

III OSA. ALAJAAMADE PROJEKTEERIMINE

1 SISSEJUHATUS

◆ Süsteemne lähenemine.

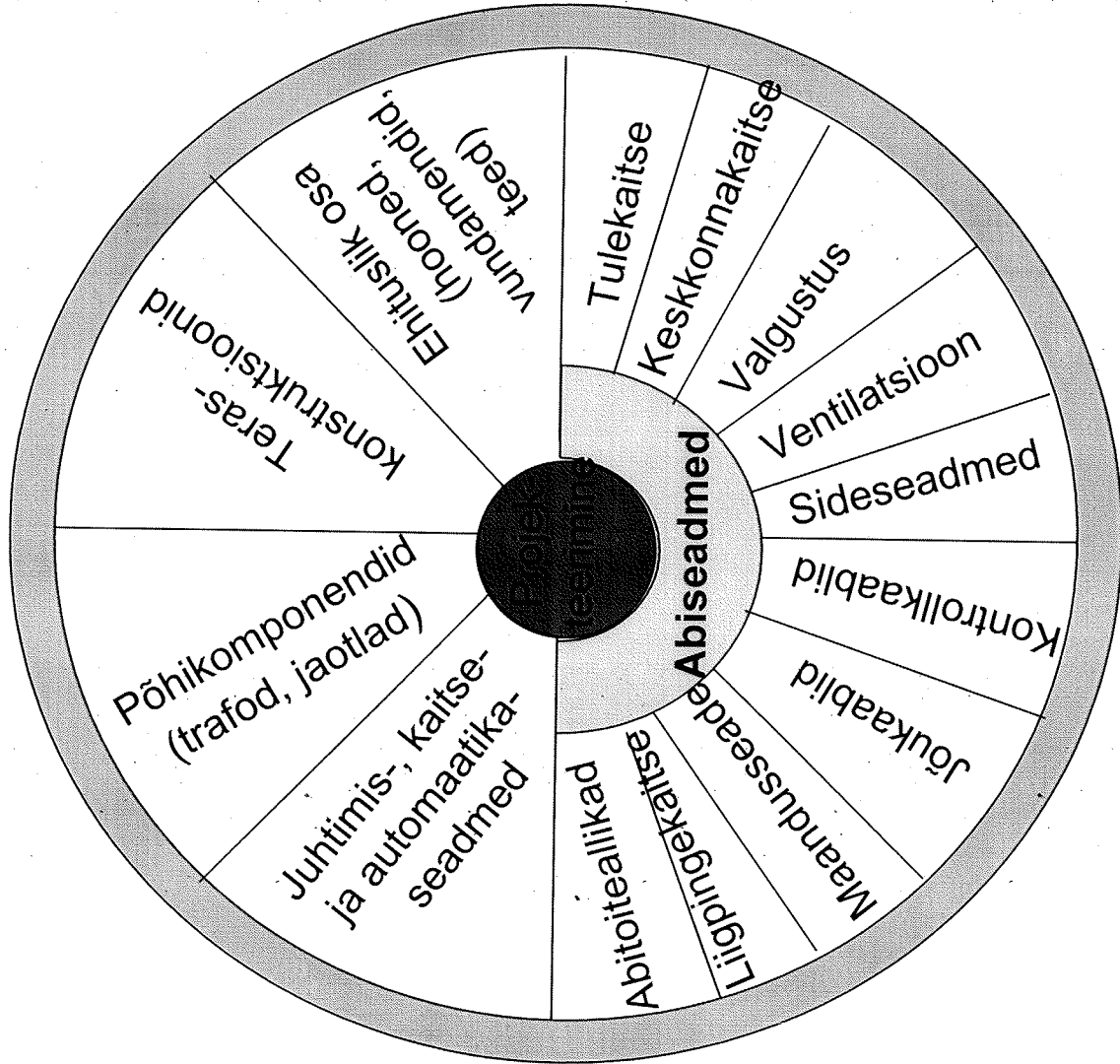
Alajaama elektriline osa ja konstruktsioon sõltuvad tema rollist energiasüsteemis. Alajaama üldised näitajad ja võimalikud talitusviisid määratakse energiasüsteemi või elektrivõrgu (või selle osa) projekteerimise käigus eelseisvaks viieks aastaks, arvestades perspektiiviga 10 a.

◆ Elektrivõrgu projekti koosseisus määratakse kõigi alajaamade jaoks:

- asukoht ja roll
- ühendus süsteemiga ja soovitatav primaarskeem
- 35-kV ja kõrgema pingega väljuvate liinide arv ja talitusviisid, ülekantavad võimsused, transiidi olemasolu läbi ülempinge lattide
- kõikide lattide pinged ja pinge reguleerimise piirid
- kompenseerimisseadmete vajadus ja tüüp
- süsteemi automaatika maht ja iseloom (ATL, ASR jne.)
- nõuded releekaitsele
- lühisvoolud ja -võimsused kõigi pinge lattidel
- neutraali talitusviis, kaarekustutuspoolide vajadus ja võimsus
- sisemiste liigpingete eeldatavad nivood, isolatsiooni koordineerimise nõuded

◆ Need andmed määravad ära **alajaama tüübi**

ALAJAAMADE PROJEKTEERIMINE



2. ALAJAAMA STRUKTUUR JA SIDE ELEKTRIVÕRGUGA

Alajaam [*substation, подстанция, sähköasema*] – elektrivõrgu osa, mis paikneb antud territooriumil ja sisaldab põhiliselt ülekande- või jaotusliinide lõppühendusi, lülitus- ja juhtimisseadmestikku, muundusseadmeid (eelkõige trafosid) ning hooneid. Alajaamas asub tavaliselt ka kaitse- ja juhtimisaparatuur.

2.1. Alajaama põhitüübid

Trafoalajaam [*transformer substation, трансформаторная подстанция, muuntoasema, muuntamo*] – alajaam kaht või enamat eripingelist elektrivõrku ühendavate jõutrafodega.

Lülituspunkt (ka **lülitusalajaam**) [*switching substation, электрическое распределительное устройство, kytkinasema, kytkemö*] – lülitusseadmestiku ja tavaliselt kogumislattidega alajaam, milles puuduvad jõutrafod.

Muundusalajaam [*converter substation, преобразовательная подстанция, muuttaja-asema*] – muundureid sisaldav alajaam, mille põhiülesandeks on vahelduvvoolu muundamine alalisvooluks või vastupidi.

Sagedusmuundusalajaam [*frequency converter substation, подстанция, преобразующая частоту, taajuudenmuuttaja-asema*] – alajaam, mis muundab antud sagedusega vahelduvvoolu teise sagedusega vahelduvvooluks.

Veosalajaam [*traction substation, тяговая подстанция, kiskoliikenteen syöttöasema*] – alajaam, mille põhiülesandeks on elekterveovõrgu toitmise.

(Pinge)kõrgendusalaajaam [*step-up substation, повышающая подстанция, nostomuuntoasema*] – trafoalajaam, mille trafode väljundpinge on kõrgem sisendpingest.

(Pinge)madaldusalajaam [*step-down substation, понижающая подстанция, pudotusmuuntoasema*] – trafoalajaam, mille trafode väljundpinge on madalam sisendpingest.

Liigitus vastavalt alajaama rollile süsteemis:

(Süsteemi) sõlmajaam [*bulk transmission substation, main substation, узловая подстанция*]

Toitealajaam [*supply substation, transmission substation, питающая подстанция*] – kõrgepinge / keskpinge alajaam

Jaotusalajaam (ka **trafopunkt**) [*distribution substation, распределительная подстанция*] – keskpinge / madalpinge alajaam

Tarbijaalajaam [*consumer substation, потребительская подстанция*]

Tootjaalajaam [*producer substation, подстанция производителя*]

Liigitus konstruktsiooni järgi:

Sisealajaam [*indoor substation, закрытая подстанция, sisäasema*] – alajaam, mis on kaitseks väliste ilmastikumõjude eest paigaldatud siseruumi.

Välisalajaam [*outdoor substation, открытая подстанция, ulkoasema*] – alajaam, mis on ette nähtud taluma väliseid ilmastikutingimusi.

Komplektalajaam, kioskalajaam [*kiosk substation, комплектная подстанция, korpiasema*] – kompaktaalajaam, mis on tavaliselt tehases toodetud ja mida kasutatakse ainult elektrienergia jaotamisel.

Metallkestas alajaam [*metal-enclosed substation, бронированная подстанция*] – alajaam, mis koosneb ainult metallkestas seadmetest.

Mastalajaam, postalajaam [*pole-mounted substation, мачтовая подстанция, pylväasema*] – ühele või mitmele postile monteeritud välisalajaam jaotusvõrgus.

Maa-alune alajaam [*underground substation; vault substation, подземная подстанция, maanalainen sähköasema*] – alajaam maa all kasutamiseks.

Liigitus isolatsiooniga järgi

Õhkisolatsiooniga alajaam [*open-type substation, подстанция с воздушной изоляцией, avosähköasema*] – alajaam, milles põhiliseks isolatsiooniks faasijuhtide ja maa vahel ning faasijuhtide vahel on atmosfäärirõhul õhk ja milles osa pingestatutud osi ei ole kapseldatud. Võib olla sise- või välistüüpi.

Gaasisolatsiooniga alajaam [*gas insulated substation, подстанция с газовой изоляцией, kaasueristeinen sähköasema*] – alajaam, mis koosneb ainult gaasisolatsiooniga seadmetest.

Liigitus teeninduse iseloomu järgi

Valvega alajaam, mehitatud alajaam [*manned substation, подстанция с обслуживающим персоналом, päivystetty sähköasema*] – alajaam, mida kohapeal juhib ja teenindab alajaamas töötav personal.

Valveta alajaam, mehitamata alajaam [*unmanned substation, подстанция без обслуживающего персонала, päivystämätön sähköasema*] – alajaam, mida teenindab alajaamas mittepaiknev personal.

Pidevvalvega alajaam [*permanently manned substation, подстанция с дежурным персоналом, jatkuvasti päivystetty sähköasema*] – alajaam, mida teenindab selles pidevalt paiknev personal.

Regulaarvalvega alajaam [*attended substation, посещаемая подстанция, työaikana päivystetty sähköasema*] – alajaam, mida personal teenindab normaalse tööpäeva kestel ja vajadusel ka muul ajal.

Kaugjuhtitav alajaam, telejuhtitav alajaam [*remotely controlled substation, подстанция с дистанционным управлением, kauko-ohjattu sähköasema*] – valveta alajaam, mida juhitakse kaugjuhtimisseadmete abil.

Juhtalajaam [*master substation, опорная подстанция, pääasema*] – valvega alajaam, millest juhitakse kaugjuhitavaid alajaamu.

Satelliitalajaam [*satellite substation, подстанция группового дистанционного управления, ala-asema*] – juhtalajaamast kaugjuhitav alajaam.

Muud liigitused (ülempinge, pingete arvu, skeemi, kuuluvuse jne järgi)

2.2. Alajaama struktuur

Muundusseade – enamikel juhtudel trafo, aga ka alaldi, inverter, sagedusmuundur. Erandjuhtudel puudub (lülituspunkt)

(Jõu)trafo [(power) transformer, (силовой) трансформатор, (teho)muuntaja] – liikuvate osadeta elektriseade, mis edastab primaarmähise vahelduvvoolu energiat ühele või mitmele sekundaarmähisele elektromagnetilise induktsiooni vahendusel. Mähiste vahel puudub elektriline ühendus, v.a autotrafod. Üldjuhul muudab trafo vahelduvvoolu pinget.

Staatiline elektrienergia muundur, mis edastab elektrienergia ilma sagedust muutmata.

Jaotla, jaotusseade [switchgear, распределительное устройство, kytkinlaitteisto, kojeisto, kytkinlaite] – rajatis, mis hõlmab lülitusseadmeid koos juurdekuuluvate juhtimis-, mõõte-, kaitse- ja reguleerimisseadmetega, juhistikku, lisaseadmeid, korpusi ja kandekonstruktsioone ja mis on põhimõtteliselt ette nähtud kasutamiseks elektrienergia genereerimisel, ülekandel, jaotamisel ja muundamisel.

Jaotlaid tavaliselt kaks või rohkem, erandjuhtudel üks (lülituspunkt)

Liigitus – mitmes osas, nagu alajaamadel:

Sisejaotla [indoor switchgear, закрытое распределительное устройство, sisäkytkinlaitos] – jaotla, mis on kaitseks väliste ilmastikumõjude eest paigaldatud siseruumi.

Välisjaotla [outdoor switchgear, открытое распределительное устройство, ulkokytkinlaitos] – alajaam, mis on ette nähtud taluma väliseid ilmastikutingimusi.

Komplektjaotla, [factory-built switchgear, комплектная подстанция, tehdasvalmisteinen kytkinlaitos] – kompakcjaotla, mis on tehases toodetud

Metallkestas jaotla [metal-enclosed substation, бронированная подстанция] – metallkestas seadmetest koosnev jaotla.

Isolatsiooni järgi

Õhkisolatsiooniga jaotla [*open-type switchgear, распределительное устройство с воздушной изоляцией, avokytkinlaitos*] – jaotla, milles põhiliseks isolatsiooniks faasijuhtide ja maa vahel ning faasijuhtide vahel on atmosfäärirõhul õhk ja milles osa pingestatud osi ei ole kapseldatud. Võib olla sise- või välistüüpi.

Gaasisolatsiooniga alajaam [*gas insulated substation, подстанция с газовой изоляцией, kaasueristeinen sähköasema*] – jaotla, mis koosneb ainult gaasisolatsiooniga seadmetest.

Muud alajaama elemendid:

- Hoone
- Juhtimisruum(id)
- Omatarbeseade
- Maandusseade
- Piksekaitseade
- Remondiväljak
- Töökoda
- Suruõhuseadmestik
- Piirded

2.3. Alajaama talitlustingimused

Püsitälitlus

- Normaaltälitlus
- Maksimaalkoormustälitlus

Siirdetälitlus (rikke e avariitälitlus)

2.4. Alajaamade ja elektriiaamade sidumine elektrivörguga

Harualajaam, tüpikalajaam, lõppalajaam [*tapped substation, tee off substation, тупиковая подстанция, pistokasasema*]

Läbivalajaam, transiitalajaam [*double-ended substation, проходная подстанция*]

Sõlmalajaam [*bulk transmission substation, main substation, узловая подстанция*]

2 LÄHTEANDMED

◆ Lähteandmete kogumine – projekteerimise algstaadium

- ◆ Alajaama vajaduse põhjendus - elektrivõrkude arengu projektis
- ◆ Toiteliinide arvu ja pingete põhjendus - samas
- ◆ Alajaama võimsus - üldiselt samas
- ◆ Ehitusplatsi valik koos liinide koridoridega - võimalikult koormustsentris.
Tehnilised ja majanduslikud kaalutlused.
Lahtine või kinnine alajaam.
Elegaastäitega, maaalused jne.
Loodushoiu nõuded.
Optimaalne variant.
- ◆ Laiendamise võimalused, ehitamine mitmes etapis

LÄHTEANDMETE KOOSSEIS

◆ TOITELLIKAD

- Toiteallikad
- Lühisvõimsused ja voolud
- Toitepinged
- Kaugused toiteallikatest
- Reserveerimise võimalused teistest alajaamadest

◆ TARBIJATE ANDMED

- Tarbijate loetelu
- Arvutuslikud koormused
- Tarbijate iseloomustus, kategooriad
- Tarbijate kaugused

◆ ANDMED ALAJAAMA KOHTA

- **Kliimaatilised tingimused**
- **Keskkonna saastatuse aste**
- **Pinnase eritakistus**
- **Teenenduse iseloom**
- **Muud tingimused**

◆ ALAJAAMADE KLASSIFIKATSIOON

- **Otstarbelt:**
 - **süsteemialajaamad**
 - **- tarbijaalajaamad**

- **Skeemidelt:**
 - **lihtsustatud skeemiga (reeglina ilma võimsuslülititeta)**
 - **läbivalajaamad (väikese liinide ja võimsuslülitite arvuga)**
 - **sõlmalajaamad**

3 PINGETE VALIK

ALAJAAMADE ELEKTRILINE OSA

Projekteerimise juhendmaterjal –

Eesti standard EVS-HD 637 S1:2002

“Tugevvoolupaigaldised nimivahelduvpingega üle 1 kV”

1 KÄSITLUSALA JA NORMATIIVVIITED

2 MÄÄRATLUSED

3 PÕHINÕUDED

Paigaldised ja seadmed peavad olema võimelised taluma nende asukohas tekkida võivaid elektrilisi, mehaanilisi, ilmastiku- ja keskkonnatoimeid

3.1 **Elektrialased nõuded**

Neutraali maandamisviisid

Elektrivõrgud tuleb projekteerida kas

- isoleeritud neutraaliga võrguna,
- resonantsmaandatud võrguna või
- väikese näivtakistuse kaudu maandatud neutraaliga võrguna.

Elektrivõrgu neutraali maandamisviis on oluline isolatsioonitaseme ja liigpinget piiravate seadmete (nt kaitsesädemike vm liigpingepiirikute) valikul.

Pinged

Paigaldised ja seadmed peavad olema võimelised taluma normitud

- võrgusageduslikke pingeid,
- võrgusageduslikke ajutisi liigpingeid,
- lülitusliigpingeid ja pikseliigpingeid.

Normaaltalitlusvool

Iga elektripaigaldis peab olema projekteeritud ja ehitatud nii, et tavakäiduoludes ei ületaks voolud seadmete lubatavaid või normvoolusid.

Seejuures tuleb arvestada ka ebasoodsaid keskkonnaolusid, nt ümbruse kõrgemat temperatuuri.

Võib ära kasutada ka soodsaid keskkonnaolusid, nt ümbruse madalamat temperatuuri, mille korral voolud võivad olla suuremad.

Kui tavakäiduolud ühtivad nimikäiduoludega, ühtib normvool nimivooluga.

Lühisvool

Paigaldised tuleb projekteerida, ehitada ja monteerida nii, et nad taluksid lühisvoolude poolt põhjustatud mehaanilisi ja termilisi toimeid.

Arvestada tuleb kõiki lühiste liike, nt

- kolmefaasilisi lühiseid,
- kahefaasilisi (faas-faas-) lühiseid,
- faasi ja maa vahelisi lühiseid,
- kahe faasi ja maa vahelisi lühiseid,
- kaksikmaalühiseid.

Paigaldised tuleb kaitsta automaatseadmetega faasidevaheliste lühiste väljalülitamiseks.

Paigaldised peavad olema kaitstud kas ohtliku väärtusega maaühendusvoolude automaat-väljalülitusseadmetega või maaühenduse automaat-signalisatsiooniseadmetega. Valik sõltub neutraali maandamisviisist.

Lühisvoolu arvutusliku kestuse standardväärtus on 1,0 s.

Kui paremini sobib 1,0 sekundist erinev väärtus, soovitatakse kasutada väärtusi 0,5 või 3,0 s.

Lühisvoolu arvutuslik kestus tuleb valida lähtudes lühise väljalülitamise tegelikust ajast.

Kolmefaasiliste vahelduvvooluvõrkude lühisvoolude arvutamise meetodid on toodud harmoneerimisdokumendis HD 533.

Lühisvoolude toime arvutamise meetodid on toodud standardis EN 60865-1, tugev-voolukaablite kohta aga standardis IEC 60949.

Koroona

Paigaldiste ehitus peab olema selline, et koroona tõttu tekkivad raadiohäired ei ületaks lubatud tase (sätestatakse riiklike või kohalike võimuorganite poolt).

Soovitused kõrgepingepaigaldistes tekkivate raadiohäirete minimiseerimiseks on toodud standardeis CISPR 18-1, CISPR 18-2 ja CISPR 18-3.

3.2 Tugevusnõuded

Seadmed, nende kandetarindid ja vundamendid peavad vastu pidama eeldatavatele mehaanilistele koormustele (tõmbekoormus, paigaldamis-koormus, jäitekoormus, tuulekoormus, lülitusjõud, lühisvoolu tõttu tekkivad jõud, juhtmete tõmbe kadumine, vibratsioon, kandetarindite dimensioneerimine)

3.3 Kliima- ja keskkonnaolud

Paigaldised, aparaadid ja abiseadmed tuleb projekteerida talitluseks alljärgnevalt loetletud kliima- ja keskkonnaoludes, arvestades seadmete tootestandardite nõudeid:

- temperatuur
- kõrgus ja õhurõhk
- niiskus
- sademed
- saastatus
- päikesekiirgus

3.4 **Erinõuded** (suurel kõrgusel asuvad paigaldised, väikeloomade ja mikroorganismide toime, müratase)

4 ISOLATSIOON

4.1 Isolatsioonitaseme valik

4.2 Taluvusväärtuste kontroll

4.3 Vähimad õhkvaheemikud pingestatud osade vahel

4.4 Paigaldise osadevahelised vähimad õhkvaheemikud erioludes

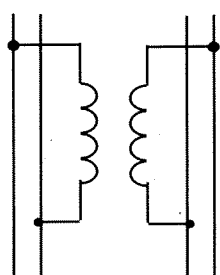
3. ALAJAAMA PÕHISEADMED

3.1. Trafod

3.1.1. Trafod elektrisüsteemis

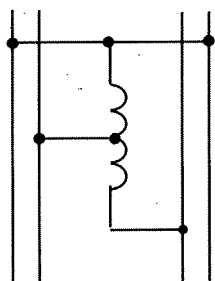
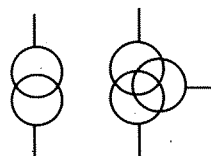
Kolme- ja ühefaasilised

Trafode ülesanne – üle kanda elektrienergiat ühe nimipingega võrgust teise nimipingega võrku.

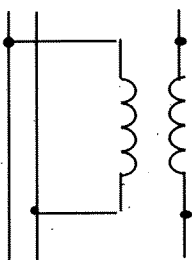
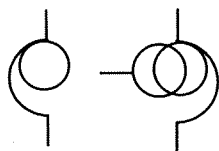


Tavatrafo – puudub elektriline side, energia ülekande ainult induktsiooni teel

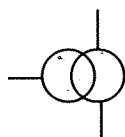
Kahe ja kolmemähiselised



Autotrafo – energia ülekande nii induktsiooni kui elektrilisel teel.



Lisapingetrafo (buustertrafo)



Isolatsiooniklassid:

Klass A – kuivtrafod (nt vaikisolatsioon) – kuni 5000 kVA , 36 kV

Klass A – õlitrafod – südamik ja mähised mineraalõlis või samalaadses sünteetilises õlis süttimistemperatuuriga $\leq 300^{\circ}\text{C}$

Klass C – südamik ja mähised sünteetilises õlis süttimistemperatuuriga $> 300^{\circ}\text{C}$ (nt silikoonõli) (ABB: kuni 10 000 kVA ja 36 kV)

Mähiste tähistus

○	○	○	○
1W	1V	1U	1N
2W	2V	2U	2N
○	○	○	○

(A,B,C,0; A_m,B_m,C_m; a,b,c)

4 TRAFODE VALIK

◆ TRAFODE ARV

◆ TRAFODE VÕIMSUS.

◆ Trafo kaod

- **tühijooksu kaod** (*no load losses, iron losses*). Vähendatud tühijooksukadudega trafod (amorfsest terasest südamikuga) - kuni 75% väiksemad).
- **vaseskaod** (koormuskaod - *load losses*)
- **ventillatsioonikaod**

Kadude arvestamine trafode valikul

◆ Trafode kuumenemine , jahutussüsteemid

- **loomulik õlijahutus** - ON (*oil natural*)
- **sundõlijahutus** - OF (*oil forced*)
- **otsene sundõlijahutus** - OD (*oil forced-directed*)
- **loomulik konvektsioon** - AN (*air natural convection*)
- **sundõhkjahutus** - AF (*air-forced*)

ONAN - ONAF - OFAF - 1 : 1,5 : 2

ODAF

- ◆ **Trafo max. koormatavus** - sõltub ööpäevasest koormusgraafikust ja ümbritseva õhu temperatuurist

- ◆ Normaalne oleks **kuumeima punkti** (*hot spot*) temp. **90...98 °C**.
Siis ei toimu isolatsiooni ülemäärast vananemist ja tööea lühenemist.
Kui temp alla selle, siis tööiga pikeneb.
Kuumeima punkti **max. temp. - 140°C**.
Selle ületamine 5...8 °C võrra kiirendab isolatsiooni vananemist ca kaks korda.
Avariilukordades lühiajaliselt - 180 °C on aktsepteeritav.

- ◆ **Ülekoormatavus** sõltub keskkonna temperatuurist ja ülekoormuse kestusest - vastavad graafikud.

- ◆ Valemid trafode võimsuse valikuks.

◆ TRAFODE TÜÜP

- kolme- või ühefaasised
- kahe- või kolmemähiselised
- tavalised või autotrafod
- lõhestatud mähisega trafod
- pinge reguleerimine – astmeümberlülitid

Mähiste lülitusgrupid – näitab mähiste ühendusviisi ja alam- (ning kesk-) pinge vektorite nurka ülempinge vektori suhtes

Mähiste ühendusviisid:

- kolmnurklülitus (*delta, треугольник*): D, d (Δ)
- tähtlülitus (*star, звезда*): Y, y (Y)
- siksaklülitus (*interconnected star, zigzag*) Z, z
- avatud mähised III, iii
- väljatoodud null N, n

Nn "kellaaeg" näitab pingevektorite vahelist nurka

Levinumad grupid:

- Yyn 0 jaotusvõrgu toitetraford, neutraal koormatav 10% nimivooluga, kasut nt kaarekustutuspooli ühendamiseks
- Yd 11 jaotusvõrgu toitetraford
- YNyn 0 süsteemide vahelised sidetraford, neutraal koormatav
- YNyn 11 nimivooluga
- YNd 5 toitetraford, elektrijaamade trafod, neutraal koormatav nimivooluga
- Yzn 5 kohalikud jaotustrafod kuni 250 kVA, neutraal koormatav
- Yzn 11 nimivooluga
- Dyn 5 jaotustrafod kuni 315 kVA, neutraal koormatav nimivooluga
- Dyn 11
- li 0 ühefaasised trafod

Kaod trafodes

- koormuskaod (vaseskaod, lühiskaod, Joule'i kaod, I^2r kaod)
- tühijooksukaod (rauaskaod)

Jahutusüsteemid

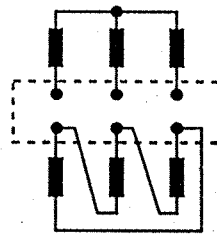
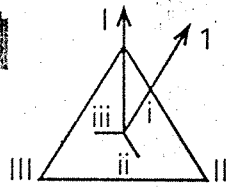
Jahutusagent	Sümbol	Tsirkulatsioon	Sümbol
Õli, $t_{süttimine} \leq 300^\circ\text{C}$	O (M)	Loomulik	N ()
Õli, $t_{süttimine} > 300^\circ\text{C}$	L	Sund (kaudne)	F (Д, Ц)
Gaas, $t_{süttimine} > 300^\circ\text{C}$	G	Sund (otsene)	D
Õhk	A (C)		
Vesi	W		

Lühispinge u_k – mida väiksem, seda väiksem trafo reaktants

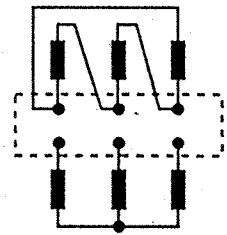
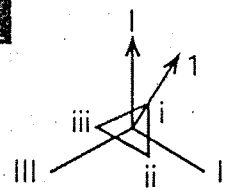
10 – 35 kV trafodel 5,5-7,5 %; 110 – 500 kV trafodel 10-15 %

Trafode enamlevinud lülitusgrupid

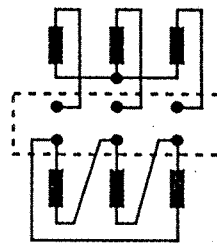
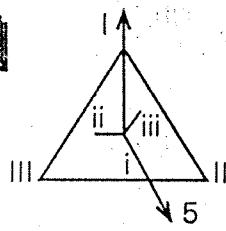
Dy1



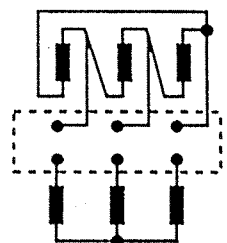
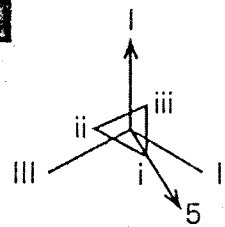
Yd1



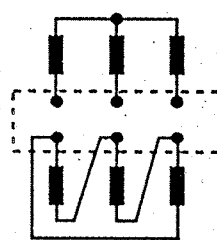
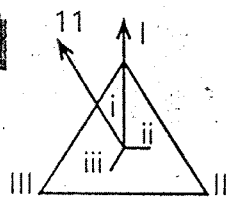
Dy5



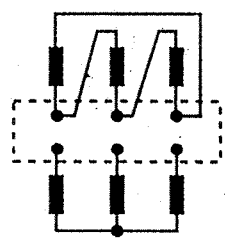
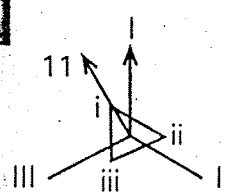
Yd5



Dy11



Yd11



5. TRAFODE RÖÖPTALITLUS

Rööptalitlusse lülitatavad trafod peavad rahuldama järgmisi tingimusi:

- pingete võrdsus (ülekande teguri erinevus ei tohi ületada $\pm 0,5\%$)
- lülitusgruppide samasus
- ühendada omavahel tuleb mähiste samad klemmid
- lühispinged ei tohi erineda rohkem kui $\pm 10\%$
- nimivõimsuste suhe peaks olema alla 3

Kogukoormuse S jagunemine rööptalitluses trafode vahel nimivõimsustega $S_{N1}, S_{N2}, S_{N3}, \dots$ ja lühispingetega $u_{k1}, u_{k2}, u_{k3}, \dots$:

$$S_1 = \beta_1 S_{N1}; \quad S_2 = \beta_2 S_{N2}; \quad S_3 = \beta_3 S_{N3}; \dots$$

kus $\beta_1 = \frac{S}{u_{k1}K}; \quad \beta_2 = \frac{S}{u_{k2}K}; \quad \beta_3 = \frac{S}{u_{k3}K}; \dots$ ja $K = \sum_i \frac{S_{Ni}}{u_{ki}}$

Näide. Rööptalitlusse kavatsetakse lülitada kolm trafot järgmiste andmetega:

Trafo 1	$S_{N1} = 100 \text{ kVA}$	$u_{k1} = 4,0\%$
Trafo 2	$S_{N2} = 250 \text{ kVA}$	$u_{k2} = 6,0\%$
Trafo 3	$S_{N3} = 500 \text{ kVA}$	$u_{k3} = 4,5\%$
Kokku	$S = 850 \text{ kVA}$	

Sel juhul

$$K = \frac{100}{4} + \frac{250}{6} + \frac{500}{4,5} = 177,8$$

Trafode koormused, kui summaarne koormus on võrdne nimivõimsuste summaga, s.t 850 kVA:

$$\beta_1 = \frac{850}{4 \cdot 177,8} = 1,195; \quad \beta_2 = \frac{850}{6 \cdot 177,8} = 0,797; \quad \beta_3 = \frac{850}{4,5 \cdot 177,8} = 1,062$$

$$S_1 = 100 \cdot 1,195 = 120 \text{ kVA}; \quad S_2 = 250 \cdot 0,797 = 199 \text{ kVA}; \quad S_3 = 500 \cdot 1,062 = 531 \text{ kVA}$$

Nagu näha, koormub esimene trafo üle 20%, kolmas aga 6%, teine trafo jääb alakoormatuks.

6. KAAD TRAFODES

- **Koormuskaod** (*load losses, impedance losses*) – vaseskaod mähistes:

$$\Delta P_k = a^2 \Delta P_{kN} = \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \Delta P_{kN}$$

$$a = \frac{S}{S_N} \text{ – trafo koormatustegur}$$

S_N – trafo nimivõimsus

ΔP_{kN} – trafo **koormuskaod** nimikoormusel (ka nn **lühiskaod**) (*rated load losses*) – antud trafo passiandmetes

- **Tühijooksukaod** (*no load losses*) – hüstereesi- ja pöörisvoolukaod terases ning lekkekaod isolatsioonis – ΔP_0 – antud trafo passis

Seega **kogukaod** koormusel S :
$$\Delta P = \Delta P_k + \Delta P_0 = \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \Delta P_{kN} + \Delta P_0$$

Vahel pakuvad huvi **reaktiivvõimsuskaod trafos**

– reaktiivvõimsuse koormuskaod
$$\Delta Q_k = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_k^2}{S_N}$$

– reaktiivvõimsuskaod tühijooksul
$$\Delta W_{Qij} = \frac{I_0 \%}{100} S_N$$

$I_0 \%$ – trafo tühijooksuvool (%) – antud trafo passis

Praktikas huvitavad meid mitte sedavõrd võimsuskaod mingil hetkel kui **energiakaod teatud perioodi T** (kõige sagedamini aasta) **jooksul**.

Ligikaudselt
$$\Delta W = \Delta P_k \tau + \Delta P_0 T_t \approx \Delta P_k \cdot k + \Delta P_0 T_t$$

τ – kaoaeg

k – koormustegur (koormusgraafiku täitetegur) (*load factor*):

$$k = \frac{P_{kesk}}{P_m}$$

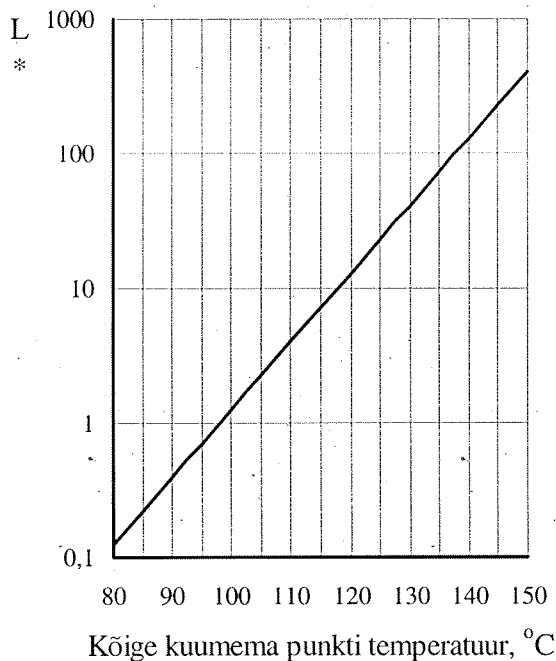
T_t – trafo tööoleku aeg perioodil T

Jahutussüsteemide tähistus

Jahutusagent	Sümbol	Tsirkulatsioon	Sümbol
Õli, $t_{süttimine} \leq 300^{\circ}\text{C}$	O (M)	Loomulik	N ()
Õli, $t_{süttimine} > 300^{\circ}\text{C}$	L	Sund (kaudne)	F (Д, Ц)
Gaas, $t_{süttimine} > 300^{\circ}\text{C}$	G	Sund (otsene)	D
Õhk	A (C)		
Vesi	W		

Isolatsiooni (ja trafo) eluiga on määratud temperatuuriga mähise kõige kuumemas punktis (*hot-spot*), mis paikneb mähise ülaosa sees ja tema temperatuur on 2 - 3 °C võrra kõrgem temperatuurist mähise välispinnal.

Trafod on projekteeritud nii, et isolatsiooni vananemise kiirus L vastab arvutuslikule elueale, kui kõige kuumema punkti temperatuur on 98°C.



Selle temperatuuri ületamisel vananemise kiirus kahekordistub iga 6-8°C kohta.

Üldiselt eeldatakse, et kõige kuumema punkti temperatuur ei tohiks ületada 140°C.

Siiski lubatakse hädaolukorras lühiaegse temperatuuri tipuna 180°C.

Trafo nimivõimsusega S_N võrd-sel püsikoormusel garanteeritakse trafo ettenähtud eluiga.

Tegelikus käidus talitleb trafo muutuva koormusega ja tekib küsimus, millise nimivõimsusega trafot valida. Valides $S_N = S_{max}$

ei saavuta trafo temperatuur kunagi nimiväärtust ning see tähendab trafo materjalide ebamajanduslikku kasutamist. Majanduslikult on otstarbekam valida $S_N \leq S_{max}$. Otstarbekas S_N ja S_{max} suhe sõltub trafo koormusvõimest.

Koormusvõime (ülekoormatavus) sõltub koormuse ööpäeva- ja aasta-graafikust, ümbritseva õhu temperatuurist ning trafo konstruktsioonist.

Koormusvõime hindamisel tuleb lähtuda valmistaja tehase koostatud graafikutest ja IEC vastavatest eeskirjadest IEC-354 "Loading guide for oil-immersed transformers" ja/või ANSI C57.92 "Guide for loading mineral-oil-immersed power transformers".

Trafo kadude hindamine

(lihtsustatud meetod)

A. Kapitalikulu

$$C_C = C_P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad [\text{EEK/a}]$$

C_P - trafo hind

i - intressimäär

n - amortisatsiooniperiood

B. Tühijooksukadude maksumus

$$C_{P0} = C_e \cdot 8760 \cdot \Delta P_0 \quad [\text{EEK/a}]$$

C_e - energia tariif [EEK/kWh]

ΔP_0 - trafo tühijooksukao võimsus [kW]

C. Koormuskadude maksumus

$$C_{Pk} = C_e \cdot 8760 \cdot \alpha^2 \cdot \Delta P_k \quad [\text{EEK/a}]$$

ΔP_k - trafo koormuskaovõimsus [kW]

α^2 - koormustegur: $\alpha = \frac{P_{keskm}}{P_{nimi}}$

D. Võimsuse tasu

$$C_D = C_d (P_0 + P_k) \quad [\text{EEK/a}]$$

C_d - võimsustariif [EEK/kW·a]

E. Kogukulu

$$C = C_C + C_{P0} + C_{Pk} + C_D \quad [\text{EEK/a}]$$

Näide: 1600 kVA jaotustrafo

Amortisatsiooniperiood	$n = 20$ a
Intressimäär	$i = 12\%$
Aastamaksetegur	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = 0,1339$
Energia tariif	$C_0 = 1$ EEK/kWh
Võimsustariif	$C_d = 1000$ EEK/kW·a
Koormustegur	$\alpha = 0,8$

	A. Tavaline trafo	B. Vähendatud kadudeg trafo
Koormuskao võimsus ΔP_k	20 kW	17 kW
Tühijooksukao võimsus ΔP_0	2,6 kW	1,7 kW
Trafo hind C_p	200 000 EEK	224 000 EEK
Kapitalikulu $C_C =$	$200000 \times 0,1339 = 26780$ EEK	$224000 \times 0,1339 = 29994$ EEK
Tühijooksukadude hind $C_{p0} =$	$1 \times 8760 \times 2,6 = 22776$ EEK	$1 \times 8760 \times 1,7 = 14892$ EEK
Koormuskadude hind $C_{pk} =$	$1 \times 8760 \times 0,64 \times 20 = 112128$ EEK	$1 \times 8760 \times 0,64 \times 17 = 95309$ EEK
Võimsusetasu $C_D =$	$1000 \times (2,6 + 20) = 22600$ EEK/a	$1000 \times (1,7 + 17) = 18700$ EEK/a
Kogukulud $C =$	184284 EEK/a	158895 EEK/a

Seega aastane sääst **25389 EEK**

ja kallima trafo tasuvusaeg on **alla ühe aasta**

- **Tühijooksukadude maksumus**

$$C_0 = C_e \cdot T_t \cdot \Delta P_0 \quad (\text{kr/a})$$

kus ΔP_0 – trafo tühijooksukaod (kW)

T_t – trafo töötundide arv aastas

- **Võimsuse tasu**

$$C_D = C_d (\Delta P_{kN} + \Delta P_0) \quad (\text{kr/a})$$

kus C_d – võimsuse tariif (kr/kW)

- **Kogukulu**

$$C = C_C + C_k + C_0 + C_D \quad (\text{kr/a})$$

Variantide võrdlemisel tuleb eelistada vähimate kogukuludega varianti.

NÄIDE

Olgu vaja paigaldada 1600 kVA jaotustrafo.

Võimalik on valida tavalise või vähendatud võimsusega trafo vahel.

Eeldatakse, et trafo talitleb aastaringelt, s.t. $T_t = 8760$ tundi.

Olgu	amortisatsiooniperiood	$n = 20$ a
	intressimäär	$i = 12\%$
	aastamaksetegur	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0,12(1+0,12)^{20}}{(1+0,12)^{20} - 1} = 0,1339$
	kaoenergia hind	$C_e = 1$ kr/kWh
	võimsustariif	$C_d = 1000$ kr/kW·a
	koormustegur	$k = 0,8$

	A. Tavaline trafo	B. Vähendatud kadudega trafo
Nimikoormuskadu ΔP_{kN}	20 kW	17 kW
Tühijooksukadu ΔP_0	2,6 kW	1,7 kW
Trafo hind	200 000 kr	224 000 kr
Kapitalikulu $C_C=$	$200000 \cdot 0,1339=26780$ kr	$224000 \cdot 0,1339=29994$ kr
Koormuskadude maksumus $C_k=$	$1 \cdot 8760 \cdot 0,64 \cdot 20=112128$ kr	$1 \cdot 8760 \cdot 0,64 \cdot 17=95309$ kr
Tühijooksukadude maksumus $C_0=$	$1 \cdot 8760 \cdot 2,6=22776$ kr	$1 \cdot 8760 \cdot 1,7=14892$ kr
Võimsuse tasu $C_D=$	$1000 \cdot (20+2,6)=22600$ kr	$1000 \cdot (17+1,7)=18700$ kr
Kogukulud $C=$	184284 kr	158895 kr

Seega on variant B puhul aastane sääst $184284 - 158895 = 25389$ kr

Seega on kallima trafo tasuvusaeg alla ühe aasta

7. TRAFODE JAHUTUS, ISOLATSIOONI ELUIGA

Võimsuskaod muutuvad soojuseks, mille eemaldamine toimub jahutamise teel.

Jahutamise efektiivsusest sõltub materjalide (vase, terase) kulu, seega trafo hind ja mõõted, aga ka isolatsiooni, seega kogu trafo eluiga.

Trafode isolatsiooniklassid

Klass A – kuivtrafod. Kasutatakse valuvaikisolatsiooni.

Soojus hajutatakse ümbritsevasse õhku, seetõttu on nõutav suur pind ja madal voolutihedus. Valmistatakse võimsustele kuni 5000 kVA ja pingetele 36 kV.

Klass O – õlitrafod – südamik ja mähised on sukeldatud mineraalõlisse või muusse samalaadsesse sünteetilisse õlisse, mille leektäpp $\leq 300^\circ\text{C}$.

Klass L – südamik ja mähised on sukeldatud sünteetilisse õlisse, mille leektäpp $> 300^\circ\text{C}$ (nt silikoonõli).

Kasutatav õli täidab isolatsiooni kõrval ka jahutusaine funktsiooni.

Trafod töötavad **parima kasuteguriga** koormusel, mille puhul koormuskadod võrduvad tühijooksukadudega, s.t kui

$$\left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \Delta P_{kN} = \Delta P_0 \quad \text{ehk kui} \quad S = S_N \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{kN}}}$$

Seda asjaolu tuleks arvestada paralleeltrafode väljalülitamisel mitme trafoga alajaamades väikestel koormustel. Väljalülitamine on otstarbekas, kui tühijooksukadude vähenemine ületab töösse jäänud trafo(de) koormuskadude kasvu nende suurema koormatuse tõttu.

Otstarbekas on koostada alajaamale võimsuste rida, millede puhul on otstarbekas trafode välja- (koormuse vähenemisel) või sisselülitamine (koormuse kasvu). Väljalülitamist vähem kui kaheks tunniks ei peeta otstarbekaks.

Tänapäeval valmistavad paljud firmad vähendatud (optimeeritud) kadudega trafosid, kus kasutatakse paremaid materjale ja mis seetõttu on ka kallimad.

Uue trafo valikul ei tule lähtuda siiski ainult hinnast vaid arvestada tuleb ka kadude maksumust trafo eluea jooksul.

Lihtsustatud meetod kogukulude hindamiseks trafo valikul

- **Kapitalikulu**

$$C_C = C_p \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{kr/a})$$

kus C_p – trafo hind (kr)

$$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{– nn aastamaksetegur}$$

i – intressimäär

n – amortisatsiooniperiood (aastat)

- **Koormuskadude maksumus**

$$C_k = C_e \cdot 8760 \cdot k \cdot \Delta P_{kN} \quad (\text{kr/a})$$

kus C_e – kaeenergia hind (kr/kWh)

ΔP_{kN} – trafo koormuskadu nimikoormusel (kW)

$$k \text{ – koormustegur} \quad k = \frac{P_{kesk}}{P_m}$$

Trafo pingereguleerimine

- Väljavõtted
- ümber lülitatavad pingevabalt (pingevaba astmelüliti)
 - ümber lülitatavad koormuse all (koormus-astmelüliti)



Reguleerimine lisapingetrafo (põikireguleerimine)

Trafode paralleeltöö – tavaliselt kaks

Paralleeltöö tingimused :

- pingete võrdsus (ülekanalite erinevus mitte üle $\pm 0,5\%$)
- lülitusgruppide samasus
- ühendada omavahel mähiste samad klemmid
- lühispingete erinevus mitte üle $\pm 10\%$
- nimivõimsuste suhe < 3

Kogukoormuse S jagunemine trafode vahel nimivõimsustega $S_{N1}, S_{N2}, S_{N3}, \dots$ ja lühispingetega $u_{k1}, u_{k2}, u_{k3}, \dots$:

$$S_1 = \beta_1 S_{N1}; \quad S_2 = \beta_2 S_{N2}; \quad S_3 = \beta_3 S_{N3}; \dots$$

$$\beta_1 = \frac{S}{u_{k1} K}; \quad \beta_2 = \frac{S}{u_{k2} K}; \quad \beta_3 = \frac{S}{u_{k3} K}; \quad \dots \quad K = \sum_i \frac{S_{Ni}}{u_{ki}}$$

Ebasümmeetriline koormus

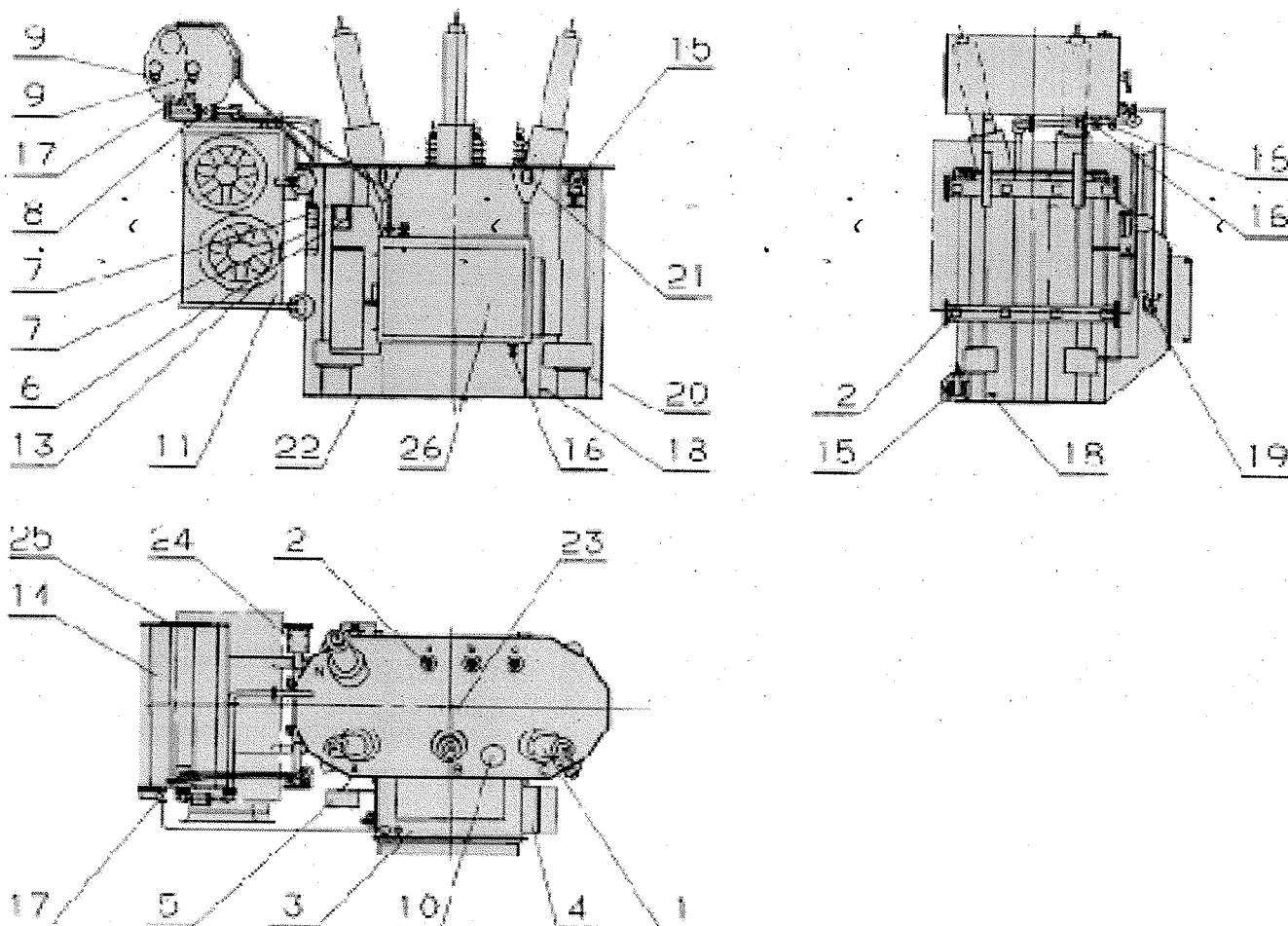
Põhjustab pingete ebasümmeetriat, ebasoovitav

Kui sekundaarmähis on väljatoodud või maandatud nulliga täht- või siksaklülituses (dn või zn), tekib sekundaarmähises nulljärgnevusvool.

Kui primaarmähis on kolmnurk- (D) või väljatoodud nulliga tähtlülituses (YN), tekib nulljärgnevusvool ka primaarmähistes.

Kui primaarmähis on täht- (Y) või siksaklülituses (Z), siis nulljärgnevusvool primaarmähistes tekkida ei saa. Tekib nulljärgnevusmagnetvoog, mis sulgub väljaspool magnetahelat. Kolmanda kolmnurka lülitatud mähise olemasolul väheneb nulljärgnevusvool tunduvalt

Lülitusgruppide Ss, Sd, Ds ja Dd korral vooludes nulljärgnevusvoole ei teki



- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1. Ülempinge läbiviigud | 16. Tühjendusventiilid |
| 2. Alampinge läbiviigud | 17. Sulgeventiilid |
| 3. (Koormus)astmelüliti | 18. Maandusklemm |
| 4. Astmelüliti juhtseade | 19. Astmelüliti rõhurelee |
| 5. Klemmkarp | 20. Tõstetapid |
| 6. Õli temperatuuri mõõtur | 21. Tõstekonksud |
| 7. Niiskusfilter | 22. Veorõngad |
| 8. Gaasirelee | 23. Täiendava temperatuurimõõtuuri tasku |
| 9. Õlinivoo näitur | 24. Neutraali ventiillahendi konsooli kinniti |
| 10. Ülerõhuventiili äärik | 25. Paisupaagi hooldusluuk |
| 11. Jahuti | 26. Astmelüliti hooldusluuk |
| 12. Jahuti ventiil | |
| 13. Ventilaatorid | |
| 14. Paisupaak | |
| 15. Puhastus- ja täitmisventiilid | |

ABB

Kolmemähiselised trafod

Tavaliselt – pingemadaldustrafod

Mähiste võimsuste vahekorrad 100/100/100, 100/100/67 ja 100/67/100 % nimivõimsusest

Alam- ja ülempingemähiste summaarne koormus \leq nimivõimsus

Ülem- ja alampingemähiste u_k suhteliselt suur, see vähendab lühisvoolu alampingevõrgus

Erijuhtum – **lõhestatud alampingemähisega trafo.**

Kumbagi alampingemähise võimsus – pool nimivõimsusest.

Eelis – piirab lühisvoolu alampinge poolel

Autotrafod

Trafo poolt ülekantud võimsus

$$S = S_{ind} + S_{el}$$

S_{ind} , S_{el} – vastavalt induksiooni ja elektrilisel teel ülekantud võimsus

Autotrafo **nimivõimsus:**

$$S_N = S_{Nind} + S_{Nel}$$

S_{Nind} , S_{Nel} – vastavalt induksiooni ja elektrilisel teel ülekantud võimsus nimitingimustel.

$S_{Nind} = S_T$ – autotrafo nn **tüüpvõimsus** – määrab materjali kulu ja mõõdud

$$\text{Tüüpvõimsuse tegur: } k_T = \frac{S_T}{S_N} = \frac{U_U - U_K}{U_U} = 1 - \frac{U_K}{U_U}$$

Mida väiksem k_T , seda väiksem on autotrafo materjalikulu võrreldes tavatrafoga. Samas $u_{k, At} = u_{k, tr} \cdot k_T$

Eelised: väiksem materjali kulu, kaal ja gabariidid; väiksemad kaod (s.t kõrgem kasutegur)

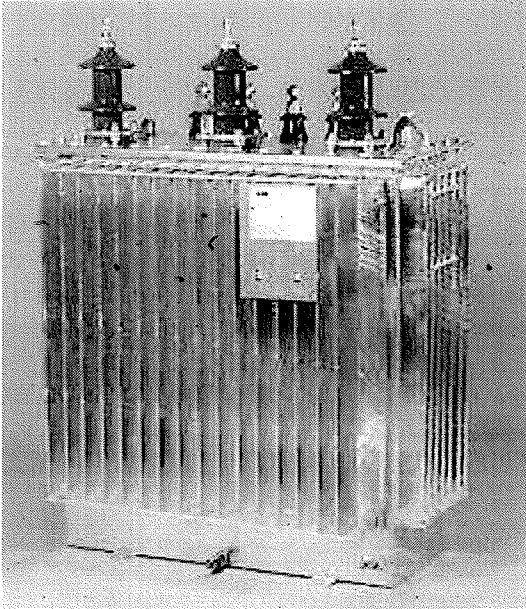
Puudused: – rikete korral suured lühisvoolud mähistes
– lühis ülempinge poolel põhjustab pinge tõusu keskpinge poolel (seda rohkem, mida väiksem on U_K / U_U).

Kui keskpingevõrgu neutraal on maandamata, on pinge tõus lubamatult suur. Seetõttu ei sobi autotrafod lülitamiseks maandamata ja ka kompenseeritud neutraaliga võrkudesse.

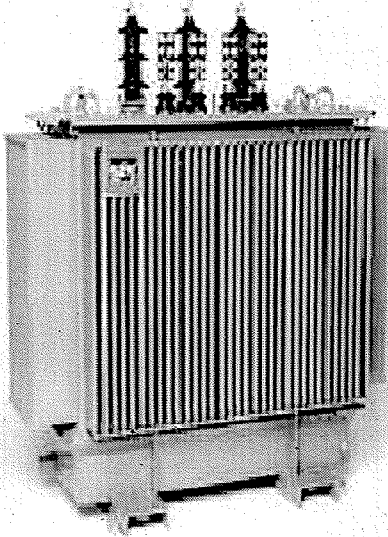
Jäikmaandatud neutraali puhul ohtu pole.

Alati ka kolmas – alampingemähis – vähendab nulljärgnevustakistust ja kompenseerib harmoonikuid kordusega 3.

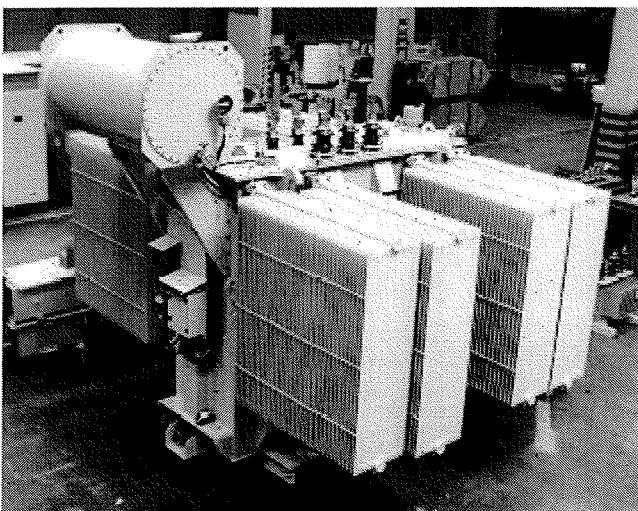
Keskpingetraford – 10 – 72,5 kV



Võimsus 16... 250 kVA

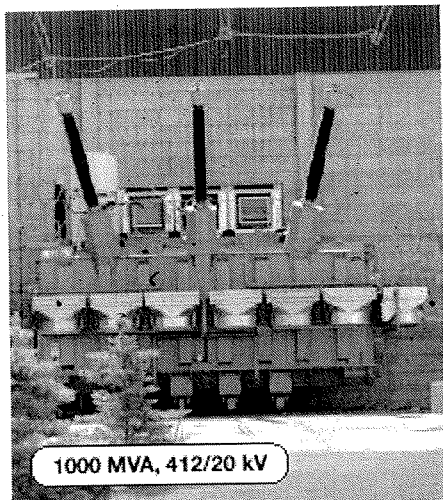


Võimsus 250 - 2000 kVA

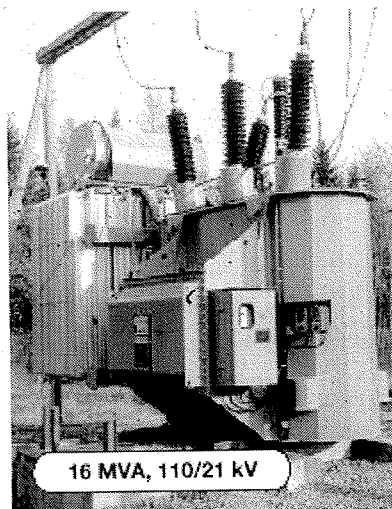


Võimsus > 2000 kVA

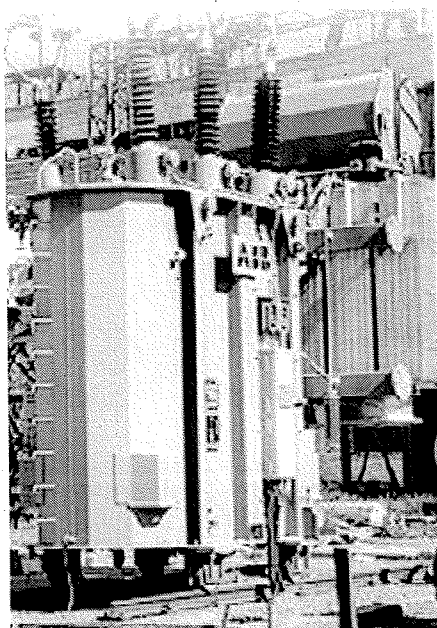
ABB



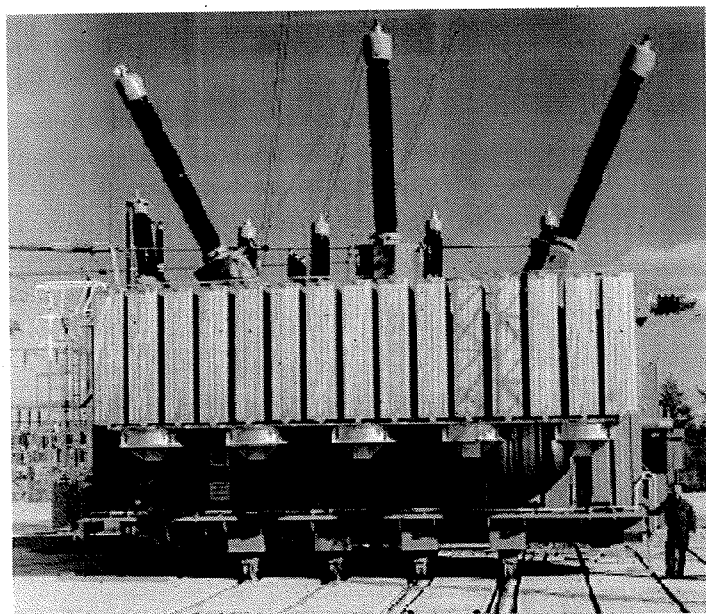
1000 MVA, 412/20 kV



16 MVA, 110/21 kV



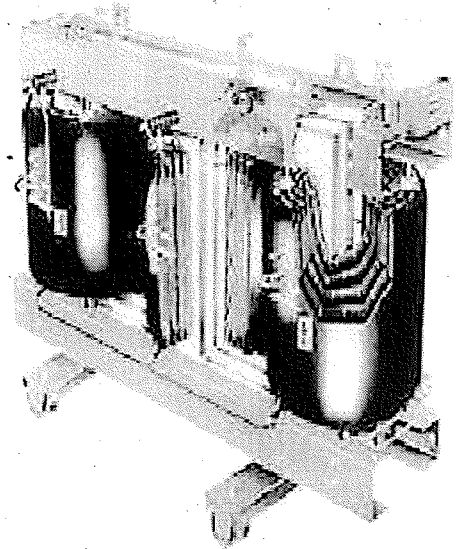
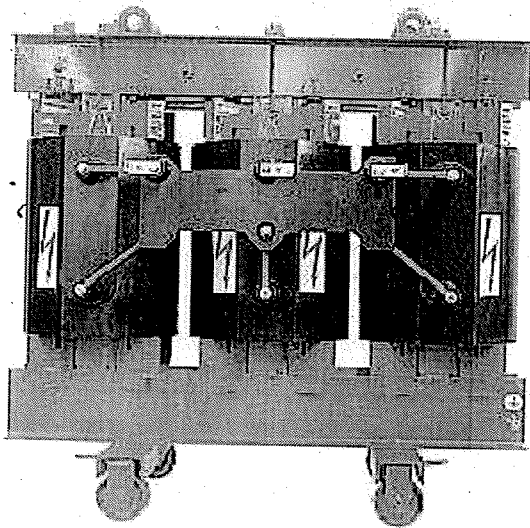
Nimivõimsus	10...63 MVA
Ülemnimipinge	115 tai 110 +/- 9 x 1,67 % kV
Alamnimipinge	21 või 10,5 kV
Nimisagedus	50 Hz
Lülitusgrupp	YNd11 tai YNyn0
Jahutus	ONAN tai ONAN/ONAF



Tüüp	KTRT 420 V 463
Nimivõimsus	400/400/125 MVA
Nimipinge	400 +/- 6 x 1,33 %/120/21 kV

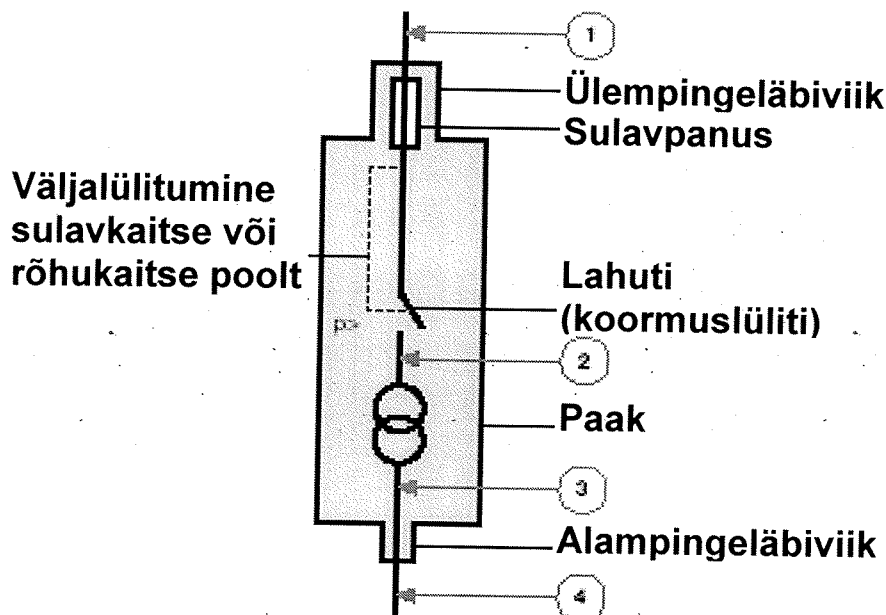


Kuivtrafod – vaikisolatsiooniga

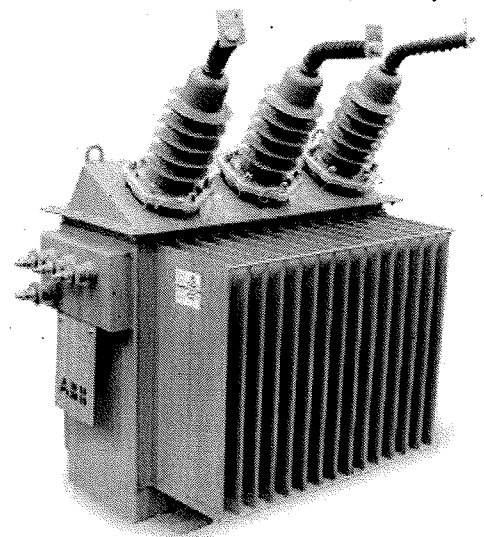


Võimsused – 50kVA - 25MVA; ülemnimipinge – kuni 36 kV

TIS - trafod



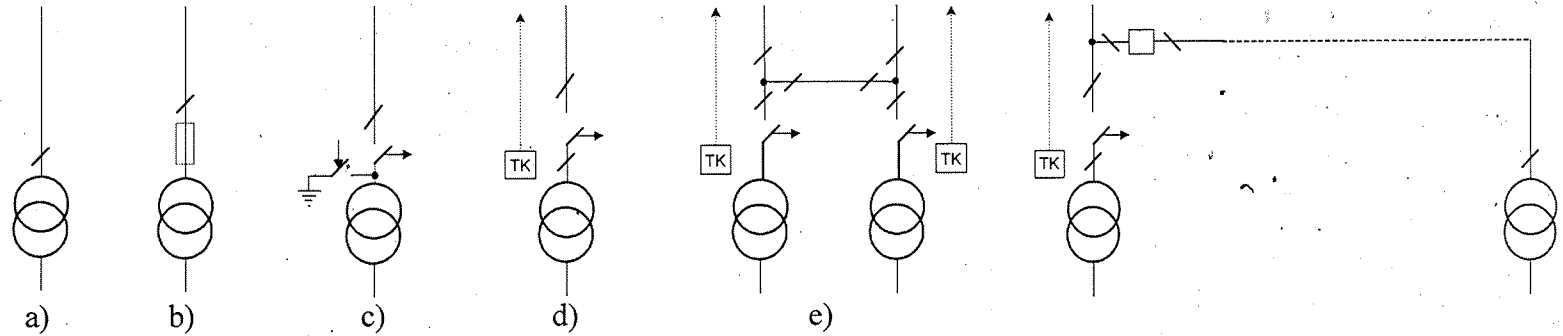
50 – 200 kVA, 20,5 / 0,41 kV



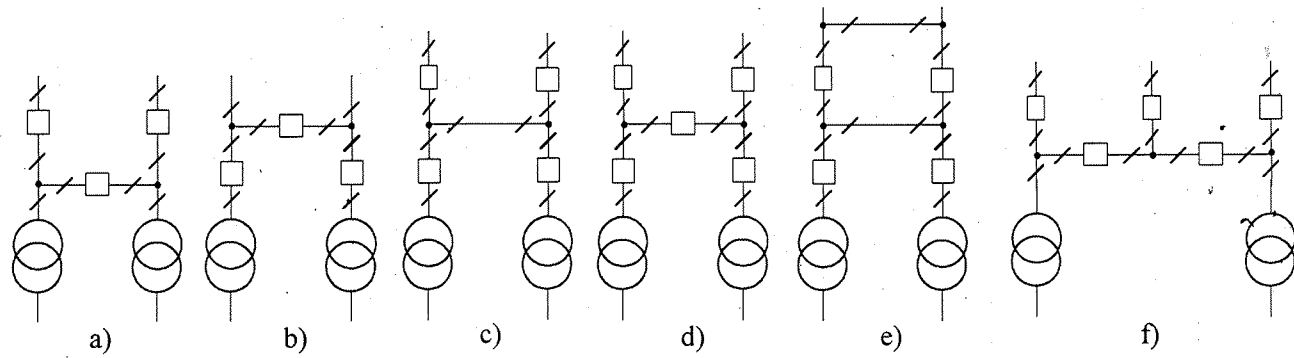
- 1 – rikete korral totevõrgus trafo kaitsed ei toimi
 - 2 – rikete puhul ülempinge poolel toimivad trafo sisemised kaitsed. Toitevõrgus katkestusi ei teki
 - 3 – rikete puhul alampinge poolel toimivad trafo sisemised kaitsed
 - 4 – rikete korral jaotusvõrgus toimivad trafo sisemised kaitsed reservkaitsetena
- Suurte rikete korral toimib selektiivselt sulavkaitse, rõhukaitse toimib väikeste rikkevoolude puhul.

Lihtsustatud skeemid

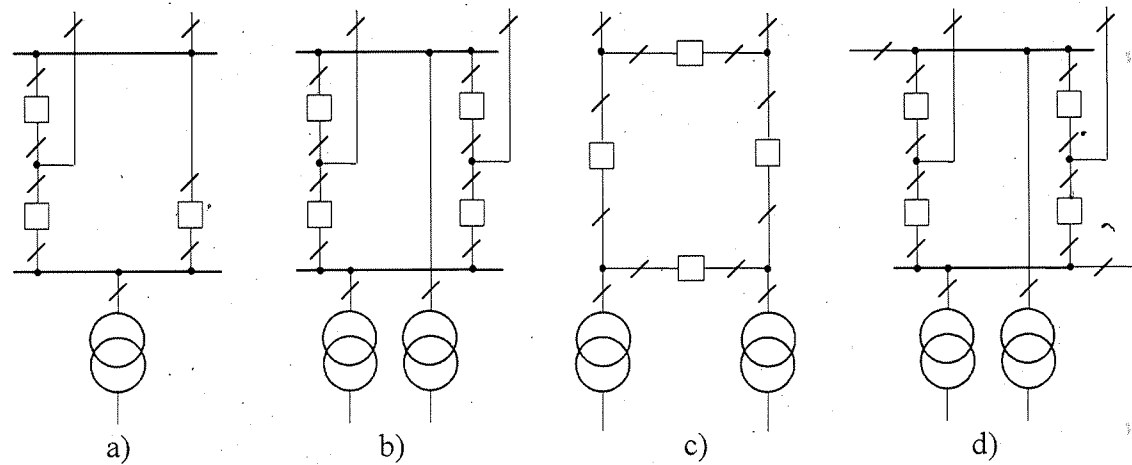
Plokkskeemid



Sildskeemid



Hulknurkskeemid (ringskeemid)



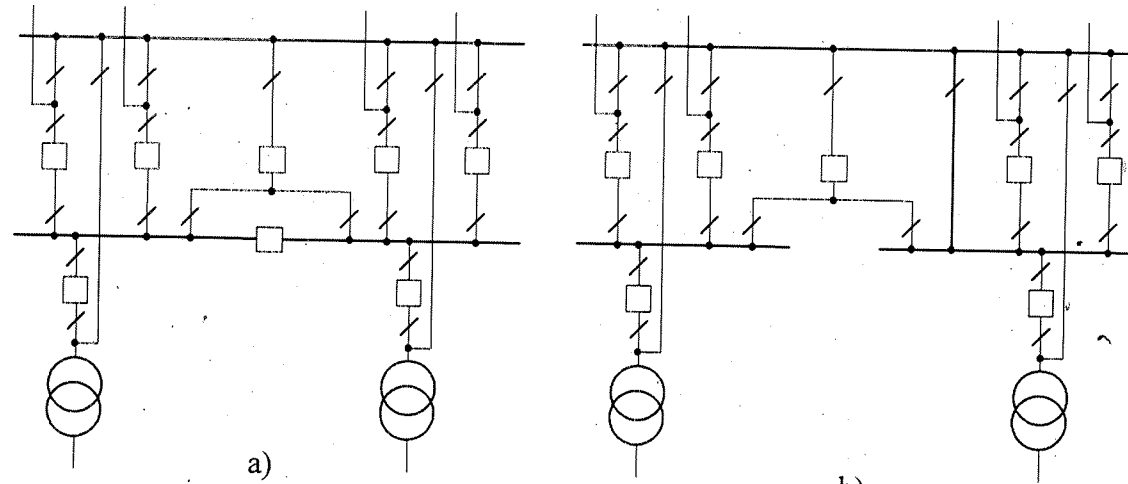
Jaotlaskeemide valik

- Põhiskeemi valik sõltub paljudest teguritest, nagu:
 - alajaama geograafiline asukoht, ühendus ja roll süsteemis
 - erinevatel pingeastmetel väljuvate liinide arv ja roll võrgus
 - võimsusvood läbi trafode
 - kompenseerimisseadmete (kondensaatorpatareid, reaktorid jms) vajadus
 - avariitõrje- ja süsteemiautomaatika maht (võrgu sektsioneerimise vajadus, TLA-de olemasolu jne)
 - lühisvoolude tase ja nende piiramise vajadus
 - trafo neutraalide maandusviis
 - dünaamilise stabiilsuse tagamisest tulenevad erinõuded
 - alajaama rajamise etapilisus ja laiendamise vajadus tulevikus
 - juhtimise ja teenindamise viis (telejuhtimine, mehitatud või mehitamata alajaam jms)

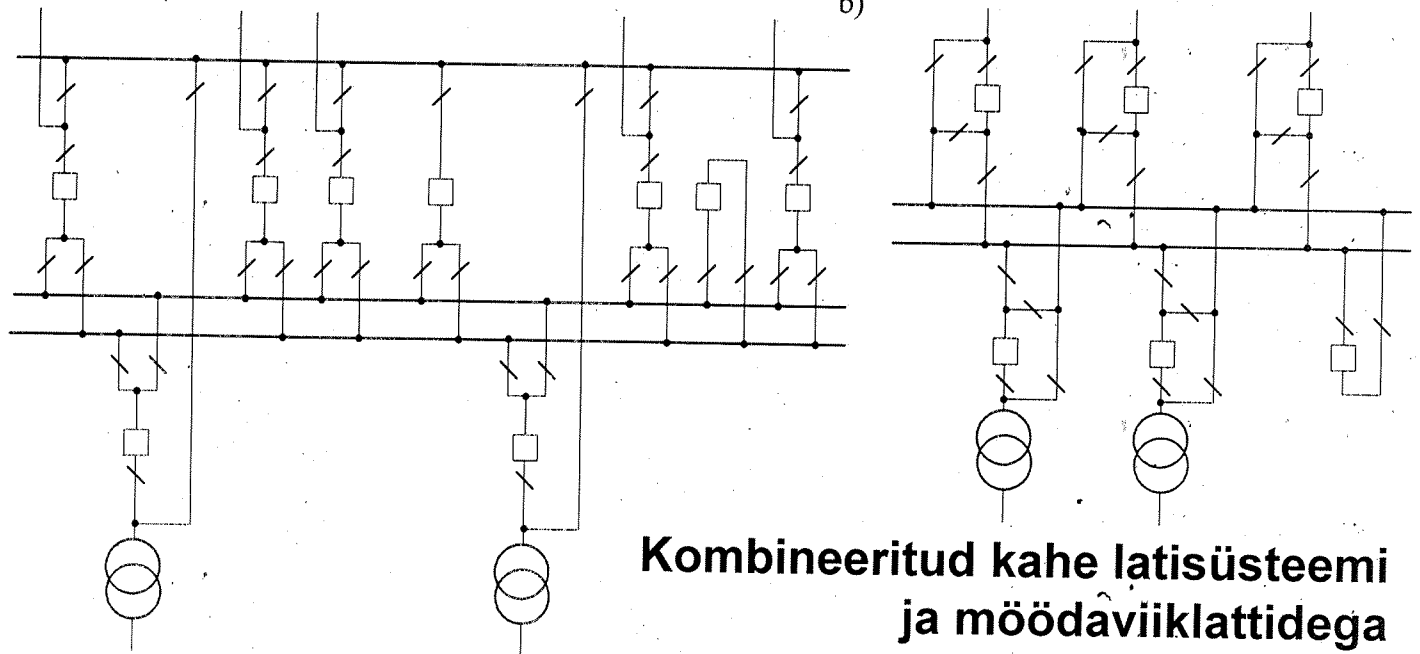
- Jaotla skeemi ja konstruktsiooni valikul tuleb eelkõige lähtuda järgmistest näitajatest:
 - maksumus
 - töökindlus
 - maa-ala vajadus
 - talitluse paindlikkus, s.o kerge adapteeritavus muutuvate talitlustingimustega, automatiseerimise võimalus
 - releekaitse keerukus
 - operatiivülitamiste keerukus muutuvate talitlustingimuste, rikete ja hoolde- ning remonttööde korral
 - remonditavus – võimalus remontida ja hooldada jaotla seadmeid minimaalse jõuga süsteemi teiste elementide toimimisele, süsteemi sidususele ja tarbijate elektrivarustusele
 - käidu mugavus ja ohutus, seda nii primaar- kui sekundaarahelate osas
 - laiendamise võimalus
 - ökoloogiline puhtus müra, elektri- ja magnetväljade, kahjulike ainete emissiooni jms osas

Möödaviiklattidega skeemid

Ühe latisüsteemi ja
möödaviiklattidega
skeemid



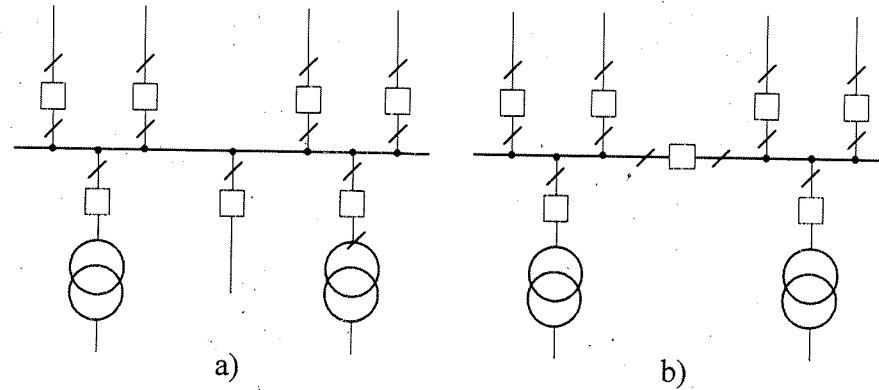
Kahe latisüsteemi ja
möödaviiklattidega
skeem



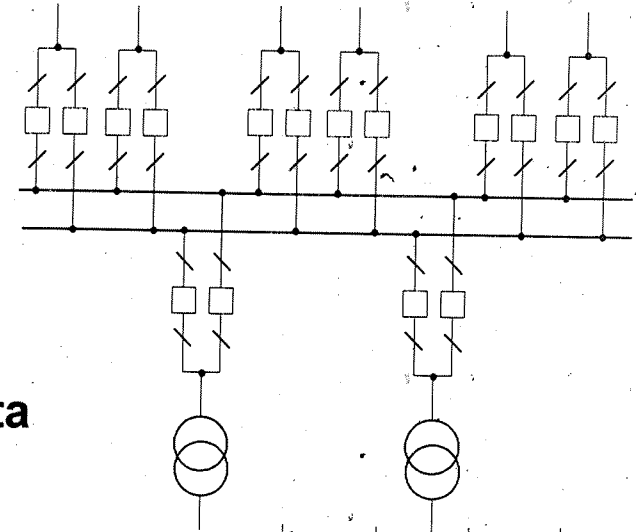
Kombineeritud kahe latisüsteemi
ja möödaviiklattidega

Kogumislatisüsteemidega skeemid

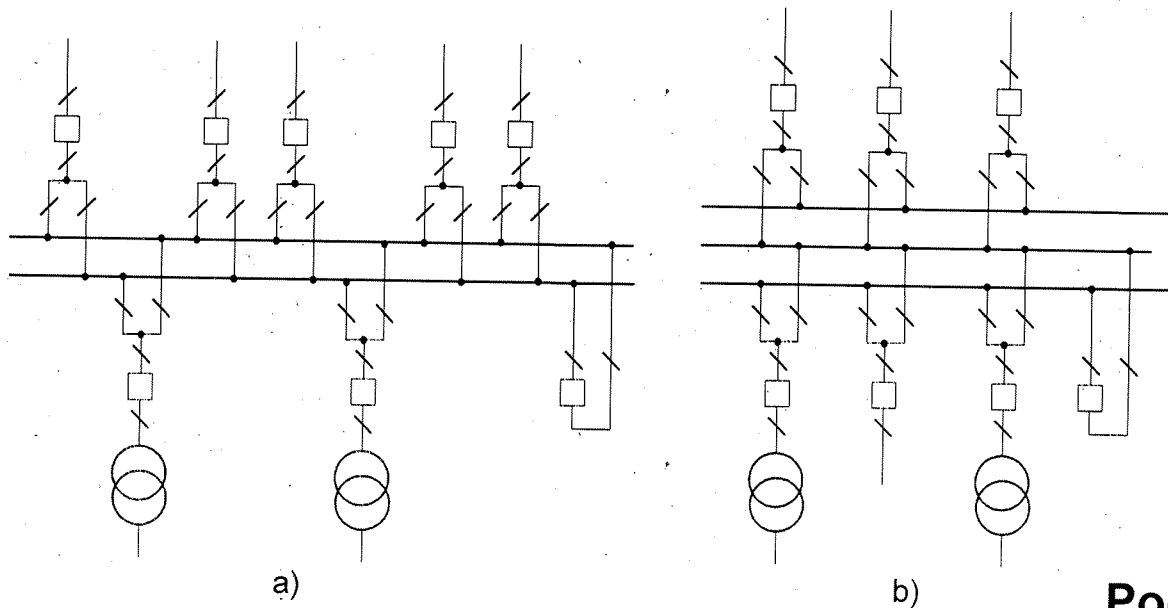
Ühe latisüsteemiga skeemid



Kahe latisüsteemiga, kakslülitiskeem



Kahe latisüsteemiga, ühe võimsuslülitiga ahela kohta



Poolteistskeem

