vähe ja aeglaselt.
- siirdeprotsessid, kus esialgne ja uus püsiolek (kui eksisteerib) erinevad oluliselt ja probleemiks on siirde füüsika, kas üleminek toimub stabiilselt.

Põhilise osa ajast funktsioneerib süsteem püsitalitluses.

Protsesside kirjeldusviisid toodud kahel erijuhul on oluliselt erinevad, juhul (a) on võimalik kirjeldada protsesse algebraliste võrrandite tasemel, juhul (b) tuleb käsitleda protsesse ajast sõltuvana st dif. võrrandite tasemel, mis on tunduvalt keerukam ja töömahukam, ning mille tõttu võimaluse korral kasutatakse lihtsustusi mis mõnedel juhtudel võimaldab olemuselt siirdeprotsesse hinnata ka lõigete st algebraliste mudelite alusel.

Tehnilis - majanduslikel kaalutlustel on **ES ehitatud nn sümmeetrilise 3 -faasilise süsteemina**, ning rikkevabas olekus sellisena ka funktsioneerib.

Arvestades elektrisüsteemi suurt ulatust, esinevad selle töös paratamatult mitmesugused häired ja rikked, millede tulemuseks võivad olla võrguosade sümmeetrilise talitluse häired, ehk teatud võrguosa talitus või muutuda **asümmeetriliseks**.

Seega võrgu käidu mitmesugustes olukordades on vajalik nii sümmeetriliste talitluste analüüs ja arvutus kui ka asümmeetriliste talitluste analüüs ja arvutus.

Asümmeetriliste talitluste käsitlus on eriti vajalik releekaitsega (RK) seotud tegevustes nagu RK valik, RK sätestuse valik, RK käitumise analüüs rikete puhul jne. Asümmeetriline talitus on üldjuhul anormaalne olek (välja arvatud 0.4 kV madalpingevõrk või mingite eritarbijatega võrgud).

3f. süsteemi sümmeetrilise talitluse määratlus:

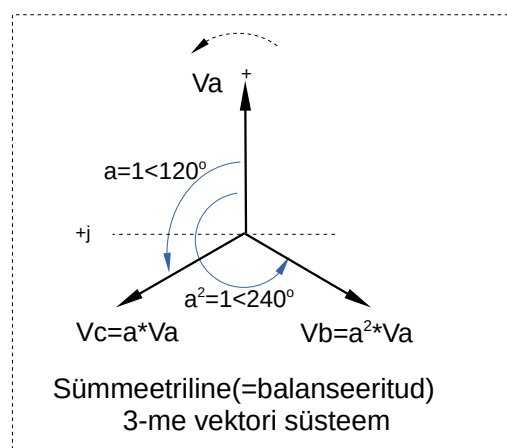
3.f süsteemi puhul, faaside emj. -de, pingete ja voolude vektorid moodustavad 3-me vektori süsteemi $[V_a, V_b, V_c]$, see süsteem ja talitus on **sümmeetriline** kui vaadeldava suuruse

- faasivektorite moodulid on võrdsed
- faasivektorid on nihutatud üksteise suhtes võrdse nurga võrra, 3f süsteemi puhul $360/3 = 120^\circ$

Kui toodud tingimused ei ole täidetud siis on tegemist asümmeetrilise talitlusega.

Lisaks kokkuleppeliselt:

Vektorite positiivne pöörlemise suund on vastu kellaosuti liikumise suunda, analoogiliselt ka



nurkade mõõtmisel on positiivne suund vastu kellaosuti liikumise suunda.

Pööret 120° kellaosuti liikumise vastassuunas väljendatakse analüütilistes avaldistes operaatoriga a , a suhtes kehtivad seosed :

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j 0.865 ; a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j 0.865 ; a^3 = 1 ;$$

$$1 + a + a^2 = 0 ; a + a^2 = -1 ; a^2 - a = -j\sqrt{3}$$

Sümmeetrilises vektorite süsteemis sõltumatuks suuruseks on üks vektoritest (tavaliselt võetakse selleks a faasi vektor V_a), teisi vektoreid saab väljendada selle kaudu.

Seega sümmeetrilise vektorite süsteemi $[V_a, V_b, V_c]$ võib kirjutada ka kujul $[V_a, a^2 V_a, a V_a]$ sest alati kehtib

$$V_b = a^2 V_a ; V_c = a V_a \quad (2)$$

Maatrikskäsitluses, tähistades kolme faasivektori süsteemi V_f , kus

$$V_f = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ a^2 V_a \\ a V_a \end{bmatrix} \quad (2b)$$

V_f on 3.f. süsteemi faasivektorite üldine tähistus, ning tähistab nii emj, pinge kui voolu vektorite süsteeme, st V_f seosed kehtivad nii pingetele U_f kui vooludele I_f .

Asümmeetriline 3-me vektori süsteem (3f süsteem) ei rahulda sümmeetrilise 3f süsteemi nõudeid st vektorid V_b ja V_c ei ole avaldatavad V_a kaudu ning seosed (2) ei kehti.

Eespooltoodu on **talitluse** (=talitusparameetri pinge, vool jne) sümmeetria/asümmeetria määratlus, millele lisandub **võrguelemendi** sümmeetria mis on elemendi ehituslik omadus ning sümmeetriline talitus eeldab üldiselt sümmeetrilisi võrguelemente. Põhiliseks probleemseks elemendiks on siin õhuliin, mille rahuldav sümmeetria saavutatakse faaside transponeerimisega.

Süsteemi asümmeetrilise talitluse põhjusi võib olla palju, eristatakse

a. pikiasümmeetriaid.

võrguelemendi rike kus see muutub asümmeetriliseks faasi (de) katkestuse või impedantsi muutuse tõttu (elemendi mittetäisfaasiline olek). See on juht kus võrgu nn passiivosa ise muutub asümmeetriliseks.

b. põikiasümmeetriaid,

tekivad balanseeritud tarbija muutumisel mittebalanseerituks (mingi häire) või sellise mittebalanseeritud tarbija lisandumisel (mitte lühisolukord),

või võrguelemendi rikked millega kaasneb erinevate faaside lühistumine nii et lühisvool ei ole balanseeritud.

Kõige olulisemateks asümmeetrilisteks talitlusteks on asümmeetrilised lühised (F-F, F-m, F-F-m) mis on tegelikult asümmeetrilise tarbija eriliigid.

Võrgu talitluse ebasümmeetriad võivad olla ühekordsed (ainult üks lühiskoht või katkestuskoht võrgus) või mitmekordsed, kui võrgus on üheaegselt mitu asümmeetrilist elementi.

ES asümmeetriliste talitluste analüüs ja arvutus.

Põhiliseks asümmeetriliste talitluste analüüsi ja arvutusmeetodiks on nn **sümmeetriliste komponentide meetod** mis on välja töötatud C.L.Fortescue poolt (alates 1913a), ning laialdaseks kasutuseks sobival kujul Ewans, Wagneri; E.Clark-i poolt 1943a

Meetodi olemus seisneb spetsiaalse koordinaatide teisenduses nn F. teisenduse kasutamises, ehk st üleminekus faasikoordinaatide (füüsikaliste koordinaatide) $V_f = [V_a, V_b, V_c]$ vallast nn sümmeetriliste komponentide $V_s = [V_1, V_2, V_0]$ ehk järgnevus koordinaatide valda.

Nimelt võrguelementide võrrandites, väljendatuna faasikoordinaatides on üldjuhul elektrivõrgu elementide faasid omavahel seotud vastastikuste induktiivsuste kaudu. Sümmeetriliste talitluste käsitlemisel, kus kehtib seos (2), st ainult üks faasivektor kolmest on sõltumatu suurus, taandub 3.f süsteemi arvutus nn 1.f süsteemi arvutusele vaatamata vastastikuste induktiivsuse olemasolule.

Asümmeetriliste talitluste puhul seos (2) ei kehti, faasisuurused ei ole omavahel otseses sõltuvuses ning arvutus haarab kõiki kolme faasi kõikides konstruktiivselt sümmeetrilistes, kuid asümmeetriliselt

talitlevates võrguelementides. Arvutus ja analüüs muutub töömahukas (eriti käsitsiarvutustel) ja analüüsil väheülevaatlikuks.

Fortescue teisendus on selliste omadustega, et uues koordinaatide süsteemis sümmeetriliste võrguelementide järgnevus parameetrid (Z_1, Z_2, Z_0) ei ole omavahel seotud. Viimane asjaolu võimaldab ebasümmeetrilisi talitlusi käsitleda kolme sümmeetrilise (1.f) askeemi kaudu, mis on omavahel seotud ainult asümmeetria esinemiskohtades, näit lühise kohas. Tulemusena arvutus ja analüüsiprotsess muutub tunduvalt lihtsamaks.

Järgnevalt vaadeldakse meetodit kahes osas

1. Fortescue teoreemist tulenevad koordinaatide teisendused, st elektrivõrgu talitusparameetrite V (U ja I) teisendusi faasikoordinaatide süsteemist (vallast) süm. komponentide valda (=järgnevuskoordinaatidesse) ja vastupidi.
2. Võrguelementide olekuvõrrandite (mudelite, askeemide) teisendust ühest süsteemist teise, ning teisenduse efekti

1. Fortescue teisendused

Fortescue teoreemi sisu :

Iga mittesümmeetrilise n vektori süsteemi saab lahutada $n-1$ ks sümmeetrilise n vektori süsteemiks plus n vektori homopolaarseks (vektorid võrdsed ja faasis) süsteemiks.

3-e vektori süsteemi (3f süsteemi) puhul: Iga mittesümmeetrilise 3 vektori süsteemi V_f saab lahutada kaheks sümmeetriliseks 3 me vektori süsteemiks + kolme vektori homopolaarseks süsteemiks.

Tekkivaid 3-me vektori süsteeme nimetatakse **sümmeetrilisteks komponentideks** ja komponente eraldi:

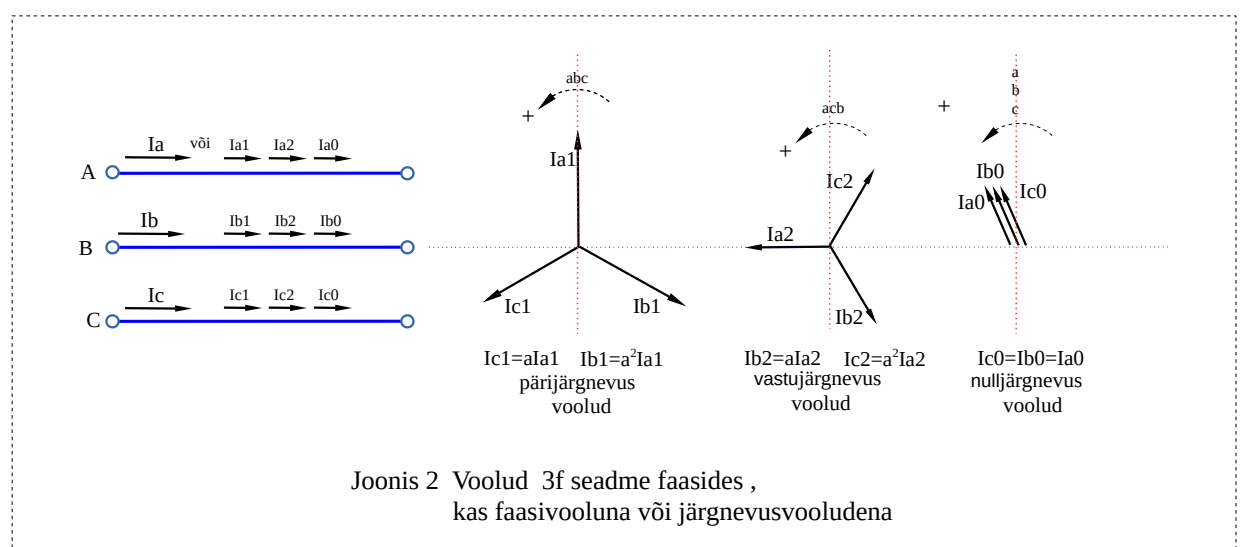
pärijärgnevuskomponent = pärijärgnevussüsteem **V1**,

vastujärgnevuskomponent = vastujärgnevussüsteem **V2**

nulljärgnevuskomponent = nulljärgnevussüsteem **V0**

Üldkujul tähistatakse suurust süm. komponentides ka $[V_1, V_2, V_0]$, 3f võrgu talitluse kirjeldamisel nimetatakse neid konkreetselt emj, pinge või voolu järgnevuskomponentideks või järgnevussüsteemideks, seejuures arvutatakse need sõlmede faasipingete või harude faasivoolude suhtes.

Joonisel 2 on toodud suvalise asümmeetrilise vooluvektorite süsteemi $[I_a, I_b, I_c]$ esitus sümmeetriliste komponendidena st F. teisendus annab võimaluse esitada haruvoole faasivoolude komplektina $[I_a, I_b, I_c]$ või kolme järgnevusvoolu komplektina $\{[I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}]; [I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}]; [I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}]\}$



Vastavalt Fortescue teoreemile saab faasisuuruste ja sümmeetriliste komponentide vastavate vektorite vahelise seose kirjutada järgmiselt,

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{aligned} \quad (1.1a)$$

kus $[V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}] = [V_{a1}, a^2 V_{a1}, a V_{a1}]$ - pärijärgnevussüsteem V_1 ,
süm. vektorite süsteem mis pöörleb esialgse süsteemiga samas suunas
(kokkuleppeliselt kellaosuti vastas suund), st faasijärgnevus a,b,c

$[V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}] = [V_{a2}, a V_{a2}, a^2 V_{a2}]$ -vastujärgnevussüsteem V_2 ,
süm. vektorite süsteem mis pöörleb pärijärgnevussüsteemiga vastassuunas,
vastassuunas pöörlemise võib asendada vastupidise faasijärgnevusega
st faasijärgnevus a,c,b

$[V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}] = [V_{a0}, V_{a0}, V_{a0}]$ -nulljärgnevussüsteem V_0

kolm samasuunalist võrdse mooduliga vektorit (pöörlevad +suunas)

Eelnevat võib kokku võtta ka nii et lähtudes süm. komponentidest nende vektoriaalsumma annab esialgse mitesüm. vektorite süsteemi.

Kuna süm.komponendid on 3-me vektori sümmeetrilised süsteemid, siis vastavalt eespoolmainitule saab b ja c faasi komponendid avaldada a faasi komponentide kaudu, kasutades seoseid

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{a1}; V_{b1} = a^2 V_{a1}; V_{c1} = a V_{a1} \\ V_2 &= V_{a2}; V_{b2} = a V_{a2}; V_{c2} = a^2 V_{a2} \\ V_0 &= V_{a0}; V_{b0} = V_{a0}; V_{c0} = V_{a0} \end{aligned} \quad (1.1b)$$

Analüütiliste käsitluse puhul kasutatakse eelnevast (3a) ja (3b) tulenevat seost faasikoordinaatide ja süm. komponentide **a** faasi komponentvektorite ($V_1=V_{a1}, V_2=V_{a2}, V_0=V_{a0}$) vahel kujul

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Avaldis (1.1) maatrikskujul

$$\mathbf{V_f} = \mathbf{A} * \mathbf{V_s} \quad (1.1c)$$

$$\text{kus } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{V_f} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{V_s} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix}$$

Teisendused (1.1a, 1.1, 1.1c) formuleerivad faasisuuruste määramise sümmeetriliste komponentide alusel, tähistame teisendust $\mathbf{V_s} \rightarrow \mathbf{V_f}$.

Faasisuuruste alusel järgnevussuuruste leidmiseks $\mathbf{V_f} \rightarrow \mathbf{V_s}$ tuleks lahendada võrrandisüsteem (1.1, 1.1c) ehk maatriksterminoloogias pöörata maatriks $\mathbf{A}$. Kuna maatriks $\mathbf{A}$ on mitteeriline siis see on võimalik ja maatriksi $\mathbf{A}$ pöördmaatriks $\mathbf{A}^{-1}$ on järgmine

$$\mathbf{A}^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

ning teisendus $\mathbf{V_f} \rightarrow \mathbf{V_s}$ võrrandisüsteemina

$$\begin{aligned} V_1 &= 1/3 (V_a + a V_b + a^2 V_c) \\ V_2 &= 1/3 (V_a + a^2 V_b + a V_c) \\ V_0 &= 1/3 (V_a + V_b + V_c) \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\text{või maatrikskujul} \quad \mathbf{V_s} = \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{V_f} \quad (1.3a)$$

Kokkuvõttes võrgu **talitus parameetrite** U_f, I_f teisendused:

$V_s \rightarrow V_f$ - järgnevuskoordinaatidest faasikoordinaatidesse toimuvad analüütiliselt 1.1, või 1.1c järgi või nende aluse konstrueeritud graafilisi konstruktsioone kasutades vt joon 3

$V_f \rightarrow V_s$ - faasikoordinaatidest järgnevuskoordinaatidesse toimuvad analüütiliselt 1.3, või 1.3a järgi või nende alusel konstrueeritud graafilisi konstruktsioone kasutades vt joon 4.

Võimsus väljendatuna süm komp kaudu (ilma teisendust läbi viimata)

Faasikoordinaatides:

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{U}_a \dot{I}_a + \dot{U}_b \dot{I}_b + \dot{U}_c \dot{I}_c$$

Järgnevuskoordinaatides:

$$\dot{S} = P + jQ = 3\dot{U}_1 \dot{I}_1 + 3\dot{U}_2 \dot{I}_2 + 3\dot{U}_0 \dot{I}_0 \quad (1.4)$$

Kus $\dot{S}$ - 3f süsteemi kompleksvõimsus

$\dot{I}$ - vastavate voolude kaaskompleks

Järgnevad näited on teisenduste analüütilisest (N1) ja graafilisest (N2) teostamisest

Näide N1.

Teostame teisenduse $V_f \rightarrow V_s$.

Olgu mõõdetud faasivoolud $I_a = 115 \angle 0^\circ \text{ A}$; $I_b = 125 \angle -90^\circ \text{ A}$; $I_c = 105 \angle 120^\circ \text{ A}$

Leida järgnevusvoolud ?

Vastavalt valemitele 5,5b

$$I_1 = (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c) / 3 = (115 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 125 \angle -90^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 105 \angle 120^\circ) / 3 = \\ = (115 \angle 0^\circ + 125 \angle 30^\circ + 105 \angle 360^\circ) / 3 = (115 + 108.25 + j62.5 + 105) / 3 = 109.42 + j20.83 = 111.4 \angle 10.8^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c) / 3 = (115 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 125 \angle -90^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 105 \angle 120^\circ) / 3 = \\ = (115 \angle 0^\circ + 125 \angle 150^\circ + 105 \angle 240^\circ) / 3 = (115 - 108.25 + j62.5 - 52.5 - j90.93) / 3 = -15.25 - j9.48 = \\ = 17.96 \angle -148.1^\circ \text{ A}$$

$$I_0 = (I_a + I_b + I_c) / 3 = (115 \angle 0^\circ + 125 \angle -90^\circ + 105 \angle 120^\circ) / 3 = \\ = (115 - j125 - 52.5 + j90.93) / 3 = 20.83 - j11.36 = 23.73 \angle -28.6^\circ \text{ A}$$

Teostame teisenduse $V_s \rightarrow V_f$.

Olgu teada järgnevusvoolud, järgnevusvooludeks võtame eelmise ülesande lahendi (kontrolli mõttes)

$$I_1 = 111.4 \angle 10.8^\circ \text{ A}; \quad I_2 = 17.96 \angle -148.1^\circ \text{ A}; \quad I_0 = 23.73 \angle -28.6^\circ \text{ A}$$

Vastavalt valemitele 3,3b

$$I_a = (I_1 + I_2 + I_0) = (111.4 \angle 10.8^\circ + 17.96 \angle -148.1^\circ + 23.73 \angle -28.6^\circ) = \\ = (109.42 + j20.83 - 15.25 - j9.48 + 20.83 - j11.36) = 115 - j0.01 = 115 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_b = (a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2 + I_0) = (1 \angle 240^\circ \cdot 111.4 \angle 10.8^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 17.96 \angle -148.1^\circ + 23.73 \angle -28.6^\circ) = \\ = (111.4 \angle 250.8^\circ + 17.96 \angle -28.1^\circ + 23.73 \angle -28.6^\circ) = (-36.6 - j105.2 + 15.84 - j8.46 + 20.83 - j11.36) = \\ = 0.07 - j125.0 = 125 \angle -90^\circ \text{ A}$$

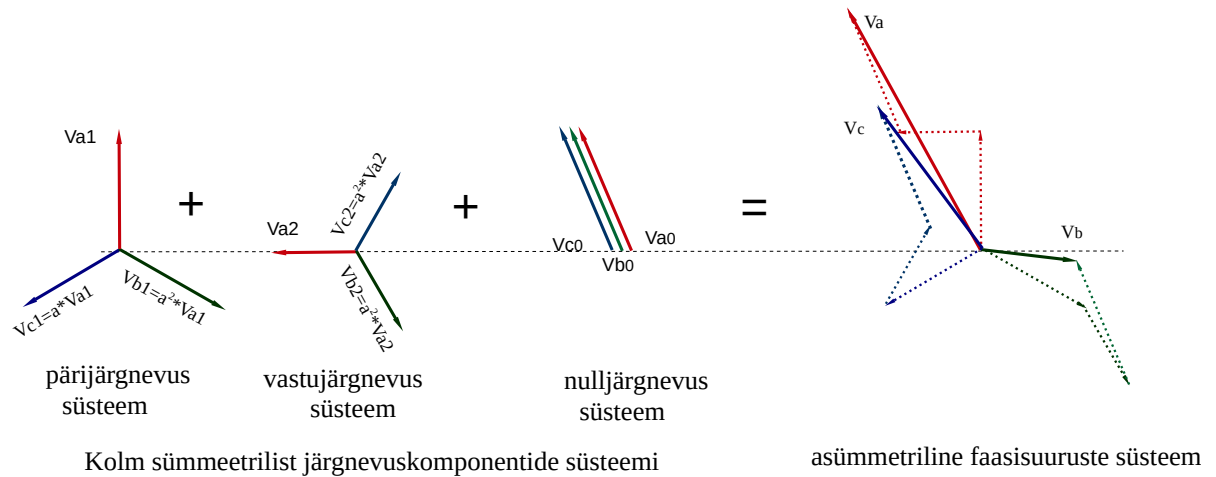
$$I_c = (a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2 + I_0) = (1 \angle 120^\circ \cdot 111.4 \angle 10.8^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 17.96 \angle -148.1^\circ + 23.73 \angle -28.6^\circ) = \\ = (111.4 \angle 130.8^\circ + 17.96 \angle 91.9^\circ + 23.73 \angle -28.6^\circ) = (-72.8 + j84.2 - 0.6 + j17.96 + 20.83 - j11.36) = \\ = -52.6 + j90.8 = 104.94 \angle 120.1^\circ \text{ A}$$

.....

N2 1. Teostame teisenduse $\mathbf{V_s} \rightarrow \mathbf{V_f}$ graafiliselt

Antud suuruse V süm komponentide vektorid $[V_1, V_2, V_0]$; leiame vastavad faasisuurused $[V_a, V_b, V_c]$ st faasisuuruste asümmeetrilise vektordiagrammi

Kuna aluseks on süm. komp. täielikud vektordiagrammid, siis põhimõtteliselt graafiline teisendus tähendab vastavate järgnevusvektorite otsest graafilist liitmist (teisendus (1.1))

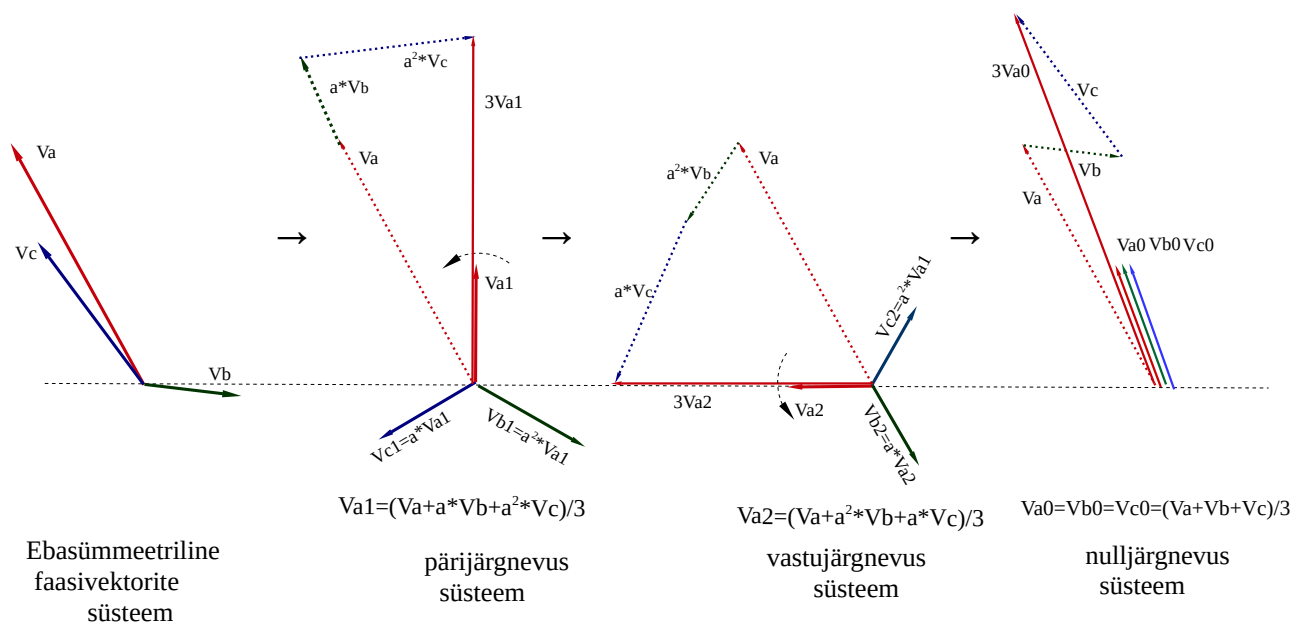


Joon 3 Faasivektorite graafiliseks määramiseks järgnevuskomponentide vektorsüsteemide alusel, tuleb vastavate faaside järgnevuskomponendid vektoriaalselt liita, nagu joonisel

2. Teostame teisenduse $\mathbf{V_f} \rightarrow \mathbf{V_s}$ graafiliselt.

Lähtume asümmeetrilisest talitlusest V_a, V_b, V_c , faasikoordinaatides, ning teostame selle komplekti lahutamise sümmeetrilisteks komponentideks.

Teisenduse graafiline konstruktsioon toimub samuti seoseid 1.3 silmas pidades, kasutades pööramisoperaatoreid a ja a^2 , mille tõttu teisendus on töömahukam kui eelmine



Joon 4 Järgnevusvektorite graafiliseks määramiseks faasivektorite alusel tuleb faasivektoreid pöörata vastavalt teisendusele 5.

1. samm – faasivektorite pööramise ja liitmise teel leitakse a faasi järgnevuskomponendid
2. samm – a faasi järgnevuskomponentide pööramise teel leitakse b ja c faasi järgnevuskomponendid

2. Võrguelementide kirjeldus faasikoordinaatides ja järgnevuskoordinaatides.

(ES passiivosa kirjeldus erinevates koordinaatides)

Eelnev oli talitusparameetrite teisendamine faasisuuruste vallas järgnevussuuruste valda ja vastupidi. Järgnevalt vaatleme võrguelementide mudelite ja nende parameetrite teisendusi faasisuuruste vallas järgnevussuuruste valda ja vastupidi , ning näeme mis toimub seejuures mudelitega.

Teisendusi on võimalik teostada võrguvõrrandite ekvivalentsusteisendustena , faasikoordinaatidest järgnevuskoordinaatidesse ja vastupidi .

Esialgselt koostatakse mudelid nn füüsikalistes koordinaatides, vajadusel minnakse üle järgnevuskoordinaatidele. Vajadus „tekib” asümmeetrilise talitluste analüüsil, kuid käesoleval ajal on SKM ja selle üksikud mõisted niivõrd laialt kasutusel (eriti RK-s) et võrguelemente iseloomustatakse nii füüsikaliste parameetrite kui järgnevusparameetritega ja seda juba seadme passis või elemendi ehitamisel.

Põhilised (oluliselt erinevad) võrguelemendid on **generaatorid, ülekandeliinid, trafod, tarbijad.**

Elemendi püsitalitus on määratud selle olekuvõrrandiga, mis on seos faasipingete (pingelangude) ja faasivoolude vahel, ning mida võib käsitleda ka kui Ohmi seadust 3f ahela lõigu jaoks.

Seose üldkuju faasikoordinaatides (=füüsikalistes) , maatrikskäsitluses

$$\mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_f * \mathbf{I}_f \text{ või } \mathbf{DU}_f = \mathbf{Z}_f * \mathbf{I}_f \quad (2.1)$$

kus $\mathbf{Z}_f$ – elemendi faasiimpedantside maatriks = võrguelemendi mudel

Faasikoordinaatide vallas on 3-f võrguelemendi mudeli üldkuju, 3x3 faasiimpedantside maatriks

$$\mathbf{Z}_f = \begin{bmatrix} Z_{da} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{db} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{dc} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

kus Z_{da}, Z_{db}, Z_{dc} – faaside enda impedantsid

$Z_{ab}, Z_{ac}, ..$ – faaside vahelised vastastikused impedantsid

Erinevatel võrguelementidel on maatriksi elementide füüsikaline sisu erinev, kuid koordinaatide teisenduse seisukohast on oluline selle maatriksi (2.2) struktuur.

Põhimõtteliselt kõik võrguelemendid ehitatakse (õhuliinide puhul transponeerimise abil) nii, et neid võib normaaltöö puhul käsitleda sümmeetrilistena, seega üldmudel $\mathbf{Z}_f$ on sümmeetriline maatriks , kuigi passiivelementidel ja aktiivelementidel (pöörlevad masinad) on sümmeetriad eri liiki

a. passiivelementidel , liinid, trafod, passiivtarbijad on $\mathbf{Z}_f$ sümmeetriline , võrdsete diagonaalelementide Z_d ja võrdsete mittediagonaal-elementidega Z_m , kuju (2.3)

$$\mathbf{Z}_f = \begin{bmatrix} Z_d & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_d & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_d \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

b. aktiivelementidel, pöörlevad masinad (generaatorid) on

$\mathbf{Z}_f$ tsükliliselt sümmeetriline st diagonaalelementid Z_d võrdsed, mittediagonaal elementid Z_{mp}, Z_{mv} struktuuriga (2.4)

$$\mathbf{Z}_f = \begin{bmatrix} Z_d & Z_{mp} & Z_{mv} \\ Z_{mv} & Z_d & Z_{mp} \\ Z_{mp} & Z_{mv} & Z_d \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

kus Z_{mp} – vastastikune ind pöörlemise suunas

Z_{mv} – vastastikune ind pöörlemise vastassuunassuunas

Ette rutates , oluline on see et Fortescue teisenduse tulemusena need mõlemad teisenevad diagonaalmaatriksiteks.

Vaatleme liinilõigu olekuvõrrandi lähtekuju detailsemalt.

Liinilõigu olekuvõrrand (2.5) faasikoordinaatides (elementkujul)

$$\begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_d & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

kus $\Delta U_a = U_a - U_a'$; $\Delta U_b = U_b - U_b'$; $\Delta U_c = U_c - U_c'$;

Kuna faasikoordinaatide süsteemis, Z_f -i kõik elemendid on mittenullilised siis isegi sümmeetrilise võrguelemendi korral on kõik faasid (võrrandid) omavahel seotud,

näit $\Delta U_a = Z_d * I_a + Z_m * I_b + Z_m * I_c$ jne

seega ebasümmeetriad kus I_a, I_b, I_c ei moodusta sümmeetrilist tähte, nõuavad kõigi kolme faasi kooskõlastamist, mis ongi töomahukuse põhjustajaks, ning ka süm.komponentide kasutuselevõtu põhjuseks.

.....

Siiski **sümmeetrilist talitlust** kus $I_f = [I_a, a^2 * I_a, a * I_a]$, saab vaadelda erandina kus

$$\Delta U_a = (Z_d * I_a + Z_m * a^2 * I_a + Z_m * a * I_a) = (Z_d - Z_m) I_a, \quad \text{sest } a^2 + a = -1$$

analoogiliselt teised faasid,

ning süsteem

$$\begin{aligned} \Delta U_a &= (Z_d - Z_m) * I_a = Z_L * I_a \\ \Delta U_b &= (Z_d - Z_m) * I_b = Z_L * I_b \\ \Delta U_c &= (Z_d - Z_m) * I_c = Z_L * I_c \end{aligned} \quad (2.6)$$

st mingi konkreetse faasi pingelang on seotud ainult selle faasi vooluga, võrdsete faasiimpedantside $Z_L = Z_d - Z_m$ kaudu, ning kuna $I_b = a^2 * I_a$ ja $I_c = a * I_a$ siis mainitud sümmeetrilise talitlusi saab arvutada ühefaasilise asenduse alusel, mis võimaldabki teostada 3f võrgu püsitalitluse arvutusi 1f ahela meetoditega. Asümmeetrilise talitluste puhul see ei kehti.

.....

Järgnevalt **teisendame võrguelemendi olekuvõrrandi** (ja elemendi mudeli Z_f) faasikoordinaatide (füüsilised koordinaatide) vallast nn järgnevus koordinaatide valda, ilma elementide füüsilise erinevusi arvestanata.

Elementide lõikes ongi kõige iseloomulikumaks liinilõigu mudel kuna siin eksisteerib faaside vahel alati vastastikune induktiivsus.

Võrrandisüsteemi (2.5) teisendus faasisuuruste vallast sümmeetriliste komponentide valda.

Kui V_f faasisuuruste vektor ja V_s - järgnevussuuruste vektor siis vektorite teisendus

$$\begin{aligned} V_s &= A^{-1} * V_f & V_f &= A * V_s \\ \Delta U_f &= Z_f * I_f \end{aligned}$$

asendades

$$\begin{aligned} A * \Delta U_s &= Z_f * A * I_s, \quad \text{korrutame vasakult } A^{-1} \text{-ga, kuna } A * A^{-1} = 1 \text{ siis} \\ \Delta U_s &= A^{-1} * Z_f * A * I_s \end{aligned}$$

$$\text{tähistades} \quad A^{-1} * Z_f * A = Z_s \quad (2.7)$$

saame liinilõigu **olekuvõrrandi sümmeetriliste komp** vallas

$$\Delta U_s = Z_s * I_s \quad (2.8)$$

kus Z_s -liinilõigu mudel süm komponentide vallas,

Teisendus (2.7) on võrguelemendi mudeli Z_f teisendus faasikoordinaatidest sümmeetrilistesse koordinaatidesse Z_s .

Seejuures passiivelementide struktuuri teisendus $Z_f \Rightarrow Z_s$ saadakse kujul (2.9)

$$Z_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Z_d & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_d & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_d \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} Z_d - Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_d - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_d + 2Z_m \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Zs struktuur (2.9) näitab et Fortescue teisendus teisendab sümmeetrilise maatriksi Zf süm komp. vallas diagonaalmatriksiks Zs, mille diagonaali elemendid kujutavad liinilõigu järgnevusimpedantse

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_d - Z_m \\ Z_2 &= Z_d - Z_m \\ Z_0 &= Z_d + 2Z_m \end{aligned} \quad (2.10)$$

Näeme et passiivielementidel $Z_1 = Z_2$; $Z_0 > Z_1$ ning oleneb võrgu neutraali maandusest ja muudest asjaoludest.

Teostades teisenduse Zf-le struktuuriga (2.4) saadakse Zs -ks samuti diagonaalmatriks, kuid erinevate diagonaalelementidega st järgnevusimpedantsidega, seejuures $Z_1 \neq Z_2$ (2.11).

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_d + a^2 Z_{mp} + a Z_{mv} \\ Z_2 &= Z_d + a Z_{mp} + a^2 Z_{mv} \\ Z_0 &= Z_d + Z_{mp} + Z_{mv} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Seega võrguelementide esialgsed sümmeetrilised faasiimpedantside maatriksid teisenevad mõlemal juhul sümmeetriliste komp vallas diagonaalmatriksideks, ning võrguelementide olekuvõrrand teiseneb kujult 2.5, süm komponentide vallas kujule 2.12

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= Z_1 I_1 \\ \Delta U_2 &= Z_2 I_2 \\ \Delta U_0 &= Z_0 I_0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

st omavahel seotud kolme võrrandi süsteem taandub uues koordinaatide süsteemis kolmeks omavahel mitteseotud võrrandiks.

Põhijäreldused:

- sümmeetrilise elemendi järgnevuste võrrandid (järgnevuskoordinaatide vallas) ei ole omavahel seotud, mis tähendab et järgnevuste pingelangud ja voolud selle elemendi piires ei ole omavahel seotud (ka asümmeetrilise talitluse korral).
- sümmeetrilise võrguelemendi päri- vastu- ja nulljärgnevusaseskeemid ei ole omavahel seotud, st et järgnevusmudel koosneb kolmest mitteseostatud järgnevusahelast (va ebasümmeetria koht)

Eelnevast nähtub ka süm. komp. kasutamise mõte, kuna võrguelemendid ehitatakse nii et mitterikkis olekus saab neid lugeda sümmeetrilisteks siis kõikides mitterikkis elementides on järgnevused eraldatud, ning võrguosa elementide järgnevuste aseskeemid saab ühendada võrguosa järgnevusaseskeemideks mis on seotud ainult rikkekohtades, tulemusena arvutus ja analüüs lihtsustuvad.

3. Võrguelementide modelleerimine faasi ja järgnevussuuruste vallas , järgnevusparameetrite määramine.

Üldist

Põhilised võrguelementide liigid on generaatorid (pöörlevad masinad) , liinid, transformaatorid, ja tarbijad mis on füüsikaliselt väga erinevad objektid kuid ühiseks omaduseks see et

- faasisuuruste vallas, mitterikkis elementide mudeliks sümmeetrilised faasiimpedantside maatriksid (mittediagonaalsed), faaside olekuvõrrandid omavahel seotud.
- järgnevussuuruste vallas elementide mudelid on diagonaal maatriksid millede diagonaalelemendid on vastava võrguelemendi järgnevusimpedantsid, erinevate järgnevuste võrrandid mitterikkis elementis ei ole omavahel seotud.

Kuna SK meetod ja põhimõtted on käesoleval ajal võrgu kirjeldamise põhimeetod siis võrgu mudelid (alati olemas) kujutavad endast võrgu päri (**pj**) , **vastu (vj)** ja nulljärgnevusmudelite (**nj**) kogumit. Sümmeetriliste talitluste analüüs toimub võrgu **pj** mudelil.

Seega võrgu modelleerimise esimene põhiülesanne on võrguelementide järgnevusparameetrite määramine ja teine võrgu järgnevus mudelite=aseskeemide koostamine.

Võrguelementide parameetreid saab määrata nii arvutuslikult kui ka mõõtmiste teel.

Reaalselt toimub see erinevatel võrguelementidel erinevalt,

pöörlevatel masinatel ja transformaatoritel toimub järgnevusparameetrite määramine tehase passiandmete alusel,

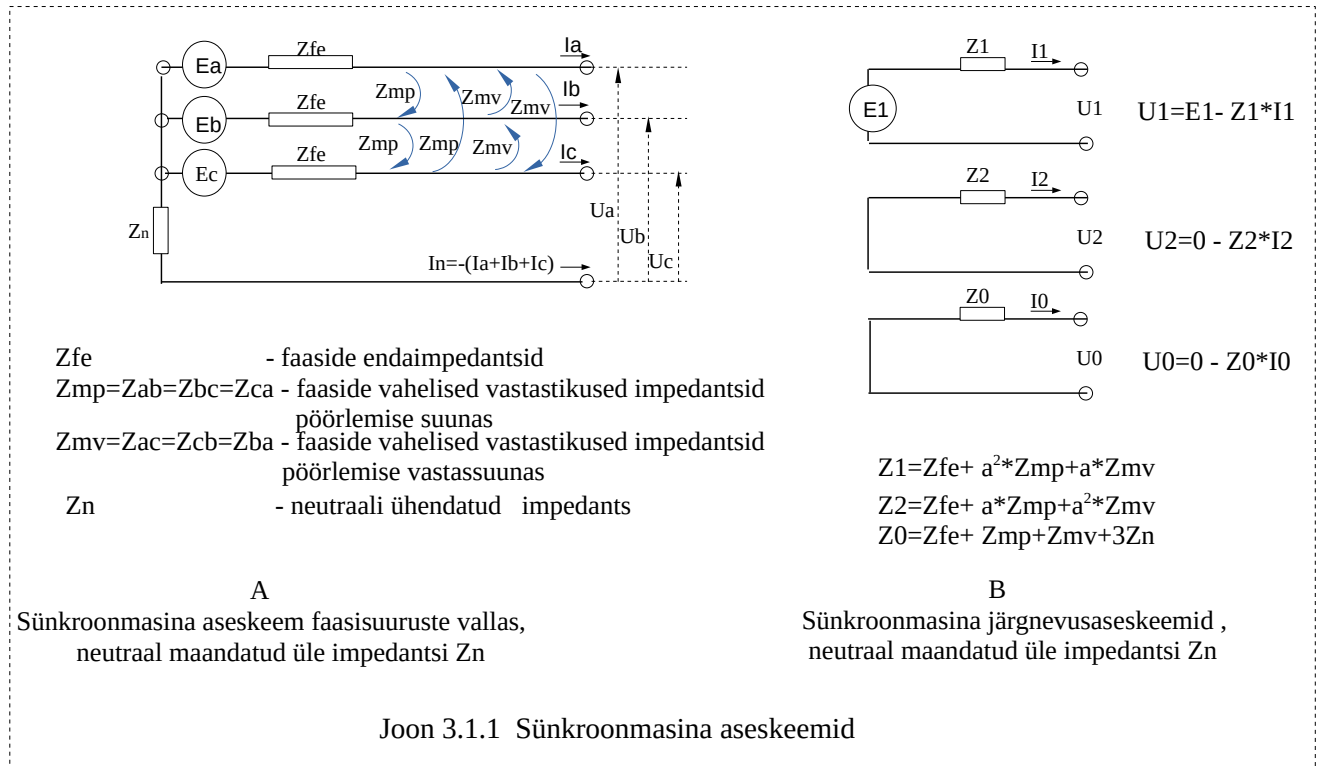
liinielemendidest õhuliinidel määratakse parameetrid arvutuslikult, kaabelliinidel kaablite passiandmete ja liini konstruktiivsete parameetrite alusel arvutustega.

Järgnevalt vaatleme võrguelementide järgnevusmudelite kujunemist ja järgnevusparameetrite määramiste konkreetsemalt

Mudeli koostisosadeks on üldjuhul on skeem ja parameetrid.

3.1 Sünkroonmasina mudel faasi- ja järgnevuskoordinaatides .

Sünkroonmasina aseskeem faasisuuruste vallas vt joon 3.1.1 A



Sünkroonmasina olekuvõrrand faasikoordinaatides

$$\mathbf{U_f} = \mathbf{E_f} - \mathbf{Z_f} \cdot \mathbf{I_f} \quad (3.1.1)$$

kus $\mathbf{U_f}$ - klemmipinged

$\mathbf{E_f}$ – masina el.motoorne jõud, sümmeetriline ka võrgu asümmeetrilise talitluse puhul

$\mathbf{I_f}$ - faasivoolud

$\mathbf{Z_f}$ – sünkroonmasina impedantsmaatriks (mudel) faasisuuruste vallas (vastavalt aseskeemile A)

$$\mathbf{E_f} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.1.2)$$

$$\mathbf{Z_f} = \begin{bmatrix} Z_{fe} & Z_{mp} & Z_{mv} \\ Z_{mv} & Z_{fe} & Z_{mp} \\ Z_{mp} & Z_{mv} & Z_{fe} \end{bmatrix} \quad (3.1.3)$$

kus Z_{fe} – faasi endaiimpedantsid

Z_{mp} – vastastikused impedantsid pöörlemise suunas

Z_{mv} – vastastikused impedantsid pöörlemise vastasuunas

Nagu eespool mainitud sellise tsükliliselt sümmeetriline maatriksi $\mathbf{Z_f}$ Fortescue teisendusel tekib diagonaalne järgnevuimpedantside maatriks $\mathbf{Z_s}$

$$\mathbf{Z_s} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.1.4)$$

$$\begin{aligned}
 \text{kus} \quad Z1 &= Z_{fe} + a^2 Z_{mp} + a Z_{mv} \\
 Z2 &= Z_{fe} + a Z_{mp} + a^2 Z_{mv} \\
 Z0 &= Z_{fe} + Z_{mp} + Z_{mv} + 3Z_n
 \end{aligned} \tag{3.1.5}$$

Seega järgnevused on eraldatud (3.1.4), kuid võrrelduna võrgu passiivelementidega on erinevuseks see et $Z1 \neq Z2 \neq Z0$

Olekuvõrrand järgnevuskoordinaatides

$$\begin{aligned}
 U1 &= E1 - Z1 \cdot I1 \\
 U2 &= 0 - Z2 \cdot I2 \\
 U0 &= 0 - Z0 \cdot I0
 \end{aligned} \tag{3.1.6}$$

või maatrikskujul

$$U_s = E_s - Z_s \cdot I_s \tag{3.1.7}$$

kusjuures $E1 = E_a$, $E2 = 0$ ja $E0 = 0$, sest E_f on süm. vektorsüsteem ja siit ka see, et emj esineb ainult võrgu pärijärgnevusaseskeemis.

Tehniliselt korras sünkroonmasinate emj-de vektorsüsteem jääb summeeriliseks võrgu kõigi asümmeetriliste talitluste puhul

Sünkroonmasina järgnevusmudel joonisel 3.1.1 B

Sünkroonmasina järgnevusparameetrite määramine.

Lühis tekitab võrgus elektromagnetilise siirdeprotsessi (ka elektromehhaanilise) st lühisvoolud selle käigus muutuvad ning täpne lühisvoolude (kui protsessi) arvutus tähendaks võrgu modelleerimist dif võrrandite tasemel, mis reaalseks arvutusteks ei ole sobiv.

Praktilisteks arvutusteks asendatakse protsess selle kirjeldusega üksikute oluliste ajahetkete jaoks, tulemusena saadakse käsitus algebralistes võrrandites, mis on võrdväärne püsitalitluse arvutusega.

Süsteemi elementideks mis põhjustab voolude ajalise muutuse on sünkroonmasin (generaator) mille parameetrid peale lühise tekkimist muutuvad (staatilistel elementidel ei muutu). Sünkroonmasina lühise käsitlemisel eristatakse kolme parameetrite komplekti, need on

a. ülimööduvad lühis parameetrid E'' , X_d'' mis iseloomustavad summutusmähistega masinat lühis tekkimise momendil,

b. mööduvad lühis parameetrid E' , X_d' mis iseloomustavad summutusmähisteta masinat lühis tekkimise momendil,

c. sünkroonparameetrid E , X_d mis iseloomustavad masinat püsilühise olekus

Sünkroonmasina parameetrikomplektide valikuga ongi võimalik valida lühisvoolude arvutuse eesmärgiks valitud aja momenti. Üksiku generaatori või ühesuguste gen. grupi käitumist on võimalik modelleerida ka täpsemalt, lähtudes vajalikust aja momendist (RK lühisvoolude kontrollid)

Sünkroonmasina konkreetsed **järgnevusparameetrid** leitakse passiivandmete alusel, seejuures nagu mainitud pärijärgnevuspaarameetreid olenevalt arvutuse eesmärgist on kolm komplekti:

$$E1 = E'', X1 = X_d'' \text{ või } E1 = E', X1 = X_d' \text{ või } E1 = E, X1 = X_d$$

kus E'' , E' , E - vastavalt ülimööduv, mööduv, sünkroonne emj, arvutatakse ergutussüsteemi tüübi ja koormatuse alusel

X_d'' , X_d' , X_d - vastavalt ülimööduv, mööduv, sünkroonne piki reaktants, generaatori passiivandmetest

Ülimööduvad suurused vastavad summutusmähistega generaatori parameetritele lühise tekkimise momendil. Lisaks, lühise tekkimise moment $t=0+$ (voolud) on ka kõige täpsemini arvutatav ning kõige laiemalt vajalik kuna määrab üldiselt kõige suuremad voolud I_k'' (perioodilised ja aperioidilised komponendid) ja on vajalik elementide erinevate taluvuspiiride määramiseks.

Suhteliselt täpselt saab määrata ka püsilühisvoolu $I_{k\infty}$, mis tekitab peale peale mööduvprotsesside sumbumist ajakonstandiga T' (~võetakse ka 30perioodi). Seega RK seisukohast tähtsate ajamomentide 0.2-1.5s lühisvoolude määramine on seotud suurte lihtsustustega, seega ka suure veaga. Ühe generaatori (või ühesuste gen. grupi) puhul on ajalist kulgu võimalik määrata ka täpsemalt valemiga. Täpsemalt vt K4.

Teisiti, lühisvoolu muutused ajas on määratud pärijärgnevusparameetrite käitumisega ajas, vastu ja nulljärgnevusparameetrid ajas ei muutu.

vastujärgnevus:

X_2 - võetakse passiandmetest või arvutatakse nende alusel (turbogen. $X_2 \sim 1.22 X_d''$)

$X_2 = (X_d'' + X_q'')/2$ -summutusmähistega gen.

nulljärgnevus:

$X_0 < X_d''$, seega gen otse maandada ei saa, sest siis $I_{k1} > I_{k3}$, (gen arvutatud taluma I_{k3}), siit tuleneb et generaatori neutraal maandatakse vajadusel üle suureoomilise takistuse, neutraali maandusviis sõltub kasutatud staatorimähise maaühenduskaitse põhimõtetest jne.

3.2 Kolmefaasilise liinilõigu mudelid ja parameetrid

Püsitalituses ning idealiseeritud juhul (sümmeetria jne) toimuvad el. magnetilised protsessid ainult liini faasides ning püsitalitluse elektriliste protsesside põhiseos on seos faasipingete (pingelangude) ja faasivoolude vahel, mille üldkuju liinilõigu p-q jaoks (3f ahela puhul maatriksavaldis) on:

$$U_{fp} = U_{fq} + Z_f \cdot I_f \Rightarrow U_{fp} - U_{fq} = \Delta U_f = Z_f \cdot I_f \quad (3.2.1)$$

kus U_{fp} , U_{fq} – sõlmede p ja q faasipingete vektor

ΔU_f – faasipingelangude vektor

I_f – faasivoolude vektor

Z_f – faasiimpedantside maatriks (3x3) - otsitav ekvivalent

Tehniliselt ja ehituslikult on küll kaks erinevat 3.f liinielemendi liiki, õhuliinid ja kaabelliinid, kuid peale vajalikke teisendusi omavad need ühesuguse struktuuriga mudeleid (3x3 maatriks).

Antud juhul lähtume õhuliinidest ja vaatleme esialgse mudeli mainitud klassikalisele kujule (2.2; 2.3) teisendamise üldkäiku.

Õhuliinidel võrrelduna teiste võrgu põhielementidega esineb see oluline omapära, et sageli on üksikud liinid või liinigrupid omavahelises magnetilises sidestatuses.

Tuleneb see sellest, et kõrgepinge õhuliinid kulgevad sageli ühises liinikoridoris või on ehitatud mitme ahelalistena st asuvad üksteisele nii lähedal et nende vahel eksisteerib magnetiline sidestatus.

Antud juhul, mudeli käsitlemisel, vaadeldakse selguse mõttes liini **eraldiseisvana** ning vastastikused magnetilisest seotusest tulenevaid probleeme vaadeldakse hiljem eraldi, võrgu mudeli koostamisel.

Konstruktiivselt õhuliin (efektiivselt maandatud kõrgepingevõrgus) on element mis sisaldab peale faasi juhtide (lõhestatud või mitte), mitmesuguse konstruktsiooniga äikesekaitsetrosse ja „maad” voolu tagasi juhtmena. Liini mudeli kõige detailsem kirjeldus ongi ahelate taseme kirjeldus, sisaldades üksikute juhtide parameetreid ja asendigeomeetriat, ning üldeesmärk on saada sellise tehnilise süsteemi (=liin) ekvivalent (mudel) elektriliste protsesside kirjeldamiseks.

Nagu liini üldkirjeldusest võib järeldada on esialgses liinilõigu võrrandis muutujaid rohkem kui kolm faasimuutujat, näiteks lisaks trossid + maa (tagasivool) jne. Kuid need lisamuutujad on võimalik mitmel viisil elimineerida, seejuures on võimalik seda teha mitmes etapis, nii et tekivad ka vahepealsed mudelid.

Teisenduste selguse mõttes on loobutud liini mudeli nn põikielementidest – mahtuvused ja isolatsiooni juhtivused, Fortescue teisendus töötab ka põiki elementide olemasolul asendades füüsilised mahtuvused järgnevusmahtuvustega. Antud juhul tähendab see seda et me käsitleme liini nn lühikese liinina, mis on lubatud lihtsustusena käsitlarvutustes, arvutusprogrammides on põikielemendid arvesse võetud ning saab modelleerida nii keskpikki kui pikki liine piisavalt täpselt.

Antud juhul (Joon 3.2.1) lähtutakse kahest vahemudelist,

- a. Joon 3.2.1 A -lähtemudel peale trosside võrrandite elimineerimist (või trosside puudumisel) - ekvivalentse tagasijuhtmega skeem.

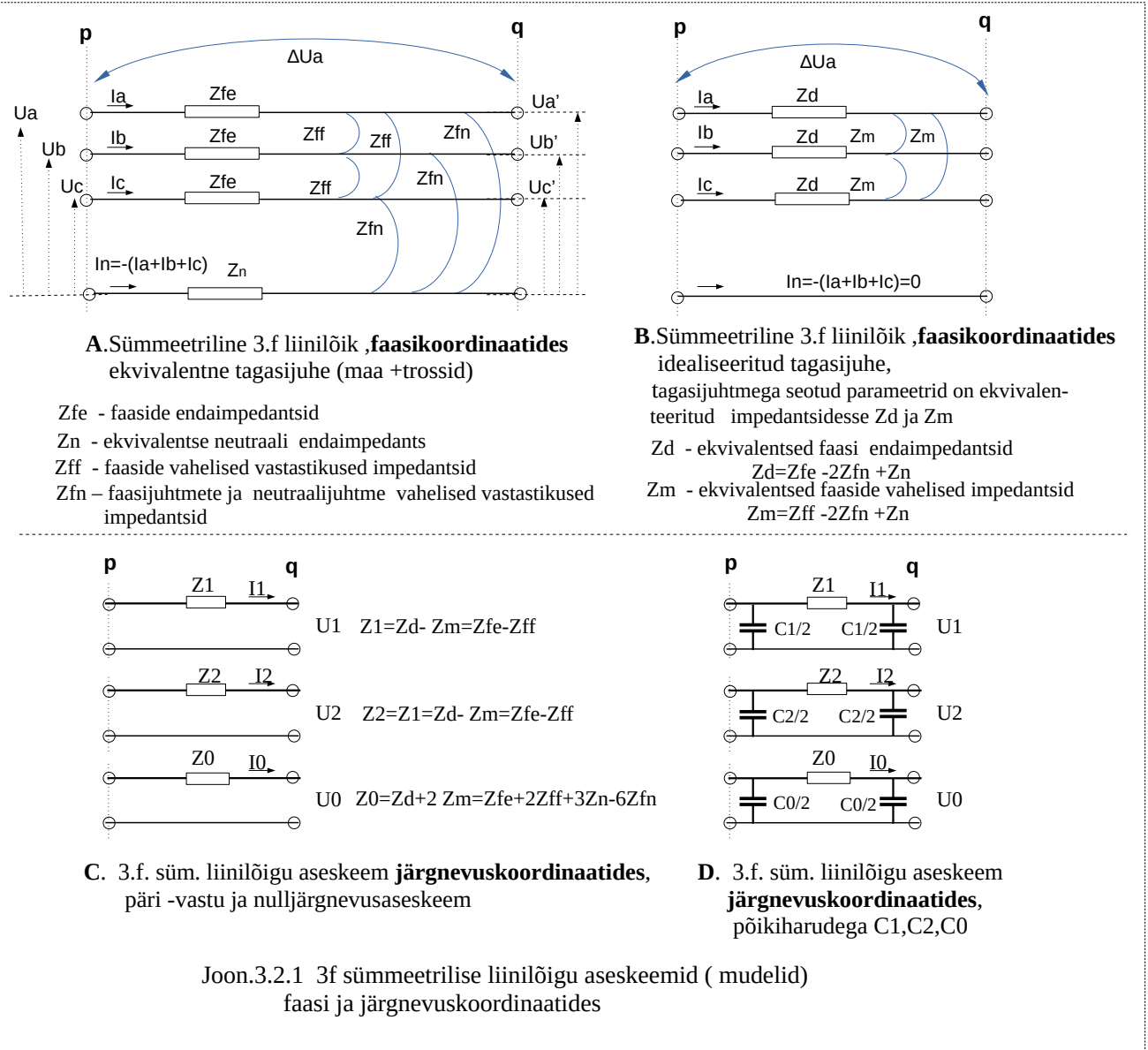
Seda ahelate mudelit võib lugeda ka trossita liini mudeliks, tagasivooluga maa kaudu, kus „maa” on asendatud ekvivalentse tagasijuhtmega (Carsoni käsitluses).

Vastavalt joonisele on igal faasil endaimpedants Z_{fe} ja vastastatikune impedants teiste faasidega Z_{ff} ja ekvivalentse tagasijuhtmega (neutraaliga) Z_{fn} , lisaks ekvivalentse tagasijuhtme endaimpedants Z_n . Sellisel käsitlusel mudeliks Z_f on 4x4 maatriks.

- b. Joon 3.2.1 B -peale ekvivalentse tagasijuhtme elimineerimist (kasutades seost $I_n = -(I_a + I_b + I_c)$), saadud faaside komposiitparameetrid Z_d ja Z_m sisaldavad kõiki trosside ja maaga seotud mõjusid ning struktuur

$$\begin{aligned} Z_d &= Z_{fe} + Z_n - 2Z_{fn} \\ Z_m &= Z_{ff} + Z_n - 2Z_{fn} \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

Antud juhul Z_d on kontuuri „faas - tagasijuhe” endaimpedants ja Z_m kahe kontuuri „faas-tagasijuhe” vastastatikune impedants



Joon.3.2.1 3f sümmeetrilise liinilõigu askeemid (mudelid)
faasi ja järgnevuskoordinaatides

Sõltumata mainitud detailidest on **transposeeritud liini** impedantsmaatriks Z_f (3.2.3) peale elimineerimisteisendusi kujunenud komposiitimpedantside suhtes sümmeetriline 3×3 maatriks, mis oli ka aluseks eespoolteostatud koordinaatide teisendamisel ()

$$Z_f = \begin{bmatrix} Z_d & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_d & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_d \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

Peale koordinaatide teisendust $Z_f \rightarrow Z_s$, (järgnevuskoordinaatide vallas) on Z_s diagonaalmaatriks

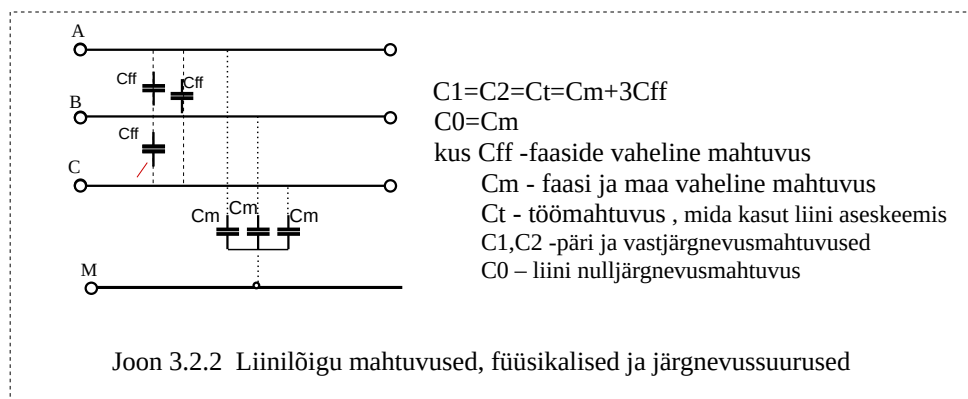
$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

elementidega

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_d - Z_m = Z_{fe} + Z_n - 2Z_{fn} - Z_{ff} - Z_n + 2Z_{fn} = Z_{fe} - Z_{ff} = Z_L \\ Z_2 &= Z_d - Z_m = Z_{fe} - Z_{ff} = Z_L \\ Z_0 &= Z_d + 2Z_m = Z_{fe} + Z_n - 2Z_{fn} + 2(Z_{ff} + Z_n - 2Z_{fn}) = Z_{fe} + 2Z_{ff} + 3Z_{fn} - 6Z_{fn} \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

Tulemusena liinilõigu **järgnevusmudel** koosneb kolmest erinevast järgnevusahela osast, nagu näha. Joon 3.2.1 C , Joon 3.2.1 D on toodud põikielementidega järgnevusaseskeem, kusjuures mahtuvuste faasi ja järgnevus mahtuvuste seosed joonisel joon 3.2.2

Eelnev kehtib nii õhu kui kaabelliinide kohta .



Liinide järenevusparameetrite määramine.

Nagu eespool nägime on iseseisva liinilõigu järenevusmudeliks selle järenevusimpedantside $\{Z1, Z2, Z0\}$ kogum, seejuures $Z1=Z2=Z_L$ st et päri ja vastjärenevusimpedantsid langevad kokku faasisuuruste vallas sümmeetriliste talitluste arvutusel kasutatava liini-impedantsiga Z_L , ning seega järenevusimpedantside komplekt määrab liini parameetrid ka faasisuuruste vallas .

Üldjuhul kui liinid moodustavad // selt kulgevate liinide grappe (suurte konstruktiivandmete hulkadega) on liiniparameetrite määramine keerukas ja tömahukas probleem.

Arvutuste teostamiseks kasutatakse spetsiaalseid arvutusprogramme, lihtsamatel juhtudel on võimalik teostada ka käsitsisarvutusi seejuures on lubatud teatud lihtsustused.

Magnetiliselt sidestatud liinide grupi puhul, järenevusparameetrite vallas

- liinide vastastikused **pj** ja **vj** impedantsid ~ elimineeruvad (muutuvad väikesteks), seega liinide grupis **pj** ja **vj** aseseemid ei ole omavahel seotud.
- liinide vastastikused **nj** impedantsid Z_{0m} ei kao ja omavad nulljärenevusparameetrite arvutusel olulist tähtsust. Seega magnetiliselt sidestatud liinilõikude **nj** aseseem haarab kogu liinigrupi ning põhiraskuseks ongi adekvaatse **nj** aseseemi tegemine.

Füüsikaliselt on induktiivsuse olemus seotud kogu voolukontuuriga, seepärast ka arvutamiseks sobib paremini joonisel aseseemile B vastav kuju, st kuju kus faasi endaimpedants Z_d on kontuuri faas-maa (f-m) impedants ja vastastikune impedants Z_m on f-m kontuuride vaheline vastastikune impedants, ning millede kaudu

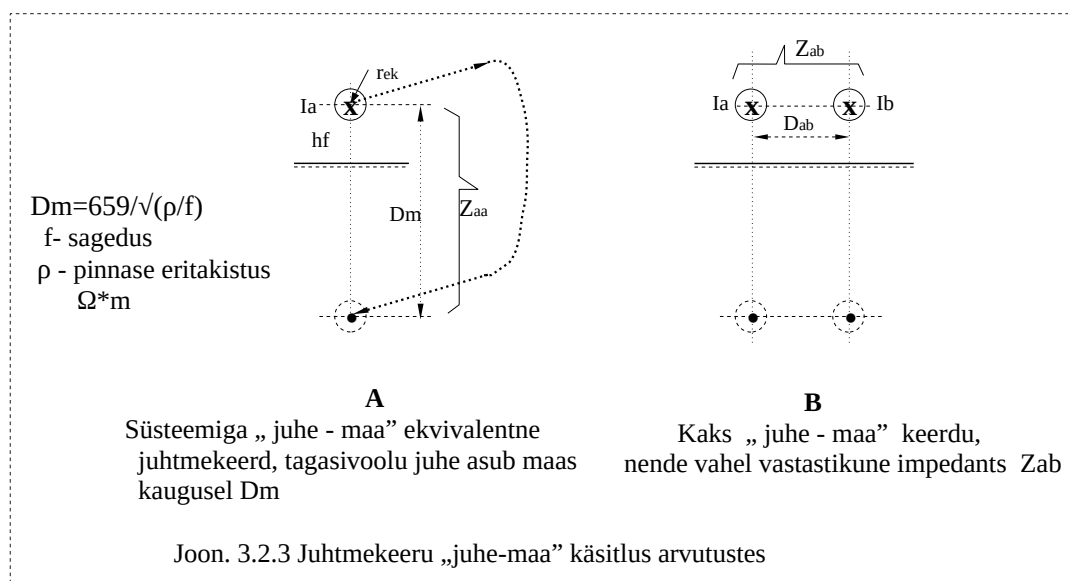
$$\begin{aligned} Z1=Z2 &= Z_d - Z_m \\ Z0 &= Z_d + 2Z_m \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

Arvutuse aluseks ongi faas-maa (f-m) voolukontuuri (=juhtmekeeru) enda ja vastastikused impedantsid Z_d ja Z_m , ning nende alusel leitakse ka $Z1, Z2, Z0$

Erinevalt klassikalistest kontuuri impedantsiarvutustest, liinide puhul kontuur f-m sisaldab vooluringi osana maad st arvutus kujutab endast osaliselt väljateooria ülesannet.

Liini f-m impedantsi arvutamise põhimõtteline lahendus on antud **Carsoni poolt**, ning selle järgi tegelik juhe-maa ahel asendatakse **induktiivsuse mõttes ekvivalentse** juhtmekeeruga, mis koosneb faasijuhtimest ja ekvivalentsest tagasijuhtimest, joonisel 3.2.3 skeem A. Vastavalt Carsoni käsitlusele tagasijuhe asub pinnases kaugusel D_m faasijuhtimest .

K: [Carsoni käsitlusest](#)



D_m sõltub voolu sagedusest f (Hz) ja pinnase eritakistusest ρ [$\Omega \cdot m$]

$$D_m = 659 \cdot \sqrt{\rho / f} \quad (3.2.7)$$

Mõned pinnase eritakistused:

mustmuld - $\rho = 10-80$ [$\Omega \cdot m$]
 savi - $\rho = 50-100$ [$\Omega \cdot m$]
 liivad - $\rho = 60-1000$ [$\Omega \cdot m$]

Sageli võetakse $\rho = 100$ [$\Omega \cdot m$] millele vastab $D_m = 932m$ (ligikaudsetes arvututes ka $D_m = 1000m$). Ekvivalentse juhtmekeeru **a** (juhe-maa) induktiivtakistus X_{aa} (50Hz)

$$X_{aa} = 0.145 \cdot \lg(D_m / r_e) \text{ [}\Omega / km\text{]} \quad (3.2.8)$$

kus $\lg$ – kümnendlogaritm, sageli kasut nat. logaritmi - $\ln$ siis koef 0.063

r_e – faasijuhtme ekvivalentne raadius, ekv raadiuse kasutamisel loetakse juhtmesisene magnetväli puuduvaks, kogu ahelduv väli on välisväli. Kui arvutatakse tegeliku raadiusega siis X_{aa} avaldis kujuneb kaheliikmeliseks, lisaliikmeks nn sisemine ind takistus.

$$r_e = k \cdot r \quad (3.2.8a)$$

kus r - juhtme tegelik raadius

k - koef mis sõltub juhtme tüübist

$k = 0.788$ – ühekiuline mittemagnetiline materjal

$k = 0.95$ – teras al. juhtmed

kui pole täpselt teda võetakse $k = 0.9$, sageli antakse r_e tootja andmetes.

Induktiivtakistuse vähendamiseks kasutatakse nn lõhestatud faase (mitu juhet faasis). Tavaliselt on lõhestatud faasi juhtmed ühesugused ja asuvad üksteise suhtes sümmeetriliselt, Näit joon Üldjuhul ja eriti lõhestatud faaside puhul kasutatakse ekvivalentse raadiuse tähist GMR (geometric mean radius).

$$\text{kui 1 juhe faasis} \quad GMR = r_e \quad (3.2.8b)$$

kui 2 juhet faasis üksteisest kaugusel d siis

$$GMR = \sqrt{(r_e \cdot d_{12})}$$

kui 3 juhet faasis, sümmeetriliselt kugusel d (juhid võrdhaarse kolmnurga tippudes) siis

$$GMR = \sqrt[3]{(r_e \cdot d^2)}$$

kus r_e – lõhestatud grupi ühe juhtme ekvivalentne raadius

Faas-maa kontuuri **a** aktiivtakistus R_{aa} on faasijuhtmete aktiivtakistuse R_f/n ja ekvivalentse tagasijuhtme (kontuuri maa osa) aktiivtakistuste R_m summa

$$R_{aa} = R_f/n + R_m \quad (3.2.9a)$$

kus n - juhtmete arv faasis

Vastavalt Carsoni käsitlusele ekvivalentse tagasijuhtme aktiivtakistus R_m sõltub ainult sagedusest f , $f = 50Hz$ puhul

$$R_m = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \approx 0.05 \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (3.2.9b)$$

Eelnevat arvestades

f-m kontuuri a impedants

$$Z_{aa} = R_f/n + R_m + j0.145 \cdot \lg(D_m/GMR) \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (=Z_d) \quad (3.2.10)$$

kus R_f/n – faasi aktiivtakistus $[\Omega/\text{km}]$, vastavalt juhi materjalile, ristlõikele ja juhtmete arvule faasis.

f-m kontuuride a ja b vastastikune impedants

$$Z_{ab} = R_m + j0.145 \cdot \lg(D_m/D_{ab}) \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (=Z_m) \quad (3.2.11)$$

kus D_{ab} – kontuuride (faaside) vaheline kaugus

3f liini (tagasivooluga maa kaudu) faaside vaheline vastastikune impedants **Z_{mk}**, on kolme // kulgeva f-m kontuuri keskmine **Z_{mk}**

$$Z_{mk} = R_m + j0.145 \cdot \lg(D_m/D_k) \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (3.2.12)$$

$$D_k = \sqrt[3]{(D_{ab} + D_{bc} + D_{ca})} = \text{GMD} \quad (3.2.12b)$$

kus $D_k = \text{GMD}$ – keskmine faaside vaheline geomeetriline kaugus (geometric mean distance)

Lõhestatud juhtmete puhul GMD täpsed avaldise on käsitsi arvusteks keerukad ja seepärast kasutatakse avaldist (3.2.12b) kus D_{ab}, D_{bc}, D_{ca} on vastavate lõhestatud juhtmegruppide tsentrite vahekaugused.

Kasutades Z_1 ja Z_0 struktuurseid avaldise **0** saadakse **Z₁** ja **Z₀** põhiavaldised (juhuks kui äikesekaitse trossid puuduvad)

$$Z_1 = Z_d - Z_{mk} = Z_f - Z_{ffk} = R_f/n + j0.145 \cdot \lg(\text{GMD}/GMR) \quad (3.2.13)$$

$$Z_0 = Z_d + 2Z_{mk} = Z_f + 2Z_{ffk} = R_f/n + 3R_m + j0.435 \cdot \lg(D_m/GMR_o) \quad (3.2.14)$$

$$= R_f/n + 0.15 + j0.435 \cdot \lg(D_m/GMR_o) \quad (3.2.14b)$$

$$\text{GMR}_o = \sqrt[3]{(GMR \cdot \text{GMD}^2)}$$

kus GMR ja GMD – 3f liini faaside vastavad suurused, ning GMR_o -i tuleb mõista kui 3f liini GMR -i **nj** **voolule** (vool mis läbib kolme faasijuhet ühes suunas ja seejärel kulgeb maas tagasi.

.....
Äikesekaitse trossid ei mõjuta liini $Z_1 = Z_2$ -te, kuid mõjutavad liini **nj** impedantsi Z_0 .

Tross kujutab endast täiendavat juhe-maa kontuuri (3.2.10) impedantsiga Z_{T0}

mis on seotud faasijuhtidega vastastikuse impedantsi Z_{T-L0} kaudu (trossis vool $I_T = 3I_{T0}$ seetõttu x3)

$$Z_{T0} = 3R_T + 0.15 + j0.435 \cdot \lg(D_m/r_{eT}) \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (3.2.15)$$

kus r_{eT} - trossi ekvivalentne raadius

Kui liinil 2 trossi siis asendatakse need ekvivalentsega mille ekviv raadius r_{e2T} , ning arvutatakse avaldisega (3.2.16)

$$Z_{T0} = 3R_T/2 + 0.15 + j0.435 \cdot \lg(D_m/r_{e2T}) \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (3.2.16)$$

$$r_{e2T} = \sqrt{(r_{eT} \cdot D_{T12})} \quad (3.2.16b)$$

kus D_{T12} - trosside T_1 ja T_2 vaheline kaugus

$$Z_{T-L0} = 0.15 + j0.435 \cdot \lg(D_m/D_{kT-L}) \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (3.2.17)$$

kus D_{kT-L} - trossi ja liinijuhtmete vaheline keskmine kaugus

$$D_{kT-L} = \sqrt[3]{(D_{aT} \cdot D_{bT} \cdot D_{cT})} \quad (3.2.17b)$$

kui liinil 2trossi siis

$$D_{kT-L} = \sqrt[6]{(D_{aT1} \cdot D_{bT1} \cdot D_{cT1} \cdot D_{aT2} \cdot D_{bT2} \cdot D_{cT2})} \quad (3.2.17c)$$

3f liini nj impedants trosside olemasolul Z_{0T} (tuletuseta)

$$Z_{0T} = Z_0 - (Z_{T-L0})^2 / Z_{T0} \quad (3.2.18)$$

kus Z_{0T} - liini nulljärgnevusimpedants trosside olemasolul

Z_0 - liini nulljärgnevusimpedants trosside puudumisel (avaldis 3.2.14)

Seega trossid vähendavad liini **nj** impedantsi, ning mida parema juhtivusega või ligemal faasijuhtmetele need asuvad seda rohkem.

.....

Näide:

Õhuliini järgnevusparameetrite arvutus.

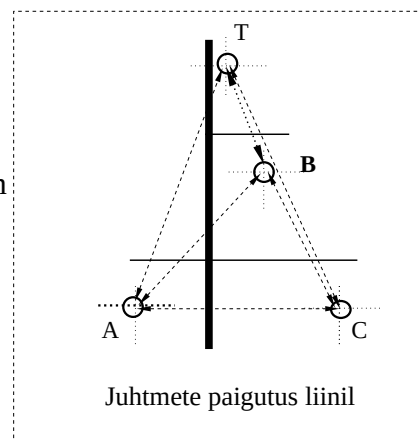
Aluseks üheahelaline 110kV liin, valguskaabel trossiga,

juhtmete paigutus vt eskiis,

juhe AC-240 (üks juhe faasis): $D=21,6\text{mm}$; $R_{AC}=0.132\ \Omega/\text{km}$

pinnase eritaistus $\rho=100\ [\Omega\cdot\text{m}]$ (savi pinnas)

tross OPGW -48: $D=15.5\text{mm}$; $R_{DC}=0.365\ \Omega$

**A. liin ilma trossita (ilma trossi mõju arvestamata)**

$$\mathbf{X1:} \quad Dk = \sqrt[3]{(D_{ab} + D_{bc} + D_{ca})} = \sqrt[3]{(5.0 * 5.5 * 3.4)} = 4.5\text{m} \quad (=GMD)$$

$$r_e = 0.9 * 21,6 / 2 = 9.72\text{mm} \quad (=GMR)$$

$$X1 = 0.145 * \lg 4.5 / 0.00972 = 0.387\ \Omega/\text{km}$$

$$\mathbf{X0:} \quad D_m = 659 * \sqrt{(\rho / f)} = 659 / \sqrt{(100 / 50)} = 932\text{m}$$

$$GMR_o = \sqrt[3]{(r_e * Dk^2)} = \sqrt[3]{(0.00972 * 4.5^2)} = 0.582\text{m}$$

$$X0 = 0.435 * \lg(932 / 0.582) = 1.39\ \Omega/\text{km}$$

$$X0/X1 = 1.39 / 0.387 = 3.59$$

$$\mathbf{Z1} = R_f + jX1 = 0.132 + j0.387\ \Omega/\text{km}$$

$$\mathbf{Z0} = R_f + 3R_m + j1.39 = 0.132 + 0.15 + j1.39 = 0.282 + j1.39 = 1.42 < 78.5\ [\Omega/\text{km}]$$

B. Liin ühe trossiga

$$Z1 = Z2 = 0.132 + j0.387\ [\Omega/\text{km}] \text{ sama mis trossita liinil}$$

Trossi impedants

$$Z_{T0} = 3R_T + 0.15 + j0.435 * \lg(D_m / r_{eT})\ [\Omega/\text{km}]$$

$$r_{eT} = 0.9 * 15.5 / 2 = 7.0\text{mm}$$

$$Z_{T0} = 3 * 0.365 + 0.15 + j0.435 * \lg(932 / 0.007) = 1.25 + j2.23 = 2.56 < 60.7^\circ\ [\Omega/\text{km}]$$

Trossi ja faasijuhtmete vaheline vastastikune impedants

$$Z_{T-L0} = 0.15 + j0.435 * \lg(D_m / D_{k_{T-L}})\ [\Omega/\text{km}]$$

$$D_{k_{T-L}} = \sqrt[3]{(D_{ta} + D_{tb} + D_{tc})} = \sqrt[3]{(6.6 * 3.86 * 7.2)} = 5.68\text{m}$$

$$Z_{T-L0} = 0.15 + j0.435 * \lg(932 / 5.68) = 0.150 + j0.96 = 0.97 < 81.1^\circ\ [\Omega/\text{km}]$$

Trossiga liini nulljärgnevus impedants Z_{0T}

$$\mathbf{Z_{0T}} = Z_0 - (Z_{T-L0})^2 / Z_{T0} = (0.282 + j1.39) - ((0.97 < 81.1^\circ)^2 / 2.56 < 60.7^\circ) =$$

$$(0.282 + j1.39) - ((0.94 < 162.2^\circ) / 2.56 < 60.7^\circ) = \dots 0.37 < 101.5^\circ = \dots -0.074 + j0.36$$

$$= 0.282 + 0.074 + (j1.39 - j0.36) = 0.356 + j1.03 = 1.09 < 70.9^\circ\ [\Omega/\text{km}]$$

$$X0/X1 = 1.03 / 0.387 = 2.66$$

Õhuliinide järgnevusimpedantsid arvutatakse eelpooltoodud viisil liinilõikude konstruktiivandmete alusel. Käesoleval ajal on liinide konstruktiivandmed samuti koondatud spets. andmebaasidesse millelele töötavad vastavad programmid. Programmiliselt arvutatud impedantsid (eriti nulljärgnevusimpedantsid) on loomulikult täpsemad kui käsitsiarvutatud, kuid teatud arvutusteks on käsitsiarvutus vajalik ja piisavalt täpne, veelgi enam perspektiivarvutustes ja projekteerimisel hinnatakse liinide impedantse veelgi lihtsustatumalt näiteks valitakse reaktantsid mitmesuguste valmisarvutatud tabelite või koguni orienteeruvate hinnangute alusel, aktiivtakistused aga juhtmemarkide passiandmete alusel . Andmete õigsust kontrollitakse ka reaktantside suhteväärtuste alusel, näit X_0/X_1 suhted

õhuliinid $X_0/X_1=3.5$ - liin trossideta
 $X_0/X_1=3.0$ - liin raud trossidega
 $X_0/X_1=2.0$ - liin hästi juhtivate trossidega

Eriti suurtes piirides kõigub nulljärnevusreaktantsi väärtus , nagu ka eespool nägime. Täpsuse nõuded olenevad arvutuse eesmärgist, näiteks releekaitse sätestuse arvutusel või kontrollil peab olema kasutada võrgupiirkonna täpne nulljärgnevuskirjeldus, vastasel juhul usaldatavaid tulemusi ei saa.

.....
 Kaabelliinide järgnevusimpedantsid sõltuvad samuti oluliselt liini ehitusest, ning täpsete nulljärgnevusparameetrite saamiseks kasutatakse ka mõõtmisi

3.3. Trafode mudelid faasi- ja järgnevuskoordinaatides .

Trafo on 3.fasiline kahe või rohkema mähisekomplektiga seade mis ühendab erineva pinget ja neutraalirežiimiga võrke ja teostab energiaülekannet nende vahel. Sõltuvalt südamiku konfiguratsioonist ja mähiste faaside ühendusviisist kujunevad trafode omadused oluliselt erinevateks. Südamiku konfiguratsiooni järgi eristatakse 3 sambalisi ja 5 sambalisi trafosid, seejuures 1fasiliste trafode ühendamisel 3.f aasiliseks grupiks, tekkib südamiku konfiguratsioon mis vastab ~ 5 sambalisele konf.-ile.

Trafo mähiste konfiguratsioon.

Mähiste faaside põhiühendusviisid on: täht(Y), kolmnurk (D), siksak(Z), seejuures neid ühendusi on võimalik teha erineval viisil mille tulemusena primaarpoole ja sekundarpoole pingete (voolude) vektordiagrammid võivad olla omavahel pööratud mingi nurga võrra.

Rahvusvaheliselt kokkulepitud viis 3.f trafo mähiste konfiguratsiooni kirjeldamiseks on trafo **lülitusgrupp** (Lgr).

Lülitusgrupi tähistus: IEC standardis on aluseks trafo ülempinge $U_{\text{ü}}$ ja alampinge U_{a} (mitmemähiselistel pingete järgnevus). Alampinge ja keskpinge mähiste pingvektorite nihkenurgad antakse ülempinge suhtes. Seega mähiste põhiühendusviisi tähised järgnevad pinget alanemise suunas, kõige kõrgem pinge on tähistatud suurte tähtedega. Iga komplekti lõpus olev number tähistab alampingepoole pingvektori asendit ülempinge suhtes, number tähistab nurka kella numbrilaua mudelina, näiteks kell 11 tähendab et U_{a} vektor asendis 11 ($U_{\text{ü}}$ alati asendis 12) ning vastav nurk $+30^\circ$

Näide : olgu kolmemähiseline trafo, mille kõrgeima pingega mähis ühendatud tähte väljatoodud neutraaliga (YN), keskpingemähis ühendatud tähte kell 0 (y_0) ja alampingemähis ühendatud kolmnurka, ning mille pingvektori asend ülempinge suhtes kell 11(d11), sellise trafo lülitusgrupp tähistatakse : YNy0d11

Oluline parameeter on veel trafo mähisepaaride vaheline **ülekanalitegur** t_{T} , mida järgnevalt käsitletakse ülempinge ja alampinge nimipingete suhtena (ühesuguselt kas faasi või liinipinged)

$$t_{\text{T}} = U_{\text{ün}} / U_{\text{an}} \quad (3.3.1)$$

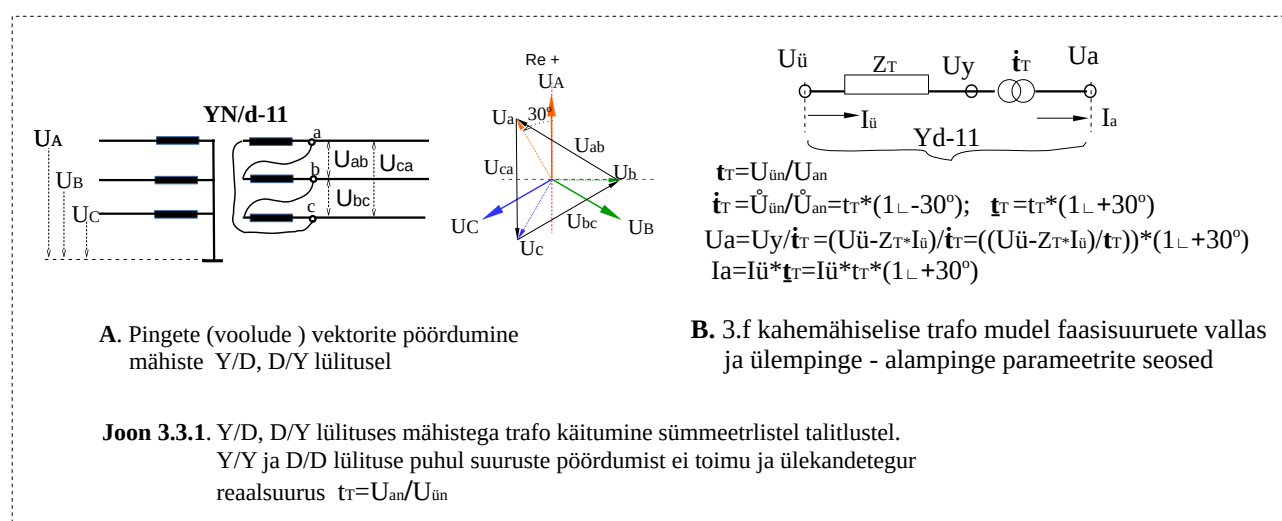
Mähisepaaride Y/D ja Y/Z ühendusviiside puhul toimub pingvektorite pöördumine, meil kasutatakse nende ühendusviiside puhul kellaega 11, mille puhul alampingevektor on ülempingevektorist ees 30° , seejuures pööramise saab ühendada ülekanaliteguriga, mille tulemusena saadakse nn trafo **kompleksne ülekanalitegur** $\dot{t}_{\text{T}}$.

$$\dot{t}_{\text{T}} = \dot{U}_{\text{ün}} / \dot{U}_{\text{an}} = t_{\text{T}} * (1_{\text{L}} - 30^\circ) \quad (\text{Lgr kell 11}) \quad (3.3.2)$$

Alam- ülempinge voolude arvutamisel tuleb $\dot{t}_{\text{T}}$ asendada vastava kaaskompleksiga $\dot{t}_{\text{T}}$

$$\dot{t}_{\text{T}} = t_{\text{T}} * (1_{\text{L}} + 30^\circ) \quad (3.3.3)$$

Olgu näitena toodud (joonisel allpool) kahemähiseline trafo YNd11, pinget vektordiagrammid ja kompleksne ülekanalitegur .



Meie piirkonnas kasutatavad mähisepaaride lülitusgrupid:

Dd; Yy; Dz; kasutavad kellaaega 0 (12) (võimalik ka kellaaeg 6)

Dy; Yd; Yz kasutavad kellaaega 11

Trafo mudel ,

mudeli põhikomponentideks on aseskeem, aseskeemi parameetrid: impedantsid, ülekandetegurid ja lülitusgrupp.

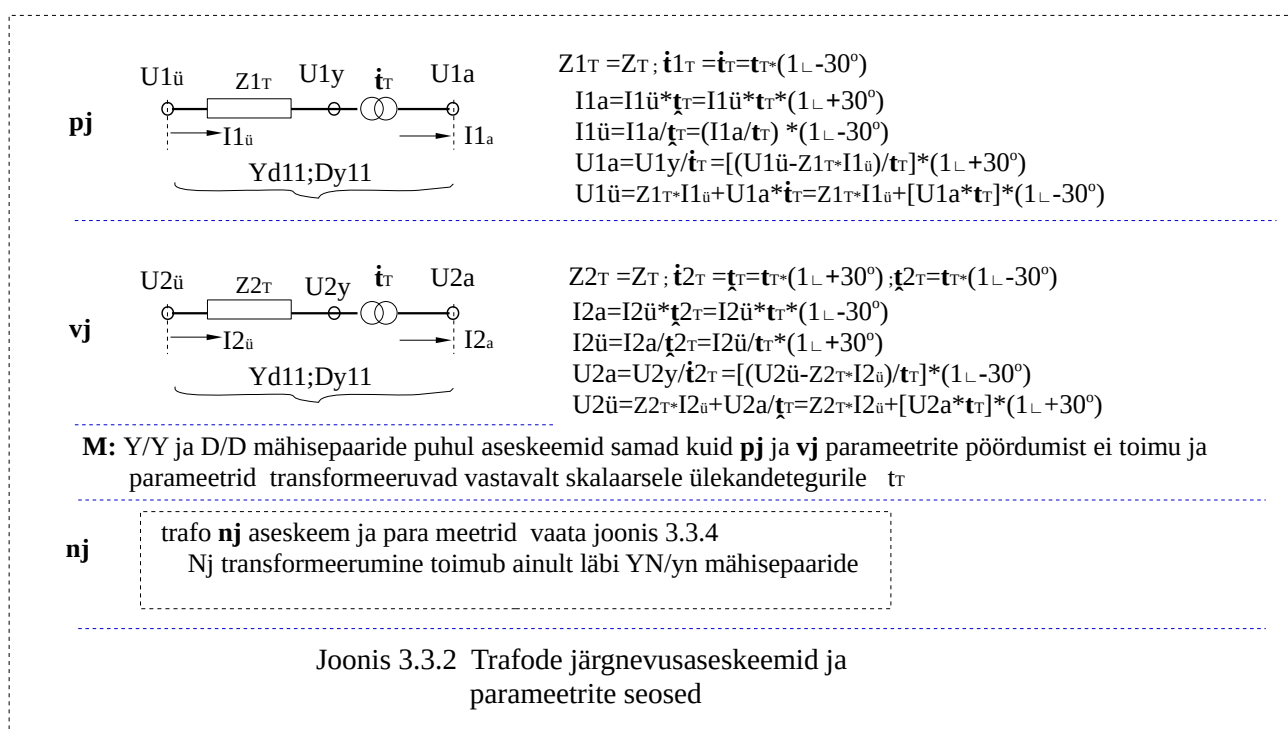
Sümmeetriliste talitluste kirjeldamiseks kasutatakse sageli lihtsaimat trafo (ideaalse) mudelit milleks on ühejooneline aseskeem ning ülem või alampingele taandatud trafo impedants (vektorite pöõret ei võeta arvesse).

Asümmeetriliste talitluste käsitlemisel tuleb lülitusgruppi ilmtingimata silmas pidada, sest mähiste Y/D, Y/Z kombinatsioonide puhul päri ja vastujärgnevussuurused pöõrduvad üksteisele vastassuunas lülitusgrupiga määratud nurga (30°) võrra. Y/y D/d ühenduste puhul päri ja vastujärgnevussuurused ei pöõrdu. Nulljärgnevussuurused läbivad trafot ainult teatud mähise lülituskombinatsioonis (YN/yn ja autotrafo) ja ei pöõrdu.

Trafo mudel järgnevussuuruste vallas lahutub samuti kolmeks mitteseotud järgnevusaseskeemiks nagu teiste sümmeetriliste võrguelementide puhul, seejuures

1. **pj** ja **vj** aseskeemid on sarnased ja impedantsid võõrdsed $Z_1 = Z_2 = Z_T$

ülekandetegurite moodulid on võõrdsed kuid Y/D mähisekombinatsioonide puhul ülekandetegurid on kaaskomplekssed st pöõrduvad vastassuundades. Aseskeemid on sidusad, ülem ja alampinge vahel katkestusi ei teki vt järgnev joonis.



2. **nj** nulljärgnevusaseskeem

nj aseskeemid sõltuvad põhiliselt lülitusgrupst ja trafo konstruktsioonist ja võivad olla oluliselt erinevad, kusjuures nulljärgnevused läbivad trafot ainult YN/yn (või autotrafo) mähisekombinatsioonide puhul teistel juhtudel toimub trafos vastavate eripingeliste võrkude **nj** aseskeemides katkestus.

Täpsemalt **nj** -e käitumine trafos on määratud mähisepaaride lülituse, neutraali maandatuse ja trafo magnetahela konfiga, seejuures iga paari puhul on olulised kolm erinevat **nj** impedantsi.

Kui mähiseid paaris tähistada 1 ja 2 ning neutraal M siis need impedantsid on Z_{01M} , Z_{012} , Z_{02M} .

Kui vastav Z_0 on väga suur ($\sim \infty$) siis nulljärgnevus ahel on vastavas kohas katkestatud.

Võrgud 1 ja 2 on nj aseskeemis ühendatud ($Z_{012} \neq \infty$) ainult juhul kui mähisepaar YNyn lülituses või (autotrafo lül.)

Vaatleme näitena mähisepaari (ü/a):YNd11;

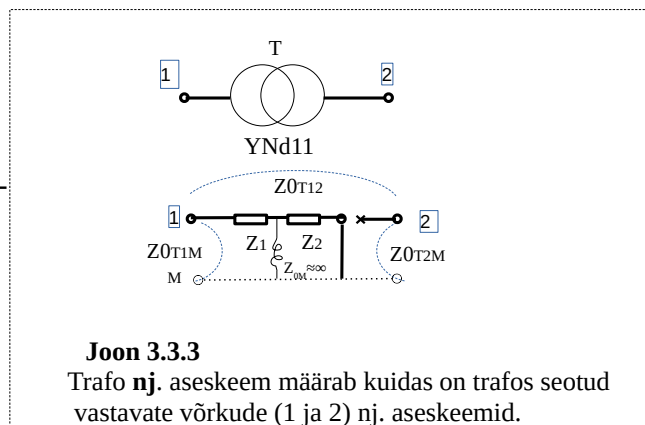
$Z_{01M} \approx 0.8Z_T$, $Z_{012} \approx \infty$, $Z_{02M} \approx \infty$

st. trafo esineb üp võrgu nj aseskeemis

põiki haruga $Z_{01M} \approx 0.8Z_T$;

üpvõrgu nj ahel ei ole võrguga 2 ühendataud ($Z_{012} \approx \infty$);

trafo ei oma võrgus ap võrgus nulljärgnevus-põikiharu ($Z_{02M} \approx \infty$).



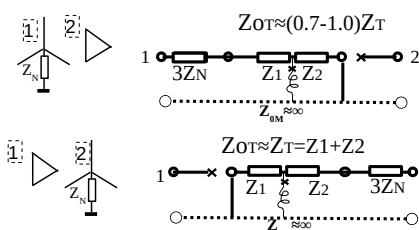
Järgnevas tabelis (Joon 3.3.4) on toodud enamlevinud mähisekonfiguratsioonidega trafode nulljärgnevusaseskeemid, seejuures on arvesse võetud ka trafo südamikute ehitusest (konf) tulenevat magnetimisahela takistust nulljärgnevusvoludele Z_{0m} , mis hinnanguliselt ,

5 samb. trafo ja kolme 1f trafo grupp: $Z_{0m} = Z_m \Rightarrow Z_{0m} = Z_{1m} \sim 1000Z_T \sim \infty$

3 samb. trafo : $Z_{0m} = (0.004-0.006)Z_m \Rightarrow Z_{0m} = (4-6)Z_T$

Trafode käsitlemisel on eriti oluline silmas pidada et trafo ap ja üp poole ja vastavate võrkude faasisuuruste vahekorrad (vektordiagrammid) asümmeetrilistel lühistel on oluliselt erinevad , mis teatud kaitsete (näit distantskaitse) sätestamisel on põhimõttelise tähtsusega.

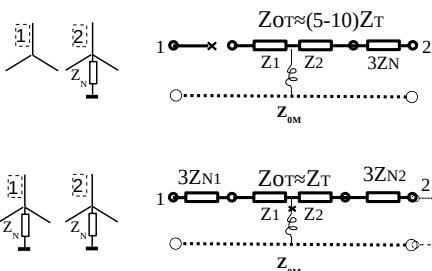
M : Kahemäh. trafodel $Z_T = Z_1 + Z_2$ fikt. $Z_1 = Z_2 = Z_T/2$



D mähise olemasolul toimub Ymähise I0 amperkeerdude kompenseerimine sambal ja $Z_{OT} \approx Z_{1T}$, erinevus tingitud ainult üp/ ap mähiste erinevast paigutusest sambal (ap mähis tavaliselt esimene südamik suhtes)

YN/d: $Z_{01M} = (0.7-1.0)Z_T$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{02M} = \infty$

D/yn: $Z_{01M} = \infty$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{02M} = Z_T$



Olenevalt magnetahela konstruktsioonist

Y/yn: $Z_{01M} = \infty$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{02M} = \infty$ - viiesambalistel

Y/yn: $Z_{01M} = \infty$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{02M} = (3-10)Z_T$ - kolmesambalistel

M: kolmesambalistel $Z_{0M} \ll \infty$ kuna nulljärgnevus vood ahelduvad

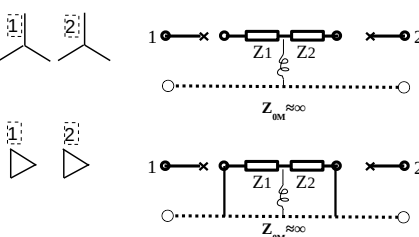
paagi jne kaudu ning moodustavad fiktiivse D, mis teostab

osaliselt Y mähise I0 amperkeerdude kompenseerimist mille

Tulemusena $Z_{OT} = (3-10)Z_T$ (väikese võimsusega jaotusvõrgu trafod, ei talu koormuse ebalanssi)

YN/yn: $Z_{01M} = \infty$, $Z_{012} = Z_T$, $Z_{02M} = \infty$

$Z_{0M} = \infty$ - viiesambalistel; $Z_{0M} \sim 5Z_T$ - kolmesambalistel;

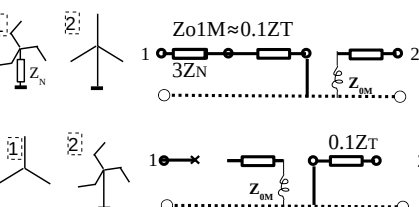


Kõik nulljärgnevusahelad lahti

Y/Y: $Z_{01M} = \infty$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{02M} = \infty$

Kõik nulljärgnevusahelad lahti

D/D: $Z_{01M} = \infty$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{02M} = \infty$



$Z_{01M} \approx 0.1Z_T$ - lisaks KKP-le ($3Z_N$),

$Z_{012} = \infty$ nj -ed ei ole seotud

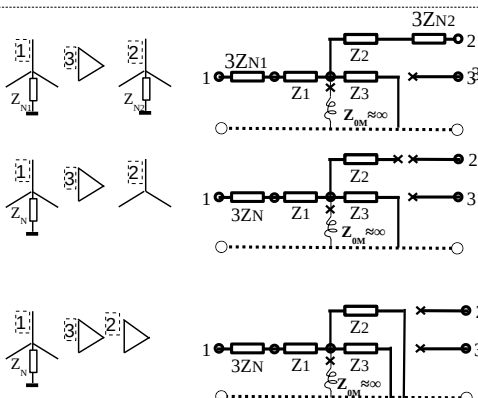
$Z_{02M} \neq \infty$ OT toitmiseks

$Z_{01M} = \infty$, sõltub Y neutr. maand.

$Z_{012} = \infty$ nj -ed ei ole seotud

$Z_{02M} \approx 0.1Z_T$ suure ebbalansiga

m.p. võrgu toitmisk



YN/yn/d: $Z_{012} = Z_1 + Z_2$,
st trafo nj aseskeem täht harudega
1:Z1, 2:Z2, M:Z3; $Z_{03M} = \infty$

YN/y/d: $Z_{01M} = Z_1 + Z_3$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{013} = \infty$
 $Z_{02M} = \infty$; $Z_{03M} = \infty$

YN/d/d: $Z_{01M} = Z_1 + Z_2 // Z_3$, $Z_{012} = \infty$, $Z_{013} = \infty$
 $Z_{02M} = \infty$; $Z_{03M} = \infty$

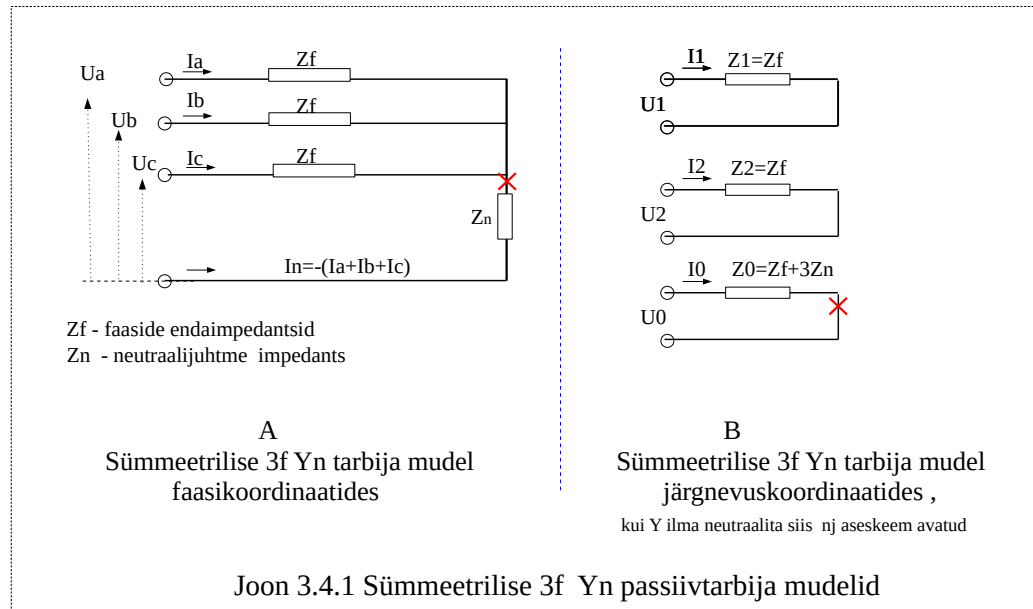
Joon 3.3.4 Trafode nulljärgnevusaseskeemid

3.4 Sümmeetrilise 3f koormuse mudel faasi ja järgnevuskoordinaatides.

Põhimõtteliselt võib 3f koormus olla sümmeetriline või asümmeetriline.

Kõrgematel pingetel vaadelduna on koormused sümmeetrilised, ning koormuse järgnevuskirjelduse vajadus tekib juhul kui soovitakse arvutada pikiasümmeetrilist talitlust (faasikatkestus), või põiki asümmeetrilist talitlust (võrgus asüm. lühis) koormuste arvessevõtmisega.

3f koormus võib olla D või Y lülituses, viimasel juhul väljatoodud neutraaliga või mitte.



Olgu tegemist sümmeetrilise Y ühenduses 3f koormusega, neutraalis impedants Z_n

Sellise tarbija lülitamisel sümmeetrilisele pingele

$$I_n = -(I_a + I_b + I_c) = 0 \quad \Rightarrow \quad I_a = -(I_b + I_c)$$

Olekuvõrrand $U_a = Z_f \cdot I_a$

$$U_b = Z_f \cdot I_b$$

$$U_c = Z_f \cdot I_c$$

(3.4.1)

Maatriks kujul Z_f diagonaalne, ning sümmeetrilise talitluse arvutus toimub 1f aseskeemi järgi. Sümmeetrilise tarbija lülitumisel ebasüm pingele (võrgus mingi ebasümmeetria), tekkivad faasi voolud ei ole sümmeetrilised, ning $I_n \neq 0$ seega arvutuseks tuleb koostada üldine olekuvõrrand.

$$U_a = I_a \cdot Z_f - I_n Z_n = I_a \cdot Z_f + (I_a + I_b + I_c) Z_n = I_a (Z_f + Z_n) + I_b Z_n + I_c Z_n$$

$$U_b = I_a Z_n + I_b (Z_f + Z_n) + I_c Z_n$$

$$U_c = I_a Z_n + I_b Z_n + I_c (Z_f + Z_n)$$

Sümmeetrilise 3f tarbija olekuvõrrand (faasikoordinaatides) maatrikskujul

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_f + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_f + Z_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.4.2)$$

või

$$U_f = Z_f \cdot I_f \quad (3.4.2b)$$

I_a, I_b, I_c leidmiseks (faasisuuruste vallas) tuleks lahendada võrrandisüsteem (3.4.2)

Maatriks Z_f on sümmeetriline, diag elemendid võrdsed $Z_d = Z_f + Z_n$ ja

mittediagonaal elemendid võrdsed $Z_m = Z_n$

Selline maatriks teiseneb sümmeetriliste komponentide vallas diagonaalmaatriksiks

St teisendus $Z_s = A^{-1} \cdot Z_f \cdot A$ annab tulemuseks

$$\mathbf{Z_s} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f + 3Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.4.3)$$

ja sümmeetrilise tarbija olekuvõrrand järgnevussuuruste vallas järgmine

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_1 \cdot I_1 = Z_f \cdot I_1 \\ U_2 &= Z_2 \cdot I_2 = Z_f \cdot I_2 \\ U_0 &= Z_0 \cdot I_0 = Z_0 \cdot I_0 \end{aligned} \quad (3.4.4)$$

Seega

3f Yn koormuse mudel järgnevussuuruste vallas koosneb kolmest järgnevaseskeemist, vt joon 3.4.1 B, maandamata Y puhul **nj** aseskeem avatud.

3f D lülituses sümmeetrilise koormuse **pj** ja **vj** aseskeemides $Z_1 = Z_2 = Z_f/3$; ja **nj** aseskeem avatud st $Z_0 = \infty$

Dünaamiste tarbijate aseskeemid

a. sünkroonmootoritel SM, asünkroonmootoritel AM järgnevaseskeemid sarnased sünkroongeneraatoritega, kuid pärijärgnevus emj-de käitumine on erinev tingutna ergutusest ja pöördemomendist

SM -tel on ergutav mmj kuid pöördemoment puudub (ainult inerts),

seetõttu toodavad nad lühisvoolu ülimööduvas ja mööduvas tsüklis st pärijärgnevus aseskeemis esineb ka emj püsilühise piirkonnas emj puudub

SK sünkroonkompensaatorid modelleeritakse nagu sünkroonmootorit

AM ergutav mmj puudub ning pöördemoment summbub samuti

seega as.mootorite lühisvoolutootmine on väga lühiaegne 1-2 perioodi

ja tavaliselt emj pj aseskeemis ainult max lühisvoolude arvutamisel sel juhul

$Z_1 \sim Z_2 = X_d''$ pidurdatud rootori reaktants, pikemate tsüklite puhul AM käitub nagu staatiline koormus $Z = U^2/S$

seega ülimööduvas tsüklis

AM lihtsustatult:

$$X_{d*}'' = 1/k_{käiv} \Rightarrow X_1 = X_2 = X_{d*}'' = X_{d*}'' \cdot U_n^2 / S_n \quad [\Omega]$$

$$E_1 = E'' = 0.85 \cdot U_n / \sqrt{3}$$

kus $k_{käiv} = I_{käiv} / I_n$ -mootori käivitusvoolu kordsus

üldistatud koormus (= väikesed mootorid):

$$X_1 = X_2 = X_{d*}'' = 0.35 \cdot U_n^2 / S_n \quad [\Omega]$$

$$E_1 = E'' = 0.85 \cdot U_n / \sqrt{3}$$

4. Võrgu järgnevusaseskeemid

Üldist

Eelnevalt käsitlesime **võrguelementide** mudeleid järgnevussuuruste vallas.

Kõik sümmeetriliselt ehitatud elementide mudelid **järgnevussuuruste** vallas on diagonaalmaatriksid ehk st nende järgnevuste aseskeemid ei ole omavahel seotud ja järgnevuste olekuvõrrandid ei ole omavahel seotud.

Järgmiseks sammuks on võrgu kui terviku järgnevus mudelite (=järgnevusaseskeemide) koostamine. Võrgu järgnevus aseskeemid (mudelid) saadakse kui elementide järgnevusaseskeemid ühendatakse omavahel vastavalt võrgu skeemile, ning teisiti üteldes mudel on skeem pluss impedantside arvvaartused. Need mudelid on universaalsed selles mõttes, et lühispunkti asukoha saab valida vastavalt vajadusele suvalisse sõlme või ka harule, katkestuse suvalisele harule.

Kuna sümmeetriliste komponentide meetod on kasutusel juba ammu ja paljude probleemide analüüsil möödapääsmatu, siis tavaliselt võrgu mudelid koostataksegi kolme järgnevusmudelina, mida vastavalt võrgu laienemisele laiendatakse.

Selline mudel on võrgu passiivosa **põhiinfo** elektriliste protsesside kirjeldamiseks.

=====

4.1. Ebasümmeetriliste lühisvoolude arvutuse protseduur süm. komp. meetodil

Antud juhul on silmas peetud nn põikiebasümmeetriat kuid üldiselt võttes kehtib ka (mõnede erinevustega) ka pikiebasümmeetria puhul.

Arvutuse teostamisel võib eristada järgmisi etappe

A. Võrgu järgnevusaseskeemide koostamine (üldjuhul osa aseskeemidest juba olemasoleva võrgu võrguosa mudelis)

Järgnevusaseskeemid (tähistatud **pj**, **vj**, **nj**) koostatakse võrguskeemi alusel, kusjuures iga võrguelement on asendatud selle elemendi vastava järgnevusaseskeemiga joon xx a.

Järgnevusaseskeemide mõningaid üldomadusi.

Võrgu päri (pj) ja vastujärgnevusaseskeem (vj)

Pärijärgnevus ja vastujärgnevusaseskeemid on omavahel konfiguratsioonilt kokkulangevad ja kokkulangevad võrgu skeemiga (aseskeemiga faasisuuruste vallas).

Staatilistele võrguelementidele (liinid, trafod) kehtib $Z_1 = Z_2 = Z_L$.

Elektromotoorsed jõud esinevad ainult pärijärgnevusaseskeemides, generaatori aseskeemis, (või ekvivaletses generaatorites) vt gen. järgnevusmudel.

Vastujärgnevusaseskeemis gen. emj-le vastav haru lühistatud.

Võrgu päri ja vastujärgnevusaseskeemid koosnevad ainult ühest osast.

Võrgu nulljärgnevusaseskeem (nj)

Võrgu nulljärgnevusaseskeem koosneb üldjuhul mitmest osast, katkestused tekivad trafode kohal, vastavalt trafode nulljärgnevusaseskeemidele.

Võrguelementide nulljärgnevusimpedantsid erinevad oluliselt pärijärgnevisimpedantsidest.

Kui trafode neutraalid on maanatud üle reaktorite Z_n siis aseskeemis esinevad $3 \cdot Z_n$ -id.

Oluline on veel ka see, et lähedalasuvate liinide (näit 2 ahelaline liin) nulljärgnevusaseskeemid on omavahel seotud, tulemusena keerulise võrgu **nj** aseskeemi osad ka sidusas piirkonnas ei oma **pj** ja **vj** aseskeemiga kokkulangevat konfiguratsiooni.

B. Vajaliku lühisekoha määramine, ning järgnevusaseskeemide ekvivalenteerimine valitud lühisekoha suhtes

Ekvivalenteerimisel kasutatakse kõiki tuntud ekvivalentse võrguteisenduse võtteid

Tulemuseks võrgu ekvivalent lühispunkti suhtes (asub võrgu sõlmes või harul) vt joon xx b

C. Ca. järgnevusvoolude ja pingete arvutus lühisekohas.

Põhimõtteliselt ühendatakse järgnevusekvivalendid arvutatava lühiseliigi nõuete järgi ja arvutatakse ahel. Erinevate lühiseliikide jaoks on tuletatud arvutusvalemid, mille tõttu arvutus lüheneb. Igal lühiseliigil F_n , FF , FF_n on lühisekohas erinev järgnevuste ühendus vt

joonxx

Voolude, pingete arvutusvalemid vt joon, joon xx

Cb. Kui lühisekohas on vajalikud ka faasisuurused siis tuleb arvutada ka need vastavalt ($xx=$)-le

D. lühisparameetrite arvutus teistes vajalikes võrgu sõlmedes ja harudes (tavaliselt releekaitse

asukohas). Siin on oluline silmas pidada et arvutus on kaheetapiline

Da . Järgnevussuuruste arvutus vajalikus kohas

Kuna tavaliselt jäävad lühisekoha ja RK asukoha vahele ka trafod siis sellel etapil tuleb teostada järgnevussuuruste pööramine vastavalt eespooltoodud reeglitele , vastasel juhul saadakse valed faasisuurused.

Db . Faasisuuruste arvutus vajalikus kohas

=====

Sümmeetriliste komponentide jagunemine võrgus.

Järgnevusvoolud on kõige suuremad lühise kohas,

mis jagunevad võrgu harude vahel lühiskohast kaugenedes

Järgnevuspinged

PJ pinge on lühise kohas kõige madalam ja suureneb generaatorite suunas nii et

emj asukohas on võrdne eemj-ga

Vj ja nj pinged on lühiskunktis kõige kõrgemad ja sõlmedes mis kaugenevad lühispunktist need pinged vähenevad vastavalt järgnevusvoolu poolt tekitatud järgnevuspingelangule.

Gen asukohas on vastujärgnevuspinged =0

nj pinged muutuvad nulliks nulljärgnevusaseskeemi piiriharudes.

pj pingete suurenemine ja vastavalt vj pingete ja nj pingete vähenemine toimub vastavalt harude järgnevuspingelangudele.

Kuigi tavaliselt eripingelise aseskeemi osad on taandatud ühele pingeastmele tuleb arvestada sellega et trafode harudes olenevalt lülitusgrupist toimub pj ja vj pingete pööramine vastavalt trafo aseskeeme käsitleva osa nõuetele. Nj pingete pööramist ei toimu.

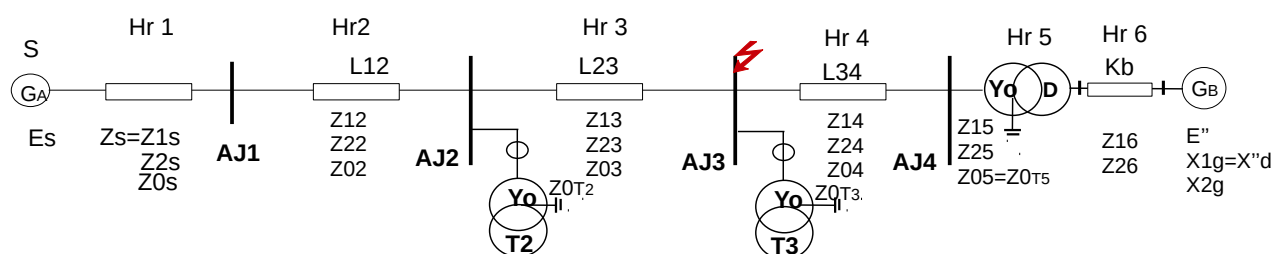
Näide:

xx. Põhitoid võrgust mida kirjeldatakse selle osa ekvivalentsete parameetritega, edasi kolm liini alajaamade ja 110/ trafodega kusjuures ühe trafo taga asub ka kohalik generaator mis võib olla töös või väljas, lühispunkt asub A3 110kV lattel.

Võrgu järgnevusaseskeemide koostamine ja ekvivalenteerimine .

Detailset huvi pakub tavaliselt ainult mingi väiksem osa koguvõrgust seetõttu üldjuhul esimeses etapis esineb kaks osa

- detailset mittevajalik osa süsteemist mis juba lähteülesandes antakse ekvivalendina enamuses on see võrgu toiteosa ja tähistatud näit. S (süsteem), parameetriteks ekvivalentne emj E_s ja ekvivalentsed järgnevusimpedantsid Z_{1s}, Z_{2s}, Z_{0s}
- Detailne osa kus asub lühispunkt ning vajalikd harud ja sõlmed. Selle osa parameetrid olenevalt arvutuse eesmärgist tuleb arvutada või hinnata teatmaterjalide alusel.
- Leida lühispunkti suhtes summaarsed ekvivalendid $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$, mille alusel toimub järgnev arvutus



Kahepoolse toitega, võrguosa skeem koos vajalike andmetega, lühised AJ3 lattel

toide A - ekvivalenteeritud süsteem $S \Rightarrow GA$

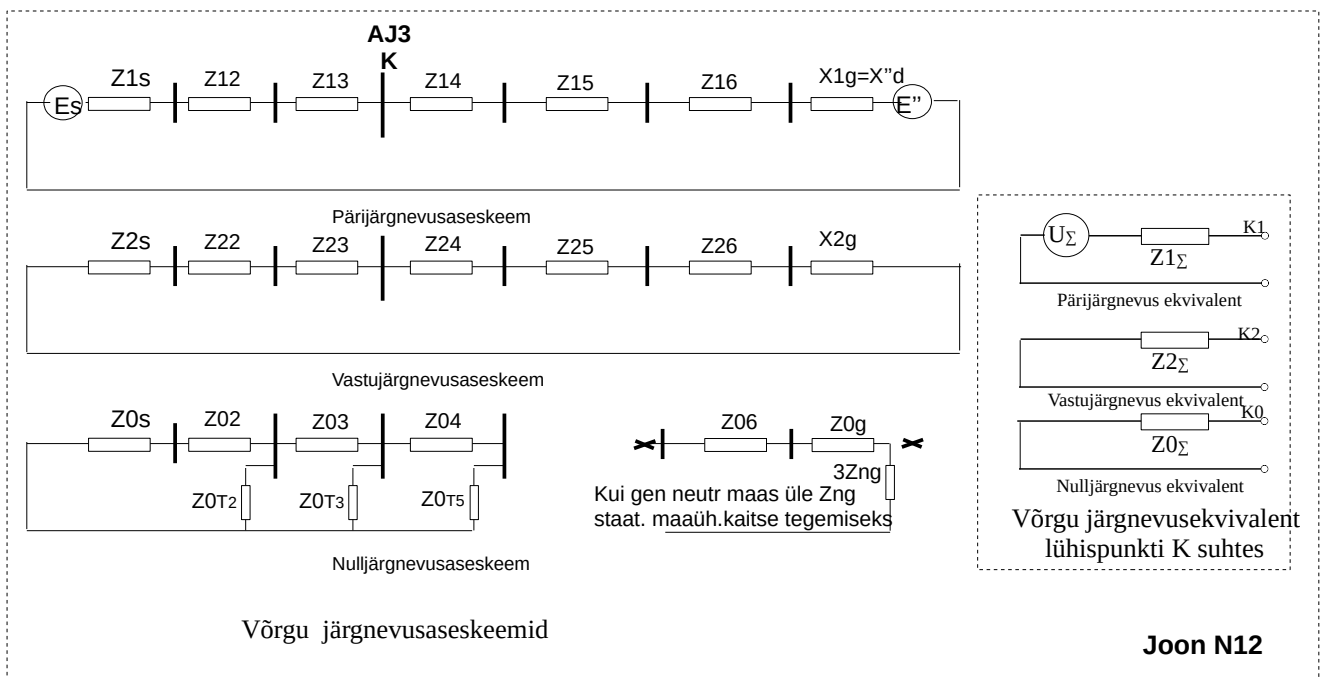
toide B – generaator, mis on modelleeritud oma ülimööduvate parameetritega

Gen B on ühendatud võrku kaabli kaudu üle Yo/D trafo

AJ 2 ja AJ 3 lattel Yo/D trafod

Impedantsid on taandatud ühisele pingele

Joon N11



Ekvivalenteerimine

Eelneva skeemi ekvivalentse järgnevusparameetrid (arvutatud mitmes etapis)

Pärijärgnevus: $Z_{1s\Sigma} = Z_{1se} + Z_{12} + Z_{13}$; $Z_{1g\Sigma} = Z_{14} + Z_{15} + Z_{16} + X_{1g}$; $Z_{1\Sigma} = Z_{1s\Sigma} * Z_{1g\Sigma} / (Z_{1s\Sigma} + Z_{1g\Sigma})$

$$U_\Sigma = (E_e * Z_{1g\Sigma} + E'' * Z_{1s\Sigma}) / (Z_{1g\Sigma} + Z_{1s\Sigma}) ;$$

Vastujärgnevus: $Z_{2s\Sigma} = Z_{2se} + Z_{22} + Z_{23}$; $Z_{2g\Sigma} = Z_{24} + Z_{25} + Z_{26} + X_{2g}$; $Z_{2\Sigma} = Z_{2s\Sigma} * Z_{2g\Sigma} / (Z_{2s\Sigma} + Z_{2g\Sigma})$

Nulljärgnevus: $Z_{0s\Sigma} = (Z_{0se} + Z_{02}) // Z_{0T2}$; $Z_{0g\Sigma} = (Z_{04} + Z_{0T5}) // Z_{0T3}$; $Z_{0\Sigma} = Z_{0s\Sigma} * Z_{0g\Sigma} / (Z_{0s\Sigma} + Z_{0g\Sigma})$

5. Valemite ja seoste tuletamine asümmeetriliste lühiste parameetrite määramiseks

Üldist.

Üks põhilisi tüüpüleandeid: Leida võrgu talitusparameetrid RK asukohas, asümmeetriliste rikete (põhiliselt asümmeetriliste lühiste) tekkimisel võrgu erinevates punktides.

Lahendusprotsessis kaks üldsammu:

- Järgnevusparameetrite määramine lühise kohas K.
 - Lühiskoha K järgnevusparameetrite alusel RK asukoha lühisparameetrite (vajalikud järgnevus ja faasisuurused) leidmine, käsitsiarvutamisel toimub see liikumisena mööda järgnevusaseskeeme, harude ja sõlmede kaupa kuni RK asukohani.
- Sammu a. lihtsustamiseks on tuletatud erinevate lühiseliikide jaoks arvutusvalemid ja muud analüüsi kergendavad seosed. Järgnevalt on esitatud üks võimalikest tuletuskäikudest, mida võib võtta kui näidet lühiskoha parameetrite analüüsist.

Seega otsitavateks parameetriteks on järgnevusvoolud I_1, I_2, I_0 ja järgnevuspinged U_1, U_2, U_0 ning vajadusel neile vastavad faasivoolud ja faasipinged.

Eeldame et on koostatud arvutatava võrgu järgnevusaseskeemid, ning need on ekvivalenteeritud etteantud lühispunkti K suhtes. Ekvivalenteerimise tulemusena on teada võrgu iseloomustavate järgnevus parameetrite komplekt: $E_{1\Sigma}, Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$

Selline võrgu parameetrite komplekt on ammendavaks lähteinfoks erinevat tüüpi asümmeetriliste lühiste arvutusele etteantud p-s K (joonis 5.1,B).

Lühiste tüübid (joonis 5.1,A):

F-m - lühis faasi ja maa vahel, võib esineda üleminekutakistus

(kaare takistus) R_f , kõige levinum rikkeliik

F-F - lühis kahe faasi, võib esineda üleminekutakistus

(kaare takistus) R_f

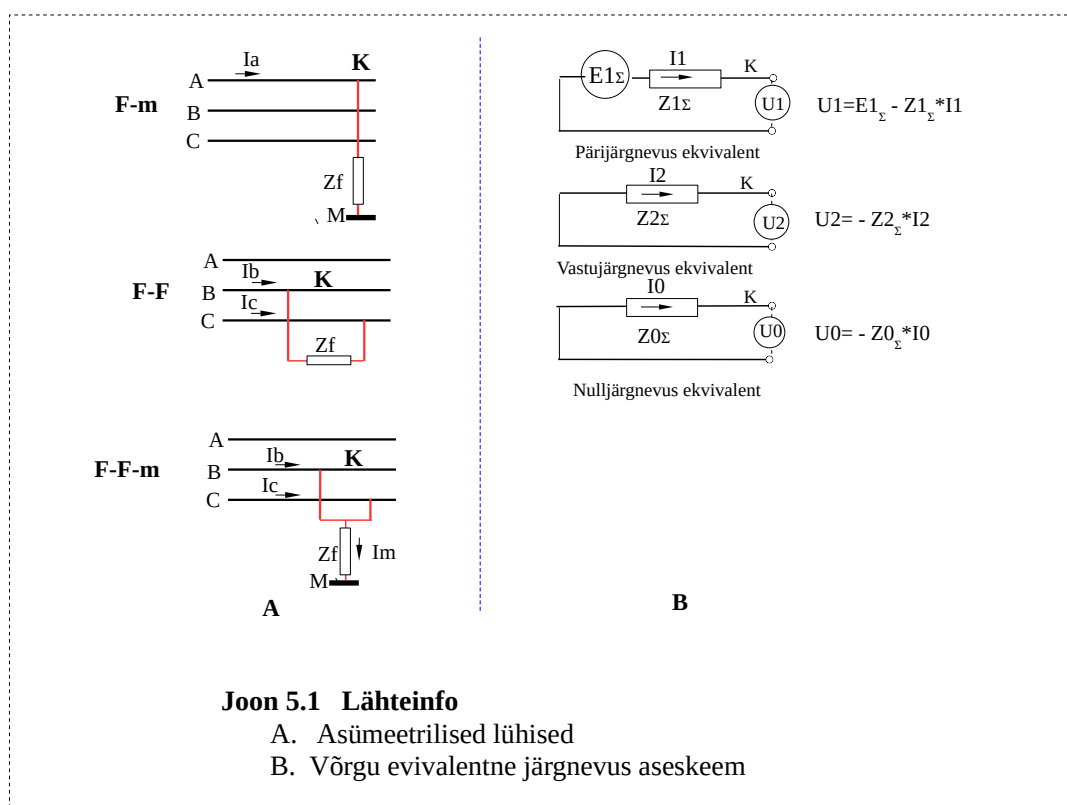
F-F-m - lühis kahe faasi ja maa vahel, võib esineda üleminekutakistus

(kaare takistus) R_f

F-m ja F-F-m lühistel (maaga lühistel) on eelduseks efektiivselt maandatud neutraaliga võrk mille $EFF < 1.39$;

$$EFF = U_{fm} / U_{fn}$$

kus U_{fn} -nimifaasipinge; U_{fm} - terve faasi max pinge lühise kohas



Põhiseoste tuletamisel kasutatakse järgmisi põhiteisendusi (kehtivad nii emj-de, pingete kui voolude jaoks) .

Faasisuurused => järgnevus suurused

$$\begin{aligned} V_1 &= (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) / 3 \\ V_2 &= (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) / 3 \\ V_0 &= (V_a + V_b + V_c) / 3 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Järgnevussuurused => faasisuurused

$$\begin{aligned} V_a &= V_1 + V_2 + V_0 \\ V_b &= a^2 \cdot V_1 + a \cdot V_2 + V_0 \\ V_c &= a \cdot V_1 + a^2 \cdot V_2 + V_0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Üksikute järgnevuste jaoks kehtivad veel Kirchhofi II seaduse alusel saadud võrrandid (5.3) mis ei sõltu lühise tüübist.

$$\begin{aligned} U_1 &= E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} \cdot I_1 \\ U_2 &= -Z_{2\Sigma} \cdot I_2 \\ U_0 &= -Z_{0\Sigma} \cdot I_0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Järgnevussuuruste puhul on kasutatud (lihtsustuse eesmärgil) tähistust $V_1 = V_{a1}$, $V_2 = V_{a2}$, $V_0 = V_{a0}$.

Kuna teisendustes kasutatakse pööramisoperaatorit **a**, siis mõned **a** olulisemad seosed

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866; \quad a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866; \quad a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 + j0.0; \\ (a^2 + a + 1) &= 0; \quad (a^2 + a) = -1; \quad (a^2 - a) = -j\sqrt{3}; \quad (1 + a^2) = 1 \angle -60^\circ; \quad (1 - a^2) = \sqrt{3} \angle 30^\circ; \\ (1 + a) &= 1 \angle 60^\circ; \quad (1 - a) = \sqrt{3} \angle -30^\circ. \end{aligned}$$

Näiteks: Faasipinged sümmeetrilises talitluses $\{U_a; U_b = a^2 \cdot U_a; U_c = a \cdot U_a\}$

Eesmärk:

Leida lühispunktis K lühiseliikidele F-m, F-F, ja F-F-m

- järgnevusvoolude ja pingete I_{a1}, I_{a2}, I_{a0} ; U_{a1}, U_{a2}, U_{a0} ; ($I_1 = I_{a1}$; $I_2 = I_{a2}$, $I_0 = I_{a0}$) arvutusvalemid
- järgnevusaseskeemide ühendusviisid
- faasivoolude ja faasipingete arvutusvalemid
- joonestada vastavad vektordiagrammid

5.1 F-m lühis

Lühispunktis K, F-m lühis (faasi A ja maa vahel) üle lühistakistuse R_f
Piiritingimused: $I_b=0$; $I_c=0$, $U_a=R_f \cdot I_a$

.....

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0$$

$$I_1 = 1/3(I_a + a^2 I_b + a I_c) = I_a/3$$

$$I_2 = 1/3(I_a + a I_b + a^2 I_c) = I_a/3$$

$$I_0 = 1/3(I_a + I_b + I_c) = I_a/3$$

$$I_1 = I_2 = I_0 \quad I_a = 3I_0 \quad (\text{Fm-1})$$

Seosest Fm-1 järeldub et Fm lühisel on järgnevusaseskeemid lühispunktis ühendatud järjestiku (punane ahelaosa)

$I_1 = ?$

$$U_a = R_f(I_1 + I_2 + I_0) = 3R_f I_1 = U_1 + U_2 + U_0$$

$$U_a = 3R_f I_1 = E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_1 - Z_{2\Sigma} I_1 - Z_{0\Sigma} I_1$$

$$3R_f I_1 = E_{1\Sigma} - I_1(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f) \Rightarrow$$

$$E_{1\Sigma} = I_1(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f) \Rightarrow$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = E_{1\Sigma} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f) \quad (\text{Fm-2})$$

$$U_1 = E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_1 = 3R_f I_1 - U_2 - U_0 = I_1 (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f) \quad (\text{Fm-3a})$$

$$U_2 = -Z_{2\Sigma} I_1$$

$$U_0 = -Z_{0\Sigma} I_1$$

$$U_1 = E_{1\Sigma} * (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f) \quad (\text{Fm-3b})$$

$$U_2 = -E_{1\Sigma} * Z_{2\Sigma} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f)$$

$$U_0 = -E_{1\Sigma} * Z_{0\Sigma} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f)$$

.....

Faasikoordinaatides.

Voolud:

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 3I_1 = 3I_2 = 3I_0$$

$$I_b = 0; I_c = 0$$

Pinged: Faasipingesid saab väljendada mitmel viisil

Üldkuju:

$$U_a = U_1 + U_2 + U_0$$

$$U_b = a^2 U_1 + a U_2 + U_0$$

$$U_c = a U_1 + a^2 U_2 + U_0$$

$$U_a = I_1 * 3R_f$$

$$U_b = I_1 * ((a^2 - a)Z_{2\Sigma} + (a^2 - 1)Z_{0\Sigma} + a^2 3R_f)$$

$$U_c = I_1 * ((a - a^2)Z_{2\Sigma} + (a - 1)Z_{0\Sigma} + a 3R_f)$$

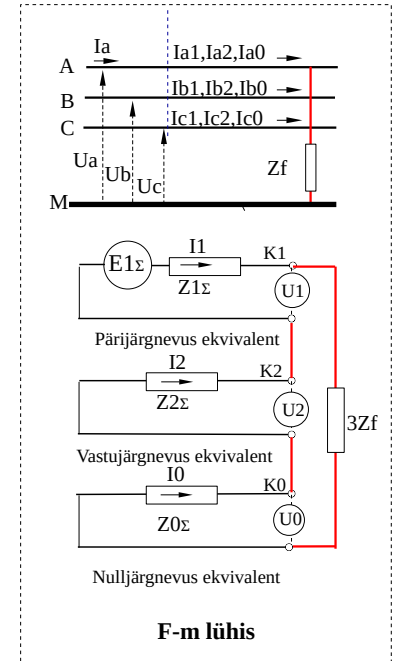
$$E_{1\Sigma} = E_{1a} \text{ kaudu (faasipinge enne lühist)}$$

$$U_a = E_{1\Sigma} * 3R_f / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f)$$

$$U_b = E_{1\Sigma} * \{a^2 + [(Z_{1\Sigma} - Z_{0\Sigma}) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f)]\} \quad (\text{Fm-4b})$$

$$U_c = E_{1\Sigma} * \{a + [(Z_{1\Sigma} - Z_{0\Sigma}) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_f)]\}$$

.....



Pingete ja voolude vektordiagrammid lühispunktis, Fm lühis.

Effektiivselt maandatud neutaaliaga võrk, maandatuse tingimus $EFF < 1.39$ ($X_0/X_1 < 3$, $R_0/X_1 < 1$)

Antud näites võtame $R_f = 0$, $R_{1\Sigma} = R_{2\Sigma} = R_{0\Sigma} = 0$; $X_{0\Sigma} = X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma}$ st tegemist on tugevas võrguosas asuva metallse lühisega, $E_{1\Sigma} = E_{a\Sigma} \angle 0^\circ$.

Fm lühise piiritingimused (lühise kohas): $U_a = 0$; $I_b = 0$; $I_c = 0$

Eelnevalt teada: $I_1 = I_2 = I_0$

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 3I_1 = 3I_2 = 3I_0$$

$$I_1 = E_{1\Sigma} / j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) = E_{1\Sigma} / j(3X_{1\Sigma}) = (E_{1\Sigma} / 3X_{1\Sigma}) \angle -90^\circ$$

Järgnevusoolude vektordiagramm

$$I_1 = I_2 = I_0 = E_{1\Sigma} / j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) = E_{1\Sigma} / 3jX_{1\Sigma} = (E_{1\Sigma} / 3X_{1\Sigma}) \angle -90^\circ$$

-eelnevas järgnevusvoolud seotud $E_{1\Sigma}$ -ga (nurgad)

Järgnevuspingete vektordiagramm

$$U_{a0} = -I_{a0} * jX_{0\Sigma} = - (E_{1\Sigma} / 3jX_{1\Sigma}) * jX_{1\Sigma} = -E_{1\Sigma} / 3$$

$$U_{a2} = -I_{a2} * jX_{2\Sigma} = - (E_{1\Sigma} / 3jX_{1\Sigma}) * jX_{1\Sigma} = -E_{1\Sigma} / 3$$

$$U_{a1} = -(U_{a2} + U_{a0}) = -(E_{1\Sigma} / 3 + E_{1\Sigma} / 3) = (2/3)E_{1\Sigma}$$

-eelnevas järgnevuspinged seotud $E_{1\Sigma}$ -ga (nurgad)

Faasivoolud lühise kohas:

$$I_a = 3I_1 = 3E_{1\Sigma} / 3jX_{1\Sigma} = E_{1\Sigma} / jX_{1\Sigma}; \quad I_b = I_c = 0$$

Faasipinged lühise kohas:

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} + U_{a0} = ((2/3)E_{1\Sigma}) + (-E_{1\Sigma} / 3) + (-E_{1\Sigma} / 3) = 0$$

$$U_b = a^2 * U_{a1} + a * U_{a2} + U_{a0} = (1/3)E_{1\Sigma} * ((2a^2 - a - 1)) = (1/3)E_{1\Sigma} * 3 \angle -120^\circ = E_{1\Sigma} \angle -120^\circ$$

$$U_c = a * U_{a1} + a^2 * U_{a2} + U_{a0} = (1/3)E_{1\Sigma} * ((2a - a^2 - 1)) = (1/3)E_{1\Sigma} * 3 \angle 120^\circ = E_{1\Sigma} \angle 120^\circ$$

Liinipinged lühise kohas:

$$U_{bc} = U_b - U_c = E_{1\Sigma} \angle -120^\circ - E_{1\Sigma} \angle 120^\circ = 1.73 * E_{1\Sigma} \angle 90^\circ \text{ -nagu enne lühist}$$

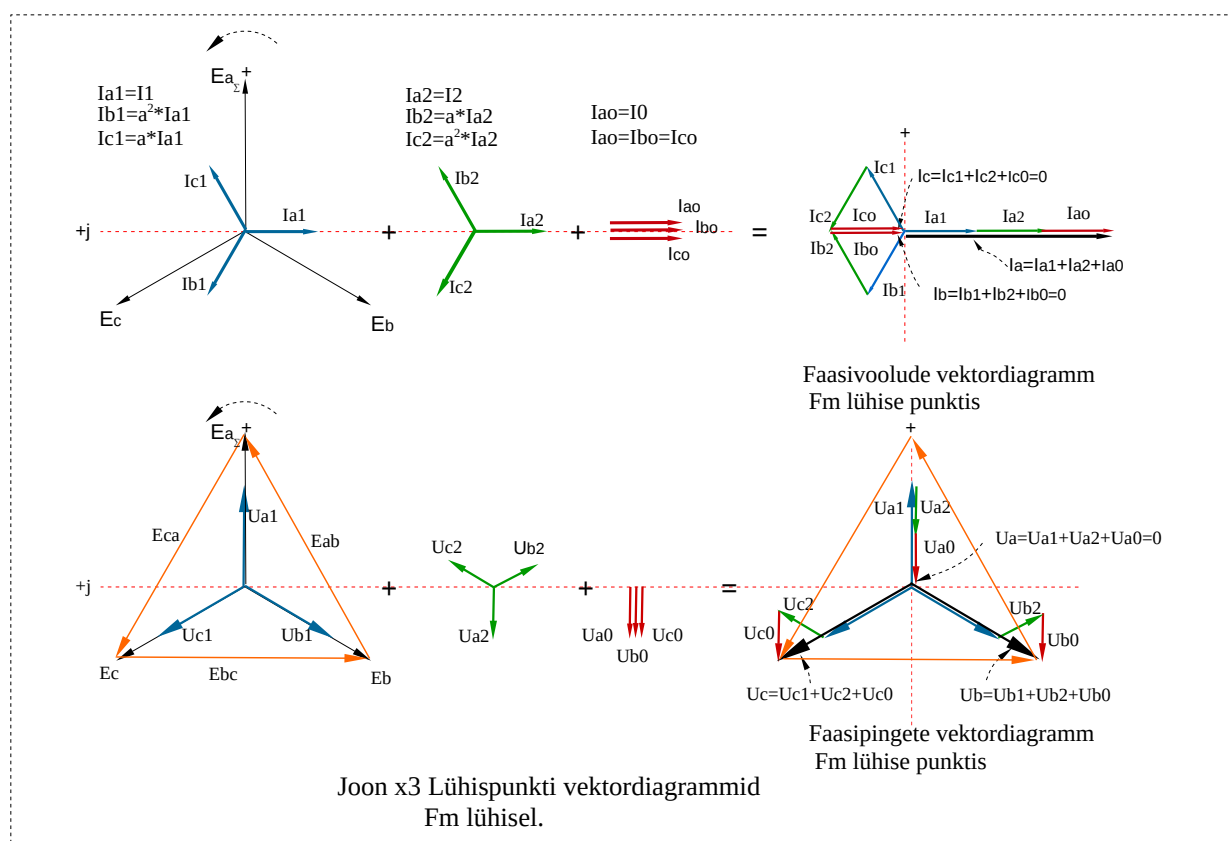
$$U_{ca} = U_c - U_a = U_c = E_{1\Sigma} \angle 120^\circ$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = -U_b = -E_{1\Sigma} \angle 120^\circ = E_{1\Sigma} \angle 60^\circ$$

Eelnevast, kui $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = X_{0\Sigma}$; $R_{1\Sigma} = R_{2\Sigma} = R_{0\Sigma} = 0$; $R_f = 0$; siis $EFF = U_b / E_{1\Sigma} = 1$

ning kuna $I_{k1} = I_a = I_{k3}$ siis antud juhul 1f lühise ja 3f lühise voolud on võrdsed

Vektordiagrammide joonestamine: Järgnevuste vektordiagrammid on positsioneeritud $E_{1\Sigma}$ suhtes, faasisuuruste vektordiagrammid kujunevad otseselt järgnevusdiagrammide vektoriaalsel liitmisel.



Mõned järeldused.

Vektordiagramm on joonestatud erijuhu jaoks. Reaalses võrgus esinevad järgnevalt impedantside reaalsad $R_{1\Sigma} = R_{2\Sigma} \neq 0$, $R_{0\Sigma} \neq 0$, $X_0 \neq X_1$ ning võib esineda $R_f > 0$.

$Z_0 \neq Z_1$, ning sõltub oluliselt võrgu trafode neutraalide maandustest.

Üldjuhul X_0 võib kõikuda kahe äärmuse $X_0 = 0$ ja $X_0 = \infty$ vahel st $0 \leq X_0 \leq \infty$, viimane juht vastab isoleeritud neutraaliga võrgule.

Oluline on liinipingete vektordiagrammi käitumine erinevate Z_0/Z_1 suhte puhul, sest suhe Z_0/Z_1 mõjutab oluliselt tervete faaside faasipingesid (põhiline X_0/X_1), viimased on olulised käidu (isolatsiooni) seisukohalt, piir kahe võrgu põhitüübi vahel on määratud võrgu maandusteguri EFF-ga, kus $EFF = U_{kfmax}/U_{fn}$

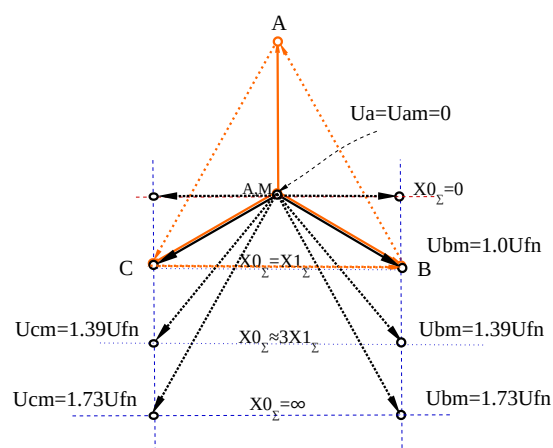
Ef maandatud neutraaliga võrgus peab olema $EFF < 1.39$, isoleeritud neutr võrgus $EFF = 1.73$

Joonis x4 isloomustab U_{kf} muutumist kui $R_{1\Sigma} = R_{2\Sigma} = R_{0\Sigma} = 0$ (või aktiivosad väikesed), (Fm 4b alusel) kogu võimalike X_0/X_1 diapasooni, sel juhul tervete faaside pinged võrdsed, kui $R_{1\Sigma} \neq R_{2\Sigma} \neq R_{0\Sigma} \neq 0$ siis tervete faaside pinged ei ole võrdsed $U_b \neq U_c$. Kui $R_f > 0$ siis 1f. lühisel U_{kf} väärtused hakkavad vähenema.

M: Fm järgnevusvektordiagrammid :

I1, I2, I0 faasis ;

U2 ja U0 vastas faasis U1-ga



Joon x4 Fm lühise tervete faaside(B,C) faasipinged sõltuvalt $X_{0\Sigma}$ väärtustest $R_f=0$; haarab nii efektiivselt maandatud kui mitteefektiivselt maandatud võrku kuni isoleeritud neutraaliga võrguni, beez – lühise eelne olek

5.2 F-F lühis

Lühispunktis K, F-F lühis (faasi b ja c vahel) üle lühistakistuse R_f vt joonis x2 B

Piiritingimused: $I_a=0$; $I_b=-I_c$, $U_b-U_c=R_f I_b$

Kuna ühendused maaga puuduvad siis nj askeem on isoleeritud ja I_0, U_0 ei eksisteeri

Otsitavateks $I_1; I_2$ $U_1; U_2$

.....

$$I_a = I_1 + I_2 = 0$$

$$I_1 = 1/3(I_a + a^2 I_b + a I_c) = 1/3(a^2 - a) I_b$$

$$I_2 = 1/3(I_a + a I_b + a^2 I_c) = 1/3(a - a^2) I_b \Rightarrow$$

$$I_2 = -I_1$$

Seosest FF-1 järeldub et F-F lühisel on järgnevusaskeemid lühispunktis ühendatud paralleelselt, joonisel punane ahelaosa

$$U_b - R_f I_b = U_c \Rightarrow (a^2 - a) U_1 - R_f (a^2 - a) I_1 = (a^2 - a) U_2 \Rightarrow$$

$$U_2 = U_1 - R_f I_1$$

$$U_2 = U_2 \Rightarrow E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_1 - R_f I_1 = Z_{2\Sigma} I_1 \Rightarrow$$

$$E_{1\Sigma} = I_1 (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f) \Rightarrow$$

$$I_1 = E_{1\Sigma} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f) \quad (FF-1)$$

$$I_2 = -I_1 \quad (FF-2)$$

$$U_1 = E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_1 = Z_{2\Sigma} I_1 + R_f I_1 = I_1 (Z_{2\Sigma} + R_f) =$$

$$= E_{1\Sigma} (Z_{2\Sigma} + R_f) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f) \quad (FF-3)$$

$$U_2 = U_1 - R_f I_1 = -Z_{2\Sigma} I_2 = Z_{2\Sigma} I_1 = E_{1\Sigma} Z_{2\Sigma} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f) \quad (FF-4)$$

.....

Faasivoolud:

$$I_a = 0$$

$$I_b = a^2 I_1 - a I_1 = (a^2 - a) I_1 = -j\sqrt{3} I_1 \quad (FF-5)$$

$$I_c = a I_1 - a^2 I_1 = (a - a^2) I_1 = j\sqrt{3} I_1$$

$$|I_k| = |I_b| = |I_c| = \sqrt{3} |E_{1\Sigma} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f)|$$

kus $|I_k|$ - 2f. lühisvoolu absoluutväärtus

kui $R_f = 0$, ning kuna $Z_{1\Sigma} \approx Z_{2\Sigma}$ siis,

$$|I_k| = \sqrt{3} |E_{1\Sigma} / 2Z_{1\Sigma}|$$

kuna $|I_k| = |E_{1\Sigma} / Z_{1\Sigma}|$, siis generaatorist kaugel lühistel võetakse

$$|I_k| = ((\sqrt{3})/2) |I_k| = 0.865 |I_k|$$

Faasipinged:

Faasipingesid saab väljendada mitmel kujul,

üldkuju:

$$U_a = U_1 + U_2 = E_{1\Sigma} * (2Z_{2\Sigma} + R_f) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f)$$

$$U_b = a^2 U_1 + a U_2 = -I_1 (Z_{2\Sigma} - a^2 R_f) = -E_{1\Sigma} * (Z_{2\Sigma} - a^2 R_f) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f) \quad (FF-6)$$

$$U_c = a U_1 + a^2 U_2 = -I_1 (Z_{2\Sigma} - a R_f) = -E_{1\Sigma} * (Z_{2\Sigma} - a R_f) / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f)$$

$$U_b = U_c + I_b R_f$$

$$\text{kui } Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} \text{ siis } U_a = E_{1\Sigma}$$

$$\text{kui } Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} \text{ ja } R_f = 0 \text{ siis } U_a = E_{1\Sigma} \text{ ja } U_b = U_c = -E_{1\Sigma}/2$$

=====

Pingete ja voolude vektordiagrammid lühispunktis, F-F lühis.

analoogiliselt eelneva lühiseliigiga $R_f=0$, $R_{1\Sigma}=R_{2\Sigma}=R_{0\Sigma}=0$; $X_{0\Sigma}=X_{1\Sigma}=X_{2\Sigma}$

st tegemist on tugevas võrguosas asuva metallse lühisega, $E_{1\Sigma}=E_{a\Sigma} \perp 0^\circ$

FF lühise piiritingimused (lühise kohas): $I_a=0$; $I_b=-I_c$, $U_b-U_c=0$

Eelnevast teada: $I_1=-I_2$; $U_1=U_2$

$$I_{a1} = E_{1\Sigma} / (jX_{1\Sigma} + jX_{2\Sigma}) = E_{1\Sigma} / j * 2 * X_{1\Sigma} = -j * E_{1\Sigma} / 2 * X_{1\Sigma}$$

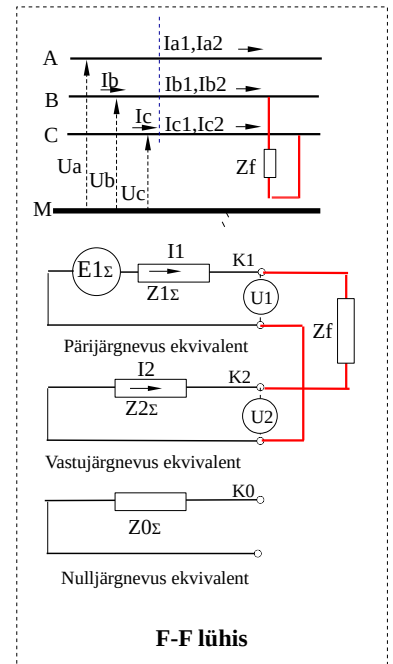
- seos määrab I_{a1} suuruse ja asendi $E_{1\Sigma}$ suhtes

$$I_{a2} = -I_{a1}$$

- seos määrab päri ja vatujärgnevusvoolude tähe omavahelise asendi ja suuruse

$$U_{a1} = U_{a2}$$

- seos määrab päri ja vatujärgnevuspingete tähe omavahelise asendi ja suuruse



$$U_{a1} = I_{a1} * jX_{1\Sigma} = [-j * E_{1\Sigma} / 2X_{1\Sigma}] * jX_{1\Sigma} = E_{1\Sigma} / 2 = U_{a2}$$

- seos määrab U_{a1} ja U_{a2} suuruse ja asendi $E_{1\Sigma}$ suhtes

Eelnevate seoste alusel on kõikide suuruste faasid määratud $E_{1\Sigma}$ suhtes ja on võimalik joonistada nii järgnevussuuste kui faasisuuruste vektordiagrammid vt järgnev joonis

Leiame **faasisuurused** ka analüütiliselt

Arvestades et FF lühisel $U_{a1} = U_{a2}$ saame **faasipingete** avaldised lühiskohas

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} = E_{a\Sigma}$$

$$U_b = (a^2 + a)U_{a1} = -1 * U_{a1}$$

$$U_c = (a + a^2)U_{a1} = -1 * U_{a1}$$

$$U_b = U_c = -E_{a\Sigma} / 2$$

$$\text{kus } (a^2 + a) = -1$$

Sama **faasivoolude** jaoks, $I_{a2} = -I_{a1}$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I_{a1} - I_{a1} = 0$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} = a^2 I_{a1} + a I_{a2} = (a^2 - a)I_{a1} = -j\sqrt{3} * I_{a1} = -j\sqrt{3} * j * E_{a\Sigma} / 2 * X_{1\Sigma} = -(\sqrt{3}/2) * (E_{a\Sigma} / X_{1\Sigma})$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} = a I_{a1} + a^2 I_{a2} = (a - a^2)I_{a1} = j\sqrt{3} * I_{a1} = j\sqrt{3} * j * E_{a\Sigma} / 2 * X_{1\Sigma} = (\sqrt{3}/2) * (E_{a\Sigma} / X_{1\Sigma})$$

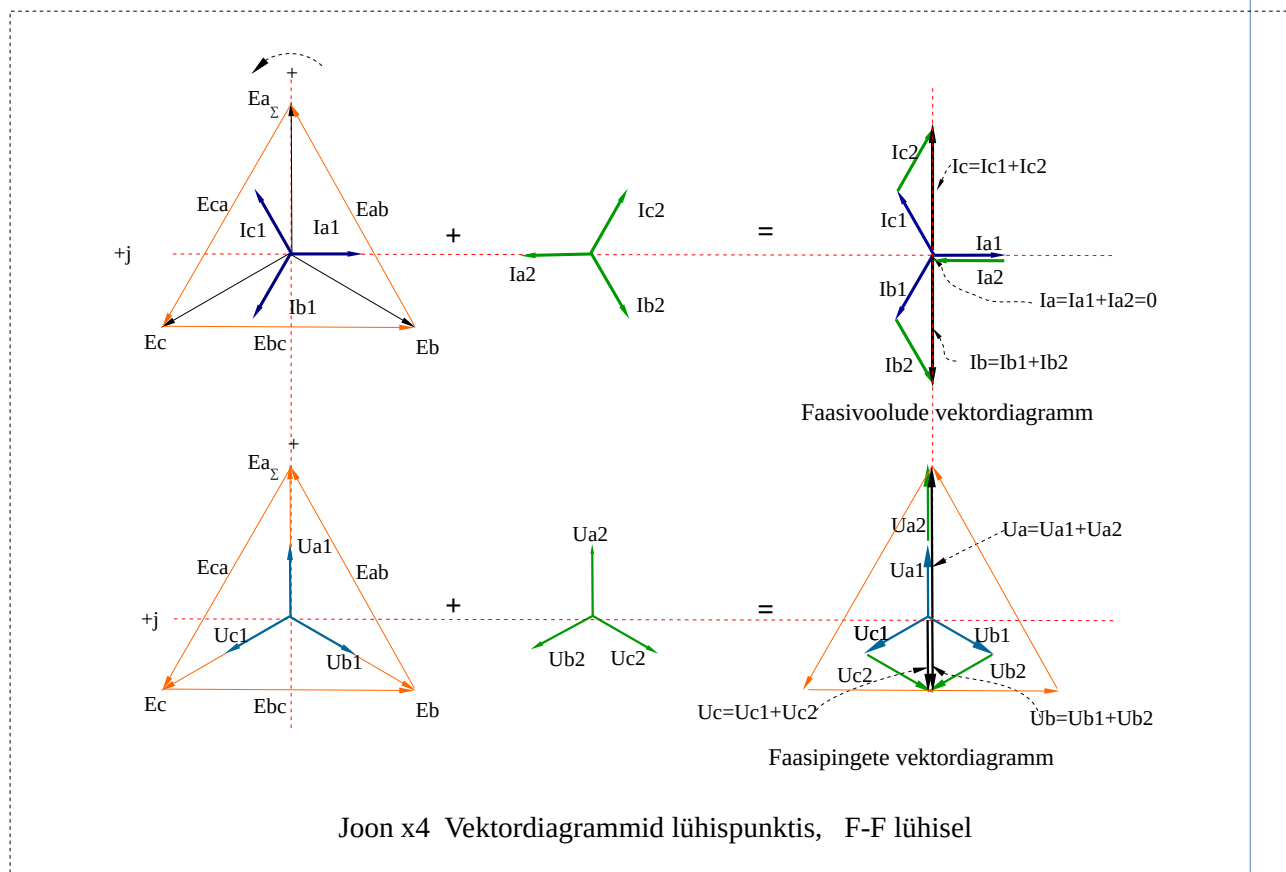
$$I_b = -I_c$$

Liinipinged

$$U_{bc} = U_b - U_c = 0$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = E_{a\Sigma} + 0.5E_{a\Sigma} = 1.5E_{a\Sigma}$$

$$U_{ca} = U_c - U_a = 0.5E_{a\Sigma} + E_{a\Sigma} = 1.5E_{a\Sigma}$$



Joon x4 Vektordiagrammid lühispunktis, F-F lühisel

M: FF järgnevusvektordiagrammid : I1 ja I2 vastasfaasis ; U1 ja U2 faasis

5.3 F-F-m lühis

F-F-m lühis lühispunktis K, faaside b ja c vahel otse, maaga üle lühistakistuse R_f vt kõrvalolev joonis.

Piiritingimused: $I_a=0$; $U_b=U_c=R_f(I_b+I_c)$;

Otsitavad I_1, I_2, I_0 ; U_1, U_2, U_0 ;

.....

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 0$$

$$\Rightarrow I_0 = -(I_1 + I_2)$$

$$I_0 = 1/3(I_a + I_b + I_c) = 1/3(I_b + I_c)$$

$$\Rightarrow 3I_0 = (I_b + I_c) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_b = U_c = R_f(I_b + I_c) = 3R_f I_0$$

$$U_b - U_c = 0 \Rightarrow a^2 U_1 + a U_2 + U_0 - a U_1 - a^2 U_2 - U_0 =$$

$$(a^2 - a)U_1 - (a^2 - a)U_2 = 0$$

$$\Rightarrow U_1 = U_2$$

$$U_b = 3R_f I_0 \Rightarrow (a^2 + a)U_1 + U_0 = 3R_f I_0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_0 - U_1 = 3R_f I_0$$

$$\Rightarrow U_1 = -(Z_0 + 3R_f)I_0$$

$$U_0 = U_1 + 3R_f I_0$$

$$U_1 = U_2 = U_0 - 3R_f I_0$$

$$I_1 + I_2 + I_0 = 0 \Rightarrow$$

$$I_1 = (U_1/Z_2) + (U_1/(Z_0 + 3R_f)) = U_1 \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{(Z_0 + 3R_f)} \right) =$$

$$U_1 \left(\frac{(Z_0 + 3R_f) + Z_2}{Z_2(Z_0 + 3R_f)} \right) =$$

$$U_1 = I_1 \left(\frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right)$$

$$E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_1 = I_1 \left(\frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right) \Rightarrow$$

$$E_{1\Sigma} = I_1 \left(\frac{(Z_2(Z_0 + 3R_f))}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} + Z_{1\Sigma} \right)$$

$$I_1 = E_{1\Sigma} / \left(Z_{1\Sigma} + \frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right)$$

$$I_1 = E_{1\Sigma} / \left(\frac{Z_{1\Sigma}(Z_0 + 3R_f) + Z_2(Z_0 + 3R_f) + Z_2^2}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right)$$

$$U_2 = U_1 \Rightarrow -Z_2 I_2 = I_1 \left(\frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right) \Rightarrow$$

$$I_2 = -I_1 \left(\frac{Z_0 + 3R_f}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right)$$

$$U_1 = U_0 - 3R_f I_0 \Rightarrow I_1 \left(\frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right) = -(Z_0 + 3R_f)I_0 \Rightarrow$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2}$$

Eespooltoodud vooludele vastab järgnevusaseskeemide ühendus vastavalt joonisele

(pärijärgnevus on järjestikku **vj** ja **nj** aseskeemidega)

Kokkuvõttes

järgnevusparameetrid FFm lühise kohas

$$I_1 = E_{1\Sigma} / \left\{ \left(Z_{1\Sigma} + \frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right) \right\} \quad (\text{FFm-1})$$

$$I_2 = -I_1 \left[\frac{(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right] \quad (\text{FFm-2})$$

$$I_0 = -I_1 \left[\frac{Z_2}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right] \quad (\text{FFm-3})$$

$$U_1 = E_{1\Sigma} - Z_{1\Sigma} I_1 = I_1 \left[\frac{Z_2(Z_0 + 3R_f)}{(Z_0 + 3R_f) + Z_2} \right] \quad (\text{FFm-4})$$

$$U_2 = U_1 = -Z_2 I_2 \quad (\text{FFm-5})$$

$$U_0 = -Z_0 I_0 = U_1 + 3R_f I_0 \quad (\text{FFm-6})$$

$$\text{kui } R_f = 0 \text{ siis } U_1 = U_2 = U_0$$

.....

Faasisuurused

Voolud:

$$I_a = 0$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0$$

$$I_m = I_b + I_c = 3I_0$$

Pinged:

$$U_a = U_1 + U_2 + U_0 =$$

$$U_a = U_1 + U_2 + U_0 = 3U_1 + R_f \cdot 3I_0$$

$$U_b = a^2 U_1 + a U_2 + U_0 = 3R_f I_0$$

$$U_c = a U_1 + a^2 U_2 + U_0 = 3R_f I_0$$

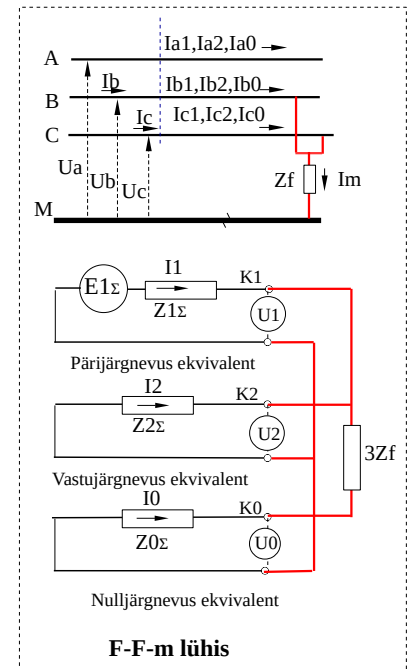
$$U_b = U_c = R_f(I_b + I_c)$$

$$I_b = I_1(a^2 - (Z_2 + a^2 Z_0)/(Z_2 + Z_0)) \quad R_f \text{ ga ???}$$

$$I_c = I_1(a - (Z_2 + a^2 Z_0)/(Z_2 + Z_0))$$

$$I_b + I_c = 3I_0 = I_m$$

$$\text{Kui } R_1 = R_2 = R_0 = 0 \text{ siis } I_b = I_c, \text{ üldjuhul } I_b \neq I_c$$



F-F-m lühis

Pingete ja voolude vektordiagrammid lühispunktis, F-F-m lühis.

analoogiliselt eelneva lühise liigiga $R_f=0$, $R1_\Sigma=R2_\Sigma=R0_\Sigma=0$; $X0_\Sigma=X1_\Sigma=X2_\Sigma$
 st tegemist on tugevas võrguosas asuva metallse lühisega, $E1_\Sigma=Ea_\Sigma \perp 0^\circ$

Piiritingimused: $Ia=0$; $Ub=Uc=R_f(Ib+Ic)$;

Eelnevast teada: $I0=-(I1+I2)$; $U1=U2=U0$ ($R_f=0$)

$$I1 = E1_\Sigma / (jX1_\Sigma + (jX2_\Sigma * jX0_\Sigma) / (jX0_\Sigma + jX2_\Sigma)) =$$

$$E1_\Sigma / (jX1_\Sigma + (jX1_\Sigma * jX1_\Sigma) / (jX1_\Sigma + jX1_\Sigma)) = E1_\Sigma / 1.5 jX1_\Sigma = (2/3) [E1_\Sigma / X1_\Sigma] \perp -90^\circ$$

- seos määrab $Ia1$ suuruse ja asendi $E1_\Sigma$ suhtes

$$I2 = -I1 * ((Z0 + 3R_f) / (Z0 + 3R_f + Z2)) = -I1 * jX1/2jX1 = -(1/2)I1$$

- seos määrab päri ja vatujärgnevusvoolude tähe omavahelise asendi ja suuruse

$$I0 = -I1 * ((Z2^*) / (Z0 + 3R_f + Z2)) = -I1 * jX1/2jX1 = -(1/2)I1$$

$$Ua1 = Ua2$$

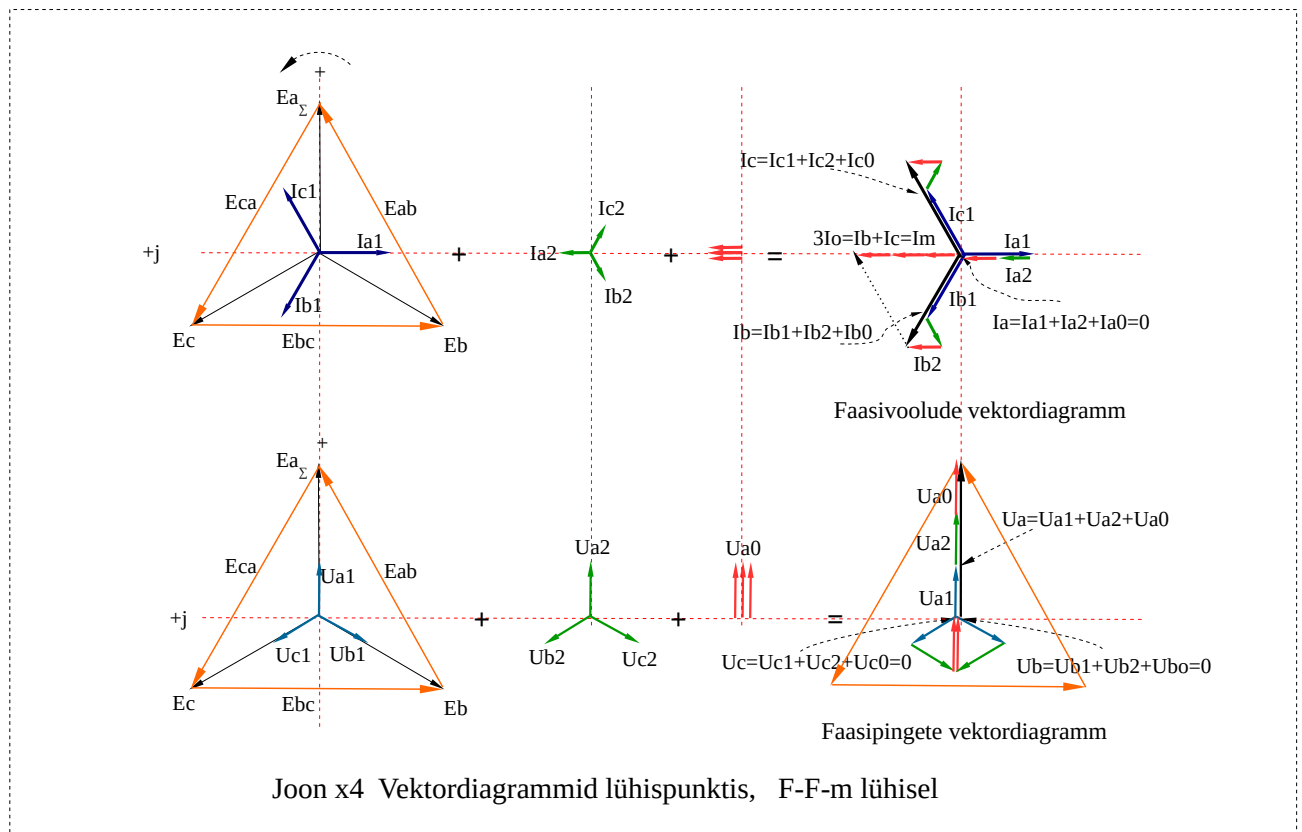
- seos määrab päri ja vatujärgnevuspingete tähe omavahelise asendi ja suuruse

$$U2 = U1 = -Z2 I2 = -I2 * jX1_\Sigma = (1/2) I1 * jX1_\Sigma = (1/2) (2/3) [E1_\Sigma / jX1_\Sigma] * jX1_\Sigma = (1/3) E1_\Sigma \perp 0^\circ$$

$$U0 = U1 + 3R_f I0 \gg U0 = U1 = (1/3) E1_\Sigma \perp 0^\circ$$

- seos määrab $Ua1$ suuruse ja asendi $E1_\Sigma$ suhtes

Eelnevate seoste alusel on kõikide suuruste faasid määratud $E1_\Sigma$ suhtes ja on võimalik joonistada nii järgnevussuuruste kui faasisuuruste vektordiagrammid vt joon x4



M: FFm järgnevusvektordiagrammid: $I2$ ja $I0$ vastasfaasis $I1$ -ga; $U2$ ja $U0 \sim$ faasis $U1$ -ga

5.4 Näide: Eespooltoodud valemite kasutamine lühisvoolude arvutamiseks lühispunktis .

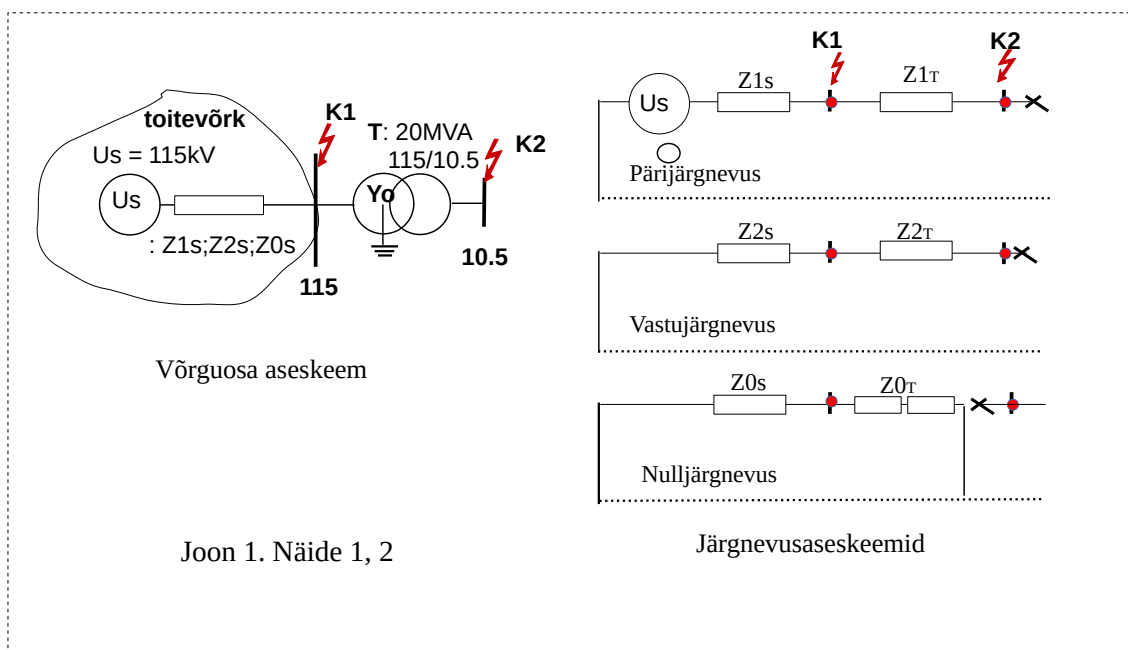
Olgu toitevõrk ekvivalenteeritud 110 kV lattide L suhtes ilma lattidele lülitatud trafot T arvestamata, teada on toitevõrgu ekvivalentsed parameetrid;

110kV lattidele on lülitatud kahemähiseline maandatud neutraaliga trafo T mille ap poolelt toidet ei ole , koormust ei arvestata.

Leida lühisparameetrid 110kV lattide asümmeetrilistel lühistel (Fm; FFm; FF).

Käsitlus füüsilikes ühikutes.

Võrgu skeem ja järgnevusaseskeemid järgneval joonisel.



Joon 1. Näide 1, 2

Süsteemi (toitevõrk) ekvivalentsed parameetrid :

$$U_s = 115 \text{ kV} ;$$

$$Z_{1s} = Z_{2s} = 4.4 + j12.8 = 13.5 \angle 71.0^\circ \Omega$$

$$Z_{0s} = 6.3 + j29.8 = 30.5 \angle 78.0^\circ \Omega$$

Trafo:

$$U_n(\text{kV}) : 115 \pm 9 \times 1.67\% \quad 11.$$

$$S_n(\text{MVA}) : 20.0$$

$$I_n(\text{A}) : 100.5 \quad 1050.$$

$$U_k\% : 10.0$$

$$U_o\% : 9.5$$

$$\text{Lül.gr.} : \text{YNd11}$$

M: Põhimõtteliselt on tegemist juhuga kus 110kV lattidele lülitatakse uus trafo, nagu aseseemidest näha on vajalik ainult trafo nulljärgnevustakistus , kuid arvutame reaktantside täiskomplekti.

Reaktantsid arvutatud 115kV-l

$$Z_T = 0.1 \cdot 115 \cdot 115 / 20.0 = 66.1 \Omega$$

$$Z_{0T} = 0.095 \cdot 115 \cdot 115 / 20.0 = 62.8 \Omega$$

$$dP_T = 81.5 \text{ kW}; \quad R_T = 81500 / 3 \cdot 100.5^2 = 2.7 \Omega$$

$$X_T = (66.1^2 - 2.7^2) = 66.0 \Omega$$

$$Z_{1T} = Z_T = 2.7 + j66.0 = 66.1 \angle 87.7^\circ \Omega$$

$$X_{0T} \sim Z_{0T} \sim j62.8 = 62.8 \angle 90^\circ \Omega$$

Ekvivalentsed järgnevusparameetrid lühispunkti K1 suhtes

$$E_{1f_\Sigma} = U_s \sqrt{3} = 115 / \sqrt{3} = 66.5 \text{ kV}$$

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = Z_{1s} = 4.4 + j12.8 \Omega$$

$$Z_{0\Sigma} = Z_{0s} \parallel Z_{0T} = (30.5 \angle 78.0^\circ) \cdot (62.8 \angle 90^\circ) / (6.3 + j29.8 + j62.8) = 20.6 \angle 82^\circ = 2.9 + j20.4 \Omega$$

Fm lühis ; Rf=0

M: Reaalsetes arvutustes, olenevalt eesmärgist, püütakse leida max ja min lühisvoolude väärtusi st süsteemi kirjeldatakse max ja min impedantsidega ning ka pingeteguriga c mis valitakse samuti sõltuvalt võrgust ja arvutatavast talitlusest (suurem või väiksem kui 1)

Voolud lühise kohas:

$$\begin{aligned} I_1=I_2=I_0 &= E_{1\Sigma}/(Z_{1\Sigma}+Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}) = \\ &= 66.5/(4.4+j12.8+4.4+j12.8+2.9+j20.4) = 66.5/(11.7+j46) = 66.5/(47.5\angle 75.7^\circ) = \\ &= 1.4\angle -75.8^\circ = 0.35 - j1.36 \text{ kA} \end{aligned}$$

$$I_a=I_1+I_2+I_0 = 4.2\angle -75.8^\circ \text{ kA}$$

$$I_b=I_c=0$$

Pinged lühisekohas:

$$U_1=I_1*(Z_{2\Sigma}+Z_{0\Sigma}) = (1.4\angle -75.8^\circ)*(34.0\angle 77.6^\circ) = 47.6\angle 1.9^\circ \text{ kV} = 47.6+j1.6 \text{ kV}$$

$$U_2=-I_1*Z_{2\Sigma} = -(1.4\angle -75.8^\circ)*(13.5\angle 71^\circ) = -18.9\angle -4.7^\circ = 18.9\angle 175.3^\circ = -18.8+j1.5 \text{ kV}$$

$$U_0=-I_1*Z_{0\Sigma} = -(1.4\angle -75.8^\circ)*(20.6\angle 82^\circ) = -28.9\angle 6.3^\circ = 28.9\angle 173.7^\circ = -28.7-j3.2 \text{ kV}$$

$$\text{Kontrolliks: } U_a=U_1+U_2+U_0=0 \Rightarrow 47.6+j1.6 - 18.9+j1.5 - 28.6-j3.2 = 0.1-j0.1 \approx 0 \text{ (ümardamisviga)}$$

$$\begin{aligned} U_b=a^2U_1+aU_2+U_0 &= (1\angle 240^\circ)*(47.6\angle 1.9^\circ) - (1\angle 120^\circ)*(18.9\angle -4.7^\circ) - (28.9\angle 6.3^\circ) = \\ &= 47.6\angle 241.9^\circ - (18.9\angle 115.3^\circ) - (28.9\angle 6.3^\circ) = -22.4-j42.0 + 8.1-j17.1 - 28.6-j3.2 = \\ &= -62.3-j42.9 \text{ V} = 75.6\angle -124.6^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$U_c=aU_1+a^2U_2+U_0 = \dots\dots\dots = 68.1\angle 129.2^\circ \text{ kV}$$

$$\text{Maandatus tegur antud võrgu punktis: } EFF=|U_b|/U_{fn} = 75.6/66.5 = 1.14$$

Järgnevusvoolude jagunemine :

M: Antud juhul kogu päri ja vastujärgnevusvool tuleb võrgust, nulljärgnevusvool tuleb osaliselt võrgust ja osaliselt trafo neutaalist.

I_{0T} - I_0 trfost

I_{0s} - I_0 võrgust

$$I_{0s}=-U_0/Z_{0s}=(28.9\angle 6.3^\circ)/30.5\angle 78.0^\circ = 0.95\angle -71.7^\circ \text{ kA}$$

$$I_{0T}=-U_0/Z_{0T}=(28.9\angle 6.3^\circ)/62.8\angle 90.0^\circ = 0.46\angle -83.7^\circ \text{ kA}$$

$$\text{Kontrolliks: } I_{0s} + I_{0T}=I_0 \Rightarrow (0.95\angle -71.7^\circ) + (0.46\angle -83.7^\circ) = 1.4\angle -75.7^\circ \text{ kA}$$

Faasivoolude jagunemine :

Faasivoolud võrgust I_{as} ; I_{bs} ; I_{cs} ; ja trafost I_{aT} ; I_{bT} ; I_{cT}

Faasivoolud määratakse harude järgnevusvoolude aluselt üldvalemiga (....)

Võrguharu:

$$I_{1s}=I_1=1.4\angle -75.7^\circ \text{ kA}; I_{2s}=I_2=1.4\angle -75.7^\circ \text{ kA}; I_{0s}=0.95\angle -71.7^\circ \text{ kA};$$

$$I_{as}=I_{1s} + I_{2s} + I_{0s} = 0.46\angle -83.7^\circ + 0.46\angle -83.7^\circ + 0.95\angle -71.7^\circ = 3.75\angle -74.8^\circ \text{ kA}$$

$$I_{bs}=a^2I_{1s}+aI_{2s}+I_{0s} = (1\angle 240^\circ)*0.46\angle -83.7^\circ + (1\angle 120^\circ)*0.46\angle -83.7^\circ + 0.95\angle -71.7^\circ = 0.46\angle 96.3^\circ \text{ kA}$$

$$I_{cs}=aI_{1s}+a^2I_{2s}+I_{0s} = (1\angle 120^\circ)*0.46\angle -83.7^\circ + (1\angle 240^\circ)*0.46\angle -83.7^\circ + 0.95\angle -71.7^\circ = 0.46\angle 96.3^\circ \text{ kA}$$

Trafoharu:

$$I_{1T}=0; I_{2T}=0; I_{0T}=0.46\angle -83.7^\circ \text{ kA};$$

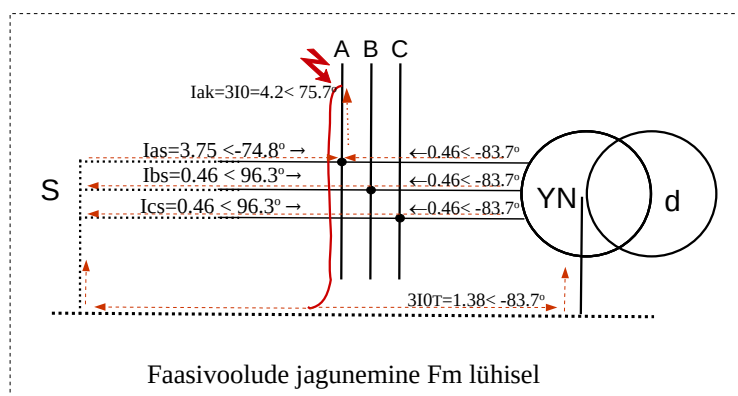
$$I_{aT}=I_{1T} + I_{2T} + I_{0T} = 0+0+ 0.46\angle -83.7^\circ \text{ kA}$$

$$I_{bT}=a^2I_{1T}+aI_{2T}+I_{0T} = 0+0+ 0.46\angle -83.7^\circ \text{ kA}$$

$$I_{cT}=aI_{1T}+a^2I_{2T}+I_{0T} = 0+0+ 0.46\angle -83.7^\circ \text{ kA}$$

M: Näeme et trafo kõikides faasides on võrdne vool mis on võrdne I_{0T} -ga ($1/3$ trafo neutraali voolu $3I_{0T}$) ja liiniharu faasides b ja c vool võrdne $-I_{0T}$ ga

Selline nähtus esineb ühe toitepunktiga maandatud neutraaliga radiaalvõrkudes, nähtust nim **Bauch-i** nähtuseks (Bauchs paradox) ja nõuab tähelepanu kaitsete sätestuse valikul taolises võrgus.



FFm lühis ; Rf=0 ;

Arvutusvalemid:

$$I1 = E1_{\Sigma} / \{ (Z1_{\Sigma} + [Z2_{\Sigma} * (Z0_{\Sigma} + 3Rf)] / ((Z0_{\Sigma} + 3Rf) + Z2_{\Sigma})) \}$$

$$I2 = -I1 * [(Z0_{\Sigma} + 3Rf) / ((Z0_{\Sigma} + 3Rf) + Z2_{\Sigma})]$$

$$I0 = -I1 * [Z2_{\Sigma} / ((Z0_{\Sigma} + 3Rf) + Z2_{\Sigma})]$$

$$U1 = E1_{\Sigma} - Z1_{\Sigma} I1 = I1 * [Z2_{\Sigma} * (Z0_{\Sigma} + 3Rf) / ((Z0_{\Sigma} + 3Rf) + Z2_{\Sigma})]$$

$$U2 = U1 - Z2_{\Sigma} I2$$

$$U0 = -Z0_{\Sigma} I0 = U1 + 3Rf I0$$

$$Z_{ffm} = Z1_{\Sigma} + (Z2_{\Sigma} * Z0_{\Sigma} / (Z0_{\Sigma} + Z2_{\Sigma})) =$$

$$(13.5 < 71.0^{\circ}) + [(13.5 < 71.0^{\circ}) * (20.6 < 82^{\circ}) / ((13.5 < 71.0^{\circ}) + (20.6 < 82^{\circ}))] = 21.7 < 72.7^{\circ} \Omega$$

Järgnevusvoolud lühispunktis K1

$$I1 = E1_{\Sigma} / Z_{ffm} = 66.5 / 21.7 < 72.7^{\circ} = 3.06 < -72.7^{\circ} \text{ kA}$$

$$I2 = -I1 * Z0_{\Sigma} / (Z0_{\Sigma} + Z2_{\Sigma}) = -(3.06 < -72.7^{\circ}) * (20.6 < 82^{\circ}) / ((20.6 < 82^{\circ}) + (13.5 < 71.0^{\circ})) = 1.86 < 111.7^{\circ} \text{ kA}$$

$$I0 = -I1 * Z2_{\Sigma} / (Z0_{\Sigma} + Z2_{\Sigma}) = -(3.06 < -72.7^{\circ}) * (13.5 < 71.0^{\circ}) / ((20.6 < 82^{\circ}) + (13.5 < 71.0^{\circ})) = 1.22 < 100.7^{\circ} \text{ kA}$$

Faasivoolud lühispunktis K1

$$I_a = I1 + I2 + I0 = \dots = 0.0 \text{ kA}$$

$$I_b = a^2 I1 + a I2 + I0 = \dots = 4.38 < 174.6^{\circ} \text{ kA}$$

$$I_c = a I1 + a^2 I2 + I0 = \dots = 4.86 < 40.8^{\circ} \text{ kA}$$

$$I_m = 3 I0 = I_b + I_c = \dots = 3.7 < 100.7^{\circ} \text{ kA}$$

Leiame ka nulljärgnevusvoolude jagunemise FFm lühisel

$$U0 = -Z0_{\Sigma} I0 = -(20.6 < 82^{\circ}) * (1.22 < 100.7^{\circ}) = -(25.1 < 182.7^{\circ}) \text{ kV}$$

I0T - I0 trfost

I0s - I0 võrgust

$$I0s = -U0 / Z0s = 25.1 < 182.7^{\circ} / 30.5 < 78.0^{\circ} = 0.82 < 104.7^{\circ} \text{ kA}$$

$$I0T = -U0 / Z0T = 25.1 < 182.7^{\circ} / 62.8 < 90.0^{\circ} = 0.40 < 92.7^{\circ} \text{ kA}$$

$$\text{Kontrolliks : } I0s + I0T = I0 \Rightarrow (0.95 < -71.7^{\circ}) + (0.46 < -83.7^{\circ}) = 1.22 < 100.7^{\circ} \text{ kA}$$

Faasivoolude jagunemine :

Faasivoolud võrgust Ias; Ibs; Ics; ja trafost Iat; Ibt; Ict

Faasivoolud määratakse harude järgnevusvoolude aluselt üldvalemiga (....)

Võrguharu:

$$I1s = I1 = 3.06 < -72.7^{\circ} \text{ kA} ; I2s = I2 = 1.86 < 111.7^{\circ} \text{ kA} ; I0s = 1.86 < 111.7^{\circ} \text{ kA} ;$$

$$Ias = I1s + I2s + I0s = (3.06 < -72.7^{\circ}) + (1.86 < 111.7^{\circ}) + (0.82 < 104.7^{\circ}) = 0.4 < -87.3^{\circ} \text{ kA}$$

$$Ibs = a^2 I1s + a I2s + I0s = (1 < 240^{\circ}) * (3.06 < -72.7^{\circ}) + (1 < 120^{\circ}) * 1.86 < 111.7^{\circ} + (0.82 < 104.7^{\circ}) = 4.34 < 179.8^{\circ} \text{ kA}$$

$$Ics = a I1s + a^2 I2s + I0s = (1 < 120^{\circ}) * (3.06 < -72.7^{\circ}) + (1 < 240^{\circ}) * 1.86 < 111.7^{\circ} + (0.82 < 104.7^{\circ}) = 4.62 < 36.9^{\circ} \text{ kA}$$

Trafoharu:

$$I1T = 0 ; I2T = 0 ; I0T = 0.4 < 92.7^{\circ} \text{ kA} ;$$

$$IaT = I1T + I2T + I0T = 0 + 0 + 0.4 < 92.7^{\circ} \text{ kA}$$

$$IbT = a^2 I1T + a I2T + I0T = 0 + 0 + 0.4 < 92.7^{\circ} \text{ kA}$$

$$IcT = a I1T + a^2 I2T + I0T = 0 + 0 + 0.4 < 92.7^{\circ} \text{ kA}$$

M: *Bauchi paradoks avaldub analoogiliselt*

=====

Näide 2 . Eelneva võrgu baasil lühised trafo 10.5kV poolel (K2), kuna see on maandamata neutraaliga võrk siis on võimalik ainult FF lühis, lisaks leiame kuidas avaldub 10.5kV FF lühis trafo 115kV poolel.

Impedantsid taandatud 10.5kV -le, Z0 pole vajalik sest FF lühisel nulljärgnevusaseskeem avatud, trafo ülekandetegur $t_r = U_a/U_{\bar{u}} = 10.5/115 = 0.091$

süsteemi järgnevusimpedantsid

$$Z_{1s} = Z_{2s} = 13.5 < 71.0^\circ \Omega \quad Z_{1s} = Z_{2s}^{10.5kV} = t_r^2 * Z_{1s} = 0.091^2 (4.4 + j12.8) = 0.036 + j0.106 = 0.091^2 * 13.5 < 71.0^\circ = 0.112 < 71.0^\circ \Omega$$

trafo järgnevusimpedantsid

$$Z_{1T} = 2.7 + j66.0 = (66.1 < 87.7^\circ) \Omega^{115kV} \gggg = 0.025 + j0.55 = 0.55 < 87.7^\circ \Omega^{10.5kV}$$

Ekvivalentsed järgnevusparameetrid lühispunkti K2 suhtes

$$E_{1f_{\Sigma}} = U_s \sqrt{3} = 10.5 / \sqrt{3} = 6.07 \text{ kV}$$

$$Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = Z_{1s} + Z_{1T} = 0.036 + j0.106 + 0.025 + j0.55 = 0.061 + j0.656 = 0.659 < 84.7^\circ \Omega^{10.5kV}$$

FF lühis ; Rf=0

$$I_1 = E_{1f_{\Sigma}} / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + R_f)$$

$$I_2 = -I_1$$

$$I_0 = 0$$

$$U_1 = I_1 (Z_{2\Sigma} + R_f) =$$

$$U_2 = U_1$$

$$U_0 = 0$$

Lühispunktis K2

$$I_1 = 6.07 / (2 * 0.659 < 84.7^\circ) = 4.6 < -84.7^\circ \text{ kA}$$

$$I_2 = -(4.6 < -84.7^\circ) = 4.6 < 95.1^\circ \text{ kA}$$

$$U_1 = I_1 * Z_{2\Sigma} = 4.6 < -84.7^\circ * 0.659 < 84.7^\circ = 3.03 < 0^\circ \text{ kV}$$

$$U_2 = U_1 = 3.03 < 0^\circ \text{ kV}$$

Faasisuurused

$$I_a = I_1 + I_2 = 4.6 < -84.7^\circ + 4.6 < 95.3^\circ = 0 \text{ kA}$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 = -j\sqrt{3} * 4.6 < -84.7^\circ = \sqrt{3} * 4.6 < -174.7^\circ \text{ kA}$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 = (a - a^2) I_1 = j\sqrt{3} * 4.6 < -84.7^\circ = \sqrt{3} * 4.6 < 5.3^\circ \text{ kA}$$

$$U_a = U_1 + U_2 = 3.03 < 0^\circ + 3.03 < 0^\circ = 6.06 < 0^\circ \text{ kV}$$

$$U_b = a^2 U_1 + a U_2 = (a^2 + a) U_1 = 3.03 < 180^\circ \text{ kV} \quad (a^2 + a) = -1$$

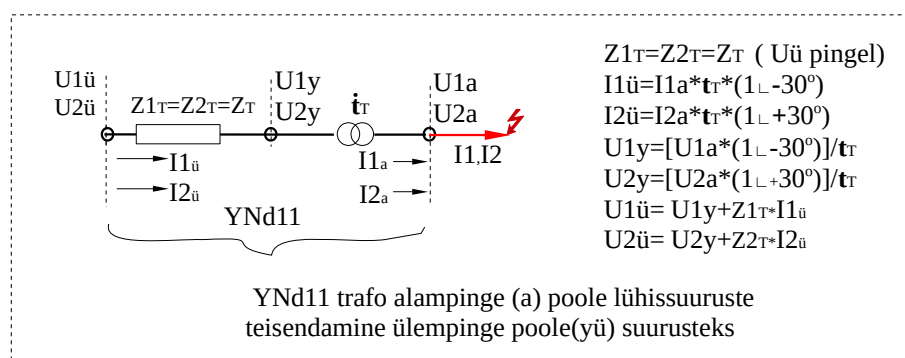
$$U_c = a U_1 + a^2 U_2 = (a + a^2) U_1 = 3.03 < 180^\circ \text{ kV}$$

Järgnevussuurused trafo 115kV poolel

Taandame järgnevussuurused ülempinge (ü,y) poolele vastavalt ülekandetegurile $t = 0.091$ ja pöörame vastvalt lülitusgrupile, vt ka skeem.

Pärijärgnevussuurused pöörduvad $1 < -30^\circ$

vastujärgnevussuurused pöörduvad $1 < +30^\circ$



Põhimõtteliselt tähendab arvutus „tagasi käigu” algust, kusjuures aluseks võrgu püsitalitluse arvutus loogika „lõpust algusesse”

$$I1\ddot{u}=(1<-30^\circ)*t*I1=(1<-30^\circ)*0.091*4.6<-84.7^\circ=0.42<-114.7^\circ\text{ kA}$$

$$I2\ddot{u}=(1<30^\circ)*t*I2=(1<30^\circ)*0.091*4.6<95.1^\circ=0.42<+125.1^\circ\text{ kA}$$

$$U1y=(1<-30^\circ)*U1/t=(1<-30^\circ)*3.03<0^\circ/0.091=33.3<-30^\circ\text{ kV}$$

$$U2y=(1<30^\circ)*U2/t=(1<30^\circ)*3.03<0^\circ/0.091=33.3<+30^\circ\text{ kV}$$

$$U1\ddot{u}=U1y+I1\ddot{u}*Z1T=(33.3<-30^\circ)+(0.42<-114.7^\circ)*(66.1<87.7^\circ)=61.1<-28.7^\circ\text{ kV}$$

$$U2\ddot{u}=U2y+I2\ddot{u}*Z2T=(33.3<+30^\circ)+(0.42<+125.1^\circ)*(66.1<87.7^\circ)=5.7<+16.2^\circ\text{ kV}$$

Faasisuurused:

$$IA=I1\ddot{u}+I2\ddot{u}=(0.42<-114.7^\circ)+(0.42<+125.1^\circ)=0.42<-174.9^\circ\text{ kA}$$

$$IB=a^2*I1\ddot{u}+a*I2\ddot{u}=(1<-120^\circ)*(0.42<-114.7^\circ)+(1<+120^\circ)*(0.42<+125.1^\circ)=0.42<-174.9^\circ\text{ kA}$$

$$IC=a*I1\ddot{u}+a^2*I2\ddot{u}=(1<+120^\circ)*(0.42<-114.7^\circ)+(1<-120^\circ)*(0.42<+125.1^\circ)=0.84<+5.1^\circ\text{ kA}$$

M: Kui ap poolel $I_a=0$; $I_b=I_c$, siis üp poolel $I_a=I_b=-IC/2$ ja $I_c=-(I_a+I_b)=Ik3$, seega voolude jagunemine faaside vahel ap ja üp poolele on täiesti erinev, seda tuleks silmas pidada trafo max kaitse sätestamisel

$$UA=U1\ddot{u}+U2\ddot{u}=(61.1<-28.7^\circ)+(5.7<+16.2^\circ)=65.3<-25.2^\circ\text{ kV}$$

$$UB=a^2*U1\ddot{u}+a*U2\ddot{u}=(1<-120^\circ)*(61.1<-28.7^\circ)+(1<+120^\circ)*(5.7<+16.2^\circ)=62.8<-153.8^\circ\text{ kV}$$

$$UC=a*U1\ddot{u}+a^2*U2\ddot{u}=(1<+120^\circ)*(61.1<-28.7^\circ)+(1<-120^\circ)*(5.7<+16.2^\circ)=55.6<+92.8^\circ\text{ kV}$$

M: Ka faasipingete vahekorrad on ap ja üp poolele erinevad, tulemusena näiteks üp poole distantskaitse mõõdab ap poole FF lühisel suurema impedantsi kui 3F lühisel, seda tuleks silmas pidada distantskaitsega reserveerimisel läbi trafo D mähise taha.

Koostas :
Vello Zupsmann
zups.ve@gmail.com