

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

HEIKI TAMMOJA

AUTOMAATIKA JA RELEEKAITSE

LOENGUKONSPEKT

Tallinn 2010

SISUKORD

1	SISSEJUHATUS	4
	1.1. Juhtimissüsteem	4
	1.2. Automaatika seadmete ülesanded energiasüsteemides	5
	1.3. Diskreetse väljundiga automaatika seadmed	5
	1.4. Elektrisüsteemi rikked ja anomaaltalitus	6
	1.5. Releed	7
	1.6. Elektromehaanilised releed	9
	1.7. Staatilised releed	10
	1.8. Mikroprotsessorreleed	10
2	RELEEKAITSE MÕISTE	13
	2.1 Releekaitse mõiste laienemine	
	2.2 Süsteemikaitse	
	2.3 Sisselülitusautomaadid	
	2.4 Kaitsega seotud mõisteid	
	2.5 Elektrisüsteemi automaatjuhtimise liigitus	
3	RELEEKAITSE TOIMIMINE	20
	3.1 Elektrisüsteemi normaaltalitluse rikkumise ja taastamise protsess	
	3.2 Juhtimissüsteem	
	3.3 Releekaitsesüsteem	
	3.4 Releekaitse liikide iseloomustustus	
	3.4.1 Tunnussuurus	
	3.4.2 Rakendumise ajaline järgnevus	
	3.4.3 Tunnussuuruse muutumise suund kaitse mõõteosa rakendumisel	
	3.4.4 Toimimiskiirus	
	3.4.5 Selektiivsuse tagamise viis	
	3.5 Releekaitsele esitatavad nõuded	
	3.5.1 Hõlmavus	
	3.5.2 Selektiivsus	
	3.5.3 Tundlikkus	
	3.5.4 Töökiirus	
	3.6 Kaitse töökindlus	
	3.7 Põhinõuete vaheline seos	
4	ELEMENDIKAITSE PÕHILIIGID	29
	4.1 Voolukaitse	
	4.2 Distantkaitse	
	4.3 Pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse	
	4.4 Põikdiferentsiaalkaitse	
	4.5 Muid kaitseid	
	4.6 Kaitse tunnussuurussäte	
	4.7 Kaitse ajasäte	
5	MÕÕTEANDURID	36

5.1	Põhimõisteid	
5.2	Mõõtevoolutrafod	
5.3	Kaitsevoolutrafod	
5.4	Voolutrafode ühendusskeeme	
5.5	Kaitsevoolutrafode ja nende ahelate arvutus	
5.6	Pingeandurid	
5.7	Uued voolu- ja pingeandurid	
6	VOOLUKAITSE	48
7	MAALÜHISKAITSE	56
8	DISTANTSKAITSE	61
8.1	Põhimõisteid	
8.2	Impedantsreleede karakteristikud	
9	PIKIDIFERENTSIAALKAITSE	65
9.1	Hälbevool ja säte	
9.2	Hälbevoolu mõju vähendamine	
9.3	Sõltuva sättega diferentsiaalkaitse	
10	SIDEKANALIGA KAITSE	67
10.1	Põhimõisteid	
10.2	Faasivõrdluskaitse	
10.3	Teisi sidekanaliga kaitseid	
11	SÜSTEEMI ELEMENTIDE KAITSE	75
11.1	Trafo	
11.2	Sünkroongeneraator	
11.3	Mootor	
11.4	Latid	
12	SÜSTEEMIKAITSE	83
12.1	Võimsuslüli tõekekaitse	
12.2	Koormusvähenduskaitse	
12.3	Sünkronismikaotuskaitse	
13	SISSELÜLITUSAUTOMAADID	85
13.1	Automaatsünkronisaator	
13.2	Taaslülitusautomaat	
13.3	Reservilülitusautomaat	
13.4	Automaattaastus	
14	SÜSTEEMI TALITLUSE AUTOMAATREGULEERIMINE	91
14.1	Põhimõisteid	
14.2	Pinge reguleerimine	
14.3	Sageduse reguleerimine	
14.4	Automaatreguleerimise mõju süsteemi stabiilsusele	
	KIRJANDUS	96
	LISA 1 RELEEKAITSE TÄRKTÄHISED	
	LISA 2 EESTI-INGLISE-VENE SÕNASTIK	

1 EESSÕNA

Käesoleva loengukonspekti eesmärgiks on anda üliõpilastele ülevaade elektrisüsteemi kaasaegsest releekaitsest ja muust süsteemi anomaalitalitluse automaatjuhtimisest..

1.SISSEJUHATUS

1.1. Juhtimissüsteem

Kõik tehnilised seadmed võib jagada 2 klassi:

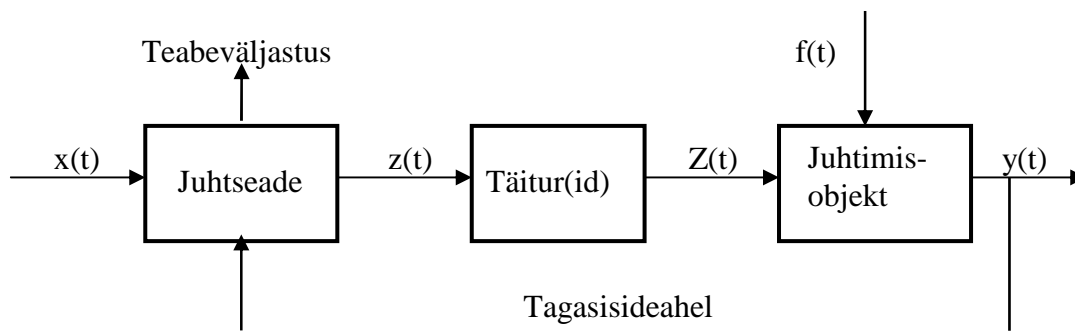
1 energeetilised jõuseadmed- neil seadmetel on kolm otstarvet:

- a) energia muundamine ja edastamine;
- b) mitmesuguste objektide kuju ja paiknemise muutmine;
- c) mitmesuguste objektide koosseisu muutmine.

Jõuseadmete põhiliseks näitajaks on kasutegur.

2 Juhtimisseadmed - kõige laiemas mõttes, kõik infoprotsessid. Juhtimisseadmete seisukohalt on tähtsaim nende töökindlus.

Juhtimine on süsteemi sihipärane mõjutamine. Joonisel 1.1 on toodud juhtimissüsteemi toimimise põhimõtteline skeem.



Joon. 1.1 Juhtimissüsteem. $x(t)$ on juhtsuurus, $z(t)$ juhttoime, $Z(t)$ täituri poolt võimendatud juhttoime, $y(t)$ väljundsuurus e juhitud suurus, $f(t)$ häiring.

1.2. Automaatika seadmete ülesanded energiasüsteemides.

Automaatika seadmete ülesandeks energiasüsteemides on: tagada elektrienergia genereerimine, ülekandmine, jaotamine ja tarbimine minimaalsete keskmiste pikaajaliste tootmiskuludega. See ülesanne jaotatakse kolme ossa:

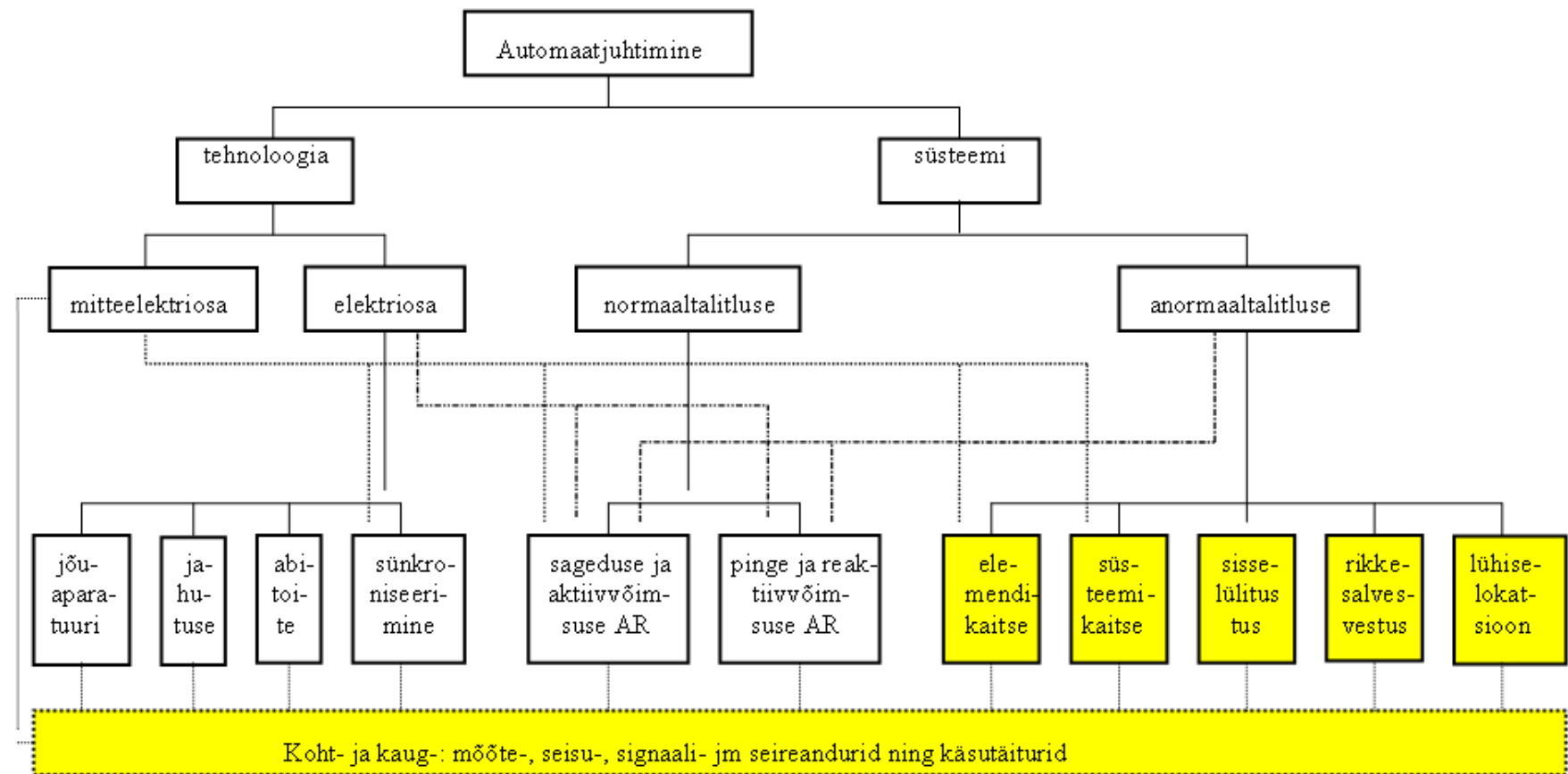
- 1) Tagada energiasüsteemi optimaalne töökindluse tase.
- 2) Tagada energia optimaalne kvaliteet.
- 3) Tagada optimaalne energia tootmine st, et tootmiskulud oleksid minimaalsed.

Energiasüsteemil on kolm olulist eesärasust teiste tehniliste süsteemidega:

- 1) Tootmise ja tarbimise samaaegsus.
- 2) Siirdeprotsesside suur kiirus, mis nõuab avariiprotsesside automaatjuhtimist.
- 3) Inimtegevuse elektrifitseeritus (energiasüsteemide ulatus).

Energiasüsteemides kasutatavad automaatika seadmed

Energiasüsteemis kasutatavad automaatikaseadmed on põhiliselt detsentraliseeritud, igal energiasüsteemi elemendil on oma automaatika seadmed. Kasutatakse ka keskeid automaatikaseadmeid ja sidekanaleid. Üksikud automaatikaseadmed moodustavad automaatikaseadmete süsteemi (joon 1.2). Eesti energiasüsteemis(üle 1000 V süsteemi osas) on umbes: 19 500 automaatikaseadet (neist 12 500 releekaitseseadmed)



Elektrisüsteemi automaatjuhtimise liigitus. Pidevjoonega on kujutatud automaatikablokid ja nende põhiseosed, teiste joontega – täiendavad seosed ning andurite ja täiturite plokk. Toonitud plokkides on sageli ühte fiidriterminali integreeritavad seadmed ja toimingud. AR – automaatreguleerimine.

Joon. 1.2 Energiasüsteemi automaatikasüsteemide süsteem.

1.3. Diskreetse väljundiga automaatika seadmed.

Diskreetse väljundiga seadmeid nimetatakse sageli ka lülitusautomaatideks. Lülitusautomaadid jagunevad ajalooliselt nelja põlvkonda:

- 1) Elektromehaanilised automaatikaseadmed.
- 2) Pooljuht automaatikaseadmed (diodid, transistorid).
- 3) Suured integraallülitused (aktiivelementideks on operatsioonivõimendid).
- 4) Mikroprotsessor automaatikaseadmed.

Viimased kolm on staatilised automaatikaseadmed. Automaatikaseadmete väljundelementideks on tavaliselt elektromehaanilised kontaktidega releed, sest elektronlülitid (türistorid, transistorid) ei isoleeri väljalülitavat ahelat piisavalt (avatud - suletud olekute takistuste erinevus on umbes 4 suurusjärku, samas mehaanilistel kontaktidel umbes 15 suurusjärku). Väljundreleed on tänapäeval hermeetilised hapnikuvabad elektromehaanilised releed. Väljundreleede kontaktimaterjaliks on AgCdO_2 (ABB) või Ag+Pd (AEG). Eesti energiasüsteemis on staatilisi automaatikaseadmeid umbes 15% 19 000.st.

1.4. Elektrisüsteemi rikked ja anormaalitalitus

Elektrisüsteemi anormaalitalitus e anormaalsus on elektrisüsteemi talitus, mille korral süsteemi talitusparameetrite (nt pinget, vool, võimsus, sagedus, stabiilsus) väärtused ei vasta normidele. Anormaalsus jaguneb süsteemi elementide rikeks ja süsteemi, selle osa ning elementide talitlustõrgeteks.

Elektrisüsteemi rike on elektrisüsteemi anormaalsus, mis on tingitud süsteemi primaarahela, seadme või -aparaadi (s.o süsteemi elemendi) tõrkest ja mis tavaliselt nõuab rikkis ahela, seadme või aparadi viivitamatut eraldamist elektrisüsteemist vastava(te) võimsuslülitite väljalülitusega. Eristatakse põik-, piki- ja kombineeritud riket. Põikrike on lühis, pikirike – tavaliselt katkestus, täpsemalt:

- *põikrike e lühis* on rike, mida iseloomustab võrgusagedusega vool kahe või enama faasi vahel või faasi(de) ja maa vahel
- *pikirike e enamasti katkestus* on rike, mida iseloomustab kolme faasi impedantsi ebavõrdsus, mis on tavaliselt põhjustatud ühe või kahe faasi katkemisest
- *kombineeritud rike* on samaaegne lühis ja katkestus.

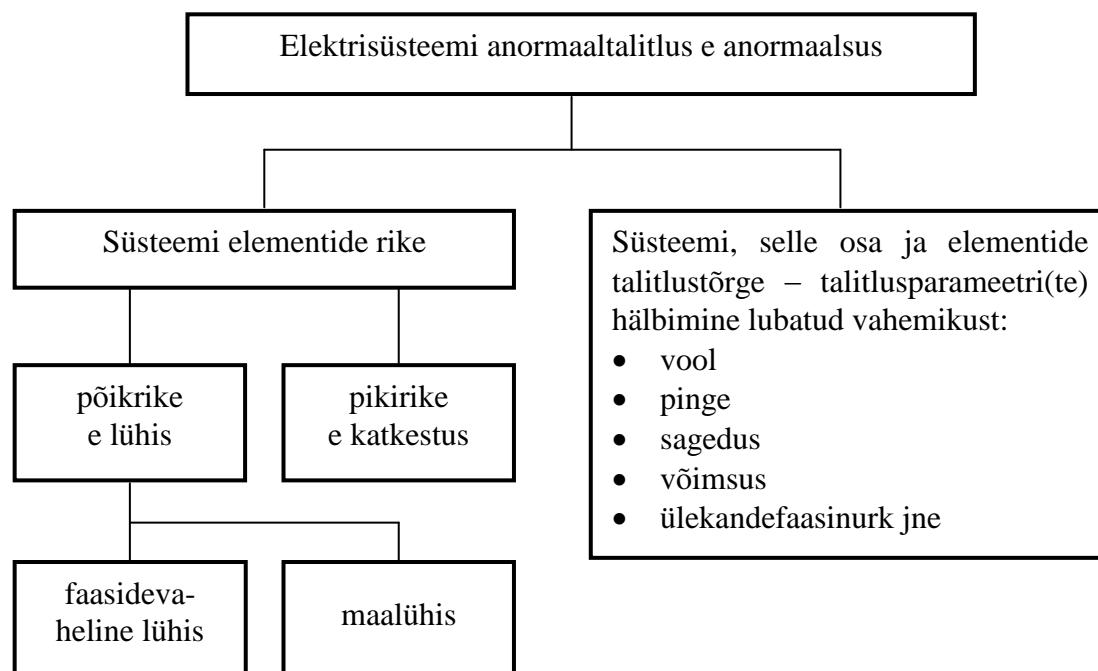
Seega on ka isoleeritud neutraaliga võrgus esinev põikrike lühis, mida on loomulik nimetada *maalühiseks*. Vastav kaitse on *maalühiskaitse*. Rikke (maalühis) ega vastava kaitse nimetus ei olene süsteemi neutraali seisust, – olgu see jäikmaandatud, takistusmaandatud, isoleeritud või resonantsmaandatud. Maalühisvool esineb ainult jäikmaanduse ja lühisvoolu piiramiseks kasutatud takistusmaanduse korral. Ülejäänud juhtumitel esineb maahendusvool. Mõlemad voolud on rikkevoolud.

Esinemiskoha järgi eristatakse *siseriket* ja *välisriket*. Olenevalt vajadusest mõistetakse siin kas kaitseobjektile või konkreetse kaitse kaitsetsoonis või neist väljaspool esinevat riket. Analoogiliselt eristatakse *sise-* ja *välisrikkevoolu*.

Süsteemi, selle osa ja elemendi talitlustõrge kujutab endast nende talitusparameetri(te) hälvimist lubatud vahemikust, nagu:

- elemendi koormuse suurenemine – liigkoormus
- sõlmepinge alanemine või kadumine
- süsteemi sageduse alanemine
- ülekandefaasinurga suurenemine.

Elektrisüsteemi anormaalsuse liigitus on esitatud joonisel 1.3.



Joon. 1.3. Elektrisüsteemi anomaaltalitus e anormaalsus

1.5. Releed

Esimese elektromehaanilise relee autoriks on ameerika füüsik J. Henry (relais - hobuste vahetamine). Relee on automaatselt toimiv seade, mis etteantud füüsikalise suuruse kindla väärtuse juures tekitab ahelas hüppelise muutuse. Etteantud füüsikalist suurust nimetatakse tunnussuuruseks ja tema kindlat väärtust relee sätteks. Kontaktide asendid, mis tahes skeemis, vastavad igasuguse pinge, voolu puudumisele ja kommutatsiooni aparaatide väljalülitatud olukorrale.

Vaatleme järgnevalt võimalikke releede liigitusi:

1. Releede liigitus liikuvate osade olemasolu järgi;
 - 1) dünaamilised e elektromehaanilised elemendid;
 - 2) staatilised elemendid.
2. Liigitus tunnussuuruse järgi:
 - 1) voolurelee;
 - 2) pingerelee;
 - 3) võimsusrelee;
 - 4) takistusrelee;
 - 5) sagedusrelee;
 - 6) kiirusrelee;
 - 7) rõhurelee;
 - 8) valgusrelee;
 - 9) termorelee.
3. Liigitus funktsioneerimisprintsipi järgi:
 - 1) elektromagnetilised releed;
 - 2) magnetelektrilised releed;
 - 3) induktsioonreleed;
 - 4) elektrostaatilised;
 - 5) mitmetel füüsikalistel efektidel põhinevad releed.
4. Releede liigitus paiknemise järgi automaatikaseadme struktuuris:
 - 1) mõõtereleed (mõõteosas);
 - 2) loogikareleed (loogikaosas).
 - 3) vahereleed, nende otstarbeks on olla võimendiks ja ahelate paljundamine);
 - 4) ajarelee ja näidikrelee.
5. Releede liigitus kontrollitavasse ahelasse lülitamise viisi järgi:
 - 1) primaarreleed - ühendatakse vahetult kontrollitavasse ahelasse;

2) sekundaarreed - ühendatakse vahetult kontrollitavasse ahelasse mõõteandurite (trafode) kaudu.

6. Toimimise viisi ehk juhttoime osutamise viisi järgi:

1) vahetu toimega releed - avaldavad juhttoimet teavet kandva energia arvel;

2) kaudtoimega releed - peab juhttoime avaldamiseks vajaliku energia saama väljastpoolt.

Releekaitse põlvkonnad

Releekaitse jaguneb, riistvara poolest, ajalooliselt kolme põlvkonda:

- 1) Elektromehaanilised automaatikaseadmed.
- 2) Pooljuht automaatikaseadmed (diodid, transistorid).
- 3) Suured integraallülitused (aktiivelementideks on operatsioonivõimendid).
- 4) Mikroprotsessor automaatikaseadmed

Viimased kolm on staatilised automaatikaseadmed. Automaatikaseadmete väljundelementideks on tavaliselt elektromehaanilised kontaktidega releed, sest elektronlülitid (türistorid, transistorid) ei isoleeri väljalülitavat ahelat piisavalt (avatud - suletud olekute takistuste erinevus on umbes 4 suurusjärku, samas mehaanilistel kontaktidel umbes 15 suurusjärku). Väljundreleed on tänapäeval hermeetilised hapnikuvabad elektromehaanilised releed.

1.6 Elektromehaanilised releed.

Arenenud riikides on elektromehaanilised releed kaotamas om kohta releekaitset. Kuna Eesti energiasüsteemis on praegu kasutusel olevatest releedest enamused seda tüüpi releed siis vaatleme neid lühidalt. Elektromehaaniliste releede konstruktsioonidega saab tutvuda laboratoorsete tööde käigus.

Igal elektromehaanilisel releel on magnetahel, mis koosneb ankrust ja ikkest. Magnetahelat ümbritseb üks või mitu mähist. Takistusmoment elektromehaanilistes releedes luuakse reeglina vedru abil ja töömoment voolu abil. Elektrivool kutsub esile magneetimisergutuse, mis tekitab magnetvoo. Magnetvoog põhjustab töömomendi. Relee rakendub kui on täidetud järgmine võrratus:

$$M_{\text{töö}} > M_{\text{tak}} + M_{\text{hõõre}}$$

Rakendumisel relee ankur muudab oma asendit ruumis. Kontakti liikuv osa on ankruga mehaaniliselt seotud.

Relee ennistub kui on täidetud järgmine võrratus:

$$M_{\text{tak}} > M_{\text{töö}} + M_{\text{hõõre}}$$

Töömoment on relee rakendumisel alati suurem kui töömoment relee ennistumisel, sest rakendunud releel on õhupilu väiksem ja on vaja väiksemat voolu, relee ümberlülitamiseks. Järelikult voolurelee ennistustegur k_e võrdub:

$$k_e = I_e / I_r \geq 0.8$$

Elektromehaanilised releed võib jagada järgmisel:

- 1) elektromagnetiline relee;
- 2) elektrodünaamiline relee;
- 3) induktsioondünaamiline relee;
- 4) induktsioonrelee;
- 5) magnetelektriline relee;
- 6) polariseeritud relee;
- 7) keelrelee.

Esimese nelja relee ühisomaduseks on see, et nende töömoment on võrdeline voolu ruuduga või kahe erineva voolu korrutisega. Nende releede rakendumisvõimsus on vahemikus 0,1 ... 10 VA. Suure rakendumisvõimsuse tõttu on nende releede tundlikus väike. Lühisel esinevad suured voolud (10 kordne) siis moment on seda suurem (100 kordne) seetõttu relee konstruktsioon peab olema mehaaniliselt tugev ja järelikult ka suured gabariidid. Järelikult töömomendi ruuduline sõltuvus on relee negatiivne omadus.

Selleks, et saada relee, mille töömoment oleks proportsionaalses sõltuvuses voolust tuleb üks mähis asendada püsिमagnetiga. Induktsioontüüpi releesid saab kasutada vaid vahelduvvoolu korral aga elektromagnetilisi ja elektrodünaamilisi releesid saab kasutada nii vahelduv- kui alalisvoolu korral. Püsिमagneti kasutusel saadakse tundlik (voolu polaarsuse suhtes) alalisvoolu relee, mida nimetatakse polariseeritud releeks. Seda tüüpi releede rakendumisvõimsus on mõni millivatt.

1.7. Staatilised releed

Automaatika seadmete teise põlvkonna seadmed said alguse releekaitse mõõteosade võrdlusskeemidest. Seadmed võimaldasid võrrelda :

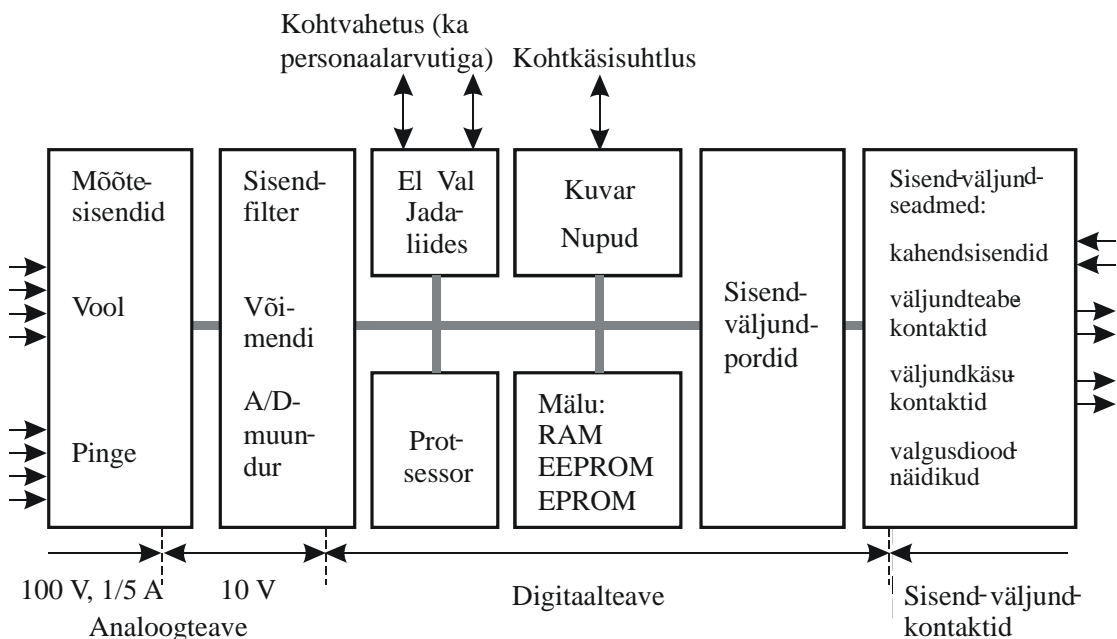
1. Moodulid
2. Faasid

3. Moodulid ja faasid

Staatiliste releede oluliseks puuduseks oli nende töökindlus. Staatilistes releedes suurenes oluliselt üksikelementide arv aga puudus autokontrolli teostamise võimalus.

1.8. Mikroprotsessorkaitse

Mikroprotsessorkaitse (MPK) funktsionaalne plokkskeem on esitatud joonisel 1.4. toimimise põhietaapid vastavalt joonisel esitatud plokkidele:



Joon. 1.4 Mikroprotsessor kaitse plokkskeem

Mõõtesisendite plokk. Kaitseobjekti voolutrafoode sekundaarnimivool on 1 või 5 A ja pingetrafoode sekundaarnimipinge 100 V. Voolusisendi dünaamiline taluvusvool on kuni 250kordne ja ühesekundiline termiline – kuni 100kordne voolutrafo sekundaarnimivool. Pingesisend talub 140 V kestevpinget. Sisendplokkis eraldatakse (isoleeritakse) kaitseobjekti voolu- ja pingeahelad MPKst ning sobitatakse (voolu ja pinge piiramise ning modifitseerimise abil) kaitseahelatega.

Järgmises plokkis vool ja pinge filtreeritakse, võimendatakse ja digitaliseeritakse. Viimase protsessi esimene aste on diskreetimine iga kaitse jaoks otstarbeka diskreetimissagedusega – tavaliselt on see 2–40 voolu ja pinge hetkväärtust ühe perioodi kohta e 100–2000 Hz. Lõpuks määratakse nende hetkväärtuste arväärtused. Digitaliseerimises osaleb MPK protsessor. Toodud diskreetimissageduse ülempiir võimaldab arvestada võrgusageduse kuni 5. harmoonikut. Kõrgemate harmoonikute arvestamiseks kasutatakse suuremat diskreetimissagedust. Vähem kui kahe väärtusega perioodi kohta ei ole võimalik perioodilist protsessi iseloomustada. Kahte väärtust kasutatakse lihtsa voolukaitse korral, mõõtes mõlema poolperioodi

amplituudväärtused. Sellega saab välistada lühisvoolu aperioidilise komponendi mõju kaitse toimimisele.

Jadaliides on kohtteabevahetuseks (nt alajaama ulatuses), sh ka personaalarvutiga. MPK kogu teabevahetus väliskeskkonnaga (v.a sisendväljundseadmete kaudu aset leidev) toimub selle liidese kaudu. Ka kaitse toimimiseks vajalik teave liini teis(t)est otsa(de)st, kaitse sätted ja nende muutmise käsud sisestatakse selle liidese kaudu. Samuti MPKsse integreeritud koht- ja kaug- mõõte-, seis-, signaali- jm seireandurite ning käsutäiturite väliskohtteabevahetus, aga ka rikkesalvestus- ja kaitse autodiagnostikaandmete väljastamine. Liideseid on kahte liiki: elektrijuht- (joonisel El) ja valgusjuht- (joonisel Val) liides. Valgusjuhi pikkus on piiratud, ulatudes kuni 2000 meetrini – on mõeldud teabedastuseks ühe elektriehitise piires.

MPK kaugteabevahetus (alajaamast eemal paiknevate objektidega, sh juhtimiskeskusega) toimub alajaama keskse kaugteabevahetusseadme vahendusel.

Nupud ja kuvar on kohtkäsisuhtluseks MPKga. Nende abil saab sooritada kõiki MPK ja temasse integreeritud lisaelementide käiduks ja diagnostikaks vajalikke operatsioone, sh sätestamist jt punktis 3 loetletud toiminguid. Kaitse autokontrolli rakendumisel saab kuvarilt teada kaitse tõrke koodi.

Protsessoreid võib olla üks (monoprotsessorikaitse) või mitu (multiprotsessorikaitse). Täiuslikemal distantkaitseil on nt iga kaitseastme tarvis oma protsessor. Protsessorid teevad tsüklilisi arvutusi voolu ja pingega ning kaitseobjekti teis(t)est otsa(de)st saabuva teabe numberväärtuste alusel vastavalt etteantud algoritmile ja võrdlevad tulemusi mälus olevate andmetega, sh sättega. Arvutuskiirus võib olla küllalt suur. Nt ABB multiprotsessorikaitse 1996. a kuni 100 mln käsku 32bitiste sõnadega sekundis (100 MIPSi – millions of instructions per second)

Mälusid on kolm erinevat liiki:

- RAM – muutmälu
- EEPROM – programmeeritav elekterkustutusega püsिमälu
- EPROM – ümberprogrammeeritav püsिमälu.

Kaitse kasutajal on ligipääs muutmälule ja sätete osas – ümberprogrammeeritavale püsिमälule. Sätete salvestamine viimases tagab nende säilimise abitoite katkemisel.

Käidu- ja rikkeandmed (sündmused ja talitusparameetrid koos ajaandmetega) salvestatakse muutmälus. Tänu kristallkella kasutamisele ja mõõdetakse aega suure täpsusega (tavaliselt 10 ms). Andmete säilimise muutmälus tagab patareivarutoide.

Püsिमälud on kasutatud valmistaja poolt MPK-le vajalike omaduste andmiseks (nt 5astmeline üleulatuse ja loa peegeldusega nõrga toitega otsast distantkaitse konkreetsete rakendusdiagrammidega ja voolu ning pingega kindla diskreetimissagedusega). Küllalt suure osa püsिमälust hõlmab MPK autokontroll on MPK enese poolt tehtav kaitseadmete ja välisahelate tõrgete automaattuvastus. Tõrke tuvastamisega kaasneb alati kaitse automaatne tööst väljaviimine.

Sisend-väljundpordid on sisend-väljundseadmete liitmikud protsessori siinil.

Sisend-väljundseadmeid on 4 liiki:

- Kahendsisendid on sama kaitseobjekti MPKväliste kaitsete (nt trafo gaasi-, joa-, temperatuuri-, rõhukaitse) poolt nende kontaktide abil antava teabe sisestamiseks MPKsse, võimaldamaks objekti kogu kaitse toimimise vahendamist MPK poolt.
- Väljundteabekontaktid toimivad kaitse rakendumisel ja kaitse tõrke tuvastamisel koht- ning kaugsignalisatsiooniseadmetele.
- Väljundkäsucontactid annavad kaitse rakendumisel võimsuslülit(e)ile väljalülituskäsu. Lülitil kahe väljalülituselektromagneti olemasolul antakse kummalegi eraldi käsk.
- Valgusdiiodnäidikute süttimine teavitab kaitse rakendumisest ja kaitse tõrke tuvastamisest.

Nii väljundteabe- kui väljundkäsucontactid on vastavate elektromehaaniliste releede contactid. Vaadeldavas tulevikus jäävad MPKde väljund-elementideks hermeetilised hapnikuvabad piisavalt töökindlad elektromehaanilised pisireled (mahuga mõni cm^3), kuna vastavad elektronlülitused ei taga suletud ja avatud ahela takistuse küllaldast erinevust.

Lisaks joonisel 7 kujutatud funktsionaalplokkidele on MPK-l veel toite-plokk. See ühendatakse abitoiteallikaga (nt akupatarei, ups). Paljude MPKde abitoitepinge võib varieeruda laias vahemikus. Nt Vaasas toodetavatel ABB kaitseadmetel on abitoitepinge enamasti kahes vahemikus: kas 18–80 või 80–265 V. Siemensi kaitseadmetel on abitoitepinge kolmes vahemikus: 19–56, 48–144 ja 176–288 V. GEC Alstom annab tellimisel valitavate nimiabipingete rea vahemikus 24–250 V (8 väärtust), lubades hälbeid 0,8–1,1 U_N .

Mikroprotsessorkaitse omadusi

- 1) Sama tüüpi riistvara kasutamine eri tarkvara abil eri kaitseadmete realiseerimiseks.
- 2) Sama kaitse kuni 4 erineva sätte kasutamise (sh kaugsätetamise) võimalus. Vastava koht- või kaugkäsu (vahel ka automaatselt) saab neist aktiveerida ühe. Sätte automaatmuutmise näiteks võib tuua mootori hetk-voolukaitse sätte kahekordistamise käivitusajaks.
- 3) Mitmekordne viit- ja kiirtaaslülitus. Selles suhtes minnakse reklaami huvides liiale, võimaldades kasutada kuni 5–10kordset (eri firmadel erinev piirarv) taaslülitust.
- 4) Kaitse tundlikkuse, töökiiruse ja mõõtmis- ning viite täpsuse oluline suurenemine.
- 5) Võimalus esitada kaitse tunnussuurus matemaatilise avaldisena, nt $\int I^2 dt$ liigkoormuskaitse tarvis, kusjuures on võimalik arvestada kaitseobjekti soojenemise ajakonstanti ja objekti algkoormust.
- 6) Viitkaitsel sõltumatu rakendusaja või rakendusaja 4–6 erineva sõltuvusliigi valiku võimalus. On sõltuvusi, mis sobivad mh maandatud neutraaliga kesk-, kõrge- ja ülikõrgepingevõrgu maalühiskaitsele ning koos-tööks elektromehaanilise kaitse ja sulavkaitsmetega.

7) Kaitse enda korrasoleku autokontroll (auto kahes mõttes – nii automaat- kui enesekontrolli mõttes) – kaitse funktsionaalplokkide ja toiteploki töövõime perioodiline kontroll, mis rikke tuvastamisel viib kaitse tööst välja, teatab sellest juhtimiskeskusse ja väljastab rikkekoodi. Ei võimalda reeglina tuvastada põhimõttelisi tõrkeid ega rikkeid, mis põhjustavad kaitse liigrakendumise. Autokontrolli perioodilisuse näide: perioodiga 5 ms kontrollitakse mikroprotsessor ja tarkvara, perioodiga 10 ms mälu ja perioodiga 1 min sätteid, analoog-digitaalmuundur, multiplekser (diskreetimisseade), võimendid, väljundreleede mähised ja toiteplokk.

8) Oluliselt väiksemad gabariidid ja juhtmestusvajadus kui kõigil MPK-le eelnenud kaitsetel.

9) Üks märkus MPKde teabeedastuse kohta: Paraku ei ühildu eri firmade teabeedastusprotokollid. Seda laadi probleemid peaks edaspidi välistama hiljuti kehtestatud IEC standardid.

MPK kasutuselevõtuga kaasnevad kaitse ülesannete täitmise kõrval järgmised võimalused:

1) Kaitse riistvara kasutamine mitmesuguste muude juhtimis- ja seireülesannete täitmiseks. Nii on MPKsse tihti integreeritud koht- ja kaugkasutamiseks mõõte-, seisu-, signaali- jm seireandurid ning käsutäiturid. Siis asendab kaitse esipaneel täies ulatuses juhtimispaneeli, kusjuures võimsus- ja lahküliteid saab juhtida ainult nendevahelise käidublokeeringu tingimuste täitmisel. Seadme esipaneelil on võimsuslülite, lahkülite ja maandusnugade seisuindikatsioon ning voolu, pinget, aktiiv- ja reaktiivvõimsuse, ning energia (mitte kommerts-) mõõtmine. Ühtlasi täidab seade fiidri telemaatikalõppjaama kõigi andurite ning käsutäiturite ülesanded. Sageli nimetatakse sellist multifunktsionaalset seadet fiidriterminaliks.

Fiidriterminalide jm kaitse- ning sideseadmete väikeste gabariitide tõttu on nt Sindi alajaama varem ehitatud hoone ainult osaliselt kasutusel.

2) Fiidriterminal võib jälgida ka võimsuslülite(te) ressursi, fikseerides kõik väljalülitused ja väljalülitusvoolu väärtused.

3) Avariisündmuste ja -parameetrite automaatsalvestus rikkeanalüüsiks.

4) Lühisekoha lokatsioon.

2. RELEEKAITSE MÕISTE

2.1 Releekaitse mõiste laienemine

Releekaitse seadmestik on elektrisüsteemi rikete või muu anormaaltiltuse avastamiseks, rikete eraldamiseks, anormaaltiltuse lõpetamiseks selleks vajalike juhtkäskude või signaalide andmise teel. Termin kasutamisel tuleks silmas pidada järgmist:

- termin *kaitse* on üldtermin *kaitseseadmete* ja *-süsteemide* tähistamiseks

- terminit *kaitse* võib kasutada kogu elektrisüsteemi kaitse või elektrisüsteemi ühe elemendi kaitse tähistamiseks, nt trafo kaitse, liini kaitse, generaatori kaitse, elektrisüsteemi koormusvähenduskaitse
- kaitse hõlmab elektrisüsteemi pinge või sageduse hälbe juhtimisseadmed, nagu koormusvähendus-, reaktorite automaatjuhtimis- jm seadmed
- kaitse hõlmab kõik elektrisüsteemi anormaaltalitluse juhtimise lülitusväljundiga (välja- ja sisselülitavad) automaadid
- kaitse ei hõlma
 - pinge- ja sagedusregulaatoreid, kuigi ka need toimivad anormaaltalitluse lõpetamiseks ning nt trafode pingeregulaatorid on kõrge-madal-toimelise (ümber)lülitusväljundiga
 - seadmeid, mis on ette nähtud liigpinge piiramiseks, kuigi just liigpingekaitse väldib lühiseid, aga releekaitse reeglina ei tee seda.

Välja lülitava või signaali andva väljundiga automaati nimetatakse kaitseks, sisselülitava toimega automaati – *lülitusautomaadiks* aga täpsem nimetus oleks *sisselülitusautomaat*, kuna see seadmeterühm ei hõlma väljalülitusautomaate.

Vastavalt ülalöeldule tundub olevat otstarbekas **jagada releekaitse kolme põhiklassi** ja nimetada neid järgmiselt:

- **elemendikaitse** – elektrisüsteemi elemendi individuaal- (ka kahe rööpelemendi ühis-) kaitse, mida võib mõista kui releekaitset kitsas ja meile seni harjumuspärasest mõttes
- **süsteemikaitse** – elektrisüsteemi elementide rühma, süsteemi osa ja kogu süsteemi kaitse
- **sisselülitusautomaadid** – automaadid alajaama võimsuslülitite) või lahkülülitite) lülitamiseks vastavalt määratletud programmile.

Sisselülitusautomaat võib rakenduda lühiskaitsest, pingekaotuskaitsest või koormusvähenduskaitsest. Seda võib kasutada väljalülitunud seadme taaslülituseks või asendamiseks töövõimelise varuseadmega (nt reservilülitusautomaat – RLA).

Releekaitse sõnastikus ei ole kaitse jagamist elemendi- ja süsteemikaitseks otseselt esitatud, aga see on kooskõlas terminite määratlusega.

Eestis on seni nimetatud süsteemikaitset Ida kombe kohaselt *avariitõrjeautomaatikaks*. Olenevalt kontekstist võib termin süsteemikaitse hõlmata ka sisselülitusautomaadid, nii nagu hõlmab viimased üldtermin *releekaitse*. Idas on esinenud ka käsitlust, mille kohaselt termin *avariitõrjejuhtimine* hõlmab kõiki kolme releekaitse eelnimetatud põhiklassi [32].

Endastmõistetavalt on mistahes terminite kasutamisel otstarbekas ära jätta konkreetsetes tekstis nende üheseks mõistmiseks mittevajalikud täiendsõnad ja -sõnaosad.

2.2. Süsteemikaitse

Olulisemad süsteemikaitsed on:

Sünkronismikaotuskaitse, mis rakendub elektrisüsteemi sünkronismikaotusprotsessi algul selle protsessi arenemise vältimiseks. Seega hõlmab see kõik sünkronismi tagavad automaadid, sh asünkroonkäigu- (AKA) ja koormus- ning genereeriva võimsuse vähendusautomaadid, mida RESi järgi tuleks nimetada vastavateks kaitseteks.

Koormusvähenduskaitse, mille ülesandeks on süsteemi koormuse vähendamine anormaaltalitluse korral, nt sageduse alanemisel. Seega hõlmab ta senise nimetusega sagedusautomaadi (SA) ja pinge järgi koormuse väljalülitusautomaadi (PKVA). Need seadmed on vastavalt nüüd alasagedus-koormusvähenduskaitse ja alapinge-koormusvähenduskaitse. Esimese kaitseobjektiks on elektrisüsteem tervikuna või süsteemi eraldunud osa, teise – süsteemi osa.

Pingekaotuskaitse toimib võimsuslüliti(te)le pinge kadumise korral, tavaliselt süsteemi taastamise ettevalmistamiseks. Idas kasutatakse nt ka reservilülitusautomaadi (RLA) koosseisus mootorite grupikaitsena vastutusrikaste mootorite isekäivituse tagamiseks vähem vajalike mootorite väljalülitusega, Läänes – isekäivituse vältimiseks.

Alapingekaitse e pingelanguskaitse, mis rakendub, kui võrgupinge alaneb alla ettemääratud väärtuse.

Võimsuslüliti tõrkekaitse, mis peab eraldama süsteemi rikke selleks määratud võimsuslüliti(te) tõrke korral. Seni on teda nimetanud idanaabri keelepruugi järgi võimsuslüliti (tõrke) reserveerimisseadmeks (VLRS).

Süsteemikaitse võib vajadusel kasutada *avariitõrjeväljalülitust* või *avariitõrjekaugväljalülitust* mis on võimsuslüliti(te) automaat(kaug)väljalülitus elektrisüsteemi lubamatu talitluse (liigpinge, liigkoormus, süsteemi ebastabiilsus jne) vältimiseks pärast teiste võimsuslülitite väljalülitust elektrisüsteemi rikke (rikete) tõttu.

Need on kaks ainust juhtumit, mil RESi eesti- ja venekeelsetes terminites esineb sõnauhend "avariitõrje" ja "противоаварийное".

2.3 Sisselülitusautomaadid

Olulisemad sisselülitusautomaadid on:

Taaslülitusautomaat (TLA), mille ülesandeks on võimsuslüliti(te) automaatne taassisselülitus pärast selle (nende) väljalülitust releekaitse toimel.

Süsteemitaastusautomaat on seade võimsuslülitite või teiste kommutatsiooniparaatide taassisselülituse juhtimiseks määratletud järjekorras ja määratletud viitega. On tavaliselt ette nähtud alajaamades pinge osaliseks või täielikuks taastamiseks pärast avariid. Automaattaastus võib järgneda edutule automaattaaslülitusele või elektrisüsteemi osadeks jagunemisele.

Koormustaastusautomaat on seade võimsuslülitite automaattaaslülituse juhtimiseks pärast nende koormusvähendusväljalülitust. Sisselülitamisel kontrollitakse sagedust ja pinget. Seni on räägitud (sageduslikust) STLAst ja (pinge järgi toimivast) PTLAst.

2.4 Kaitsega seotud mõisteid

Kaitserellee on mõõterelee, mis iseseisvalt või koos teiste releedega moodustab kaitseeadme.

Kaitstesüsteem on ühe või mitme kaitseeadme ja teiste seadiste kompleks kaitse ühe või mitme määratletud ülesande täitmiseks.

Kaitstesüsteem hõlmab:

- * ühe kaitseeadme või mitu kaitseeadet
- * voolu- ja pingeadurid, tavaliselt mõõtetrafo(d)
- * juhtistiku, sh nii elektri- kui valgusjuhistiku
- * väljalülitusahela(d)
- * abitoiteallika(d)

olenevalt kaitstesüsteemi toimimise põhimõttest võib ta lisaks hõlmata:

- * sidekanali(d)
- * kas ühe või kõik (sidekanaliga kaitse) kaitseobjekti otsad
- * taaslülitusautomaadi.

Kaitseobjekt on see osa elektrisüsteemist või tema võrgu ahelast (enamasti elektrisüsteemi element, mõnikord ka kogu süsteem või selle osa), mille tarvis konkreetset kaitset kasutatakse.

Kaitsetsoon on elektrisüsteemi osa, mille eeldatavasti hõlmab kaitse ja millest väljaspool esinevate rikete korral ta ei rakendu.

Kaitseaste. – suhteliselt selektiivse (tavaliselt distants-) kaitse astmed on kaitse allsüsteemid, mille mõõteelementidel on erinev toimimisolatus. Märkusi:

- suhteliselt selektiivsel kaitisel on sageli kaks, kolm või enam astet
- harilikult selle kaitse lühima ulatusega aste on hetktoimega ja tema säte vastab impedantsile, mis on mõnevõrra väiksem kaitseobjekti impedantsist
- pikema ulatusega kaitseastmetel on tavaliselt selektiivsuse tagamiseks viide
- ka voolukaitse on tihti mitmeastmeline.

Veel mõningaid piiratuma kasutusala kaitsega seotud mõisteid.

Asenduskaits on kaitse, mis normaalselt ei ole töös, kuid mille võib teise kaitse asemel töösse viia.

Kaitse ülekate on erinevate kaitsete tsoonide ühisosa.

Alaulatus on distants- või voolukaitse omadus, mille korral lühima ulatusega astme säte vastab kaitseobjektist lühemale kaitseulatusele.

Üleulatus on distants- või voolukaitse omadus, mille korral lühima ulatusega astme säte vastab kaitseobjektist pikemale ulatusele.

2.5. Elektrisüsteemi automaatjuhtimise liigitus

Tavaliselt eristatakse elektrisüsteemide juhtimisel järgmisi ajalise hierarhia tasandeid:

- pikaajaline plaanimine, ka kaugplaanimine
- lühiajaline plaanimine, ka lähiplaanimine
- operatiivjuhtimine
- reaajas juhtimine.

Elektrisüsteemi operatiivjuhtimine toimub inimese (operaatori) vahetult antud juhtimiskäskude järgi. See on tüüpiline käsijuhtimine. Automaatjuhtimine, mille toimimises operaator vahetult ei osale, toimub reaajas.

Kahtlemata on ka automaatjuhtimissüsteemi toimimises inimese osa määrav, aga seda kõrgematel elektrisüsteemi talitluse juhtimise ajalise hierarhia tasanditel nii elektrisüsteemi talitluse pika- kui lühiajalisel plaanisel ning operatiivjuhtimisel kui ka elektrisüsteemi arengu kavandamisel.

Automaatjuhtimine peab alati olema kooskõlas plaanitava talitlusega. Selle tagamiseks nähakse süsteemi talitluse plaanisel ette vajalikke muudatusi automaatide toimimisalgoritmide (nt releekaitse sätete muutmine), mis realiseeritakse operatiivjuhtimise tasemel. Mõnikord on vaja arvestada talitluse plaanisel automaatikaseadmetest tingitud piiranguid. Süsteemi arengu (sh renoveerimise) kavandamisel valitakse need automaatikaseadmed, mis on võimalikult sobivad süsteemi oodatavate talitluste tarvis ja mis võimaldavad vajalikul viisil muuta nende toimimisalgoritme.

Käsitleme lähemalt elektrisüsteemi automaatjuhtimissüsteemi. See on küllaltki keerukas ühtne süsteem. Seda iseloomustab süsteemsus kahel tasandil. Esiteks **automaatjuhtimise süsteemsus makrotasandil e makrosüsteemsus**. Selle kohaselt toimub elektrisüsteemi arendus- ja käidu otsuste vastuvõtmine süsteemselt, arvestades kõiki olulisi seoseid:

- elektrisüsteemi elementide ja nende automaatjuhtimisseadmete vahel
- elektrisüsteemi ja süsteemiautomaatide vahel
- elektrisüsteemi elementide vahel
- erinevate automaatjuhtimisseadmete toimimise vahel
- käsi- ja automaatjuhtimisseadmete toimimise vahel.

Teiselt poolt, kaasaegse mikroprotsessorjuhtimisaparatuuri (sh releekaitseadmete) riistvara efektiivsemaks kasutamiseks integreeritakse vastava tarkvara abil samasse riistvarasse (juhtimisterminali) paljude juhtimisülesannete täitmine. See on **juhtimise süsteemsus mikrotasandil ehk mikrosüsteemsus**.

Elektrisüsteemi automaatjuhtimissüsteemi süstemaatiliseks käsitluseks on otstarbekas see omakorda liigitada. Üks võimalikke liigitusi, millest lähtutakse käesolevas konspektis, on esitatud joonisel 2.1. Sellel on kujutatud lihtsustatult funktsionaalsed automaatikaplokid ja nendevahelised seosed. Oma juhtimisobjekti ja juhtimise põhiülesande järgi jaguneb automaatjuhtimine kahte klassi:

- elektrisüsteemi elementide toimimise lokaalne e tehnoloogilise protsessi automaatjuhtimine, mis omakorda jaguneb elektriosa ja mitteelektriosa elementide automaatikaks

Joon. 2.1 10–110 kV liini juhtimisterminali näide. Täidetakse nii kohalikke kui kaugkäiduülesandeid, sh võimsus- ja lahkülilitite juhtimine ning seisuindikatsioon ja käidublokeering. Kaitse sätted on ka kaugmuudetavad. Toimingutest salvestatakse viis viimast võimsuslüliti väljalülitust ja seejuures esinenud suurimad voolud.

- elektrisüsteemi automaatjuhtimine, milles omakorda eristatakse normaal- ja anormaalitalitluse automaatikat. Süsteemiautomaatika hõlmab ka selle osa elementide automaatikast, mille toimimisel on suur mõju süsteemi talitlusele. Esitatud funktsionaalsete automaatikaplokkide vahel ei ole ranget piiri. Nii elektri- kui mitteelektriosa tehnoloogia automaatika peab toimima efektiivselt elektrisüsteemi igal talitlusel. Eriti oluline on see just anormaal- ja osa-normaalitalitlusel, tagamaks süsteemi töökindlust, sh ka süsteemiautomaatika toimimise võimaldamisega.

Plokkskeemil joonisel 2.1. on kujutatud ka releekaitse laiendatud mõiste poolt hõlmatavad **kaitse kolm põhiklassi: elemendi- ja süsteemikaitse ning automaatsisselülitus.**

Tavaliselt on elektrisüsteemi elemendi juhtimisterminali peale mikroprotsessorkaitse integreeritud veel :

- võimustlüliti tõrkekaitse
- mitmekordne kiir- ja viittaaslülitusautomaat (TLA)
- kaitseobjekti mitteelektrilise kaitse juhtimiskäskude ja toimimisteabe vahendamine (nt trafo gaasi-, joa- ja rõhukaitse puhul)
- tihti ka automaatrikkesalvestus jt kaitse toimimisega seotud ülesannete täitmine
- mõnikord ka lühiselokaator, mis määrab lühise kauguse liini otsast.

Sageli on juhtimisterminali integreeritud tema riistvara efektiivsemaks kasutamiseks funktsionaalselt automaatjuhtimise valdkonna väliste seire- ja juhtimisülesannete täitmine, nagu:

- lülitusaparaatide (võimsuslülitite, lahkülilitite):
 - koht- ja kaug(käsi)juhtimine
 - (lisaks ka maandusnugade) käidublokeering
 - koht- ja kaug- (lisaks ka maandusnugade) seisuindikatsioon

- kaitseobjekti talitusparameetrite koht- ja kaugmõõtmine
- võimsuslülitite ressursiarvestus: lühisvoolu väljalülituskordade ja väljalülitusvoolu väärtuse salvestamine.

Nimetatud kohttoiminguid võib sooritada kas vahetult juhtimisterminali esipaneelil paiknevate nuppude, näidikute ja kuvarite abil või alajaamas paikneva personaalarvuti abil, opereerides kursoriga kuvari mnemoskeemil.

Eelkirjeldatuga seoses on joonisele 2.1 plokkiskeemi lisatud **koht- ja kaug-: mõõte-, seisu-, signaali- jm seireandurite ning käsutäiturite plokk** ning selle seosed automaatjuhtimisega. Seega on sellisesse juhtimisterminali integreeritud ka telemaatikalõppjaama andurid ja käsutäiturid. Tihti ühte juhtimisterminali integreeritavad automaatikaplokkid.

Ühtlasi võiks soovitada senise vene keelest toortõlgitud “telemehaanika” asemel võtta kasutusele sobivam termin *telemaatika* (telecontrol, телемеханика), mis esineb rüüpvormina Eesti Entsüklopeedia 9. köites (1996). Ei ole ju tänapäeva kaugtehnikal reeglina midagi tegemist mehaanikaga. Liati pole põhjendatud mingi (tehnikavaldkonna) nimetamine selles kasutatavate “pulkade”, vaid olulise toimimistunnuse järgi.

Releekaitstes kasutatavad sidekanalid kuuluvad vastavate kaitseüsteemide koosseisu. Ka selles suhtes puudub telemaatikal funktsionaalne seos automaatjuhtimisega. Küll aga hõlmab telemaatika elektrisüsteemi talitluse (sh releekaitseesse puutuva) käiduandme- (sh käsu-) edastuse. Nt võib kaugkäsuga muuta kaitse toimimisalgoritmi. Sageli muudetakse sätet.

Mõnda plokki ja plokkidevahelist seost on vaja kommenteerida.

Elektriosa tehnoloogia aparatuuriautomaatika plokk hõlmab nt õhk-, elegaas- ja vaakumvõimsuslülitite ning muu aparatuuri, sh ka seadmete elegaasisolatsiooni toimimiseks ja kontrolliks vajaliku automaatika.

Elektriosa tehnoloogia jahutuse automaatikaplokk hõlmab elektrijõuseadmete (nt trafod, reaktorid, generaatorid, sünkroonkompensaatorid) jahutuse automaatjuhtimise.

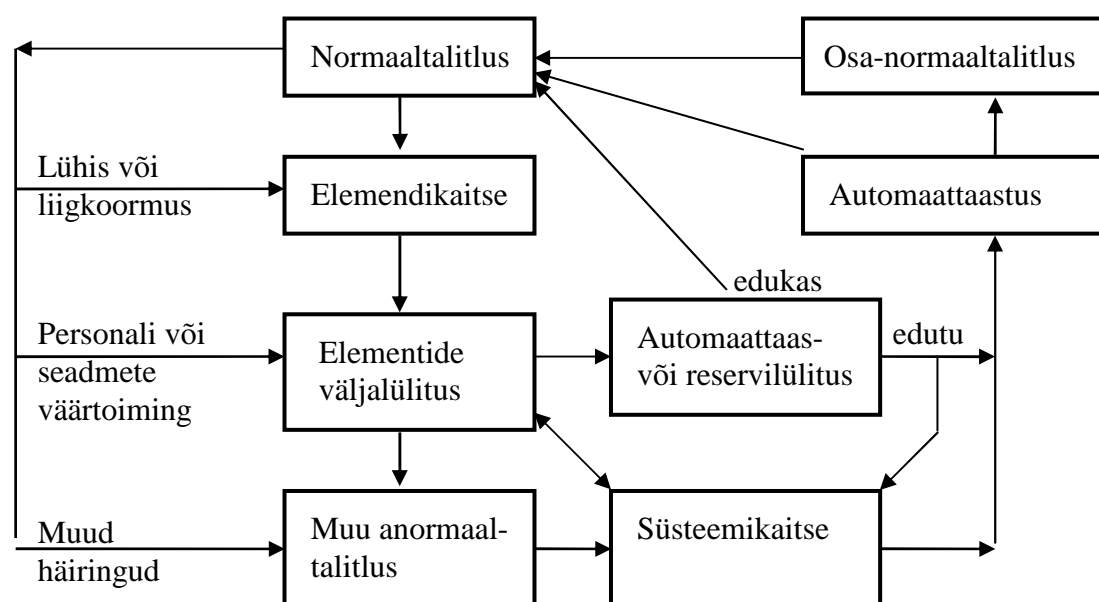
Elektriosa tehnoloogia abitoiteautomaatika plokk hõlmab nt akupatarei-, vahelduvvooluabitoite- ja Eesti elektrivõrkudes järjest enam kasutatava puhverabitoiteautomaatika. Puhverabitoiteallikas – ups (uninterruptible power supply – UPS) on algselt arvutite katkematu toite tagamiseks kasutusele võetud toitesead.

3 RELEEKAITSE TOIMIMINE

3.1 Elektrisüsteemi normaaltalitluse rikkumise ja taastamise protsess

Elektrisüsteemi anormaaltalitlust (sh rikkeid) käsitleti lühidalt punktis 1.4. Elektrisüsteemi rikete või muu anormaaltalitluse avastamine, rikete eraldamine, anormaaltalitluse lõpetamine on releekaitse põhiülesanne.

Elektrisüsteemi normaaltalitluse rikkumise ja taastamise protsess võib toimuda igal konkreetsel juhul erinevalt, oleneades tingimusest. Enamasti toimub see iseloomulike etappidena, mida võib kujutada joonisel 3.1. esitatud lihtsustatud plokk skeemina. Selle skeemi alusel on kirjeldatavad kõige tagasihoidlikum lühis ja suurim süsteemikaskaadri (süsteemiavarii).



Joon. 3.1 Elektrisüsteemi normaaltalitluse rikkumise ja automaatse taastamise protsessi plokk skeem

Kaitse toimimisega kaasnevat teabeväljastust (signalisatsiooni) ei ole plokk skeemis kujutatud.

- võimsuslüliti(te)le väljalülituskäsu
- elektrisüsteemi elemendi liigkoormus, mis põhjustab elemendi väljalülituse (kui element ei talu liigkoormust) või ainult teabeväljastuse (signaali andmise)
- personali või seadmete väärtõimingu tulemusena aset leidev elektrisüsteemi elemendi *väärväljalülitus*
 - personali väärtõimine võib olla nt:
 - võimsuslüliti(te) ekslik sisse- ja väljalülitamine
 - lühise põhjustamine

- seadmete väär toimimine võib olla nt:
 - releekaitse rakendustõrge
 - releekaitse liigrakendumine
 - võimsuslüliti(te) väljalülitustõrge
- muu häiring võib olla nt orkaan, nagu 1998. a jaanuaris Kanadas (paljudel kordadel mujalgi), mis põhjustab elektrivõrkudes palju lühiseid ja katkemisi (neist suur osa õhuliini mastide ja juhtmete purunemise tõttu); sekundaarhäiringuks on siis enamasti võimsusdefitsiidist tingitud sageduse järsk langus süsteemis või selle eraldunud osas või lokaalne pinge langus. Lumetuisk koos järsu temperatuuri muutusega põhjustas Eestiski 1999. a veebruaris liinijuhtmete jäite- ja puude lumekoormuse suurenemise tagajärjel hulgaliselt samaaegseid lühiseid ning sadade alajaamade pingetuks jäämise paljudeks päevadeks.

Väärväljalülitus on mittevajalik väljalülitus kaitse liigrakendumise tulemusena nii elektrisüsteemi rikke korral kui rikke puudumise korral või teiste sekundaarseadmete tõrke tulemusena või inimliku eksituse tulemusena.

Releekaitse liigrakendumise näiteks võib tuua maailma seni suurima süsteemiavarii (novembris 1965 USA kirde- ja Kanada loodeosas) algpõhjuse, milleks oli releekaitse liigrakendumine aja jooksul suurenenud koormuse ja kaitse sätte korrigeerimata jäämise tõttu.

Etapp 2. Väljalülitamine. Kõige lihtsamal juhtumil – kaitseobjekti siselühise korral – lülitab objekti välja tema elemendikaitse. Selle halvimaks tulemuseks võib olla muu anormaaltalitus, mis võib aset leida ka teistel põhjustel. Siis võib tekkida sünkronismikaotus süsteemi osade vahel ja lokaalne aktiivvõimsusvajak ning -ülejäak. Nendes tingimustes rakendub ja väljastab juhttoimeid süsteemikaitse – sünkronismikaotuskaitse, sh koormuse ning genereeriva võimsuse vähendamise kaitsed. Viimaste ülesandeks on süsteemi eraldunud osades võimsusbilansi tagamine normaalsele lähedasel pinge ja sageduse väärtusel ning vajalike ettevalmistuste tegemine süsteemi- ja koormustaastuseks. Vajaduse korral rakendub koormusvähenduskaitse alasagedus- või alapingekaitse, lülitades defitsiitset süsteemiosast osa koormust välja.

Kõige lihtsamal süsteemirikke juhtumil – võimsuslüliti väljalülitustõrke korral – lülitab lühise välja lihtsaim ja vähima ulatusega süsteemikaitse: võimsuslüliti tõrkekaitse.

Etapp 3. Rikke heastamine. Seda alustab kaitseobjekti (nt liini) väljalülituse korral tema oma TLA. Selle edukuse korral taastub normaaltalitus.

Edu TLA korral võib järgneda etapp 2 või automaattaastus. Vajalike tingimuste (sh süsteemiosade resünkroniseerimise tingimuste) täitumisel leiab aset süsteemitaastus ja seejärel – koormustaastus. Vajadusel osaleb rikke likvideerimise protsessis ka elektrisüsteemi operatiiv- ja remondipersonal (nt Kanada 1998. a jaanuariorkaani järel kestis kõigi tarbijate elektrivarustuse taastamine terve nädala).

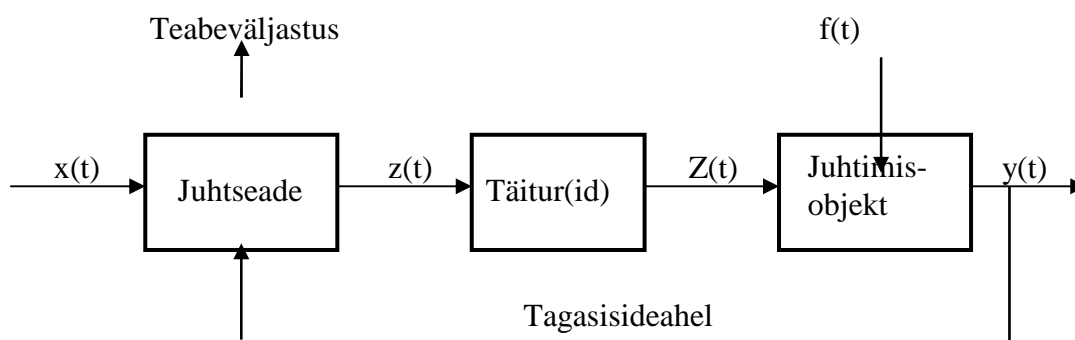
Sünkronismikaotuskaitse võib olla ka ennetava iseloomuga, kasutades sünkronismikaotuse vältimiseks sobivat toimimisalgoritmi, sh ka avariitõrjeväljalülitust. Oluline osa sünkronismikaotuse ennetamisel ja ka sünkronismi taastamisel on täita kaasaegsetel sünkronmasinate kiiretoimelistel

pingeregulaatoritel. Elektrisüsteemi rööptöö stabiilsuse tagamisel omandavad järjest suurema tähtsuse gaasi- ja auruturbiinide spetsiaalsed kiirusregulaatorid. Selliseid regulaatoreid kasutatakse laialdaselt nt Euroopa mandriosa ühendelektrisüsteemis UCPTE.

Kas süsteemi- ja koormustaastuse tulemuseks pärast rikke likvideerimist on elektrisüsteemi siirdumine normaal- või osa-normaaltalitusse, sõltub asjaoludest. Osa-normaaltalitus erineb normaalsest peamiselt tarbijate elektrivarustuse ulatuse poolest.

3.2. Juhtimissüsteem

Mistahes liiki releekaitse ja automaatreguleerimissüsteemi plokkskeemi võib esitada üldistatud kujul – klassikalise juhtimissüsteemina (joon. 3.2). Juhtimissüsteem on seotud väliskeskkonnaga kahe sisendi $x(t)$ ja $f(t)$ ning ühe väljundi $y(t)$ kaudu. Juhtsuurus $x(t)$ juhtseadmest.



Joon. 3.2 Juhtimissüsteem. $x(t)$ on ohjesuurus, $z(t)$ juhttoime, $Z(t)$ täituri poolt võimendatud juhttoime, $y(t)$ väljundsuurus e juhitud suurus, $f(t)$ häiring.

Joonisel on kujutatud klassikaline suletud juhtimisahelaga ehk *tagasisidega juhtimise* plokkskeem. See on juhtimine, mille korral juhttoime sõltub juhitava suuruse mõõtmisest, seega ka juhtimisobjekti reaktsioonist juhttoimele. Juhtsuurus $x(t)$ on konstantne või ajas muutuv juhtimissüsteemi sisendsuurus (nt kaitse või automaatregulaatori sätted), millele vastavalt peab selle süsteemi väljundsuurus $y(t)$ muutuma. *Juhttoime* ehk *toimesuurus* $z(t)$ on juhtseadme (antud juhtumil kaitseseadme) väljundsuurus, mis täituri poolt võimendatuna ($Z(t)$) on ühtlasi juhtimisobjekti sisendsuuruseks.

Vaatleme kahte juhtumit:

- juhtseadmeks on releekaitseseade, – siis on tegemist releekaitse süsteemiga
- juhtseadmeks on automaatregulaator – siis on tegemist automaatreguleerimissüsteemiga.

Neist esimest kirjeldame järgmises punktides.

3.3 Releekaitsesüsteem

Juhtseadmeks on releekaitse seade. Juhtimisobjektiks on kaitseobjekt – nt kogu elektrisüsteem (alasadus-koormusvähenduskaitse või sünkronismikaotuskaitse korral) või süsteemi element (nt elektriliin). Täitur(id) on mõlemal juhtumil võimsuslülitid(d) Q. Tagasisideahel hõlmab voolu- ja pingetrafo ja sidekanaliga kaitse korral ka teabeahelad liini teis(t)est otsa(de)st. Kaitse seadmes sisalduv teabeplokk väljastab kaitse toimimist ja mitmesuguste lisaulesannete täitmist iseloomustavat teavet.

Joonise 3.2 plokkskeem kujutab mistahes releekaitset, sh ka nt elektrisüsteemi alasadus-koormusvähenduskaitset. See kaitse on mitmeastmeline ja paikneb hajusalt paljudes alajaamades. Kaitseobjektiks on elektrisüsteem või tema eraldunud osa. Täituriteks on kaitse poolt sageduse langemisel väljalülitatavate koormuste võimsuslülitid. Kaitse tunnussuurus on sagedus, mille kohta saab kaitse teavet tema tagasisideelemendina toimivast pingetrafo st vm pingeaandurist. Ohjesuurus $x(t)$ kujutab endast kaitse sagedus- ja ajasätteid. Ka koormusvähenduskaitsega seonduva koormustaastusautomaadi toimimine on kirjeldatav sellesama plokkskeemi alusel. Kaitse seadmes sisaldub ka eelnimetatud lülitusautomaat. Ohjesuurus on koormustaastuse ajaline programm ja sageduskontrolli sätteid. Automaat rakendub sageduse taastumisel, mille kohta ta saab teavet tagasisideelemendiks oleva pingeaanduri kaudu, ja annab eelnevalt koormusvähenduskaitsest välja lülitatud võimsuslülititele sisselülituskäskud $z(t)$.

Analoogiliselt on kirjeldatav joonise 3.2 plokkskeemi alusel ka taaslülitusautomaadiga ja rikkesalvestiga varustatud keskpingeliini kolmeastmelise voolukaitse toimimine ning mistahes muu kaitse funktsioneerimine.

Signaaltoimega kaitse puudub joonise 3.2 skeemil objekti mõjutamine. Puuduvad täitur ja juhttoimed $z(t)$ ning $Z(t)$.

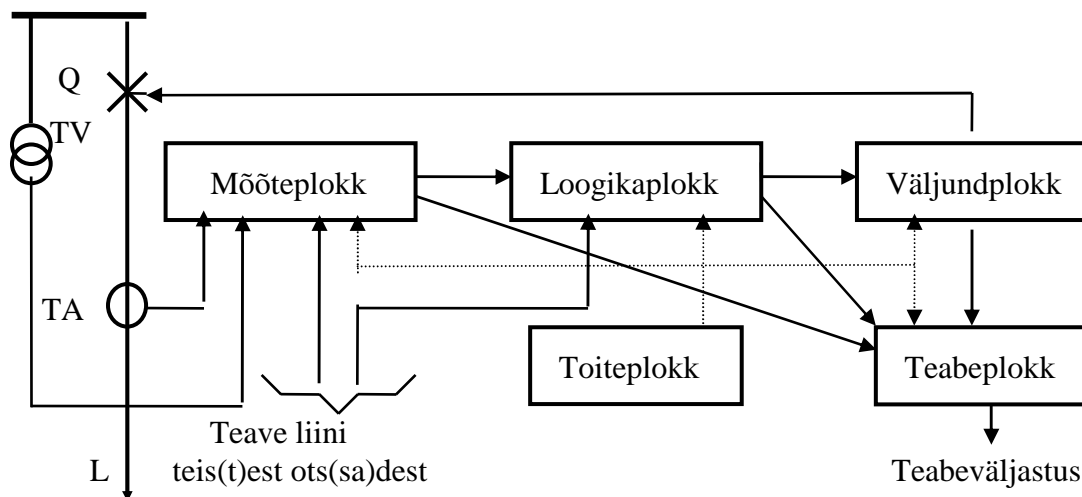
Kaitseobjekti (süsteemi elemendi) ühe otsa releekaitse (s.o elemendikaitse) plokkskeem on kujutatud joonisel 3.3. Kaitseobjektiks on ülekandeliin. Sellel on haruühenduste korral rohkem kui kaks otsa.

Mõõte- ja loogikaplokk on kaitse põhiplokkid. Kui ei käsitleta just kaitse plokkskeemi, nimetatakse neid ka kaitse mõõte- ja loogikaosaks. Nendes töötatakse välja kaitse toimimisalgoritmi alusel kaitse juhttoime, mis edastatakse kaitse väljundplokki kaudu täituri(te)le – võimsuslülitite(te)le ja ühtlasi teabeplokkile.

Mõõteplokk saab teavet kaitseobjekti seisundi kohta voolu- ja pingetrafo st, mis on kaitse süsteemi kui juhtimissüsteemi seisukohast tagasisideelementideks. Mõõteplokk kujundab voolust ja/või pingest tunnussuuruse (nt vool, pinge, sagedus, võimsus, takistus, kaitseobjekti otste voolude erinevus vms), kasutades selleks vajaduse korral teavet elektrilise suurus(t)e kohta ka objekti teis(t)est otsa(de)st (diferentsiaal- ja võrdluskaitse). Saadud tunnussuurust võrdleb mõõteplokk kaitse tunnussuurussättega. Sätte ületamisel ettenähtud suunas mõõteplokk rakendub ja väljastab kindlaks määratud väljundtoime.

Mõõteplokki väljundtoime suunatakse loogikaplokki (võib ka puududa). Seal kontrollitakse kaitse rakendumiseks vajalike loogikatingimuste täitmist, kasutades vajadusel sidekanali kaudu kaitstava liini teis(t)est otsa(de)st saadavat loogikateavet (nt liini üleulatusega distantskaitse). Loogikaplokk lisab ka vajaliku viite. Kui

loogikatingimused on täidetud ja kaitse mõõteplokk ei ole ettenähtud viite kestel ennistunud, kaitse rakendub, väljastades väljundplokki kaudu juhttoime täituri(te)le. Sellega kaitse juhttoime väljatöötamine kaitse rakendumise korral lõpebki.



Joon. 3.3 Kaitseobjekti ühe otsa elemendikaitse plokkiskeem. TV – pingetrafo, TA – voolutrafo, Q – võimsuslüliti L – liin (kaitseobjekt). Kaitse funktsionaalplokkide abitoide toiteplokkist on kujutatud punktiirina.

Kirjeldatud teabetöötlus toimub kaitse mõõteplokkis kogu selle töösoleku aja. Käivitusseadisega kaitstes (nt distantskaitse, faasivõrdlus- e senise nimetusega faasidiferentsiaalkaitse) toimub pidev teabetöötlus käivitusseadis, tuvastamaks elektrisüsteemis lühist. Lühise tuvastamisel alustavad teabetöötlust seni ooteseisus olnud kaitse enda mõõte- ja viimase rakendumisel ka loogikaplokk.

Väljundplokk võimendab juhttoimet ja paljundab toimeahelaid. Selleks kasutatakse elektromehaanilise kaitse korral väljundvahereleid. Elektro-mehaanilise kaitseriele kontaktide küllaldase võimsuse ja arvu korral täidab see ühtlasi väljundplokki ülesande. MPK-1 on väljundplokk alati olemas, tema väljundelemendiks on elektromehaanilised hermeetilised mini- (maht mõni cm^3) releed.

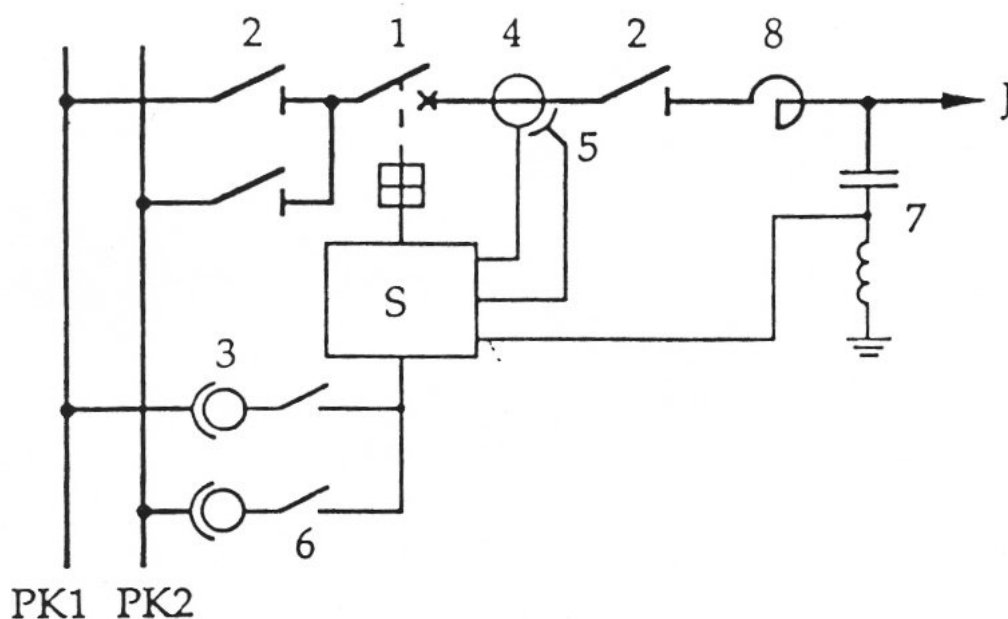
Töös olev kaitse seade töötab välja ja väljastab kogu aeg vajalikku juhttoimet – see ongi kaitse toimimine. Kaitse rakendustingimuste mittetäitmise korral (nt siselühise puudumisel) on kaitse juhttoimeks väljalülituskäsu puudumine e nulltoime. Kaitse rakendustingimuste täitmise korral (nt siselühise olemasolul) on selleks lülituskäsk võimsuslüliti(te)le. Kaitse ja tema üksikute plokkide toimimise kohta edastatakse vajalik teave teabeplokkile.

Joonisel 3.3 kujutatud toiteplokk on olemas MP- ja pooljuhtanalooγκaitsetel, puudub aga elektromehaanilisel. See saab vajaliku abitoite otse abitoiteallikast – akupatareist, puhvertoiteallikast (upsist) vms.

Lääne kirjanduses kasutatakse laialdaselt releekaitseliikide tärgtähisteid. Lisas 1 on esitatud ülevaade enamkasutatavatest tärgtähistest.

Joonisel 3.4 on esitatud kõrgsageduskanalit kasutava liini ühe otsa kaitse primaarahelatega ühendamise skeem. Joonisel kujutatud graafilised tähised on näiteks Lääne kirjanduses kasutatavatest küllaltki mitmekesisest tähistest. Sellel joonisel ei vasta standardile IEC 617 pingetrafo ja voolutrafo mahtuvusliku pingeanduri kujutised. Seejuures on need küllalt otstarbekad. Ka käesolevas töös ei järgita kõiki standardi IEC 617 nõudeid.

Joon. 3.4. Liini J kaitse S ühendamine primaarahelatega. 1 – võimsuslülit, 2 – lahklülit, 3 – pingetrafo, 4 – voolutrafo, 5 – voolutrafo mahtuvuslik pingeandur, 6 – lattide lahklülitite abikontaktid, 7 – sidekondensaator koos ühendusfiltriga, 8 – kõrgsageduspiirik ehk kõrgsagedustõkkefilter, PK1 ja PK2 – latisüsteemid.



3.4 Releekaitse klassifikatsioon

Kaitse toimimist iseloomustatakse tema viie põhiomaduse järgi. Nende omaduste järgi kaitset ka liigitatakse:

1. tunnussuurus

2. rakendumise ajaline järgnevus
3. tunnussuuruse muutumise suund kaitse mõõteosa rakendumisel
4. toimimiskiirus
5. selektiivsuse tagamise viis.

Tunnussuurus. Tunnussuurus on füüsikaline suurus, millele kaitse mõõteosa reageerib. Tunnussuurus iseloomustab nii süsteemi- kui elemendikaitset, ja ka sisselülitusautomaati, kui tal on mõõteosa (nt pinge puudumise või sünkronismi kontroll). Tunnussuurusi on kümneid. Komplekssuuruse korral võib tunnussuuruseks olla moodul ja faas või moodul või faas või komplekssuuruse imaginaar- või reaalsosa. Siinuselise suuruse korral võib tunnussuuruseks olla selle sümmeetriline (päri-, vastu- või nulljärgnevus-) komponent või nende kombinatsioon või mingi harmoonik – tavaliselt nende efektiiv-, kuid vahel ka hetkväärtus. Tunnussuurused võib jagada nelja järgmisesse rühma:

- Elektrilised, nt vool, pinge, sagedus, kahe elektrilise suuruse vaheline faasinurk, takistus (reeglina impedants), võimsus. Tunnussuurusi võib ühel kaitisel olla mitu, nt vool ja pinge.
- Ühe või mitme elektrilise suuruse funktsioon, nt voolu ruudu integraal, elektrilise suuruse tuletis, pinge ja sageduse suhe.
- Elektriliste suuruste erinevus kaitseobjekti otstes või kaitseobjektiks olevas kahes rööpelemendis.
- Mitteelektrilised, nt valgus, temperatuur, gaasi maht, gaasi- ja vedelikuvoo kiirus ning rõhk.

Rakendumise ajaline järgnevus

Rakendumise ajalise järgnevuse järgi jagatakse kaitse põhi- ja reservkaitseks.

Põhikaitse on oodatavasti prioriteetne kaitse rikke eraldamisel või anormaaltalitluse lõpetamisel.

Elektrisüsteemi olulisemate elementide kaitseks kasutatakse Läänes sageli kahte põhikaitset (enamasti üks neist on täiuslikum). Nt on Paide-Sindi, Püssi-Balti ja Püssi-Kiisa 330 kV liinidel kaks viieastmelist distantskaitset. Need on nii faasidevaheliste lühiste kui maalühiskaitseks.

Reservkaitse on kaitse, mis peab rakenduma, kui süsteemi rike pole eraldatud või anormaaltalitus lõpetatud etteantud aja jooksul mingi teise kaitse tõrke või toimimisvõimetuse või vastava(te) võimsuslüliti(te) tõrke tagajärjel. Eristatakse järgmisi reservkaitse liike:

- *ahela lähireservkaitse* – reservkaitse, millele antakse vool ja/või pinge samadest mõõtetrafodest kui põhikaitselegi või teistest mõõtetrafodest, mis on lülitatud samasse primaarahelasse kui põhikaitse omadki
- *alajaama lähireservkaitse* – reservkaitse, millele antakse vool ja/või pinge mõõtetrafodest, mis paiknevad samas alajaamas, kus põhikaitse omadki, kuid pole lülitatud samasse primaarahelasse
- *kaugreservkaitse* on reservkaitse, mis paikneb alajaamas, mis on eemal vastava põhikaitse paiknemise alajaamast.

Tunnussuuruse muutumise suund kaitse mõõteosa rakendumisel

- Üle- või liigkaitse (ka maksimaalkaitse) – rakendub tunnussuuruse suurenemisel, nt liigvoolukaitse, diferentsiaal- ja võrdluskaitse, ülepinge-, ülesagedus-, sünkronismikaotus-, võimsuslüliti tõrke-, elektrikaare-, gaasi-, termo- ja rõhukaitse.
- Alakaitse (ka minimaalkaitse) – rakendub tunnussuuruse vähenemisel, nt distant-, alapinge- ja alasageduskaitse.

Märkus. Reeglina saab kaitset liigitada üle- ja alakaitseks. Erandiks on juhtum, mil kaitse mõõteosa rakenduseseisule vastab tunnussuuruse koordinaattasandil kinnine rakenduspiirkond, mis ei hõlma koordinaatide nullpunkti. See kehtib ka skalaarse (ühemõõtmelise) tunnussuuruse korral, mil rakendusvahemik arvteljel ei hõlma arvtelje nullpunkti. Sel juhtumil on kaitse nii üle- kui alakaitse.

Toimimiskiirus

Toimimiskiiruse järgi jagatakse kaitse kahte klassi, olenevalt viite puudumisest või olemasolust:

- *Hetkkaitse*
- *Viitkaitse*.

Selektiivsuse tagamise viis

Selektiivsus on kaitse omadus tuvastada elektrisüsteemi rikkis objekt (s.o *objektiselektiivsus*) või faas(id) (s.o *faasiselektiivsus*).

Absoluutselt selektiivne kaitse – kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus olenevad kaitseobjekti iga otsa elektriliste suuruste võrdlusest (pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse). Kaitsetsoon hõlmab kogu kaitseobjekti otstes paiknevate voolutrafode vahelise ala. Reeglina üheastmeline, harva (nt lattide ja trafo pikidiferentsiaalkaitse) kaheastmeline. On alati hetkkaitse. Ei saa olla välisobjektide reservkaitseks.

Suhteliselt selektiivne kaitse – kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus olenevad elektriliste suuruste mõõtmisest mõõtereleede abil kaitseobjekti ühes otsas (nt voolu- ja distantkaitse). See kaitse on tihti mitmeastmeline. Esimene aste on hetkkaitse, ülejäänud – viitkaitsed. Võib olla välisobjektide reservkaitseks.

3.5. Releekaitsele esitatavad põhinõuded

Tavaliselt esitatakse releekaitsele järgmised põhinõuded:

1 Hõlmavus

Releekaitse peab hõlmama kõiki elektriseadmeid, alates keskpingest.

2 Selektiivsus

Kaitse peab olema selektiivne ehk valiv st, et lühis tuleb välja lülitada võimalikult väikese arvu elektrisüsteemi elementide väljalülitamisega.

3 Tundlikus

Kaitse peab reageerima võimalikult väikesele tunnussuuruse muutumisele, aga igal juhul tuleb tagada kaitse selektiivsus. Lühisekaitse jaoks kasutatakse tundlikkustegurit - see on rakendumise varutegur tunnussuuruse kohta:

voolukaittsel

$$k_{\text{tund}} = I_{1,s}^{\min} / I_s$$

siin $I_{1,s}^{\min}$ - siselühisvoolu minimaalne väärtus ja I_s - sättevool.

Takistuskaitsel

$$k_{\text{tund}} = Z_s / Z_{1,s}^{\max}$$

siin Z_s on sätteväärtus ja $Z_{1,s}^{\max}$ siselühise maksimaalne takistus.

Põhikaitsel: $k_{\text{tund}} \geq 1,5 \dots 2,0$

Reservkaitsel $k_{\text{tund}} > 1,2$.

4 Töökiirus

Kaitse peab olema kiire, ülesanded:

- 1) süsteemi paralleeltöö stabiilsuse säilitamine. Faaside vaheliste lühiste lubatav kestus kuni 0,1 ... 0,2 sekundit ja 1-faasilise lühise kestus kuni 0,2 ... 0,6 sekundit.
- 2) Elektrisüsteemi elementide vigastuse ulatuse piiramine. See on tähtis automaatse taaslülitamise (ATL) edukuse suurendamiseks ja remondi kestuse, mahu ja maksumuse vähendamiseks
- 3) Tarbijate väiksem häiritus st pinge väheneb lühemaks ajaks.

Lühise kestus võrdub releekaitse rakendumisaja ja võimsuslülitivi väljalülitusaja summaga. Tänapäeval kiiremate kaitsete rakendumisaeg on alates 5 ms. Õhuliinide releekaitse rakendusaeg on piiratud liigpingelahendite toimekiirusega. Tänapäeval kasutatavate liigpingepiirikute toimimisaeg on alla 2,5 ms.

3.6. Kaitse töökindlus.

Kaitse õige toimimine tähendab kaitse väljalülitus- ja muu juhttoime väljastamist määratletud reageeringuna elektrisüsteemi rikkele või muule anormaalsusele ning juhttoime mitteväljastamist elektrisüsteemi normaaltalitluse korral. *Kaitse väärtoimimine* jaguneb *rakendustõrkeks* ja *liigrakendumiseks*.

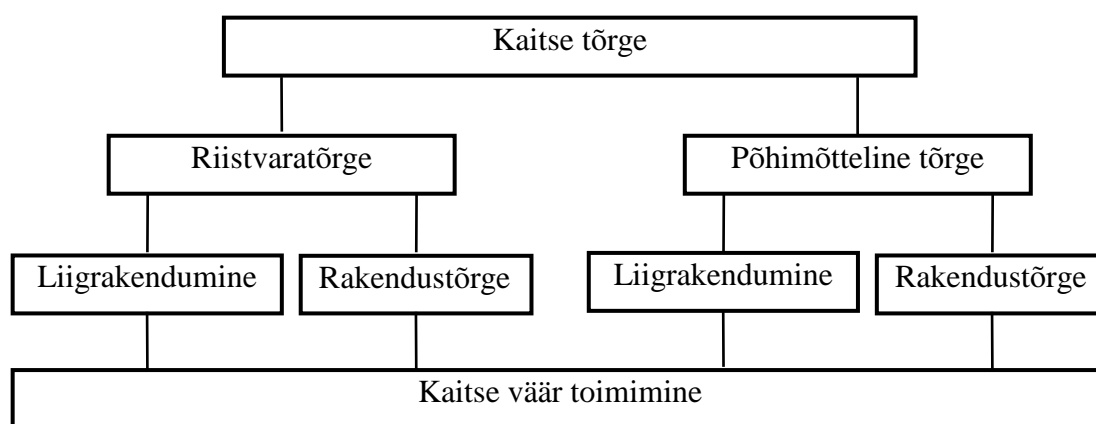
Kaitse liigrakendumine tähendab kaitse rakendumist kas elektrisüsteemi rikke või elektrisüsteemi muu anormaalsuse puudumisel või elektri süsteemi rikke või elektrisüsteemi muu anormaalsuse esinemisel, mille korral see kaitse ei tohi rakenduda. *Kaitse rakendustõrge* on kaitse mitterakendumine rakendusvajaduse korral. *Kaitse töökindlust* iseloomustab tema vajaliku toimimise tõenäosus määratletud tingimustel kindla ajavahemiku jooksul. Vajalik toimimine on

rakendumine rakendusvajaduse korral ja mitterakendumine rakendusvajaduse puudumisel.

Kaitse tõrked jagunevad *riistvaratõrgeteks* ja *põhimõttelisteks tõrgeteks* (joonis 3.5). Esimene tähendab kaitse väär toimimist kaitse elemendi tõrke tagajärjel, teine väär toimimist vea tõttu kaitse projekteerimisel, konstrueerimisel, sätestamisel või kasutamisel. Põhimõtteline tõrge on ka numberkaitse tarkvaratõrge. Seda tõrkeliiki ei saa tavaliselt tuvastada hooldetestimisel. Küll aga saab hooldetestimisel tavaliselt tuvastada riistvaratõrget

Näide: Lihtsaim kaitse otsustab siselühise olemasolu lühisevoolu suuruse järgi. Olgu õhuliin, lühis on ühes ja samas punktis, siis lühisevoolu suurus oleneb:

- 1) elektrisüsteemi talitlusest,
- 2) lühise liigist,
- 3) takistusest lühise kohas,
- 4) voolutrafode vigadest jääkeelmagneetumusest,
- 5) kaitse rakendusparameetri hajuvusest,
- 6) lühisvoolu arvutusmetoodikast, arvutusveast jne.



Joon. 3.5 Kaitse tõrked ja väär toimimine

4 ELEMENDIKAITSE PÕHILIIGID

4.1 Voolukaitse

- *Liigvoolukaitse* tunnussuurus on
 - faasivool – *faasidevaheliste lühiste kaitse* ja *liigkoormuskaitse*

- *summavool* (faasivoolude summa e 3kordne nulljärgnevusvool – *maalihiskaitse*)
- *vastujärgnevusvool* (vooluasümmeetriakaitse).

Tunnussuuruseks võib olla voolumoodul või -moodul ja -faas (suundvoolukaitse). Vajadusel täiendatakse voolukaitset pingeloaga (e nagu varem räägiti – pingeblokeerimise).

Voolukaitseid: kereühendus-, faasidevaheliste lühiste, maalihiskaitse, neutraalivoolu- ja neutraalinihkekaitse

Kohustuslik releekaitse - elu, tervise ja vara kaitse: maalihiskaitse ning liigvoolukaitse. Vara kaitse all mõeldakse tulekahjude ja loomade elektritraumade vältimist. Maalihise korral esineb isoleeritud neutraaliga võrkudes maahendusevool (kuni mõnikümme A) ja maandatud neutraaliga võrkudes (maa)lühisvool (kuni kümneid kA). Nt Soome elektriohutusseadmed kohustavad maalihised (olenemata võrgu neutraali maandamisviisist) automaatselt välja lülitama kuni 500 Ω maalihis-takistuseni. Isoleeritud neutraaliga võrgu maalihiskaitse käsitlemisel tuleb silmas pidada, et võrgu neutraali maandamine läbi suure impedantsi kaitse ja mõõtmiste tarbeks ei muuda tema maandamisviisi. Selline võrk on ikkagi isoleeritud neutraaliga.

4.2 Distantkaitse

Distantkaitse – tunnussuurus on takistus, enamasti impedants. Vahel kasutatakse ka reaktants- ja aktiivtakistuskaitset. Kasutatakse nii faasidevaheliste lühiste kui maalihiskaitseks. Distantkaitse on suhteliselt selektiivne ala-(minimaal)kaitse. Kasutatakse nii põhi kui reserv kaitseks. Distantkaitse võib olla nii hetk- või viitkaitse. Voolukaitsest erineb vaid ainult selle poolest, et ta on ala (minimaal)kaitse.

Distantkaitse on astmeline ja kasutatakse kuni 4 astet.

Distantkaitse tagab selektiivsuse mistahes konfiguratsiooniga võrgus ja kaitsetsoonid on stabiilsete lõpppiiridega ja samas on ta kõige keerulisem releekaitse. Distantkaitse kaitsetsoonid on märksa pikemad kui voolukaitse (kuni 85 % liini pikkusest). Sidekanali lisamisega saab distantkaitse muuta absoluutselt selektiivseks kaitseks - pikkidiferentsiaalkaitseks.

Distantkaitse põhimõte. Distantkaitse mõõteelemendiks on takistusrelee, mis reageerib liini Z, X või R takistusele. Liini faasitakistused relee paigalduskohast kuni lühisekohani on proportsionaalsed vastava liini osa pikkusega (kaugusega AK paigalduskohast), sest

$$U^{(3)} = I^{(3)} z_0 L$$

$$Z^{(3)} = U^{(3)} / I^{(3)} = I^{(3)} z_0 L / I^{(3)} = z_0 L,$$

siin Z - on liini impedants lühisekohani, z_0 - liini eritakistus ja L - lühisekoha kaugus AK paigalduskohast.

Järelikult sõltub takistusreele toimimine lühisekoha kaugusest AK paigalduskohast.

Selektiivsuse tagamiseks distantskaitse tehakse tavaliselt suunatud kaitsena ja mitme astmelisena. Samasuunaliste kaitseastmete selektiivsus tagatakse viidetega.

Distantskaitse rakendumise kujutamine $X - R$ tasapinnal. Distantskaitse rakendumise karakteristikuks on

$$Z_{\text{rak}} = f(\varphi).$$

Kuna näivtakistus Z on kompleksuurus siis on takistusreele rakendumistsooni on otstarbekas kujutada $X - R$ tasapinnal. Järelikult igat näivtakistust takistusreele klemmidel ($Z = U/I$) võib kujutada kompleksuurusena $Z = R + jX$. Joonisel on toodud distantskaitse rakendumiskarakteristikud.

Tabelis on toodud distantskaitse astmete viited ja kaitsetsoonid.

Aste	Viide, s	Kaitsetsoon
1	0	85% kaitstavast liinist
2	0,4	120% ja 50 - 85% järgmisest liinist
3	1	väljastatakse koormustakistusest

Maandatud neutraaliga võrkudes kasutatakse tavaliselt nii faasidevaheliste lühiste kaitseks kui maalühiskaitseks ühte ja sama distantskaitset.

4.3 Pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse

• Pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse – tunnussuurus on voolumoodulite või voolumoodulite ja -faaside (diferentsiaalkaitse) või voolu faasi või elektrilise suuruse suuna (võrdluskaitse) erinevus kaitseobjekti otstes. Võrdluskaitse kasutab sidekanalit, diferentsiaalkaitse ei kasuta. Eristatakse kahte pikidiferentsiaalkaitse liiki:

- suurimpedantsdiferentsiaalkaitse
- väikeimpedantsdiferentsiaalkaitse.

Siin peetakse silmas kaitses kasutatava diferentsiaalvoolureele impedantsi võrreldes kaitse küllastunud voolutrafo sekundaarahela impedantsiga. Suurimpedantsdiferentsiaalkaitset kasutatakse peamiselt põhivõrgus lattide kaitsena .
valikuaste ja valikuta aste maalühisdiferentsiaalkaitse

4.4 Põikdiferentsiaalkaitse

- Põik- (e rist)diferentsiaalkaitse – tunnussuurus on voolu kaitseobjekti rööpahelate vahel jagunemise erinevus.

4.5 Muid kaitseid

Käesolevas paragrahvis käsitleme väga lühidalt nii elemendi- kui süsteemikaitseid.

- Pingekaitse – tunnussuurus on faasidevaheline pinge (ala- ja ülepingekaitse, pingekaotuskaitse), *summapinge* (faasipingete summa e 3kordne nulljärgnevuspinge – signaaltoimega mitteselektiivne maalühiskaitse) või vastujärgnevuspinge (pingeasümmeetriakaitse).
- Liigvookaitse – tunnussuurus on pinge ja sageduse suhe või voolu 5. harmoonik.
- Sünkronismikaotuskaitse – tunnussuurus on aktiivõimsusvoogude järsk muutus, ülekande faasinurk või asünkroontalitluse algus.
- Sageduskaitse – tunnussuurus on sagedus (alasageduskaitse koormusvähenduskaitse ja ülesageduskaitse süsteemi jaotuskaitse).
- Võimsuslüliti tõrkekaitse – lüliti tõrke tunnuseks on lühise ülemäärane ajaline kestus.
- Elektriakaarekaitse – tunnussuurus on valgus.
- Gaasikaitse ehk Buchholzi kaitse (Läänes levinud nimetus) – tunnussuurus on gaasi maht (signaaltoime) ja õlivoo kiirus (väljalülitustoime).
- Termokaitse – tunnussuurus on kontrollitava objekti (nt mähise, õli) temperatuur või faasivoolu ruudu integraal aja järgi.
- Rõhukaitse – tunnussuurus on rõhk (nt hermeetilise trafo paagis).
- Liigtulekaitse – tunnussuurus on tuule kiirus.

Ülikõrgepingeliini *lühisparameetrialbe-suunavõrdluskaitse* on kaitse rakendusaeg on vahemikus 3–5 ms. Mainitud liinikaitsete arv maailmas on praegu arvata veidi alla 200.

Kulglainekaitse

Sidekanaliga kaitse

4.6. Kaitse tunnussuurussäte määramine

Kaitse tunnussuurussäte määratakse kõikidel kaitsetel ühtemoodi. Sätte määramisel lähtutakse selektiivsustingimustest:

1) Maksimaalkaitsetel:

$$\mathbf{X}_s > \mathbf{X}_v,$$

\mathbf{X}_v - tunnussuuruse väärtus, mille kaitse peab välistama (mille puhul kaitse ei tohi rakenduda)

\mathbf{X}_s - tunnussuuruse säte.

2) Minimaalkaitse:

$$\mathbf{X}_s < \mathbf{X}_v ,$$

Sõltuvused (1) ja (2) on kaitse mitterakendumise tingimused

Tunnussuurussätte üldvalem on:

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{k}_v \mathbf{X}_{arv}$$

Maksimaalkaitse $\mathbf{X}_{arv} = \mathbf{X}_v^{\max}$, et tingimus (1) oleks täidetud ja maksimaalkaitsete puhul on välistustegur $\mathbf{k}_v > 1$ (tavaliselt $k_v = 1,05 \dots 2,0$).

Minimaalkaitse $\mathbf{X}_{arv} = \mathbf{X}_v^{\min}$, et tingimus (2) oleks täidetud ja välistustegur $\mathbf{k}_v < 1$ (näiteks distantskaitse $k_v = 0,85$).

Juhul, kui on tegemist aeglustatud kaitsega siis tuleb arvestada kaitse ennistumisvõimalust. Ennistumisvõimalust arvestatakse ennistusteguriga \mathbf{k}_e .

$$\mathbf{X}_s = (\mathbf{k}_v / \mathbf{k}_e) \mathbf{X}_{arv}$$

Näiteks vene voolureedel: $k_e \geq 0,8$.

Seni vaadeldud oli primaarvoolust lähtuvalt võetud sätte väärtused. Järgnevalt vaatleme üleminekut sekundaarvoolule.

Voolukaitse: sekundaarvoolu sätevärtus I_s^{sek} võrdub,

$$I_s^{\text{sek}} = (I_s^{\text{prim}} / n_{TA}) k_{sk}$$

Voolutrafodel skeemitegur $k_{sk} = 1, \sqrt{3}, 3$

Pingekaitse:

$$U_s^{\text{sek}} = U_s^{\text{prim}} / n_{TV}$$

siin n_{TV} on pingeaduri ülekangetegur.

Takistuskaitse:

$$\mathbf{Z}_s^{\text{sek}} = (\mathbf{U}_s^{\text{prim}} / \mathbf{n}_{\text{TV}} / \mathbf{I}_s^{\text{prim}} / \mathbf{n}_{\text{TA}}) = (\mathbf{U}_s^{\text{prim}} \mathbf{n}_{\text{TA}}) / (\mathbf{I}_s^{\text{prim}} \mathbf{n}_{\text{TV}}) = \mathbf{Z}_s^{\text{prim}} (\mathbf{n}_{\text{TA}} / \mathbf{n}_{\text{TV}})$$

4.7 Kaitse ajasätte määramine

Ajasäte on ainult aeglustatud kaitsetel. Vaatleme järgnevalt voolukaitse kolmanda astme süsteemi:

Joonis. Voolukaitse kolmanda astme toimimise skeem

Ajasäte peab olema suurem kui välislühise kestus:

$$t > t_{\text{lühis}}^{\text{välis}}$$

Näide: Vaata joonist . Ükskõik, millises n liinis on lühis, rakendub nii selle liini kaitse voolurelee AK_{j-1} ning ka toiteliinil AK_j . Antud juhul tagab selektiivsuse vaid kaitse rakendusae.

Valime välja pikima rakendusajaga kaitserellee (parempoolsete kaitsete hulgast):

$$t_{j-1} = \text{maks} (t_1 \dots t_n)$$

Kirjutame valemi (1) ümber

$$t_j = t_{\text{lühis}}^{j-1} + t_{\text{varu}} \quad (3)$$

$$t_{\text{lühis}}^{j-1} = t_{j-1} + t_{j-1}^{\text{Q}} \quad (4)$$

Siin t_{j-1} on (j-1) liini kaitse rakendusae ja t_{j-1}^{Q} (j-1) liini võimsuslüliti väljalülitamise aeg.

$$t_{\text{varu}} = t_{j-1}^+ + t_j^- \quad (5)$$

Siin t_j^- on j-da liini väljalülitamisaja negatiivne viga, mis tähendab, et

$$t_j^- = t_j^e + t_{\text{varu}}$$

Kus t_j^e - on j-nda kaitse ennistusaeg ja t_{j-1}^+ arvutuslik positiivne viga lühise korral sellel liinil.

Nüüd asendame valemid (4) ja (5) valemisse (3) ja saame:

$$t_j = t_{j-1} + t_{j-1}^{\text{Q}} + t_{j-1}^+ + t_j^- + t_j^e + t_{\text{varu}} \quad (6)$$

Viimase viie liikme summa on siin välistusaeg Δt_j

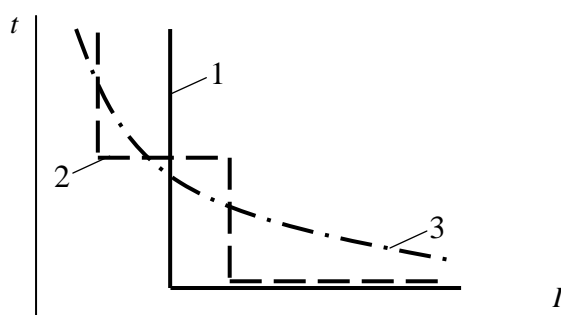
$$t_j = t_{j-1} + \Delta t_j \quad (7)$$

Välistusae - välistab kaitse rakendumise välislühisel. Kaitse ajadiagramm - kaitse rakedusaja sõltuvus lühisekohast. Antud diagramm on sõltumatu ajaga voolukaitsele. Kaitse vastav rakendustsoon algab voolutrafo (vooluanduri) parempoolsest klemmist.

Aeglustatud kaitse jagatakse:

- 1) Sõltumatu ajaga kaitse;
- 2) Sõltuva ajaga kaitse.

Antud jagamisel peetakse silmas kaitse rakendusaja võimalikku sõltuvust tunnussuuruse väärtusest (vool või takistus). Joonisel 4.1 on toodud vastavad aeg-vool karakteristikud.



Joon. 4.1 Kaitse karakteristikud. 1 - viiteta kaitse karakteristik,

2 – sõltumatu viitega viitkaitse, 3 - sõltuva viitega kaitse karakteristik (tänapäeval kuni 6 erinevat karakteristikut).

Kaitse välistusaeg kujuneb järgmine (NSVL-s toodetud kaitse kohta)

Δt_j liidetav	Aeg (s)	Aeg (s)
	Sõltumatu ajaga kaitse	Sõltuva ajaga kaitse
t_{j-1}^Q	0,04 ... 0,35	0,04 ... 0,35
$t_{j-1}^+ + t_j^-$	0,03 ... 0,25	0,1 ... 0,4
t_{he}	0	0,2
t_{varu}	0,1	0,2
Δt_j	0,17 ... 0,7	0,54 ... 1,15

Läänes toodetud aparatuuri jaoks on kaitse välistusaeg järgmine:

Kaitse põlvkond	Δt_j
Elektromehaanilised kaitsed	0,5
Staatilised kaitsed	0,3
Mikroprotsessorkaitse	0,15

Ajasätte arvutus on deterministlik. Sõltumatu (viitega) ajaga kaitsete ajaviga jaotub normaaljaotuse järgi. Sätte arvutus tehakse halvimalle juhtumile. Oleks põhjendatud ja ei vähenda ka kaitse toimimise selektiivsust, kui algebralise liitmise asemel liita ajad geomeetriliselt, mis arvestab vigade juhuslikku iseloomu:

$$t_{j-1}^+ + t_j^- \rightarrow$$

5 MÕÕTEANDURID

5.1 Põhimõisteid

Mõõteandurid on primaarvoolu ja -pinge vahendajad mõõte-, releekaitse- jm juhtimisseadmete tarvis. Andurite ülesanne on:

- vähendada voolu ja pinget väärtust kasutamiseks sobiva standarditud väärtuseni
- eraldada (isoleerida) primaarahel sekundaarahelast
- vältida mõõteriistade liigkoormus
- voolu ja pinget vajavate seire- ja juhtimisseadmete primaarseadmetest eemale paigutuse võimaldamine.

Kõige laialdaselt kasutatavad voolu- ja pingeadurid on mõõtetrafod.

Voolutrafode nimisekundaarvoolu IEC standardi väärtused on 1 (2) ja 5 A. Pingetrafode nimisekundaarpinge standarditud väärtused on 100 (200) V primaarmähise lülitamisel faaside või võrgu neutraali ja maa vahele. Primaarmähise lülitamisel faasi ning maa vahele – $100/\sqrt{3}$ ($200/\sqrt{3}$) V ning avakolmnurksekundaarmähise tarvis – $100/3$ ($200/3$) V. Sulgudes olevaid väärtusi ei soovitata.

Mõõtetrafode mähiste IEC standardi kohased klemmitähised:

- voolutrafo primaarmähis – P1 ja P2 ning sekundaarmähis – S1 ja S2, mitme sekundaarmähise korral – 1S1, 1S2; 2S1, 2S2 jne
- ühefaasilise pingetrafo primaarmähise mõlema klemmi täispingeisolatsiooni korral: primaarmähis – A ja B ning sekundaarmähis – a ja b ning maandatava primaarklemmi korral – vastavalt A ja N ning a ja n ning avakolmnurksekundaarmähise klemmid – da ja dn.

Nii mõõte- kui kõigi muude trafode klemmitähistus on niisugune, et voolu suund trafo mähistes ei muutu – klemmi P1 (A) sisenenud vool väljub klemmist S1 (a) ja vastavalt vool klemmi P2 (B või N) – klemmist S2 (b või n). Vool just kui siirduks primaarahelast otse sekundaarahelasse, nagu trafo mähiseid polekski. Loomulikult

muutub seejuures voolu moodul vastavalt trafo ülekandesuhtele ja vooluveale ning voolu faas faasivea võrra. Samuti muutub sekundaarvoolu faas välisahelates olenevalt trafo(de) kolme faasi mähiste lülitusgrupist.

Voolutrafol on üks primaarmähis ja reeglina mitu (kuni 4) eri südamikel paiknevat sekundaarmähist. Pingetrafol on üks primaarmähis ja 1 või 2 (neist 1 avakolmnurkmähis) sekundaarmähist. Kolmefaasilisi pingetrafosid reeglina enam ei valmistata.

Voolutrafo talitus on lähedane trafo lühitalitlusele ja pingetrafo talitus – trafo tühijooksutalitlusele.

Seetõttu on voolutrafo ohtlik rike tema siirdumine tühijooksutalitlusse sekundaarahela katkemise korral. See on eluohtlik inimesele ja ahelate isolatsioonile voolutrafo sekundaarmähises indutseeritava suure (tippväärtusega kuni kümnekond kilovolti) elektromotoorjõu tõttu. Lisaks sellele kuumeneb voolutrafo südamik ligi sajakordsest (võrreldes normaaltalitlusega) tühijooksuvoolust tingitud suurte rauaskadude tõttu.

Pingetrafo ohtlik rike on tema siirdumine lühitalitlusse sekundaarahela lühise korral. Siis kuumenevad pingetrafo mähised. Ohtlikuks võib osutuda ka lubamatu primaarpinge tõus, mis põhjustab südamiku kuumenemise suurenenud tühijooksuvoolu tõttu.

Ferromagnetilise südamikuga mõõteandurite kõrval on kasvaval määral kasutusele tulemas ilma magnetsüdamikuta andurid, nagu õhksüdamikuga vooluandurid (Rogowski vöö), pingejagurid-pingeandurid ning valgusefektidel (polarisatsioonitasandi pöördumine magnet- või elektrivälja toimel) põhinevad voolu- ja -pingeandurid (Faraday ning Pockels'i efektid). Mõõtetrafodeks nimetatakse ainult ferromagnetilise südamikuga mõõteandureid, kuigi ka Rogowski vöö on tegelikult õhksüdamikuga voolutrafo.

5.2 Mõõtevoolutrafod

Mõõtevoolutrafode kõige olulisemaks näitajaks on täpsusklass. IEC standardi täpsusklassid ja neile vastavad lubatavad vooluvead ning nurgavead on esitatud tabelis 7.1.

Tabel 5.1 Mõõtevoolutrafode lubatavad voolu- ja nurgavead

Täp- sus- klass	Vooluviga % voolul I_p/I_{pn}						Nurgaviga ' voolul I_p/I_{pn}				
	0,01	0,05	0,20	0,50	1,00	1,20	0,01	0,05	0,20	1,00	1,20
0,1		0,4	0,2		0,1	0,1		15	8	5	5
0,2		0,75	0,35		0,2	0,2		30	15	10	10
0,2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5		1,5	0,75		0,5	0,5		90	45	30	30
0,5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30	30	30
1,0		3,0	1,5		1,0	1,0		180	90	60	60
3,0				3,0		3,0					
5,0				5,0		5,0					

Tabelis puuduvad vigade väärtused ei ole normitud. I_{pn} – primaarnimivool.

Voolutrafo vooluviga

$$f_i = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

kus K_n on nimiülekanadesuhe, I_p primaarvoolu ja I_s sekundaarvoolu väärtus.

Voolutrafo vooluviga

$$\delta_i = \arg \underline{I}_s - \arg \underline{I}_p \quad (5.2)$$

Voolu väärtustel I_{pn} ja $1,2I_{pn}$ langeb täpsusklass kokku lubatava vooluveega. Väiksema voolu korral väheneb voolutrafo täpsus oluliselt. Seda tuleb arvestada voolutrafo primaarnimivoolu valikul.

Voolutrafo täpsus oleneb ka voolutrafo koormusest S_k (väljendatakse voltamprites). Voolutrafode *nimikoormuse* S_{kn} IEC standardväärtused on 2,5, 5, 10, 15 ja 30 VA (võimsustegur 0,8 ind). Kasutatakse ka väärtusi 45 ja 60 VA. Tavaliselt on vead lubatavates piirides koormusel $(0,25-1)S_{kn}$. Täpsus on suurim koormusel umbes $0,75S_{kn}$. Samal voolutrafol võib olla erinevail nimikoormuseil erinevaid täpsusklasse, nt 15 VA, *class 0,5* – 30 VA, *class 1*, kus 15 ja 30 VA on voolutrafo nimikoormus.

Eriklassi (tähis S) voolutrafol on suurendatud täpsus väikese voolu korral, nt 20 VA, *class 0,5S*. Seda kasutatakse Saksamaal üsna laialdaselt mõõtmisteks. See võib osutada otstarbekaks ka isoleeritud neutraaliga võrgu maalühiskaitse tarvis, kui samas kaitseesadmes ühiste vooluahelatega faasidevaheliste lühiste liigvoolukaitsele on vastuvõetav mõõtevooltrafo südamiküllastumine väikese nimiprimaarvoolu kordsuse (tavaliselt 5–10) korral või kui faasidevaheliste lühiste kaitse tarvis on võimalik kasutada voolutrafo teist mähist.

Lisaks tabelis näidatud täpsusnõuete ülapiirile $1,2I_{pn}$ on olemas ülapiirid $1,5I_{pn}$ ja $2,0I_{pn}$. Need on *laiendatud mõõtepiirkonnaga voolutrafod*. Nende tähistus on 15 VA, *class 0,2 ext. 150%* või *200%*.

Elektrienergia müügil kasutatavate voolutrafode täpsusklass ei tohi olla halvem kui 0,5. Mitmes riigis on kehtestatud selle üldnõudega kooskõlas olevad omad elektriinvesteeringute täpsusnõuded. Soome nõuded on esitatud tabelis 5.2.

Mõõtevooltrafo peab kaitsma mõõteseadmeid lühisvoolu dünaamilise ja termilise toime eest südamiküllastumisega. Seda omadust iseloomustab mõõtevooltrafo *mõõteriista turvategur* S_o voolutrafo primaarnimi

Tabel 5.2 Soome arvestite ja mõõtetrafode täpsusklassid

Aastas mõõdetav energiakogus GWh	Arvesti täpsusklass	Mõõtetrafode Täpsusklass
< 1	2,0	0,5
1–10	1,0	0,2
> 10	0,5	0,2

Märkus. Oluliselt suurema elektrienergiakoguse mõõtmiseks kasutatakse klassi 0,2 arvestit.

voolu kordsus (ei ole standarditud, tavaliselt 5–10), mille juures *voolutrafo koguviga* $\varepsilon_i \geq 10\%$, nt 10 VA, class 0,5 FS5, kus viimane arv ongi mõõteriista turvateguri nimiväärtus (s.o väärtus nimikoormusel 10 VA).

5.3 Kaitsevoolutrafo

*Kaitsevoolutrafo*de tarvis on esitatud tabelis 5.3 standarditud täpsusklassid, mis kehtivad perioodilise voolu korral. Lubatavad voolu- ja nurgavead on normitud primaarnimivoolul, lubatav koguviga – voolu korral, mille väärtus võrdub täpsuspiirikordsuse ja primaarnimivoolu korrutisega.

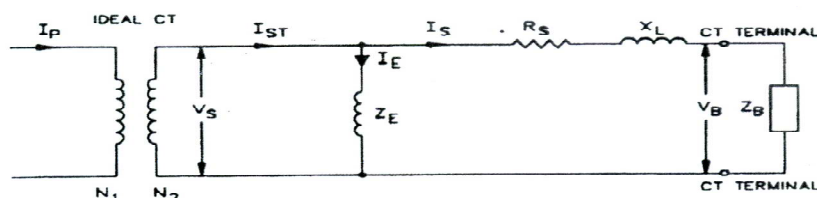
Tabel 5.3 Kaitsevoolutrafo lubatavad voolu- ja nurgavead

Täpsusklass	Vooluviga %	Nurgaviga ' ,	Koguviga %
5P	1	60	5
10P	3	*	10

* Lineariseeritud voolutrafol IEC standardi väliselt 150'. Terviksüdamikuga voolutrafo ostjad nõuavad sageli 180'.

Kaitsevoolutrafo täpsuspiirikordsus on voolutrafo primaarnimivoolu kordsus, mille korral voolutrafo koguviga $\varepsilon_i \leq 5\%$ (voolutrafo südamiku ja sekundaarmähise tähis 5P, (P - protection)) või $\varepsilon_i \leq 10\%$, (10P). Kaitsevoolutrafo tähistuse näide: 25 VA, class 5P30, kus viimane arv on nimitäpsuspiirikordsuse (s.o voolutrafo nimikoormuse korral) väärtus.

Kaitsevoolutrafo täpsusseoseid selgitab joonisel 5.1 esitatud voolutrafo aseskeem.



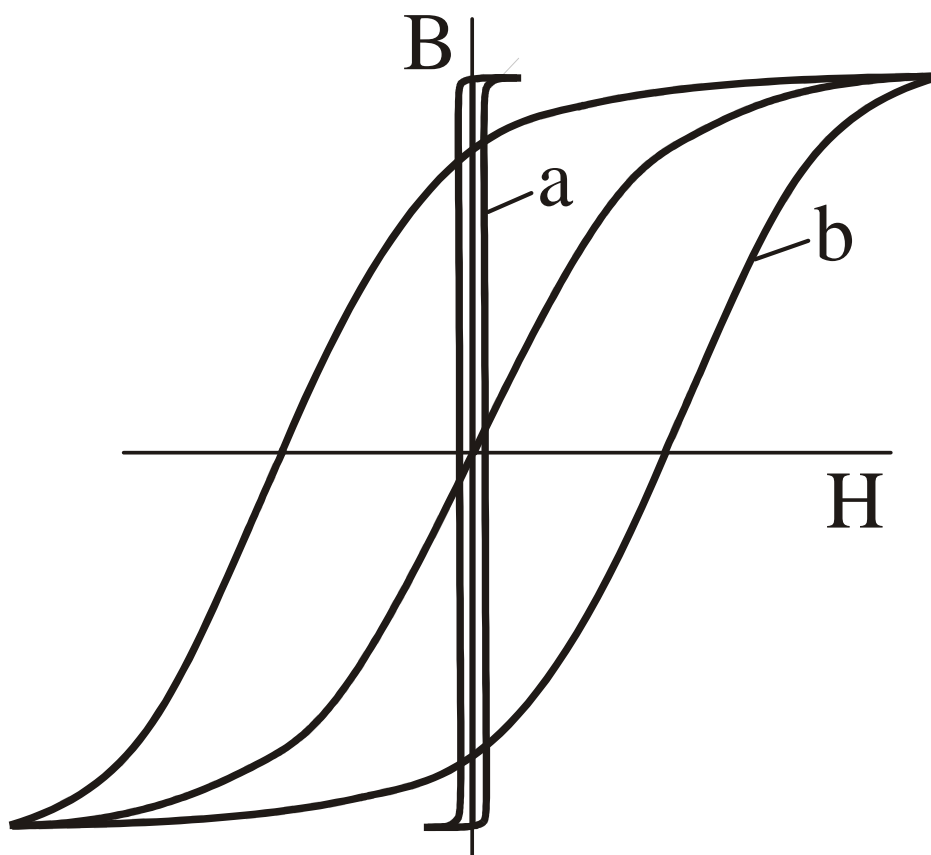
Joon.5.1 Voolutrafo aseskeem

Tühijooksuvool I_0 põhjustab sekundaarvoolu I_s vea, kuna osa sekundaarpoolele taandatud primaarvoolust I'_p kulgeb magnetimisvooluna $I'_{0\mu}$ läbi

magneetimisinduktantsi X'_μ ja rauaskaovooluna I'_{0r} läbi rauaskaoresistantsi R'_r .
 Voolutrafo viga suurendavad:

- koormusimpedantsi Z_k suurenemine
- primaarvoolu I'_p suurenemine voolutrafo südamiku küllastumiseni. Mõlemal juhtumil on vea suurenemise põhjuseks tühijooksuvoolu $I'_0 = I'_{0\mu} + I'_{0r}$ suurenemine.

Küllastumise oluline suurenemine algab *voolutrafo käänu(punkti)pingest* suurema pinge korral (joon. 5.2). Käänupinge on sekundaarmähise klemmidele rakendatud nimisagedusega siinuselise pinge efektiivväärtus, mille



Joon. 5.2 Voolutrafo $B=f(H)$ tunnusjoon.

suurendamine 10% võrra põhjustab 50%lise magneetimisvoolu suurenemise eeldusel, et teised mähised on avatud. Käänupinge on ligikaudu võrdne 10%lise täpsuspiirikordsuse ja voolutrafo sekundaarnimipinge korrutisega. Viimane suurus on võrdne voolutrafo nimikoormuse ja sekundaarnimivoolu jagatisega.

Voolutrafo koguviga ε_i (suhtarvuna) primaarvoolu I_p kõigi väärtuste korral määratakse järgmise valemiga

$$\varepsilon_i = \frac{1}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt} \quad (5.3)$$

kus T on perioodi kestus (20 ms), K_n voolutrafo nimiülekanne, i_s ja i_p sekundaar- ja primaarvoolu hetkväärtus.

Valem (5.3) kehtib ka küllastunud südamikuga voolutrafo korral, mil voolus on palju kõrgemaid harmoonikuid. Põhisagedusel võib koguvea ε_i (suhtarvuna) ligikaudu määrata seosega

$$\varepsilon_i \approx \sqrt{f_i^2 + \delta_i^2} \quad (5.4)$$

kus f_i on vooluviga suhtarvuna ja δ_i nurgaviga radiaanides.

Koguvea saamiseks protsentides korrutatakse valemite (5.3) ja (5.4) tulemid sajaga.

Kaitsevoolutrafo täpsusnäitajate parandamine – nimikoormuse ja täpsuspiirikordsuse suurendamine ning lubatava vea vähendamine on võimalik magneetimisvoolu vähendamisega. Selleks tuleb suurendada voolutrafo südamiku ristlõikepinda. See aga teeb voolutrafo kallimaks. Võrdluseks võib tuua vastupidise näite selle kohta, kuidas GEC Alsthomi andmetel voolutrafo nimikoormuse vähendamine 10 korda – 30-lt 3-le VA-le (on otstarbekas MPseadmete kasutamise korral, kuna nende voolutarbimine on palju väiksem analoog- ja eriti elektromehaaniliste seadmete omast) koos samaaegse ülekandesuhte muutmisega 1200/5 A-lt 800/1 A-le võimaldas vähendada voolutrafo südamiku ristlõikepinda 150-lt 19-le cm²le, seega 8 korda.

Täpsuspiirikordsus on määratletud puhta vahelduvvoolu korral (aperioodilise voolu puudumisel). Lühisvoolu aperioidiline komponent suurendab viga oluliselt, kuna magneetimisinduktiivtakistus on võrdeline sagedusega:

$$X_{0m} = \omega L_{0m} = 2\pi f \quad (5.5)$$

kus ω on nurksagedus, L_{0m} magneetimisinduktiivsus, f sagedus.

Aperioidilise s.o alalisvoolu mõjul voolutrafo südamik küllastub ja koguviga on liiga suur. Täpsuse tagamiseks tuleb valida oluliselt suurem täpsuspiirikordsus, kui seda tingiks ainult perioodiline lühisvool. Voolutrafo täpsuspiirikordsuse vajaliku väärtuse saamiseks korrutatakse perioodilise lühisvoolu kordsus alalisvoolu mõju arvestava üledimensioneerimisteguriga []

$$f_I = 1 + \omega \tau_p \left(\frac{\tau_p}{\tau_s} \right)^{\frac{\tau_p/\tau_s}{1-\tau_p/\tau_s}} \quad (5.6)$$

kus τ_p on primaarlühisahela ajakonstant, mis määrab aperioidilise lühisvoolu vähenemiskiiruse, τ_s sekundaarahela ajakonstant.

Tervikliku (õhupiluta) voolutrafo südamiku korral kehtib ligikaudne võrdus

$$f_I \approx 1 + \omega \tau_p \quad (5.7)$$

Ülikõrgepinge-elektriedastusel enamasti primaarajakonstant $\tau_p = 40\text{--}60$ ms. Selle suurimad väärtused (100–150 ms) esinevad ainult suure võimsusega elektrijaamade läheduses. Voolutrafo tervikliku südamikuga korral sekundaarajaonstant $\tau_s > 1$ s. Vaid õhupiluga südamikuga korral võib olla $\tau_s < 1$ s. Kui $\tau_p = 20\text{--}150$ ms ja $\tau_s = 0,2\text{--}10$ s, siis $f_I = 5\text{--}35$. []

Lisaks aperioidilisele lühisvoolule moonutab voolutrafo toimimist eelmise lühise väljalülitusest tingitud südamiku jääkvoog. See võib ulatuda 80%ni küllastusvoost. Sekundaarajakonstandi τ_s vähendamise korral alla 0,1 s südamiku õhupilude abil väheneb ka võimalik jääkvoog paljukordselt.

Õhupiludega südamikuga voolutrafo koguviga (eriti nurgaviga) on sedavõrd suurem, et tema täpsusklass saab olla ainult 10P. Ka on ta oluliselt kallim kui terviksüdamikuga voolutrafo.

Täpsuspiirikordsuste standarddrida on: 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500). Kordsuse 50–500 puhul on tegemist lineariseeritud (südamiku õhupilu(de) abil) voolutrafoodega. IEC standard ei näe ette neid kordsusi ega vastavaid voolutrafosid, küll aga nt Soome SFS standard. Ülikõrgepinge-elektriedastusel võib realselt vajalik täpsuspiirikordsus küündida 100ni [].

IEC standardi projektis on ette nähtud järgmised 3 kaitsevoolutrafoode klassi:

- TPX – südamik ilma õhupiluta
- TPY – südamik väikese õhupiluga, jääkmagneetumus alla 10% küllastusvoost
- TPZ – südamik suure või mitme õhupiluga, jääkmagneetumus tähtsusetu.

Voolutrafo kaitse südamiku ristlõikepinna suuruse määravad tema täpsuspiirikordsus, nimikoormus ja lineariseerimisaste. Kõigi nende suurendamine põhjustab alati lisakulusid. Neid meetmeid tuleb kasutada ainult tähtsate kaitseobjektide korral.

Voolutrafo südamiku küllastumisega seotud probleemid on sundinud otsima uusi lahendusi kahes suunas:

- 1) küllastusnähtuseta (lineaarsete) vooluandurite loomine.
- 2) kaitsete loomine, mis oleksid küllastuse suhtes vähem tundlikud

Esimest lahendust tutvustatakse alajaotises 5.7. Teise kohta esitatakse siinsamas mõni näide pikidiferentsiaalkaitse osas.

- Diferentsiaalvoolu väärtuse ülikiire tuvastamine – enne voolutrafo südamiku küllastumist. Küllastumiseks kulub 100kordse nimivoolu korral halvimal tingimusil (jääkvoog 80% küllastusvoost, lühisvoolus maksimaalne aperioidiline komponent) vähemalt 2–3 ms [M]. Nt Sindi alajaama 110 kV lattide kaitse REB103 (ABB) tuvastab diferentsiaalvoolu 1 ms jooksul pärast sise- või välislühise tekkimist. REB103 on analoogmõõteosa (suured integraallülitused) ja MP-loogikaosaga kaitse.
- Lattide kaitse voolude suunavõrdluse asemel nende tuletiste suunavõrdluse kasutamine. Küllastunud voolutrafo sekundaarvool muudab märki siinuselise voolu poolperioodi keskel, tema tuletis aga mitte.

- Küllastumise mõju vähendamine trafo sõltuva sättega (pidurdusega) diferentsiaalkaitsele selle rakendustunnusjoone valikuga.
- Suurimpedantsdiferentsiaalkaitse kasutamine. See on kaitse, mille diferentsiaalvooluahela impedants on suur, võrreldes küllastunud voolutrafo sekundaarahela impedantsiga. Sekundaarpoole alalisvoolu mõjust on kaitse välistatud kaitse 50 Hz pääsfiltri abil. Voolutrafode täpsusnõue piirdub niisuguse kaitse puhul sellega, et kõigi voolutrafode käänapinge peab olema vähemalt kaks korda suurem kui kaitse pingesäte. Meedet saab kasutada ka mõne teise nimetatud meetmega samaaegselt.

5.4 Voolutrafode ühendusskeeme

5.5 Kaitsetrafode ja nende ahelate arvutus

Tutvustame ainult Läänes kasutatavat kaitsevooluahelate arvutust. Arvutus peab tagama:

- 1) Voolutrafode täpsuse
- 2) Vooluahelate dünaamilise ja termilise lühisvoolutaluvuse
- 3) Voolutrafo sekundaarklemmidel lühise korral esineva pinge lubatavuse.

1. Voolutrafode täpsuse tagamine

Diferentsiaalkaitse ja liigvoolukaitse, mis reageerib $\int I^2 dt$ korral tuleb tagada voolutrafode piisav täpsus kogu võimalike voolude vahemikus.

Arvutuslik voolutrafo täpsuspiirikordsus arvutatakse järgmise valemiga:

$$K_{arv} = K_N ((\underline{S}_T + \underline{S}_{TN}) / (\underline{S}_T + \underline{S}_{TA}))$$

Siin,

K_N – voolutrafo täpsuspiirikordsuse nimiväärtus VT nimikoormusel ($K_N = 10, 15, 20, 30, \dots, 500$). Täpsuspiirikordsuse nimiväärtus on valitav.

S_T – voolutrafo sisekoormus, $S_T = Z_2 I_{2N}^2$, Z_2 – voolutrafo sekundaarmähise näivtakistus ja I_{2N} – voolutrafo sekundaarnimivool.

S_{TN} – voolutrafo nimikoormus ($S_{TN} = 10, 15, 30, 45, 60$ VA)

S_{TA} – voolutrafo arvutuslik koormus, $S_{TA} = S_{juhe} + S_{relee}$.

Arvutuslik voolutrafo täpsuspiirikordsuse lubatav piirväärtus on tavaliselt antud relee tootja poolt. Järelikult projekteerijal jääb otsustada, kas valida jämedama ristlõikega juhe või valida suurema täpsuspiirikordsusega voolutrafo.

5.6 Pingeandurid

Pingeandurite liigid on järgmised:

- pingetrafo
- mahtuvuslik pingejagur-pingetrafo
- resistants- e aktiivtakistuspingejagur.

Neist levinuim on pingetrafo. Ülikõrgepingel kasutatakse peamiselt mahtuvuslikku pingetrafo. See on mahtuvusliku pingejaguri ja pingetrafo kombinatsioon. Mahtuvuslikku pingejagurit valmistatakse ka kombineeritult voolutrafo ja sidekondensaatoriga.

Resistantspingejagurit kasutati varem ainult laborites. Väike vajalik väljundvõimsus, mis on omane MPseadmetele, on teinud otstarbekaks resistantspingejaguri kasutamise pingeadurina ka tööstuslikes elektriseadmes. ABB Transmit Oy (Vaasa) toodab pingele kuni 24 kV neid resistantspingeadureid nii õhk- kui elegaasisolatsiooniga elektriseadmete tarvis. Täpsusklass on 1/3P ja mass – 4 kg.

Pingetrafode nimivõimsuse S_{kn} (võimsustegur 0,8 ind). IEC standardväärtused on vahemikus 10–500 VA. Mõõtepingetrafo täpsus on suurim koormusel $(0,6–0,65)S_{kn}$.

Mõõtepingetrafo IEC standardi täpsusklassid ja lubatavad ping- ning nurgavead on esitatud tabelis 7.4.

Tabel 5.4 Mõõtepingetrafo lubatavad ping- ja nurgavead

	Pingeviga %	Nurgaviga ' °
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	

Lubatavad vead kehtivad primaarpingevahemikus $(0,8-1,2)U_n$ koormusel $(0,25-1)S_{kn}$.

Elektrienergia arvestamiseks kasutatavate pingetrafode täpsusnõuded on esitatud tabelis 5.2.

Releekaitstes kasutatavate pingetrafode täpsusklassid on 3P ja 6P. Nende täpsusnõuded on esitatud tabelis 5.5.

Tabel 5.5 Kaitsepingetrafode lubatavad pinge- ja nurgavead

Täpsusklass	Pingeviga %	Nurgaviga ' ,
3P	3	120
6P	6	240

Lubatavad vead kehtivad primaarpingevahemikus $(0,05-k_n)U_n$ koormusel $(0,25-1)S_{kn}$. Pingel $0,02U_n$ võib olla kahekordne viga. Pingetrafo nimipingetegur $k_n = 1,2, 1,5, 1,9$. Väärtus 1,2 kehtib kõigi pingetrafode kohta. Väärtused 1,5 ja 1,9 olenevad terve faasi pinge suurenemise määrast maalühise korral. Ka pinge suurenemise kestus on pingetrafo südamikule ülekuumenemise vältimiseks normitud.

Mahtvuslikus pingetrafos antakse kondensaatorite abil jagatud pinge (umbkaudu 10 kV) sobitustrafode, mis on induktiivsuse L abil häälestatud resonantsi nimisagedusel. Joonisel 5.3 esitatakse mahtvusliku pingetrafo lülituskeemi kaks varianti: kombineeritult sidekondensaatoriga (a) ja ilma selleta (b). Viimane lülituskeem kehtib ka mahtvusliku pingetrafo kombineerimisel voolutrafoga.

Joon. 5.3 Mahtvuslik pingetrafo: a) kombineeritult sidekondensaatoriga, b) ilma sidekondensaatorita.

Mahtvuslike pingetrafode kasutamine on seotud mõningate komplikatsioonidega, eriti siirdeprotsesside puhul. Numbriline kaitse sobib nende pingeanduritega paremini kui muud kaitsed.

Kõrgema pinge korral on nad märksa odavamad pingetrafodest.

5.7 Uued voolu- ja pingeandurid

Vajadus küllastusnähtuseta (lineaarsete) voolu- ja ka pingeandurite järele tingis uute voolu- ja pingeandurite väljatöötamise. Seda edendas oluliselt mikroprotsessorkaitse- ja mõõteseadmete kasutuselevõtt, kuna nende voolu- ja pingeahelate sisendvõimsus on väike.

Perspektiivsete mõõteandurite väljundvõimsus on väga väike võrreldes traditsiooniliste mõõtetrafodega – 1 VA murdosa. Andurite aluseks olevad füüsikanähtused on tuntud juba ammu. Perspektiivsemate vooluandurite aluseks on Rogowski vöö põhimõtte käesoleva sajandi algusest ja Faraday efekt aastast 1845. Pingeandur põhineb Pockels'i efektil (avastatud 1894).

Kõigis neis mõõteandureis puudub magnetsüdamik. Seetõttu ei esine ka küllastust. Sekundaarmõõtesuurus on lineaarsõltuvuses primaarsest kogu töövahemiku ulatuses. Aperiodiline primaarlühisvool ega südamiku jääkvoog ei mõjuta perioodilise voolu edastamist sekundaarpoolele. Kaob vajadus arvestada anduri vea suurenemist suure voolu korral ja seega kaob ka täpsuspiirikordsuse mõiste. Need omadused on eriti olulised releekaitse vooluandurite korral.

Uute vooluandurite kasutamisel kaob võimalus kaitsta mõõteriistu liig-voolu eest mõõtevoolutrafo südamiku küllastumisega. Küll aga on see võimalik sobiva voolu-vahemiku valikuga. Mõõteriistad on ka suhteliselt hõlpus valmistada suurt primaarvoolu taluvaina, eriti mõõteanduri väikese väljundvõimsuse korral.

Rogowski vöö on sümmeetriliselt toroidalusele mähitud õhksüdamikuga pool. Toroidi keskelt viiakse läbi voolujuht, nt latt. Vöö klemmpinge hetkväärtus on võrdeline primaarvoolu hetkväärtuse tuletisega. Sekundaarvoolu saab sekundaarpinget integreerides.

Valgus-mõõteandurid on Faraday ja Pockels'i efektil põhinevad voolu- ja pingeandurid. Need on passiivandurid – ei vaja primaarpoolel abitoidet. Nende tajuriks on sümmeetriakeskmeta kristall, milles lineaarselt muutub

- 1) piki magnetvälja leviva lineaarselt polariseeritud monokromaatilise valguse võnketasandi pöördnurk võrdeliselt magnetvälja tugevuse ja kristalli paksusega - s.o Faraday efektil põhinev voolutajur
- 2) piki elektrivälja leviva lineaarselt polariseeritud monokromaatilise valguse murdumisnäitaja võrdeliselt elektrivälja tugevusega - s.o Pockels'i efektil põhinev pingetajur.

Monokromaatilist valgust kasutatakse seepärast, et pöördnurk ja murdumisnäitaja olenevad valguse lainepikkusest.

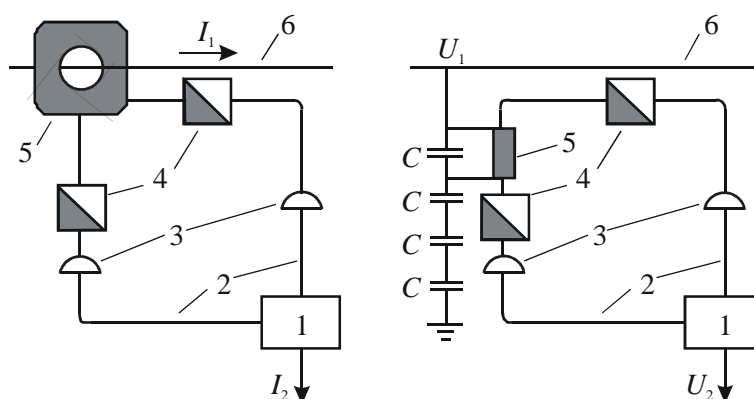
Voolutajuriks on avaga (primaarahela tarvis) silikaatklaaskristall, pingeanduriks – mahtuvuslikku pingejagurisse lülitatav sünteetiline kristall. Võrdetegur on valguse lainepikkusel 0,8 μm voolu korral (Verdet' konstant) nt 2,7 $\mu\text{rad}/\text{A}$, pinge korral – 70 $\mu\text{rad}/\text{V}$. Võrdetegur muutub temperatuuri muutudes 100° C võrra 1–2%. Temperatuuriviga saab kompenseerida.

Mõlemal juhtumil edastab mõõteteadete maa potentsiaalile valgusjuht, mille valgus-elektronliidesteks on valgusallikana valgusdiod (varasema laseri asemel) ja lõppmuunduriks fotodiod.

Elektrisüsteemides on algamas üleminek numberväljundiga mõõteanduritele. Sellega seoses on uusehituse ja vanade mõõtetrafode asendamise korral otstarbekas kaaluda numberväljundiga andurite kasutuselevõttu, – esialgu koos digitaal-analoogmuunduriga. Üleminek numberväljundiga mõõteanduritele kestab mitukümmend aastat.

Mikroprotsessoritel põhinevatel releekaitse- ja mõõteseadmetel on väike sisendvõimsus, mis võimaldab mõõteanduritena kasutada magnetsüdamikuta voolu- ja pingeadureid. Kuna nendel anduritel ei esine küllastumist, siis kaob vajadus arvestada anduri vea hälvet suure voolu korral. Kahjuks kaob koos sellega ka võimalus trafo südamiku küllastumisega kaitsta mõõteriistu liigvoolu eest.

Trafode kõrval on kasutusel valgusele reageerivad **valgusandurid**, mis toimivad nii voolu- kui pingeaduritena. Valgusandurite tajuriks on sümmeetriakeskmeta kristall. Pockelsi efektile põhinevas pingetajuris (joonis 5.4) muutub elektrivälja tugevusega võrdeliselt valguse murdumisnäitaja. Voolutajur (joonis 5.4) tugineb Faraday efektile, mille kohaselt valguse võnketasandi pöördenurk muutub võrdeliselt magnetvälja tugevusega. Mõlemal juhul edastatakse mõõteteave lõppmuundurisse valgusjuhi kaudu. Valgusallikaks on valgusdiod ja lõppmuunduriks fotodiod. Joonisel 5.4 on elektroonikaplokk 1, valgusjuht 2, lääts 3, polarisaator 4, kristall 5 ja primaarahel 6.



Joon. 5.4 Voolu- ja pingeadurite põhimõttelised skeemid.

6 LIIGVOOLUKAITSE

6.1 Liigvoolukaitse esimene aste

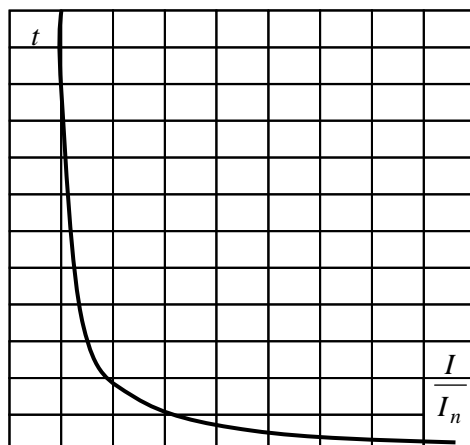
Elektrivarustuse turvalisuse ja töökindluse tõstmiseks on oluline rikete automaatne ja kiire kõrvaldamine. Selleks kasutatakse elektrivõrkudes kaitsesüsteeme, mis peavad tagama rikkekoha kiire ja selektiivse väljalülitamise. Kaitsesüsteemide põhielementideks jaotusvõrgus on sulavkaitsmed, automaatlülitid ja kaitsereleed. Sulavkaitsmeid ja automaatlüliteid kasutatakse põhiliselt madalpingevõrkudes, kuid sulavkaitsmed leiavad rakendust ka kesk- ja isegi kõrgepingevõrkudes nimipingel kuni 110 kV. Kaitsereleesid kasutatakse laialdaselt kesk- ja kõrgepingevõrkudes. Kaitsereleed võib ühendada võrku vahetult või läbi voolu- ja/või pingetrafo. Esimesel juhul on tegu primaar- ja teisel juhul sekundaarreleega. Tingituna võrgu kõrgeast nimipingest kasutatakse kesk- ja kõrgepingevõrkudes peamiselt sekundaarreleesid. Lühisekaitses sagedamini kasutatavad releed on liigvoolureleed ning ala- ja liigpingereleed.

Lühisvoolu väljalülitamiseks ja lühisekoha eraldamiseks kasutatakse põhiliselt liigvoolukaitset. Liigvoolukaitse tunnussuuruseks on vool ja liigvoolukaitse rakendub sättevoolu ületava voolu korral. Liigvoolukaitsele esitatavad tähtsamad nõuded on

- selektiivsus, mis tähendab, et rikke korral väljalülitatav võrguosa on nii väike kui võimalik
- kiirus, mis tähendab, et rikke põhjustatud kahjud oleksid võimalikult väikesed
- tundlikkus, mis tähendab, et kaitse peab reageerima võimalikult väikesele tunnussuuruse muutusele
- hõlmavus, mis tähendab, et kõik võrgu elemendid ja kogu võrk peavad olema kaitstud
- lihtsus ja töökindlus
- katsetatavus talitlust katkestamata.

Liigvoolukaitse on väljalülitav. Rikke heastamiseks kasutatakse taaslülitusautomaate.

Sulavkaitse katkestab vooluahela teatud voolu väärtuse ületamisel sulavelemendi läbipõlemisega. Sulavkaitsme toimekiirus oleneb voolu väärtusest. Sulavkaitsme toimekiiruse sõltuvust voolu I ja sulavkaitsme nimivoolu I_n suhtest kujutab joonis 6.1.



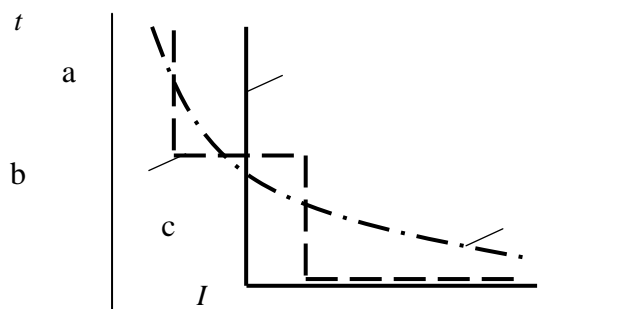
Joonis 6.1 Sulavkaitsme rakendusaja sõltuvus voolust

Kaitserelee aga ei katkesta vooluahelat iseseisvalt, vaid annab rakendumisel lülitusseadmele lahtussignaali, mille põhjal lülitusmehanism käivitub ja lüliti katkestab vooluahela.

Rakendusaja järgi eristatakse järgmisi liigvoolukaitseid:

- hetkkaitse
- sõltumatu viitega viitkaitse
- sõltuva viitega viitkaitse.

Joonisel 6.2 on eri tüüpi voolukaitsete tunnusjooned.



Joonis 6.2 Liigvoolukaitse rakendusaja sõltuvus voolust: a) hetkkaitse, b) sõltumatu viitega viitkaitse, c) sõltuva viitega viitkaitse.

Hetkkaitse viide ei ole tahtlikult esile kutsutud, vaid on tingitud kaitse vähimast tehniliselt võimalikust rakendusajast. Hetkkaitse rakendumisaeg ulatub tänapäeval 0,1...0,005 sekundini.

Sõltumatu viitega viitkaitse rakendumisaeg sätestatakse vastavalt vajadustele ja võib ulatuda mitme sekundini. Sageli on sõltumatu viitega kaitse kaheastmeline, kui alates teatud voolu väärtusest hakkab kaitse toimima hetkkaitseksena (joonis 6.2 - b).

Sõltuva viitega kaitse rakenduskiirus on pöördvõrdeline voolu suurusega, mis tagab suuremate voolude kirema väljalülitamise ja väiksemate voolude korral suurema viite. Vastava tunnusjoone (joonis 6.2 - c) kalle võib olla sõltuvalt vajadusest järsem või laugem. Standardi IEC 60255 kohaselt eristatakse nelja sõltuvust

- normaalne (*normal inverse*)
- pikaajaline (*long time inverse*)
- väga järsk (*very inverse*)
- äärmiselt järsk (*extremely inverse*).

Sõltuva viitega kaitse rakendusaeg arvutatakse valemiga

$$t = \frac{k\beta}{\left(\frac{I}{I >}\right)^\alpha - 1}$$

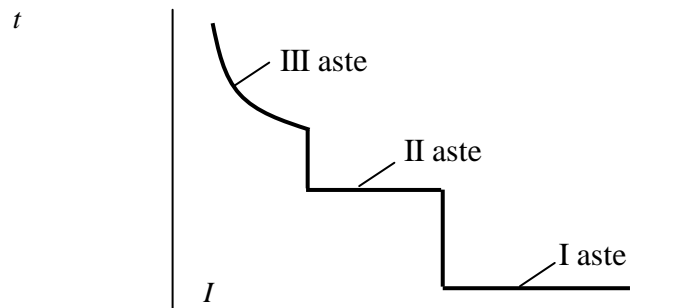
kus k – sättejategur
 I – vool
 $I >$ – voolusäte
 α, β – tegurid

Tegurid α ja β valitakse vastavalt sõltuvuse tüübile

- normaalne $\alpha = 0,02$ ja $\beta = 0,14$
- väga järsk $\alpha = 1,0$ ja $\beta = 13,5$
- äärmiselt järsk $\alpha = 2,0$ ja $\beta = 80,0$
- pikaajaline $\alpha = 1,0$ ja $\beta = 120,0$

IEC standardi kohaselt kasutatakse eri tüüpi sõltuvustel erisuguseid lähtumistegureid. Lähtumistegur näitab, mitu korda kaitse lähtumisvool võib enimalt ületada sättevoolu. Normaalse, väga järsu ja äärmiselt järsu sõltuvuse korral on lähtumistegur 1,3, aga pikaajalise sõltuvuse korral 1,1.

Kaasajal kasutatakse radiaalses jaotusvõrgus sagedasti kolmeastmelist liigvoolukaitset, kus selektiivsuse ja töökindluse tagamiseks on ühte kaitse ühendatud kõik kolm kaitsetüüpi. Kolmeastmelise kaitse tunnusjoon on joonisel 6.3.



Joonis 6.3 Kolmeastmelise kaitse tunnusjoon

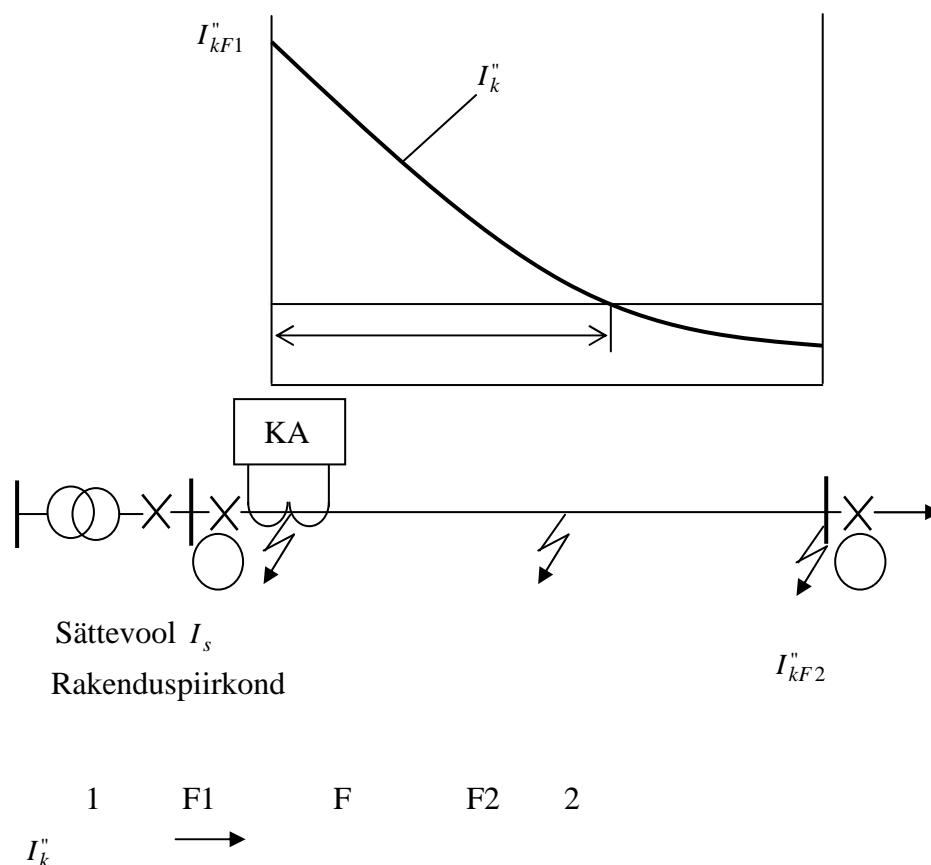
Jaotusvõrgu ja tema elementide kaitse koosneb paljudest kaitseseadmetest, mille koostöö peab olema koordineeritud. Kaitsekoordinatsiooni eesmärgiks on luua kogu võrku hõlmav kaitse, mis peab tagama rikete kiire, selektiivse, aukudeta ja töökindla väljalülitamise. Kaitse töökindluse tõstmiseks kasutatakse lisaks põhikaitsele reservkaitset, mille ülesandeks on rakendada juhul kui põhikaitse millegipärast ei rakendunud. Ka reservkaitse peab olema võimalikult selektiivne. Reservkaitsena kasutatakse tavaliselt kolmeastmelise kaitse teist ja kolmandat astet. Näiteks jaotusvõrgu ja toitetrafo kaitsekoordinatsioon eeldab, et trafo alampingekaitse toimib piisavalt kiiresti võrreldes ülempingepoole kaitsega.

Selektiivsust tagatakse nii sättevooluga kui ka sättejaga. Vastavalt sellele eristatakse vooluselektiivsust ja aegselektiivsust.

Hetkkaitse sätestamine

Hetkkaitse selektiivsus tagatakse kaitse poolt kaitstava piirkonna piiritlemisega. Hetkkaitse ei tohi rakenduda, kui viga tekib väljaspool hetkkaitse poolt kaitstavat piirkonda. Hetkkaitse rakenduspiirkond määratakse ülimööduva lühisvoolu I_k'' järgi, kui lühis tekkis kaitstava liini vastasotsas, või kaitstava elemendi punktis, kus lõppeb vaadeldava kaitse poolt kaitstav lõik.

Ühepoolse toitega radiaalliinis hakkab ülimööduv lühisvool kasvama, kui lühisepunkt nihkub toitepunkti poole. Hetkkaitse sätestamist ühepoolse toitega liini kaitsmiseks illustreerib joonis 6.4.



Joonis 6.4 Hetkkaitse toimimispõhimõtte ühepoolse toitega radiaalvõrgus

Hetkkaitse KA sättevool I_s valitakse tingimusel, et kaitse ei tohi rakenduda, kui lühisepunkt asub järgmises kaitstavas tsoonis ehk kaugemal kui F2. Selle tagamiseks peab kaitse sättevool I_s olema suurem kui punktis F2 esinev ülimööduv lühisvool I_{kF2}'' . Sättevoolu arvutamiseks kasutatakse erilist välistustegurit k_v ,

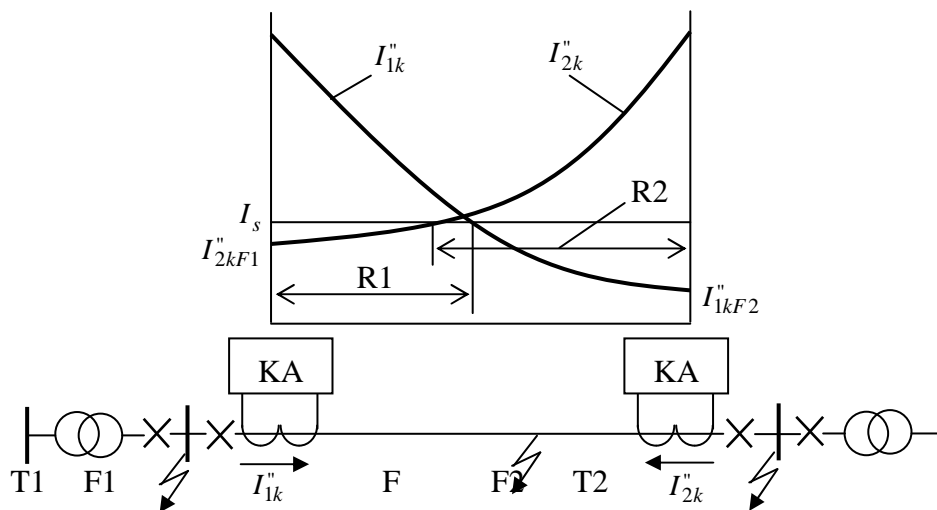
$$I_s = k_v I_{kF2}''$$

Välistusteguri väärtus oleneb kaitse tüübist ja lülitusviisist (vahetu, läbi voolutrafo või anduri) ning asub tavaliselt vahemikus $k_v = 1,1 \dots 1,5$.

Relee rakenduspiirkond määratakse kas graafiliselt nagu kujutatud joonisel 8.4 või analüütiliselt, avaldades esmalt ülimööduva lühisvoolu funktsioonina lühisekoha kaugusest $I_k'' = I_k''(l)$ ja seejärel avaldades otsitava rakenduspiirkonna l võrdusest

$$I_s = k_v I_k''(l)$$

Kahepoolse toitega radiaalliinil paiknevad kaitseadmed liini mõlemas otsas ja lühisvool muutub sõltuvalt lühise asukohale joonise 6.5 Järgi.



Joonis 6.5 Hetkkaitse toimimispõhimõtte kahepoolse toitega radiaalvõrgus

Vastavalt joonisele 6.5 arvutatakse esmalt trafo T1 poolt tulev ülimööduv lühisvool I''_{1kF2} tingimusel, et lühis on punktis F2 ja trafo T2 poolt tulev ülimööduv lühisvool I''_{2kF1} tingimusel, et lühis on punktis F1. Kahepoolse toitega liini mõlemas otsas asuva kaitse sättevoolud peavad olema võrdsed ja nad arvutatakse suurema lühisvoolu järgi. Joonise 6.5 järgi on I''_{2kF1} suurem kui I''_{1kF2} ja seega arvutatakse antud näite puhul sättevool valemiga

$$I_s = k_v I''_{2kF1}$$

Nüüd kujuneb kaitse KA1 rakenduspiirkonnaks R1 ja kaitse KA2 rakenduspiirkonnaks R2. Liini keskele tekib ühine lõik R1+R2, mis kuulub mõlema kaitse rakenduspiirkonda.

Lõpuks tuleb veel kord rõhutada, et hetkkaitset kasutatakse tavaliselt põhikaitse, mitte reservkaitse.

Sõltumatu viitega voolukaitse sätestamine

Sõltumatu viitega liigvoolukaitse selektiivsus tekitatakse rakendusviite sobiva valikuga. Rakendusviide valitakse astmepõhimõttel, mille järgi on koormus – toiteallikas suunal paikneva iga järgmise kaitse viide teatud astme võrra suurem eelmise kaitse viitest. Viidete valikut alustatakse toitepunktist kõige kaugemal paiknevast võrgu punktist, kus viite suuruseks võetakse $t_1 = 0$ ehk teisisõnu kasutatakse hetkkaitset. Järgmise kaitse viide valitakse eeldusel, et näiteks joonisel 8.6 kujutatud mootori M1 rike ei põhjustaks trafo T2 väljalülitamist. Selleks peab kaitse KA2 viide t_2 olema mõnevõrra suurem kui kaitse KA1 viide t_1 . Seda viidete erinevust nimetatakse selektiivsusastmeks Δt . Üldistades, avaldub kaitse $i+1$ viide kaitse i viide ja selektiivsusastme Δt_i kaudu valemiga

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i$$

Selektiivsusaste Δt_i peab olema niivõrd suur, et rikkepiirkonna kaitse jõuaks rakenduda ja lüliti lahutada enne, kui kulub ära piirkonna $i+1$ kaitse viiteaeg. Selektiivsusaste Δt_i arvutatakse valemiga

$$\Delta t_i = t_{VLi} + \Delta t_{KAi} + \Delta t_{KAi+1} + t_v$$

kus t_{VLi} – i -nda võimsuslüliti rakendusae

Δt_{KAi} – i -nda kaitsepiirkonna kaitse rakendusajaviga

Δt_{KAi+1} – kaitsepiirkonda $i+1$ kaitsva kaitse rakendusajaviga

t_v – varu-ehk välistusaeg.

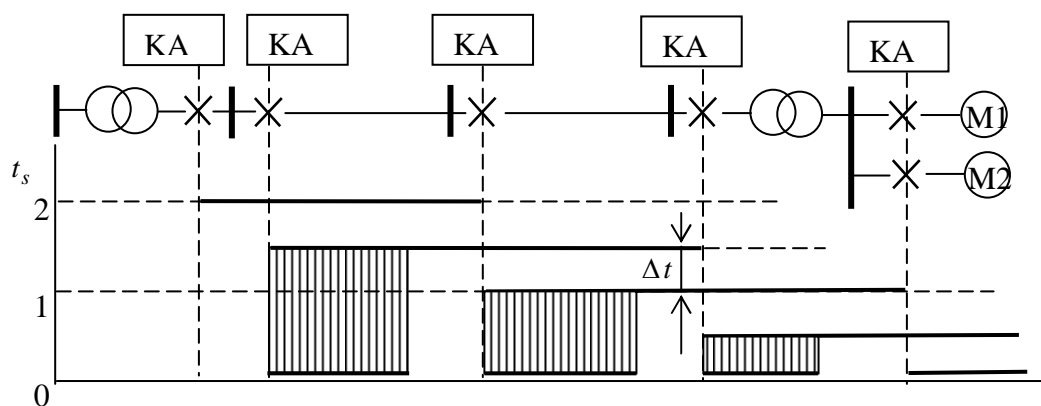
Võimsuslüliti rakendusajad on tavaliselt $t_{VLi} = 40...350$ ms.

Sõltumatu viitega kaitse rakendusajavead sõltuvad seadme tüübist ja on tavaliselt $\Delta t_{KA} = 15...125$ ms.

Välistusajaks võetakse tavaliselt $t_v = 100...150$ ms.

Kokku võttes kujuneb selektiivsusastmeks vastavalt olukorrale $\Delta t = 170...750$ ms.

Aegselektiivsuse kujundamise näide on joonisel 6.7.

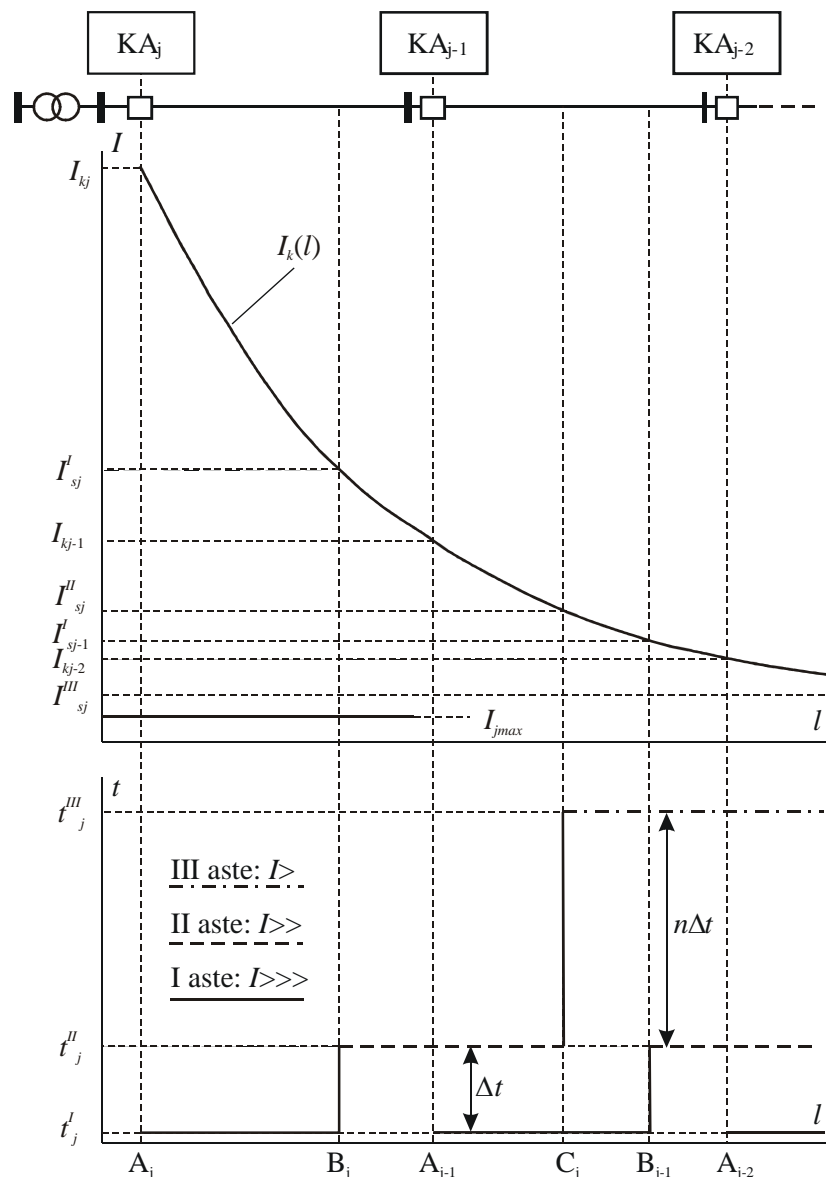


Joonis 6.7 Sõltumatu viitega kaitsete sätestamine radiaalses võrgus

Nagu näha joonisel 6.7 võib sõltumatu viitega kaitse toimida nii põhi- kui ka reservkaitsena. Näiteks kui mootori lühise korral põhikaitse KA1 ei rakendu, toimib reservkaitsena kaitse KA2.

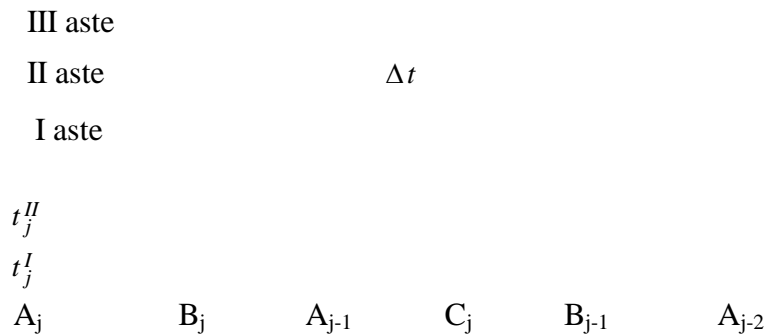
Sellisel kujundatud aegselektiivsus põhjustab põhikaitsetele suhteliselt suuri viiteaegu. Viiteaegade vähendamiseks kombineeritakse sõltumatu viitega kaitsed hetkkaitsetega, mis toimivad omas kaitsepiirkonnas tekkivate rikete korral kiiresti. Hetkkaitse mõju on joonisel 6.7 tähistatud viirutatud aladega.

Kolmeastmelise liigvoolukaitse toimimispõhimõtet aitab selgitada joonis 6.8



Joonis 6.8 Kolmeastmelise liigvoolukaitse toimimispõhimõte

I
 I_{kj}^I
 I_{kj-1}^{II}
 I_{lj}^{II}
 I_{lj-1}^I
 I_{kj-1}^{II}
 I_{lj}^{III} I_{jmax}
 S t
 t_j^{III}



Joonis 6.8 Kolmeastmelise liigvoolukaitse toimimispõhimõte

Kolmeastmelise sõltumatu viitega kaitse astmeid iseloomustavad järgmised seosed:

- **I aste** ($I \gg \gg$) on hetkkaitse, mille lähtumisvool arvutatakse ülimööduva lühisvoolu alusel

$$I_{lj}^I = k_v^I I_{kj-1}''$$

$$I_{lj-1}^I = k_v^I I_{kj-2}''$$

I astme rakenduspiirkonnad on joonisel 6.8 $A_j B_j$; $A_{j-1} B_{j-1}$

- **II astme** ($I \gg$) viiteaeg arvutatakse valemiga

$$t_j^{II} = t_j^I + \Delta t = t_{j-1}^{II} = t_{j-2}^{II}$$

II astme lähtumisvoolud arvutatakse järgmise kaitse I astme lähtumisvoolust kasutades

II astme välistustegurit k_v^{II}

$$I_{lj}^{II} = k_v^{II} I_{lj-1}''$$

$$I_{lj-1}^{II} = k_v^{II} I_{lj-2}''$$

II astme rakenduspiirkonnad on joonisel 6.8 $B_j C_j$ ja analoogilislt ka $B_{j-1} C_{j-1}$ jne.

III astme ($I >$) viiteaeg leitakse seostest

$$t_j^{III} = t_j^{II} + n\Delta t \text{ ja } t_j^{III} = t_{j-1}^{III} + \Delta t$$

III astme lähtumisvoolu arvutatakse valemiga

$$I_{lj}^{III} = \frac{k_v^{III}}{k_e} I_{j \max}$$

kus k_v^{III} - III astme välistustegur

k_e - ennistustegur

$I_{j \max}$ - j-indat võimsuslülitit läbiv maksimaalne võimalik koormusvool

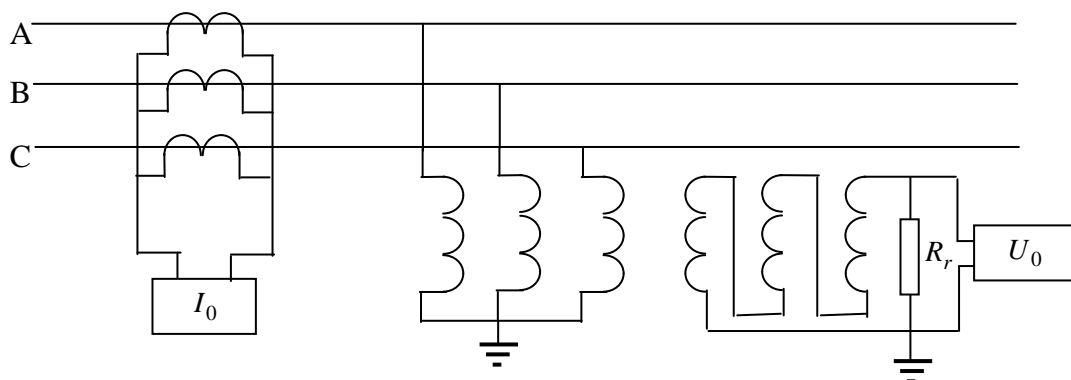
$$I_{j \max} = 5I_{nM}, \text{ kui on tegu asünkroonmootoritega ja}$$

$$I_{j\max} = 4I_n, \text{ kui on tegu segakoormusega.}$$

Ennistustegur näitab ennistusvoolu suhet rakendusvoolu ja on sagedasti $k_e = 0,6...0,9$. Välistustegurid valitakse tavaliselt piirides $k_v = 1,1...1,5$.

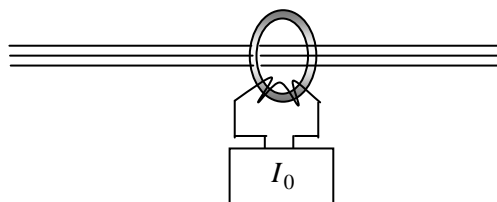
7. Maalühiskaitse

Maalühiskaitse tunnussuurusteks on nulljärgnevuspinge ja nulljärgnevusvool. Nulljärgnevuspinge- ja voolu mõõtmiseks lülitatakse pinge- ja voolutrafad mõõdetava koha kõikidesse faasidesse. Nulljärgnevusvoolu mõõtmiseks ühendatakse voolutrafade sekundaarmähised tähte, aga nulljärgnevuspinge mõõtmiseks ühendatakse pingetrafade sekundaarmähised avatud kolmnurka. Õhuliinidel kasutatavad nulljärgnevusvoolu ja -pinge mõõteskeemid on joonisel 7.1. Maarikkekaitse töökindluse seisukohalt on oluline, et ühes mõõtekohas kasutatavad mõõtetrafod oleksid kõikides faasides identsed. Veel on oluline, et koormusvoolud ja maalühisvoolud oleksid ligikaudu samas suurusjärgus. Voolutrafade ülekandeegurid ei tohiks olla eriti suured. Pingetrafade puhul tuleb silmas pidada ferreesonantsnähtusi, mis võivad esile kutsuda pingetrafade rikkeid. Ferreesonantsnähtude põhjustatud ohu vähendamiseks ühendatakse pingetrafade avatud kolmnurka oomiline takistus $R_r = 20...30 \Omega$ võimsusega 300...800 W.



Joonis 7.1 Õhuliinide nulljärgnevusvoolu ja -pinge mõõteskeemid

Kaablite nulljärgnevusvoolude mõõtmine toimub kõiki kolme faasijuhet aheldava ühe ühise mõõtetrafo abil nii, nagu näidatud joonisel 7.2. Kaablitel on võimalik mõõta väga väikeseid maarikkevoole suurusega isegi alla 0,5 A. Seepärast soovitatakse nulljärgnevusvoolusid mõõta kui võimalik just kaablitel. Nulljärgnevuspinget on aga praktiliselt võimalik mõõta ainult õhuliinidel. Kaablite nulljärgnevuspinge määramine on võimalik vaid kaablite otstes, kus tekib juurdepääs faasijuhtidele.



Joonis 7.2 Kaabelliinide nulljärgnevusvoolu mõõteskeem

Nulljärgnevuspinge järgi rakenduv maarikkekaitse ei ole selektiivne. Nulljärgnevuspinge tekkimine annab küll tunnistust maarikke olemasolust kuid kuna maarikkel tekkiv nulljärgnevuspinge on kogu võrgus ligikaudu sama suur, siis ei ole nulljärgnevuspinge alusel võimalik määrata maarikke asukohta.

Nulljärgnevuspingereleed kasutatakse peamiselt maarikke olemasolu kindlakstegemiseks ja sellest teavitamiseks.

Võrgu selektiivset maarikkekaitset võimaldavad aga nulljärgnevusvoolureleed. Nulljärgnevusvoolureleed võivad olla suunatudlikud või mittesuunatudlikud. Mittesuunatudliku relee juures on oluline, et võrgu maarikkevool oleks tunduvalt suurem kaitstava liini tavalisest nulljärgnevusvoolust. Maarikkekaitse töökindluse tõstmiseks kasutatakse nulljärgnevuspingerelee blokeeringut. Kui nulljärgnevuspingerelee ei ole rakendunud, siis ainult nulljärgnevusvoolu olemasolu ei ole veel maarikke tunnuseks ja maarikkekaitse ei rakendu. Suunatudliku nulljärgnevusvoolurelee kasutamine põhineb asjaolul, et vigastatud liini maarikkevoolu suund on vastupidine võrreldes vigastamata liini nulljärgnevusvooluga.

Resonantsmaandatud võrgu maalühiskaitse on keerukam ja põhineb nulljärgnevusvoolu aktiivkomponendi mõõtmisel. Nulljärgnevusvoolu reaktiivkomponendi väärtus on suhteliselt tühine ja tema märk sõltub sellest, kas võrk on ala- või ülekompenseeritud. Maarikkevoolu väiksuse tõttu soovitatakse nulljärgnevusvoole mõõta kaabli ümber paigaldatavate voolutrafodega. Maarikkekaitse töökindluse tõstmiseks resonantsmaandatud võrgus kasutatakse nulljärgnevuspingerelee blokeeringut.

Maalühiskaitse isoleeritud neutraaliga võrgus

Isoleeritud neutraaliga võrkude maalühiskaitse on reeglina suure tundlikkusega summavoolukaitse (vajadusel suundkaitse).. NSV Liidu Elektriseadmete ehituseeskiri (EEE) nõuab isoleeritud neutraaliga võrgus väljalülitavat maalühiskaitset ainult turbatööstuse toiteliinidel (EEE § 7.7.7). Seejuures peetakse silmas vajadust vältida turba süttimine maaühendusvoolust.

Läänes seonduvad maalühiskaitsega elektrivarustuse lühiajalise katkemise probleemid. Maalühise väljalülitamisele järgneb tavaliselt 0,3 s pingepausiga enamasti edukas kiirtaaslülitus. See häirib tarbijaid, eelkõige arvutikasutajaid (eriti pangad jms), aga ka tööstuslikke ja põllumajanduslikke tootmisprotsesse jm. Elektrivarustuskindlust saab suurendada maalühiste arvu vähendamisega

Keskpingevõrkudes (Eestis 6 – 35 kV) moodustavad maalühised statistilistel andmetel 60 – 70 % kõigist keskpingevõrkudes esinevatest riketest. Ühefaasiline maalühis ei põhjusta häiringuid elektrienergia tarbijatele, võrreldes faasidevaheliste lühistega.

Maalühisega kaasnevad rikkekohas maalühispinged, mille suurus sõltub maalühisvoolust ja maandustakistusest. Maalühistel tekkivad maalühispinged on

ohtlikud rikkekoha lähedal olevatele inimestele ja loomadele. Elektriõhutuseskirjad annavad lubatavad suurimad maalühispingete väärtused (60 –70V).

Maalühisvoolu väärtuse määravad galvaanilises ühenduses oleva keskpinge võrgu liinide pikkus. Järelikult keskpinge võrgu laienemine ühe alajaama piires suureneb ka maalühisvool. Maalühisvoolu saab piirata:

- Uute alajaamade ehitamisega
- Maalühisvoolu reaktiivkomponendi kompenseerimisega (kaarekustuspoolide kasutamine).

Maandustakistus sõltub :

- Pinnase eritakistusest
- Maandurist

Maalühise lubatud kestust ja maalühispinge suurus on määratud standardiga.

Maalühise kestust saab vähendada kasutades selektiivset ja kiiretoimelist väljalülitamist toimivat maalühiskaitset.

Maalühise rikkevoolu ja nulljärgnevuspinge tekkimine ja arvutamine.

Isoleeritud neutraaliga elektrivõrk.

Normaalolukorras on võrgus faasipinged maa suhtes vaadatuna sümmeetrilised st nende summa igal aja hetkel on null. Samuti on liini mahtuvusi läbivad voolud sümmeetrilised. Ühe faasi maalühise tekkimisel suurenevad tervete faaside faasipinged maa suhtes. Pingete ebasümmeetria tulemusena liini mahtuvusi läbivate voolude summa ei võrdu enam nulliga ning tekitab rikkekohas maasse voolav rikkevool (maaühendusvool).

Ühe faasi maalühise rikkevoolu saab arvutada valemiga:

$$I_1 = \sqrt{3}\omega C_0 U$$

Kus C_0 - ühe faasi mahtuvus maa suhtes

U - võrgu nimipinge

$\omega = 2\pi f$ - nurksagedus

Kaablite maalühisvoolud on tavaliselt toodud vastavates tabelites. Maalühisvoolud sõltuvad siin kaabli margist ja kaabli pikkusest (A/km).

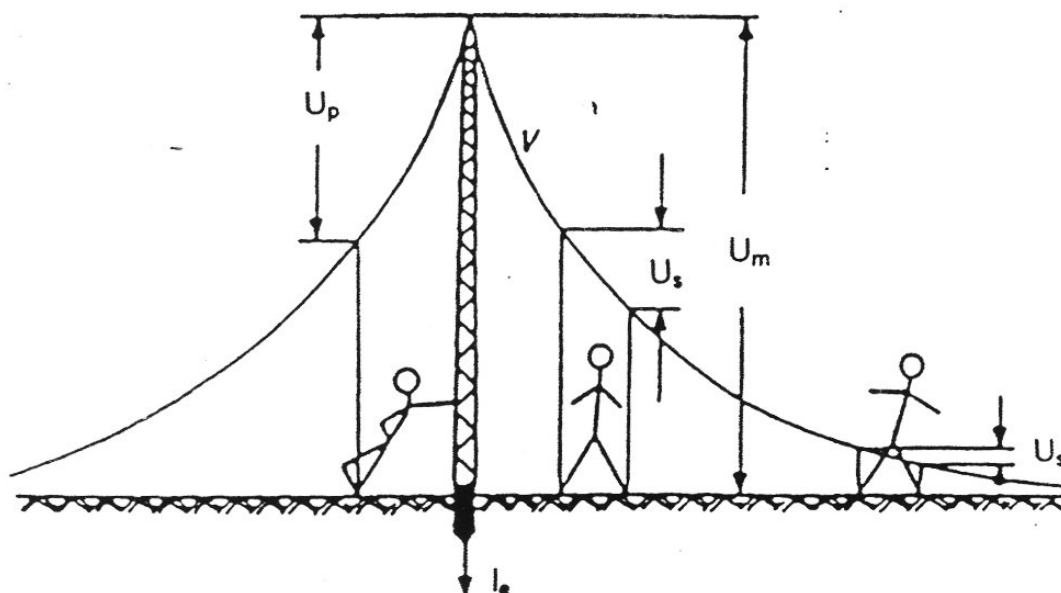
Maalühisvoolu suurus sõltub ka rikkekoha takistusest.

Maalühisel tekkiv faasipingete ebasümmeetria põhjustab trafo neutraalis nulljärgnevuspinge (neutraali nihkepinge).

Maalühiskaitse isoleeritud neutraaliga võrgus

Isoleeritud neutraaliga võrkude maalühiskaitse on reeglina suure tundlikkusega summavoolukaitse (vajadusel suundkaitse). Ida aparatuuri tundlikkus ei ole enamasti piisav. Seda väljalülitustoimega kaitset Ida elektrivõrkudes peagu ei kasutata. NSV Liidu Elektriseadmete ehituseeskiri (EEE) nõuab isoleeritud neutraaliga võrgus väljalülitavat maalühiskaitset ainult turbatööstuse toiteliinidel. Seejuures peetakse silmas vajadust vältida turba süttimine maaihendusvoolust.

Läänes seonduvad maalühiskaitsega eelkõige inimeste turvalisus (joon 7.3) ja seejärel elektrivarustuse lühiajalise katkemise probleemid. Maalühise väljalülitamisele järgneb tavaliselt 0,3 s pingepausiga enamasti edukas kiirtaaslülitus. See häirib tarbijaid, eelkõige arvutikasutajaid (eriti pangad jms), aga ka tööstuslikke ja põllumajanduslikke tootmisprotsesse jm.



Joon. 7.3. Sammu- ja puutepinged.

Ühe faasi maalühiskaitse

Isoleeritud neutraaliga võrkudes kasutatakse kaitseid, mis reageerivad:

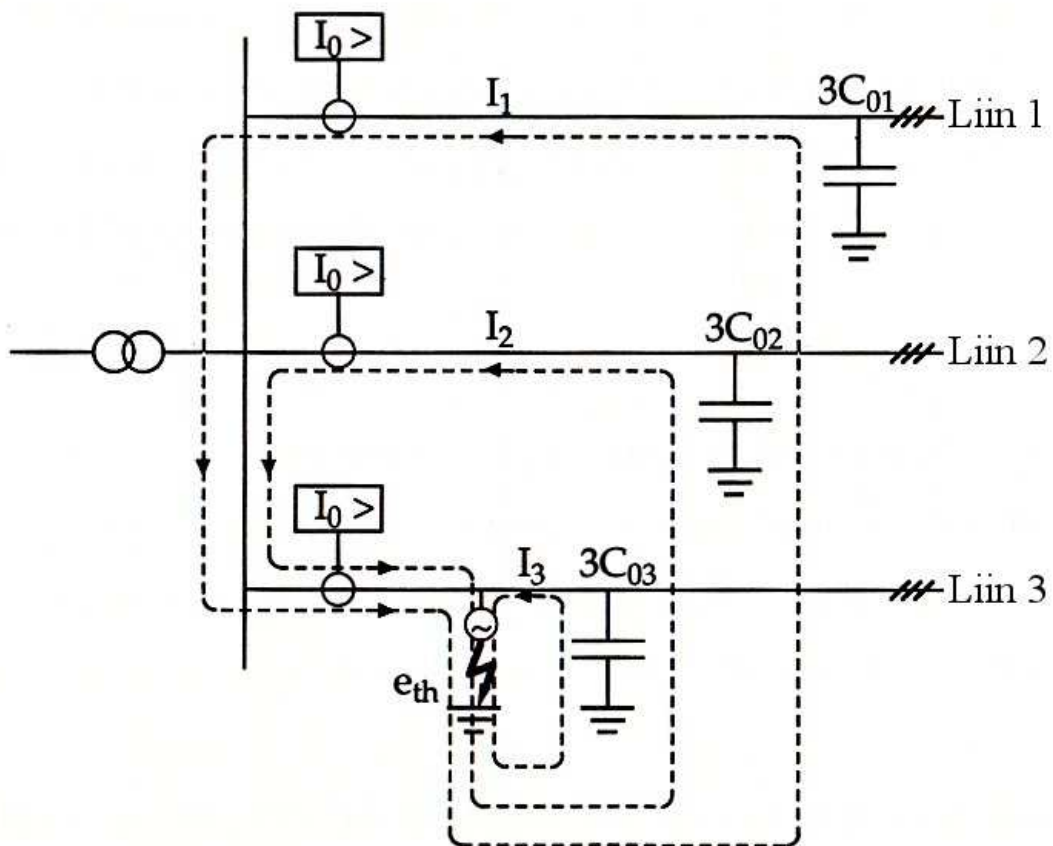
- Nulljärgnevuspinge
- Nulljärgnevusvoolule

Keskpingevõrgus tekkinud maalühis põhjustab nulljärgnevuspinge. Seoses sellega saab nulljärgnevuspingerelle signaali abil teada tekkinud maalühisest. See kaitse ei tee kindlaks vigastatud liini. Vigastatud liini peab kindlaks tegema võrgu juhtimiskeskus.

Õhuliinide korral on võimalik nulljärgnevuspinge mõõtmisega avastada suhteliselt suurel rikkekoha takistusel tekkinud maalühised. Kaabelliinide korral on olukord oluliselt raskem. Näiteks sama suure sättega nulljärgnevuspingerelle tunneb samal

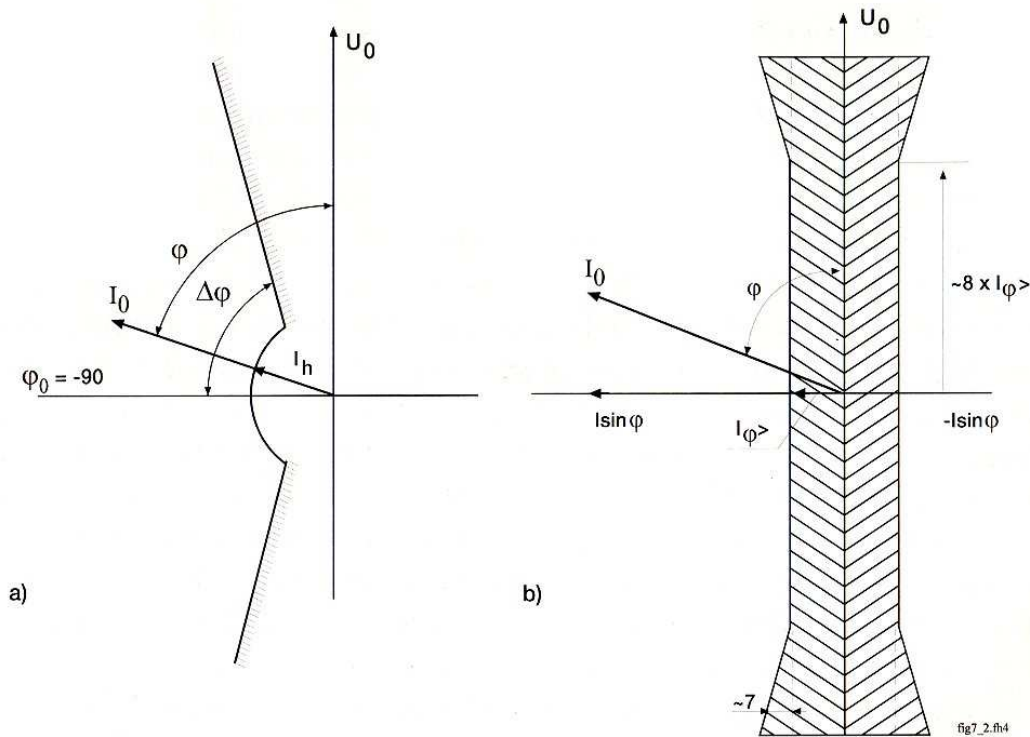
rikkekoha takistus (3000Ω) maalühise umbes 60 korda väiksema kogupikkusega kaabelvõrgus kui õhuliinidega võrgus.

Maalühisel tekkivate nulljärgnevusvoolude kulgemised on toodud joonisel 7.4.



Joon. 7.4 Nulljärgnevusvoolude kulgemine maalühisel.

Joonisel 7.5 on toodud suunatud maalühiskaitse rakenduspiirkonnad. Need piirkonnad vastavad mikroprotsessor kaitsetele.



Joon. 7.5. Mikroprotsessor kaitse toimimise tsoonid.

8 DISTANTSKAITSE

8.1 Põhimõisteid

Distantskaitse mõõtteelemendiks on takistusrelee, mis reageerib liini Z, X või R takistusele. Liini faasitakistused relee paigalduskohast kuni lühisekohani on proportsionaalsed vastava liini osa pikkusega (kaugusega AK paigalduskohast), sest

$$U^{(3)} = I^{(3)} z_0 L$$

$$Z^{(3)} = U^{(3)} / I^{(3)} = I^{(3)} z_0 L / I^{(3)} = z_0 L,$$

siin **Z**- on liini impedants lühisekohani, **z₀** - liini eritakistus ja **L**- lühisekoha kaugus AK paigalduskohast.

Järelikut sõltub takistusrelee toimimine lühisekoha kaugusest AK paigalduskohast.

Selektiivsuse tagamiseks distantskaitse tehakse tavaliselt suunatud kaitsena ja mitme astmelisena. Samasuunaliste kaitseastmete selektiivsus tagatakse viidetega.

Distantskaitse rakendamise kujutamine X - R tasapinnal. Distantskaitse rakendamise

karakteristikuks on

$$Z_{\text{rak}} = f(\varphi).$$

Kuna näivtakistus Z on komplekssuurus siis on takistusreele rakendumistsooni on otstarbekas kujutada $X - R$ tasapinnal. Järelikult igat näivtakistust takistusreele klemmidel ($Z = U/I$) võib kujutada kompleksuurusena $Z = R + jX$. Joonisel on toodud distantskaitse rakendumiskarakteristikud.

8.2 Impedantsreleede karakteristikud

Lühise puhul tuleb arvestada lisaks liini näivtakistusele ka lühisekoha näivtakistust (üldiselt aktiivtakistused): Lühisekoha näivtakistus sõltub:

1. Elektriikaare aktiivtakistusest
2. Puuokste aktiivtakistusest
3. Maalühise korral ka maandustakistustest

Elektriikaare aktiivtakistus

Elektriikaare aktiivtakistus on üldiselt väike ja omab olulist osa vaid lühikeste liinide korral (10 km). Väikeste maaihendusvoolude korral võib elektriikaare takistus olla tühine võrreldes maaihendus takistusega. Maaihendustakistustel üle 500 oomi ei saa üldjuhul kasutada distantskaitset. Elektriikaare takistuse saab määrata Warringtoni valemiga:

$$R = 1.8 L/I^{1.4}$$

Siin L – elektriikaare pikkus meetrites ja I lühisvool kA.

Elektriikaare takistus ei ole püsiv vaid sõltub elektriikaare “venimisest” ja tihti tuuakse Warringtoni valem, mis arvestab elektriikaare otspunktide vahelist kaugust S (eeldusel, et kaare väljatugevus on 2,5 kV/m)

$$R = 2,5 S/I^{1.4}$$

Näide: 110 kV liini isolaatorite keti pikkus on umbes 0,8 m ning elektriikaare väljatugevus umbes 2 kV/m ja lühisvoolu 2 kA korral on kaare takistus 1 oom.

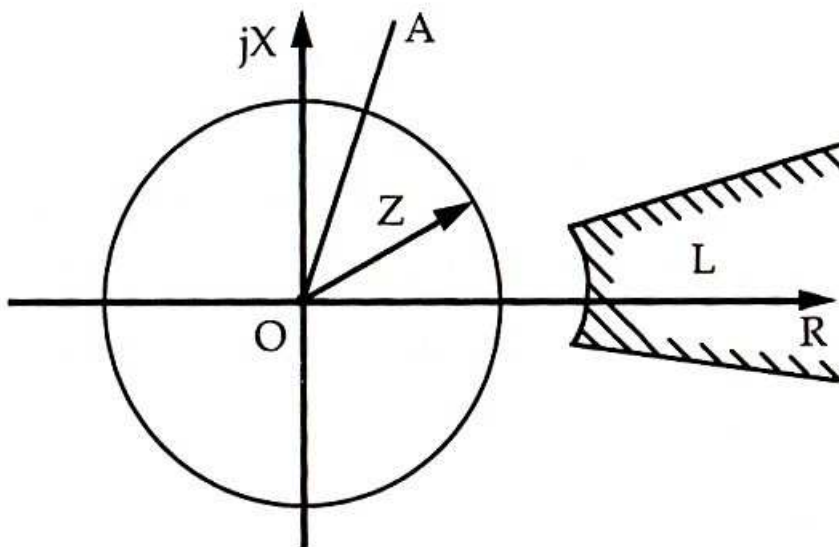
Maalühise korral lühisekoha takistus sõltub;

1. Piksetrossi materjalist (piksetrossi kaudu maalühise korral tuleb arvestada ka lühisekoha induktiivtakistus)
2. Alajaamas, alajaama maandustakistusest
3. Liini mastide materjalist

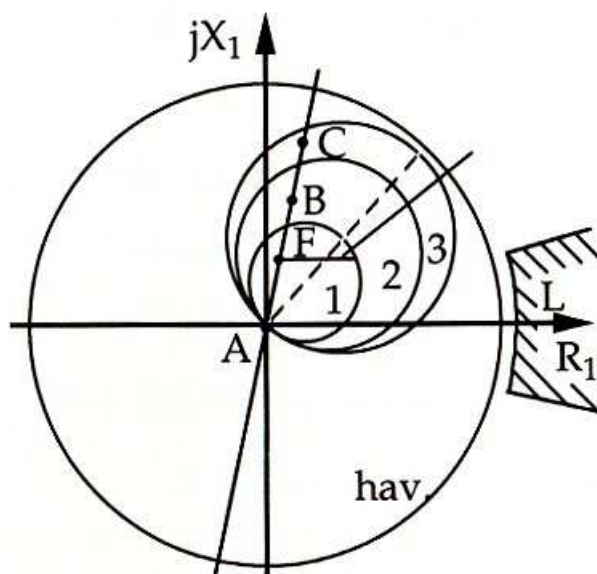
4. Pinnase takistusest
5. Liini toitest (ühe- või kahepoolne toide)
6. Võimsusvoo suunast enne lühist
7. Lisa toiteallikatest
8. Rööpliinidest

8.2. Distantkaitse karakteristikud XR tasapinnal

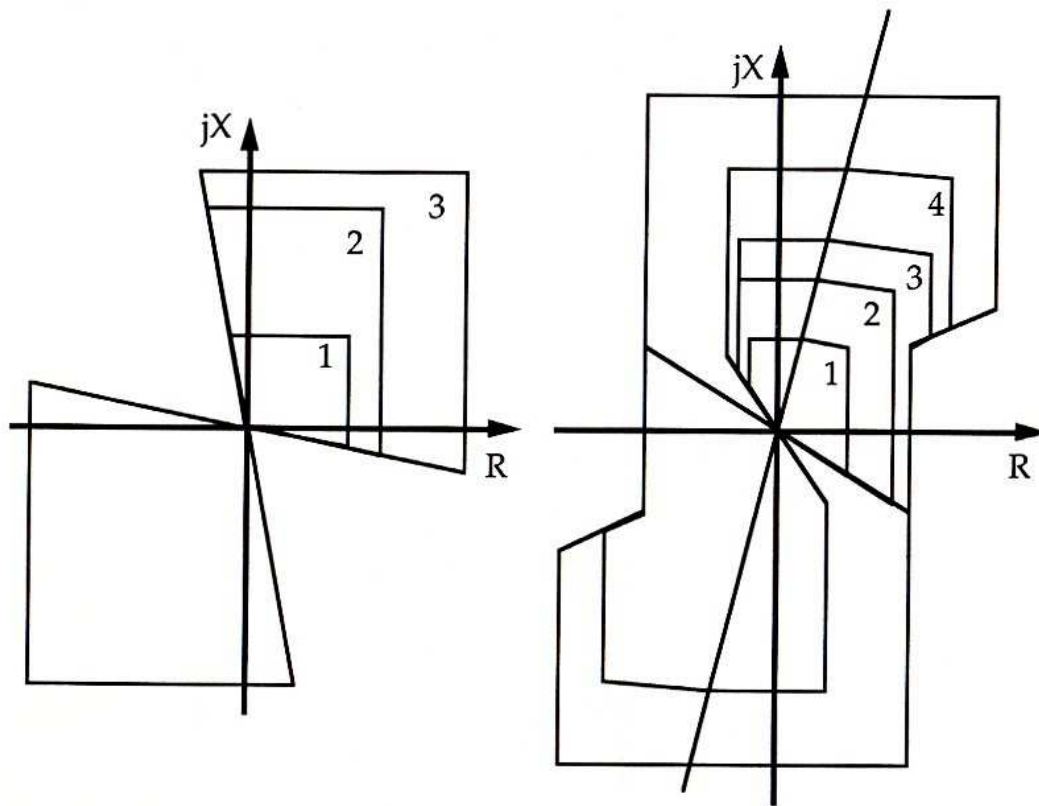
Joonistel 8.1.- 8.3. on toodud distantkaitsete toimimise piirkonnad XR tasapinnal. Suund A vastab liini nävttakistusele.



Joon. 8.1. Suunatoimeta takistusreele toimimise piirkond.



Joon. 8.2. Suunatoimega takistusrelee rakenduspiirkonnad (elektromehaanilised releed)..



8.3. Mikroprotsessor distantkaitse toimimispiirkonnad.

9 PIKIDIFERENTSIAALKAITSE

9.1 Hälbevool ja säte

Diferentsiaalkaitse on absoluutselt selektiivne viiteta kaitse. Diferentsiaalkaitset kasutatakse ainult põhikaitseks. Kaitse reageerib tunnussuuruse suurenemisele st on ülekaitse. Diferentsiaalkaitse on kõige täiuslikum kaitse. Diferentsiaalkaitse jaguneb piki- ja põikidiferentsiaalkaitseks.

Pikidiferentsiaalkaitse tunnussuuruseks on lihtsamal juhtumil kaitse objekti otste kompleksvoolude vahe moodul. Kaitseobjektiks võib olla: lühike liin, generaator, mootor või trafo. Vaatleme trafo diferentsiaalkaitset. Lihtsuse mõttes vaatleme trafot mille ülekande tegur on võrdne ühega. Lühist L toidavad mõlemad toiteallikad.

Siselühise korral on mõlema toiteallika voolud suunatud diferentsiaalkaitse voolutrafode suhtes kaitstava trafo suunas seega releed läbib voolutrafode sekundaarvoolude summa on võrdne nende kahekordse väärtusega ja rele rakendub. Välislühise korral trafo diferentsiaalkaitse voolutrafosid läbivad voolud on samasuunalised ja voolutrafode sekundaarvoolude summa relees on võrdne nulliga ja rele ei rakendu.

Tegelikult on vooluandurite magneetimiskõverad erinevad ja tekitab hälbevool, mis võib põhjustada kaitse rakendumise ka välislühiste korral. Diferentsiaalkaitse sätevool arvutatakse valemiga:

$$I_s = k_v I_h^{arv}, \text{ siin } k_v > 1. \quad (9.1)$$

Arvutuslik hälbevool arvutatakse valemiga:

$$I_h^{arv} = k_a k_{\ddot{u}} \varepsilon I_{\text{lühis, välis max}} \quad (9.2)$$

k_a – arvestab lühisvoolu aperioidilist komponenti.

$k_a = 2$, tavalise voolurelee puhul

$k_a = 1$, küllastustrafoga ja mikroprotsessor rele puhul

$k_{\ddot{u}}$ – voolutrafode ühetüübilisust arvestav tegur. Ühte tüüpi voolutrafode korral on teguri väärtus **0,5** ja eri tüüpi voolutrafode korral on teguri väärtus **1,0**. Hälbevool on taandatud magneetimisvoolude vahe ja ühe tüübiliste voolutrafode viga ei tohi ületada 50% ahk 0,5.

ε - voolutrafode viga. Voolutrafode **5P** korral $\varepsilon = 0,05$ ja voolutrafode **10P** korral $\varepsilon = 0,1$.

Mikroprotsessorkaitseid võivad reageerida ka keerulistele siirdeprotsessidele lühise algul, teised kaitseid mitte.

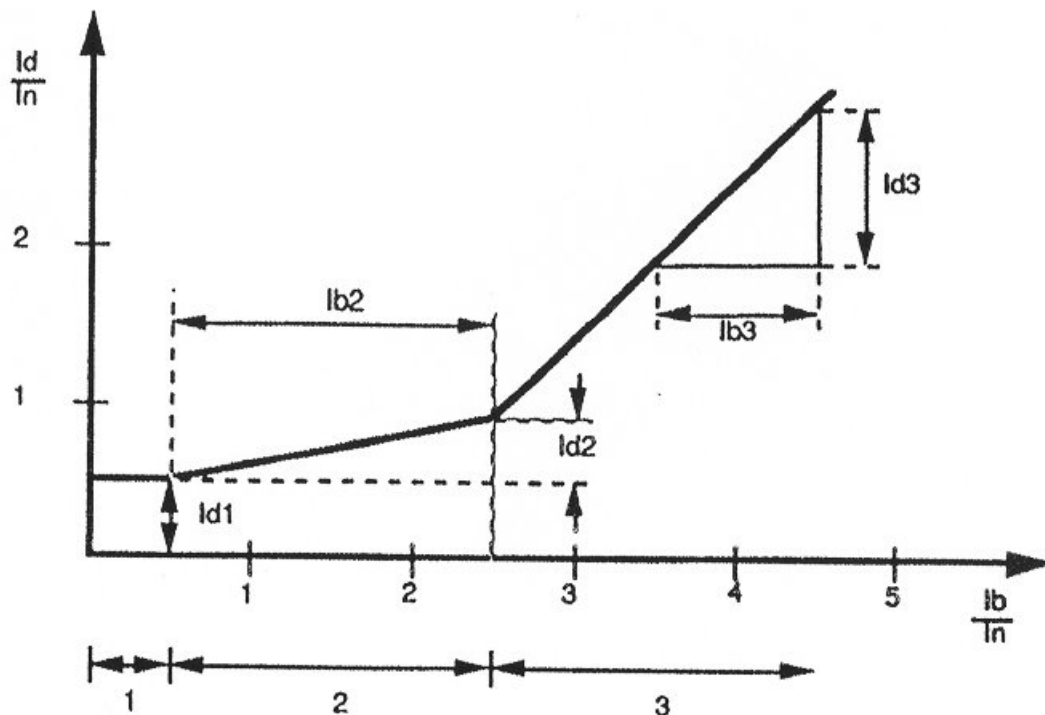
9.2. Hälbevoolu mõju vähendamine

Hälbevoolu mõju vähendamisel kaitse tundlikkus suureneb. Hälbevoolu vähendamiseks kasutatakse elektromehaaniliste releede korral:

Vahe küllastustrafod, mis lühisvoolu hälbevoolu aperioidiline komponent küllastab vahetrafo südramiku ja selle tõttu, esimeste lühisvoolu perioodide jooksul perioodiline komponent ei transformeeru. Selle tulemusena kaitse tundlikkus tõuseb kaks korda kuna hälbevool ja voolusäte väheneb kaks korda. See kõik toimub loomulikult kaitse toimimise kiiruse arvel, aeglustab kaitse rakendumist mõne sajandiku sekundi ulatuses. Mikroprotsessorkaitse tundlikkuse suurenemisel tema rakendumiskiirus ei vähene.

Sõltuva sättega diferentsiaalkaitse. Kaitse muudab ise oma sätet olenevalt välislühisvoolu suuruse muutumisele. See on esimene adaptiivreleekaitse ehk isekohastuv releekaitse ja üks esimesi isekohastuvaid automaatikaseadmeid üldse. Kuna välislühise minimaalse voolu juures on adaptiivsäte $1/3$, siis siselühise korral on adaptiivkaitse tundlikkus kolm korda suurem.

Enamik diferentsiaal mikroprotsessorkaitseid on sõltuva sättega (joonis 9.1)

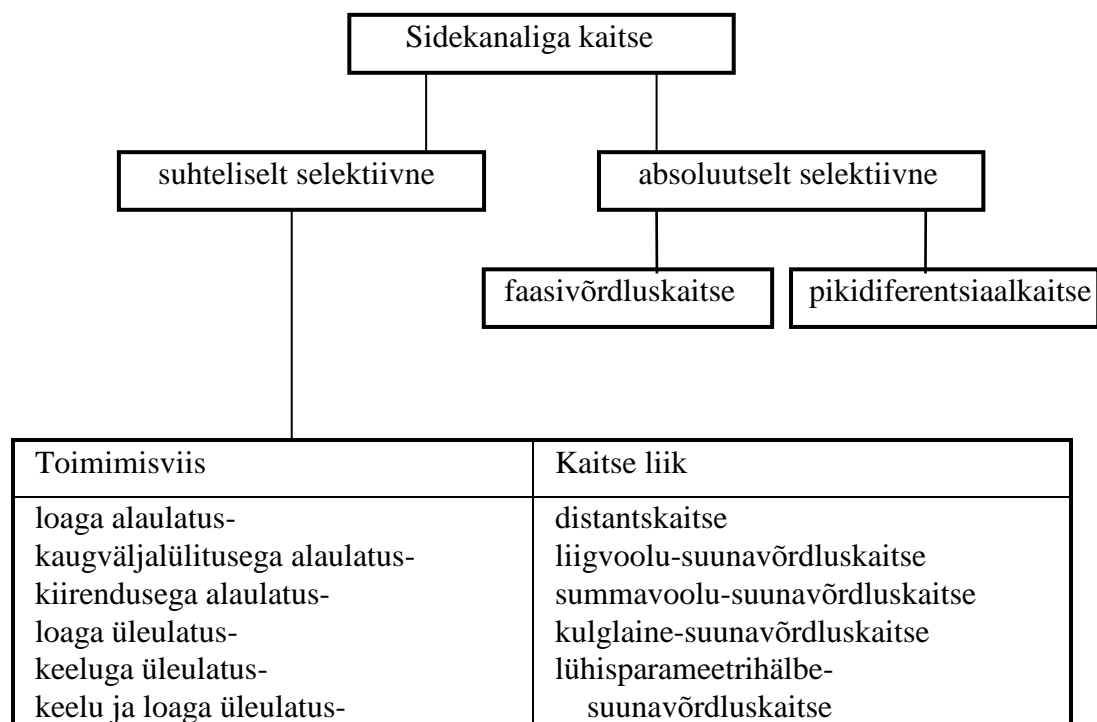


Joon. 9.1. Välislühise voolust sõltuva sättega diferentsiaalkaitse tunnusjoon.

10 SIDEKANALIGA KAITSE

10.1 Põhimõisteid

Sidekanaliga kaitse kasutab kaitseobjekti otste vahel sidekanalit. Kaitseobjektiks on reeglina kõrge- või ülikõrgepingeliin, vahel ka keskpingeliin. Reeglina võib kaitstavat liinil olla haruühendus. Sidekanaliga kaitsete liigitus on esitatud joonisel 10.1.



Joon. 10.1 Sidekanaliga kaitsete liigitus

Alaulatus- kaitse, tavaliselt distantskaitse) omadus, mille korral lühima ulatusega astme säte vastab kaitseobjektist lühemale kaitseulatusele.

Üleulatus- kaitse, tavaliselt distantskaitse) omadus, mille korral lühima ulatusega astme säte vastab kaitseobjektist pikemale kaitseulatusele.

Loaga kaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitse, millel kaugloa vastuvõtt võimaldab kohaliku kaitse rakendamise.

Keeluga kaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitse, millel kaugkeelu vastuvõtt keelab kohaliku kaitse rakendamise.

Kaugväljalülitusega alaulatuskaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitsesüsteem, millel kaitseobjekti igas otsas on alaulatuskaitse. Ühe otsa kaitse

rakendumine annab kohaliku väljalülituskäsu ja väljalülituskäsu sidekanalisse. Vastuvõetud kaugkäsk edastatakse võimsuslülitu(te)le, sõltumata kohalikust kaitsest. Joonis 10.2.

Kiirendusega alaulatuskaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitstesüsteem, millel kaitseobjekti igas otsas on alaulatuskaitse. Ühe otsa kaitse rakendumine annab kohaliku väljalülituskäsu ja loa sidekanalisse. Kaugloa vastuvõtt tagab kohaliku kaitse viiteta (täisdistantskaitse 2. Astme) üleulatuvusrakendumise.

Keeluga üleulatuskaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitstesüsteem, millel kaitseobjekti igas otsas on üleulatuskaitse. Tagalühise avastamisel antakse keeld sidekanalisse. Kaugkeelu vastuvõtt keelab kohaliku üleulatuskaitse rakendumise.

Keelu ja loaga üleulatuskaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitstesüsteem, millel kaitseobjekti igas otsas on üleulatuskaitse Sidekanalisse antakse pidev keeld, kuni ühe otsa üleulatuskaitse avastab lühise ja asendab keelu loaga. Kaugloa vastuvõtt lubab kohaliku kaitse rakendumise.

Loaga üleulatuskaitse- sidekanaliga, (tavaliselt distantskaitse) kaitstesüsteem, millel kaitseobjekti igas otsas on üleulatuskaitse. Kui ühe otsa üleulatuskaitse avastab lühise, annab see kaitse loa sidekanalisse. Kaugloa vastuvõtt lubab kohaliku üleulatuskaitse rakendumise.

Nagu nähtub jooniselt 10.1, jagunevad sidekanaliga kaitse, nagu kõik muudki kaitse, absoluutselt ja suhteliselt selektiivseiks. Suhteliselt selektiivse kaitse kõigi joonisel näidatud liikide ja nende toimimisviiside kombinatsioonid on võimalikud. Tavaliselt võimaldabki kaitse tarkvara kõigi toimimisviiside kasutamist. Kaitseliikidest on enim kasutusel distantskaitse.

Absoluutselt selektiivne sidekanaliga kaitse edastab sidekanali kaudu kaitseobjekti igast otsast elektrilisi suurusid (pidev- või numbervormis) ja võrdleb neid kaitseobjekti teis(t)e otsa(de) suurusetega. Teabevahetus toimub objekti otste kaitse mõõtetasemel vahel.

Suhteliselt selektiivne sidekanaliga kaitse edastab sidekanali kaudu kaitse rakendumisloa või võimsuslülitu(te) kaugväljalülituskäsu kaitseobjekti siserikke korral või kaitse rakendumiskeelu välisrikke korral. Teabevahetus toimub loa või keeluga kaitse puhul objekti otste kaitse loogikaosade vahel. Kaugel paiknevast kaitsest saabuv võimsuslülitu(te) väljalülituskäsk täidetakse sõltumata kohaliku kaitse seisust.

Absoluutselt selektiivsed on *faasivõrdluskaitse* ja *pikidiferentsiaalkaitse*. Neist esimene võrdleb kaitseobjekti iga otsa voolufaase ja teine – voolumooduleid või voolumooduleid ja -faase. Eestis oli laialdaselt kasutusel kõrgsagedus-poolperiood-faasivõrdluskaitse, mida on seni nimetatud faasidiferentsiaalkaitseks ja edaspidi oleks õigem nimetada lihtsalt faasivõrdluskaitseks.

Kasutatava sidekanali järgi liigitatakse kaitse:

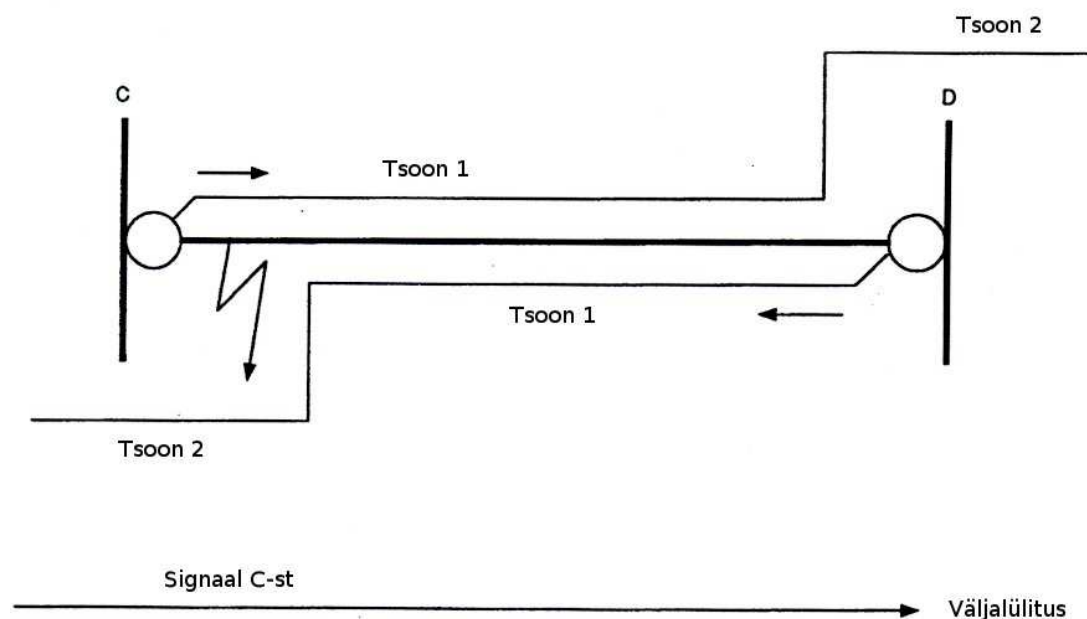
- *Abijuhtkaitse* sidekanaliks kasutatakse elektrijuhti (traat, juhe, kaabel). See on tavaliselt võrgusageduskanal. Näiteks ABB kõigi pingestmete liinide pikidiferentsiaalkaitse RADSL nõuded abijuhtsidekanalile: pikkus kuni 80 km, ühe

soone lubatav resistants 900Ω , põikkapatsitants $1\text{--}2 \mu\text{F}$ (olenevalt vajalikust tundlikkusest).

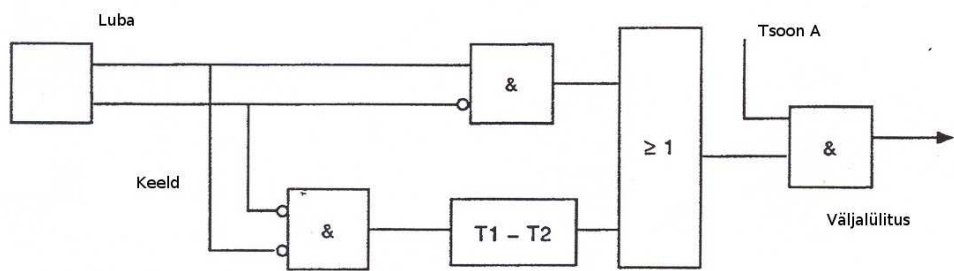
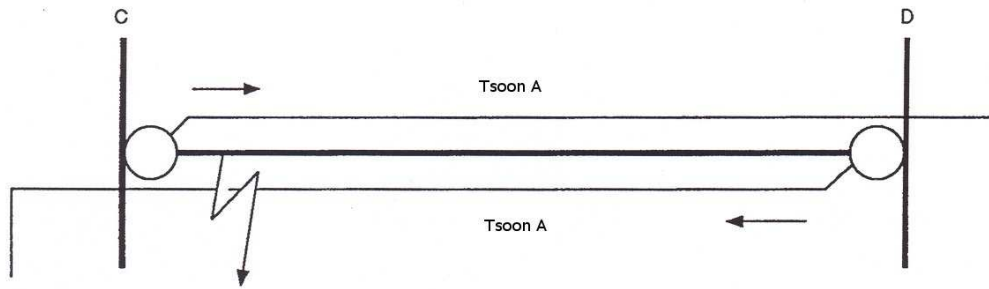
- *Kõrgsageduskaitse* sidekanalina kasutatakse kõrgsageduskanalit sagedusega $10\text{--}490 \text{ kHz}$. On praegu veel maailmas valdav sidekanal kõrge- ja ülikõrgepingeliinide kaitse tarvis. Tulevikus loovutab esikoha valgussidekanalile.
- *Mikrolainekaitse* sidekanaliks kasutatakse mikrolainekanalit (ka radioreleeliiniks nimetatud) sagedusega $0,15\text{--}20 \text{ GHz}$. Eestis ei kasutata.
- *Valgusjuhtkaitse* sidekanaliks kasutatakse valgusjuhti. Täiesti häirekindel kanal. Tema osatähtsus suureneb kogu aeg. Eestis veel ei kasutata.

Summavool releekaitse terminina tähendab faasivoolude summat, seega kolmekordset nulljärgnevusvoolu. Summavooluks nimetatakse seda ka saksa ja rootsi keeles.

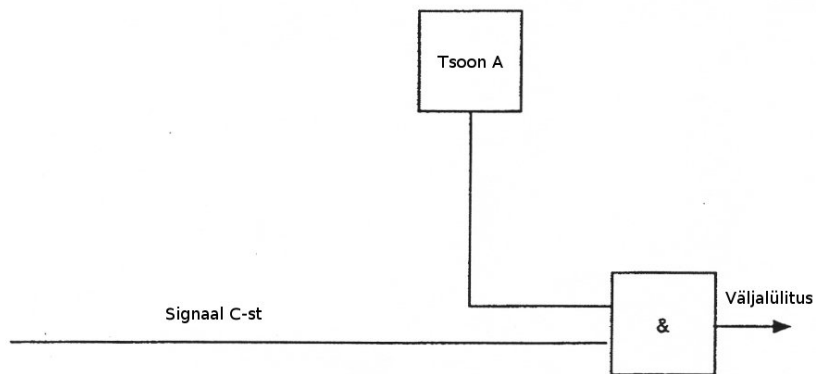
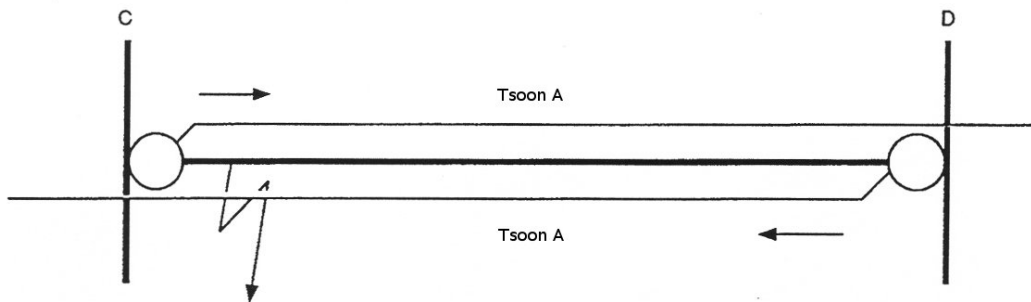
peegelduse valikuvõimalusega.



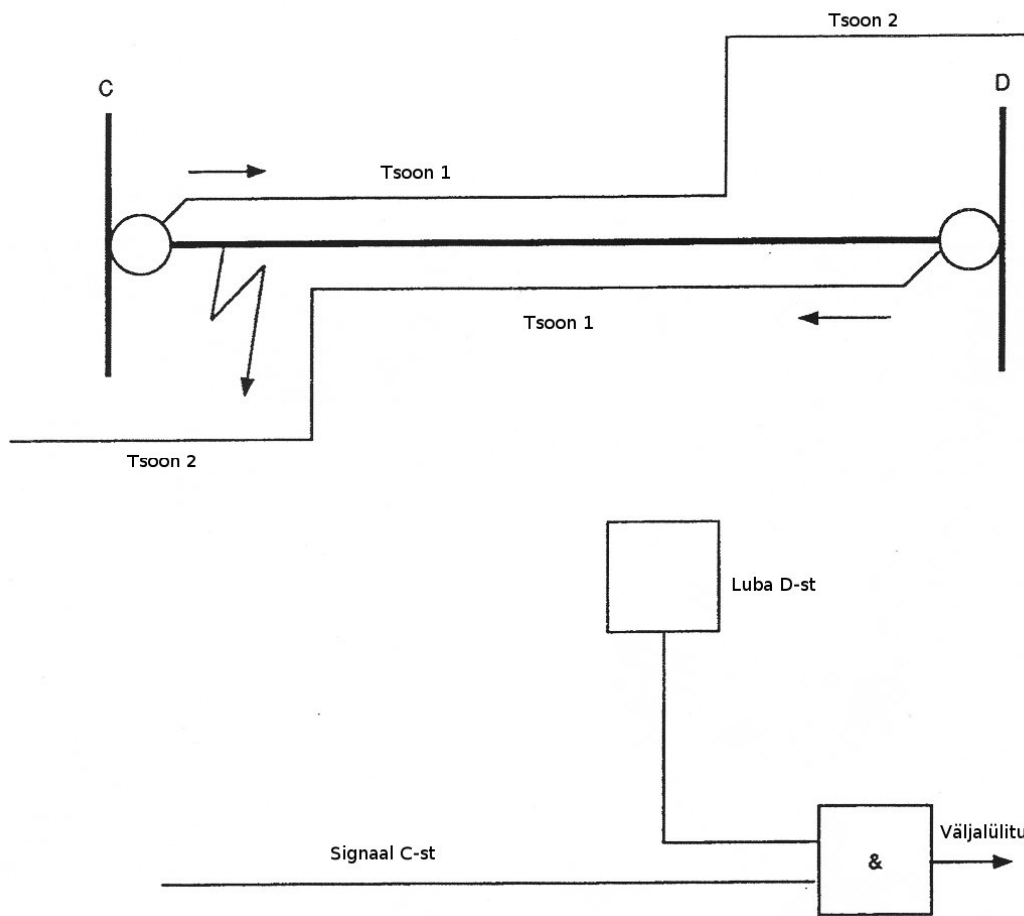
Joon. 10.2. Kaugväljalülitusega alaulatusega distantskaitse.



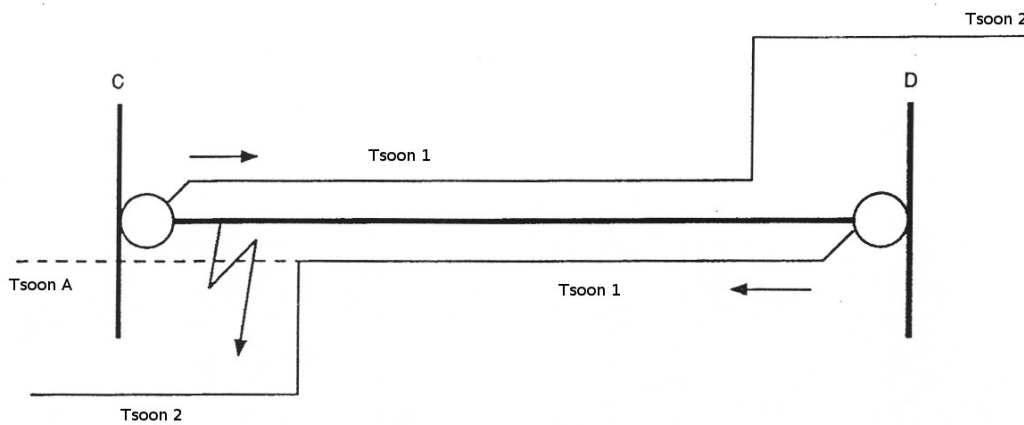
Joon. 10. 3. Keeldu ja loaga üleulatuskaitse.



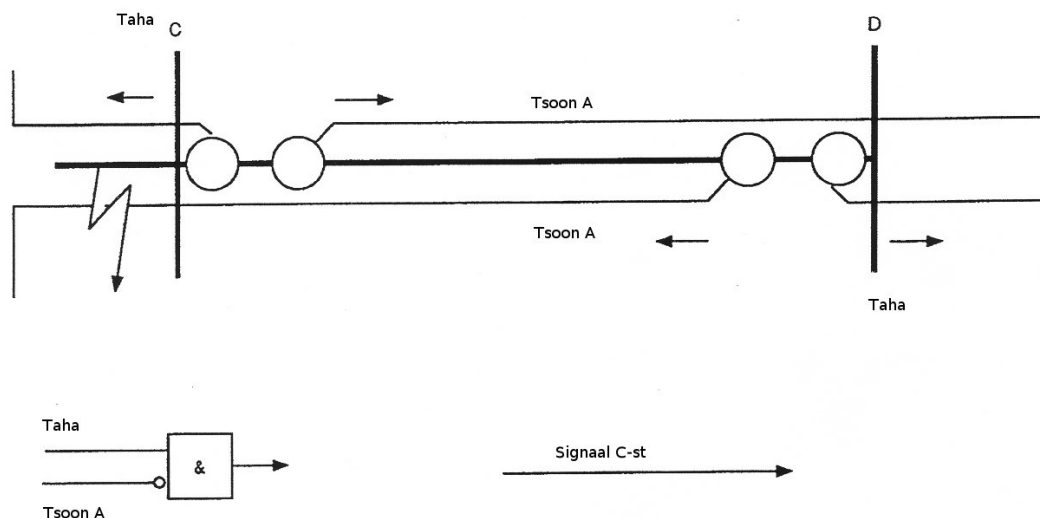
Joon. 10. 4. Loaga üleulatuskaitse.



Joon 10.4. Loaga alaulatuskaitse.



Joon. 10. 5. Alaulatuskaitse.



Joon. 10.6. Keeluga üleulatuskaitse.

Faasivõrdluskaitse

Tunnussuuruseks on 1- faasilise voolu faaside vahe liini otstes. Tavaliselt

$$I_a = I_1 + kI_2$$

Sidekanal on kallis (traatside) ja kasutatakse kõrgsagedussidekanalit (sidekanaliks on faasijuht). Liini mõlemas otsas asuvas poolkomplektis on saatja ja vastuvõtja. Normaaltalitusel saatjad ei tööta, saatja käivitub automaatselt lühiste tunnuste, näiteks lühiajaline vastujärgnevusvool, ilmnemisel. Välislühise korral käivituvad liini mõlema otsa saatjad. Saatja töötab igal positiivsel poolperioodil. Kui lühis on samas faasis kus on sidekanal ja kui lühise kohal on suur sumbuvus ja signaal liini teise otsa ei levi siis kaitse rakendub ikkagi.

Säte valik on:

$$\delta_s = k_v \delta_\Sigma,$$

kus k_v – välistustegur, välistustegur on suurem kui 1.

δ_Σ - võimalike faasivigade summa.

Vigade allikad:

1. Vooluandurite ja voolufiltrite faasiviga.
2. Kõikidel liinidel on maa suhtes mahtuvuslik ristjuhtivus. Seega muutub voolu faas.
3. Kaugsaatjast signaali edastamise kiirus teise vastuvõtjasse põhjustab faasivea.

Näiteks. 1 sekundi jooksul signaal levib 300 000 km ja põhjustab vooluvea 50 Hz 360°. Meid huvitab viga 100 km kohta. 100 km puhul valguse kiirusest tingitud viga on:

$$\delta = (100 \cdot 50 \cdot 360^\circ) / 300\,000 = 6 \text{ [}^\circ / 100\text{km]}$$

Tavaliselt on säte:

$$\delta_s = 80^\circ \dots 120^\circ.$$

Teisi sidekanaliga kaitseid

Kulglainekaitse mõõdab voolu ja pinge kulglainete amplituudi ja/või polaarsust. Kulglaineid põhjustab elektrivõrgu rikke tekkimine.

Lühisparameetrihällbekaitse mõõdab või võrdleb kaitseobjekti lühisparameetrite hälvet, s.o voolu, pinge vm lühiseelsete ja lühiseagsete hetkväärtuste vahet.

Kaitse alaulatuse ja üleulatuse mõisteid on selgitatud alajaotises 3.4.

Loaga kaitse võimaldab kaugloa vastuvõtt kohaliku kaitse rakendamise. Keeluga kaitse keelab kaugkeelu vastuvõtt kohaliku kaitse rakendamise.

Loaga alaulatuskaitse puhul on kaitseobjekti igas otsas alaulatuskaitse. Ühe otsa kaitse annab rakendamisel kohaliku väljalülituskäsu ja loa sidekanalisse. Kaugloa vastuvõtt lubab kohaliku kaitse viiteta üleulatusrakendamise. See kaitse võib olla distantskaitse käivituseaste või eraldi viiteta üleulatus- (sh ka alapinge- või liigvoolu-) kaitse.

Kaugväljalülitusega alaulatuskaitse puhul on kaitseobjekti igas otsas alaulatuskaitse. Ühe otsa kaitse annab rakendamisel koht- ja kaugväljalülituskäsu.

Kiirendusega alaulatuskaitse puhul on kaitseobjekti igas otsas alaulatuskaitse. Ühe otsa kaitse annab rakendamisel kohaliku väljalülituskäsu ja loa sidekanalisse. Kaugloa vastuvõtt tagab kohaliku kaitse viiteta üleulatusrakendamise.

Loaga üleulatuskaitse puhul on kaitseobjekti igas otsas üleulatuskaitse. Kui ühe otsa üleulatuskaitse tuvastab lühise, annab see loa sidekanalisse. Kaugloa vastuvõtt lubab kohaliku üleulatuskaitse rakendamise.

Keeluga üleulatuskaitse puhul on kaitseobjekti igas otsas üleulatuskaitse. Tagalühise tuvastamisel annab kaitse keelu sidekanalisse. Kaugkeelu vastuvõtt keelab kohaliku üleulatuskaitse rakendamise.

Keelu ja loaga üleulatuskaitse puhul on kaitseobjekti igas otsas üleulatuskaitse. Sidekanalisse antakse pidev keeld, kuni ühe otsa üleulatuskaitse tuvastab lühise ja asendab keelu loaga. Kaugloa vastuvõtt lubab kohaliku kaitse rakendamise. Märkus.

Luba asendab keelu hetkeliselt või reguleeritava ajavahemiku (tavaliselt 100–200 ms) möödumisel.

Loaga üleulatuskaitse korral on võimalik, et kaitseobjekti ühe otsa kaitse ei saa rakenduda, kuna puudub luba objekti teisest otsast, kus kaitse lühisetuvastuselement liiga nõrga toite tulemusena ei rakendu ega saada luba. Sel puhul kasutatakse *loa peegeldust nõrga toitega otsast*. Määratletud kohalike tingimuste täitmise korral tagab kaugloa vastuvõtt nõrga toitega otsas loa tagasisaatmise tugeva toitega otsa, lubamaks seal kaitse rakendumise.

Tavaliselt toodetakse suhteliselt selektiivsed sidekanaliga kaitseeadmed toimimisviisilt mitmevariandilisena: nii loa kui keelu, nii üle- kui alaulatuse ja loa

11 SÜSTEEMI ELEMENTIDE KAITSE

11.1 Trafo kaitse

Vigastused ja anormaaltalitlused

Trafodes võivad esineda järgmised vigastused ja anormaaltalitlused:

- 1) Faasidevaheline lühis;
- 2) Ühe või kahe faasi maaga lühis;
- 3) Keerdude lühis - ühe ja sama trafo mähise keerdude vaheline lühis;
- 4) Südramiku pleki-isolatsiooni vigastus trafol;
- 5) Trafo neutraali isolatsiooni vigastus - mõeldakse trafo mähist, mis talitleb maandatud neutraaliga (110 kV võrgud). Trafo neutraali sisseviik tehakse 35 kV isolatsiooni klassiga. Maaga lühisvoolude vähendamiseks võivad mõned trafod talitleda (110 kV võrgus) isoleeritud neutraaliga ja maalühise korral jääb toitvaks elemendiks ka isoleeritud neutraal - neutraalile tuleb peale faasipinge (110 kV võrgus 63,5 kV) ja 35 kV ettenähtud neutraali isolatsioon lüüakse läbi;
- 6) Trafo paagi mehaaniline vigastus - õlikaotus;

Trafo kõige sagedaseim anormaaltalitus on:

- 1) Trafo ülekoormus;
- 2) Välislühise liigvoolud;
- 3) Õlitaseme alanemine paagis ilma paagi vigastuseta.

Trafo normaalsed iseärasused.

- 1) Trafo sisselülitamisel esineb magneetimisvoolu tõuge, samasugune magneetimisvoolu tõuge esineb ka lähedase lühise väljalülitamisel, üldiselt trafo pingestamisel. Magneetimisvoolu hetkväärtus:

$$i_m^{\max} \leq 10 I_N$$

Magneetimisvool sumbub kiiresti: **0,3 ,...,0,5 s** pärast $i_m \leq I_N$.

- 2) Trafo ülekanne: $n_T = U_N^I / U_N^{II}$
- 3) Erinevates mähistes tekib voolu ja pinge faaside erinevus. Seda iseloomustab trafo lülitusgrupp:

$$I_T^{II} = n_T I_T$$

siin m - lülitusgrupi järjekorranumber $m = 0, \dots, 11$.

Trafo põhikaitseteks on:

- pikkidiferentsiaalkaitse,
- gaasikaitse

- rõhukaitse.

Trafo reservkaitseks on :

- voolukaitse, väikse võimsusega trafode korral voolukaitse trafo põhikaitseks.

Voolukaitse.

Voolukaitse on väikse võimsusega trafode korral trafo põhikaitseks. Suure võimsusega trafodel on ta trafo reservkaitseks ja ülekoormuskaitseks.

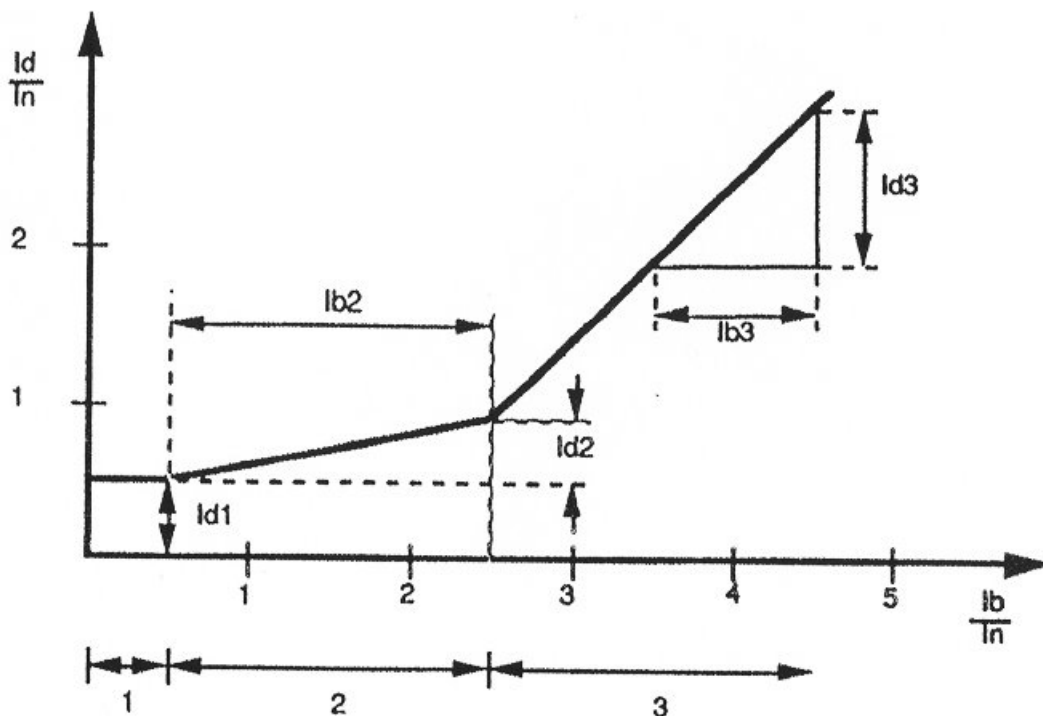
Tunnusuurusteks võivad olla:

- 1) Faasivool;
- 2) I_2 , sümmeetrilistel talitlustel $I_2 = 0$, seega vastujärgnevusvool tekib vaid asümmeetrilistel talitlustel;
- 3) $3I_0$, nulljärgnevusvool.

Vajadusel võib voolukaitse reageerida ka voolu suunale ehk kompleksvoolule.

Vajaduse korral lisatakse pingeblokeering st samaaegselt voolu (lühisvoolu) suurenemisega kontrollitakse faasi- või liinipinge vähenemist või/ja vastujärgnevuspinge suurenemist (sümmeetrilisel talitlusel vastujärgnevuspinge võrdub nulliga).

Joonisel 11.1 on toodud trafo voolust sõltuva sättega diferentsiaalkaitse sätte karakteristik.



Joon. 11.1 Trafo diferentsiaalkaitse tunnusjoon.

Gaasikaitse.

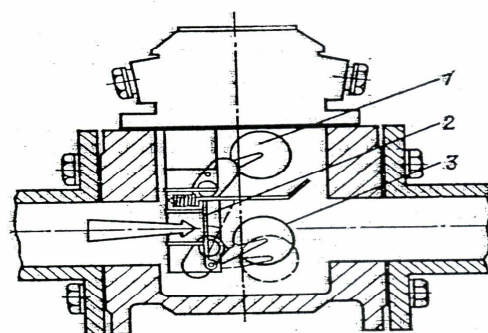
Ainus mitteelektrilise tunnussuurusega kaitse, mida kasutatakse trafo põhikaitsena. Mujal maailmas tuntakse seda kaitset Buchholz'I kaitsena. Gaasikaittsel on kaks tunnussuurst:

- 1) I - astme tunnussuuruseks on : õli liikumiskiirus reles;
- 2) II - astme tunnussuuruseks on gaasihulk reles. Selle astme rakendamine annab signaali.

Gaasikaitse sätted:

- 1) I - aste: 1 = 0,5 m/s - õli loomulik tsirkulatsioon, mis on tingitud õli soojenemisest trafos. 2 = 1 , , 2 m/s - õli sundtsirkulatsioon, mis viitab lühisele trafos.
- 2) II - aste: 200,...,400 cm³.

Trafo kaane kalle peaks olema umbes 1,5%, et elektrikaare toimel trafoõli lagunemisel tekkivad gaasid läbiksid gaasireleed. Gaasirelee paikneb trafopaagi ja õlipaagi vahelises torus.



Joon. 11.2. Gaasikaitse

11.2. Sünkroongeneraator

Generaatori vigastuste põhjuseks on üldiselt isolatsiooni vananemine, niiskumine ja isolatsiooni defektid. Põhjusteks võivad olla ka ülepinged, mehaanilised vigastused (mis on tavaliselt põhjustatud mähiste ja magnetahela vibratsioonidest).

Generaatori rikked ja anormaalitalitus

Staatori mähise põhilised rikked:

1. Staatori faaside vaheline lühis, nii mähises kui väljaspool st generaatori lattide süsteemis.
2. Staatori mähise maalühis. Faasi lühis kerega. Tavaliselt talitlevad generaatorid isoleeritud neutraaliga talitluses. Suur maauhendus vool võib vigastada staatori magnetahela südamiku plekide isolatsiooni. Selle vältimiseks on seatud empiiriline piir, maauhendusvoolu piirväärtus, mille puhul loetakse võimalikuks südamiku pleki isolatsiooni rikkumine.

$$I_{\text{maa}} = 3I_0 < 5A \text{ (töös maksimaalselt 2 tundi)}$$

$$3I_0 \geq 5A \text{ (generaator välja)}$$

Generaatori staatori elektrotehnilisest terasest südamiku remont on pikaajaline ja kallis.

3. Staatori mähise keerdude vaheline lühis. (Ühe keeru pinge on tavaliselt 1-2 kV) Tehnoloogilistel põhjustel staatori mähis generaatori teatud võimsusest alates tehakse kahe rööpharuna, seega esinevad järgmised lühised. Keerdude vaheline lühis läheb tihti üle faasidevaheliseks või kere lühiseks.

Staatori anormaalitalitus:

1. Staatori mähise ülekoormus (välislühised ja talituslik ülekoormus).
2. Mittesümmeetriline koormus (mittesümmeetrilised välislühised). Tekkib vastujärgnevusvool, mis põhjustab staatori magnetvoo, mis pöörleb pärijärgnevus magnetvooga vastassuunas. Rootor pöörleb sünkronismis staatori pärijärgnevus magnetvooga ja kadusid ei ole. Rootori südamikus puuduvad rauas kaod ja rootori südamiku võib valmistada ühest tükist. Seega I_2 tekkimisel vastujärgnevus magnetvoog pöörleb rootori suhtes kahekordse kiirusega ja põhjustab rootori südamikus rauas kadusid. Lubatud on:

$$I_2 \leq 0,06 I_N$$

3. Staatori mähise ülepinge (järsk koormuse ära kukkumine). Ergutus vool on nimiväärtusega ja tühijooksul generaatori jaoks on see liiga suur.
4. Asünkroontalitus. Tavaliselt põhjustab selle sünkroonmasina ergutuse kaotus ja masin muutub asünkroonmasinaks. Kuna asünkroonmasin tarbib reaktiivvõimsust, siis on selline talitus süsteemile kahjulik, samuti selles talitluses kuumeneb rootor.

Rootori rikked.

Rootori mähist toidetakse tavaliselt pingega 300-500 V seega rootori mähise isolatsioon omab piisavalt suurt varu võrreldes staatori mähisega. Kuid kui arvestada millised mehaanilised jõud mõjuvad rootori mähisel, mis on põhjustatud rootori suurest pöörlemiskiirusest (1500-3000 p/min) siis võivad esineda isolatsiooni rikked ja rootori mähise lühised korpusega ühes või kahes punktis. Rootori mähise lühis ühes punktis ei ole ohtlik kuid sellega suureneb tõenäosus, et toimub lühis ka teises punktis, mis on generaatorile juba ohtlik.

1. Rootori mähise kereühendus teine punktis.
2. Rootorimähise ülekoormus.

Generaatori releekaitse.

Pikki diferentsiaalkaitse

Keerdudevahelise lühise kaitse. (põiki diferentsiaalkaitse).

Staatorimähise kereühenduse kaitse.(nulljärgnevuskaitse).

Ülekoormuskaitse.

Voolude ebasümmeetria (vastujärgnevus liigvoolukaitse).

Rootori kereühendus.

Rootori ülekoormus.(pingerelee).

Staatori kaitse

Pikki diferentsiaal kaitse: Faaside vahelise lühise kaitse.

Kaitse säte arvutatakse valemiga:

$$I_{säte} > I_{hälve}$$

$$I_{hälve} = k_a k_{ü} \varepsilon I_{välis, max}$$

Välüstegur valitakse vahemikus 1,3 – 1,5.

Pikki diferentsiaal kaitse lülitab generaatori välja ja lülitab sisse väljakustutus automaatika.

Rootori releekaitse

Rootori kereühenduskaitse:

Rootori ülekoormuskaitse;

Kaitse toimib põhiliselt ergutuse forsseeringu ajal.

Alalisvoolu erguti korral pingerelee ja vahelduvvoolu generaatori korral liigvoolukaitse AC poolel.

Üldiselt on lubatud kahekordne rootori nimivool

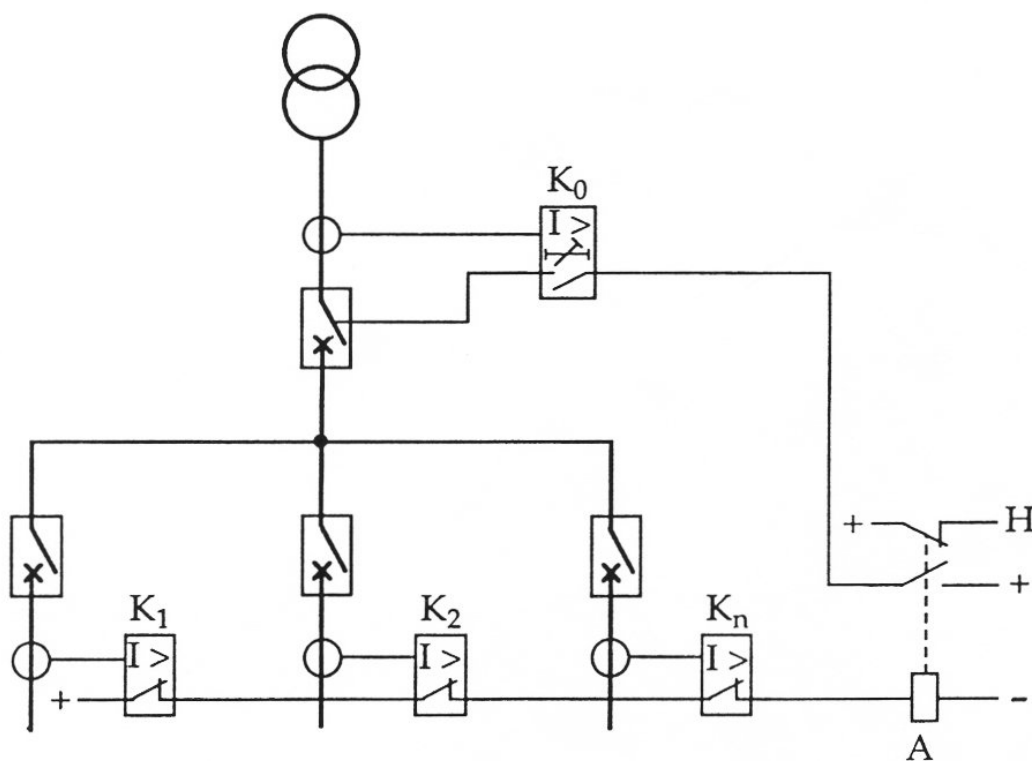
11.3 Mootor

Mootori kaitse on analoogne generaatori kaitsega.

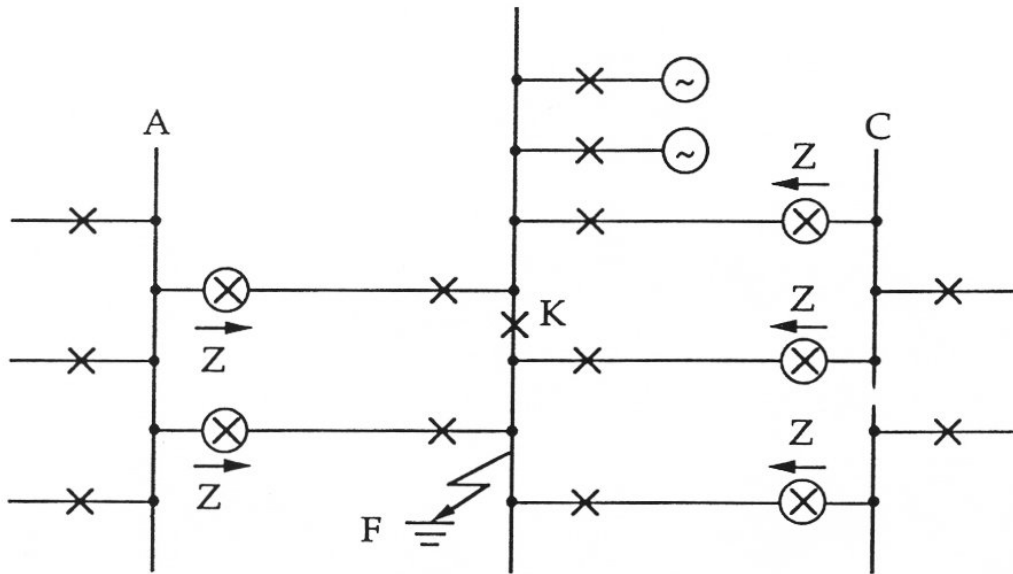
11.4 Lattide kaitse

Alajaamade ja jaotlate latid on elektrisüsteemi sõlmpunktideks ja neil esinevad lühised on lubatavad vaid lühiajaliselt ning lattide kaitseks kasutatakse:

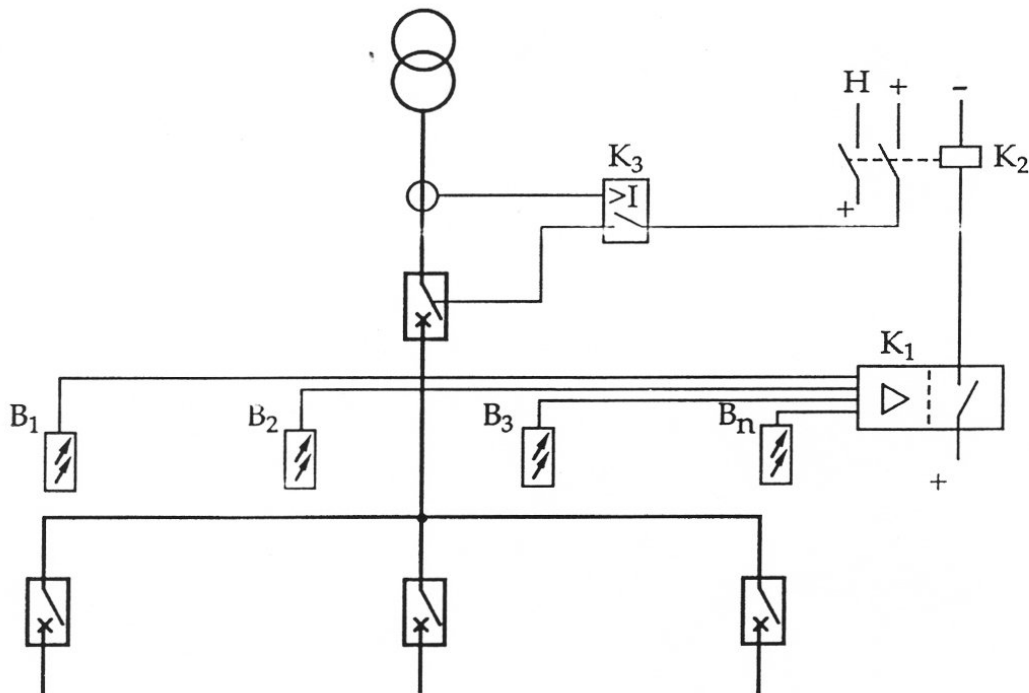
- Liigvoolukaitset (lihtsaimal juhul) Joonis 11.1.
- Distantkaitset (täiuslikumal juhul). Joonis 11.2.
- Valguskaitse (elektrikaarekaitse). Joonis 11.3.
- Pikidiferentsiaalkaitse Joonis 11.4.



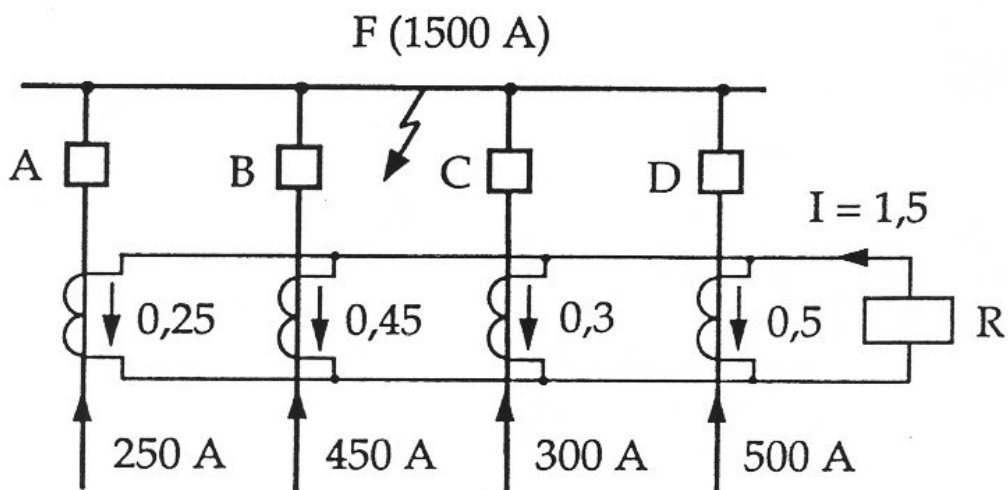
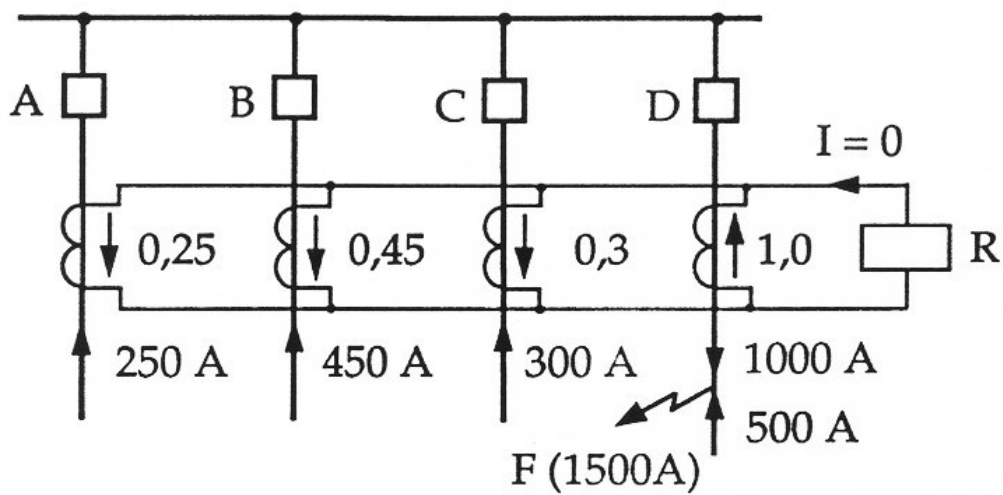
Joon. 11.1. Liigvoolukaitsega latikaitse.



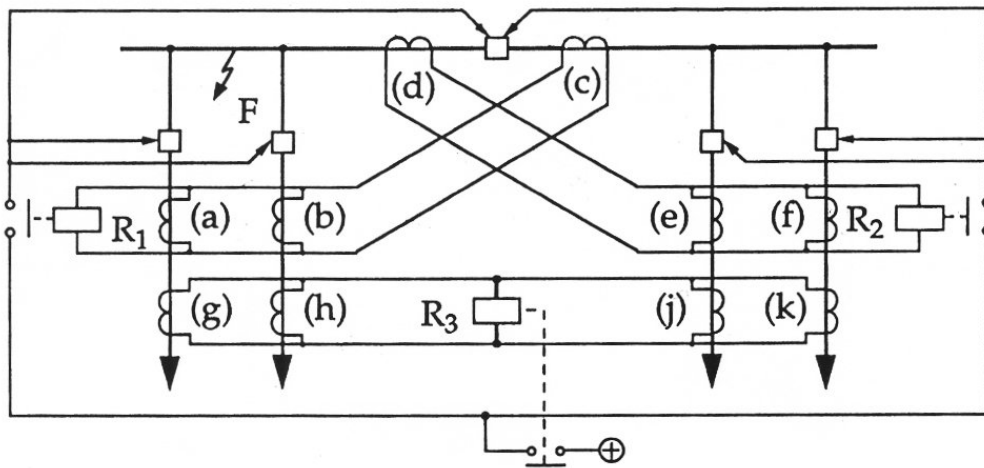
Joonis 11.2. Distantkaitsega latikaitse.



Joonis 11.3. Elektriikaitsega latikaitse.



Joon. 11. 4. Lattide diferentsiaalkaitse.



Joon. 11.5. Kahe sektsioonilise lattide süsteemi diferentsiaalkaitse.

12 SÜSTEEMIKAITSE

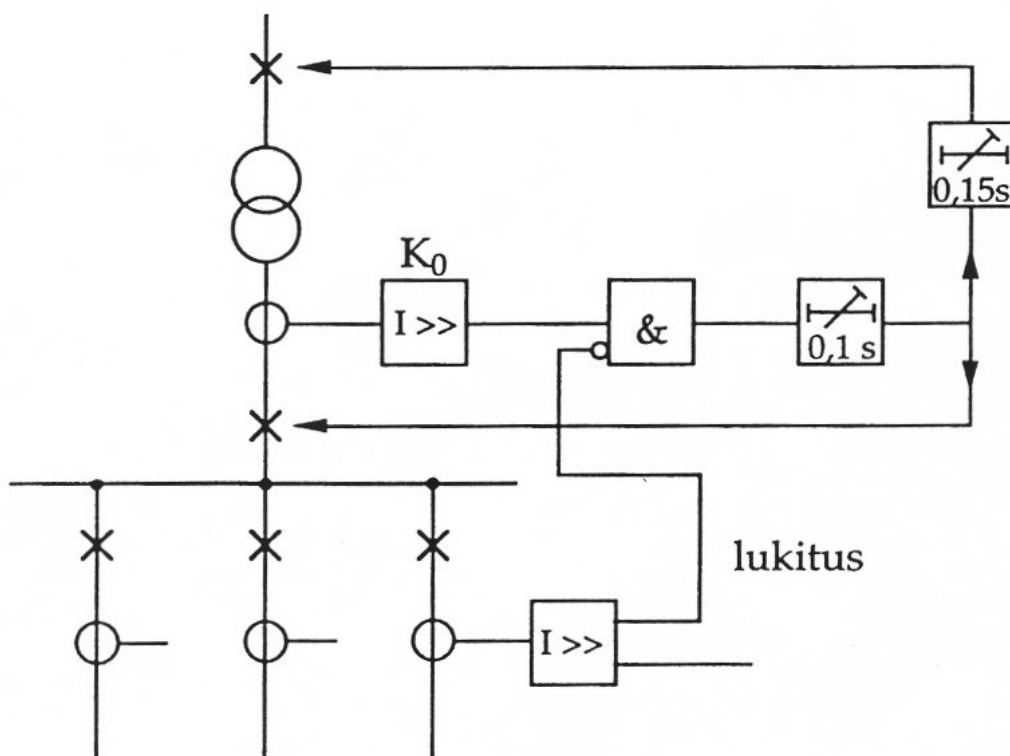
12.1 Võimsuslüli tõeekaitse

Võimsuslüli ja selle ajam on mehaaniliselt keerukad mehhanismid ja vaatamata sellele, et pidevalt kontrollitakse võimsuslüli talitusvalmidust on oluline kindlustada elektrisüsteemisüsteemi kaitse ka võimsuslüli tõe korral.

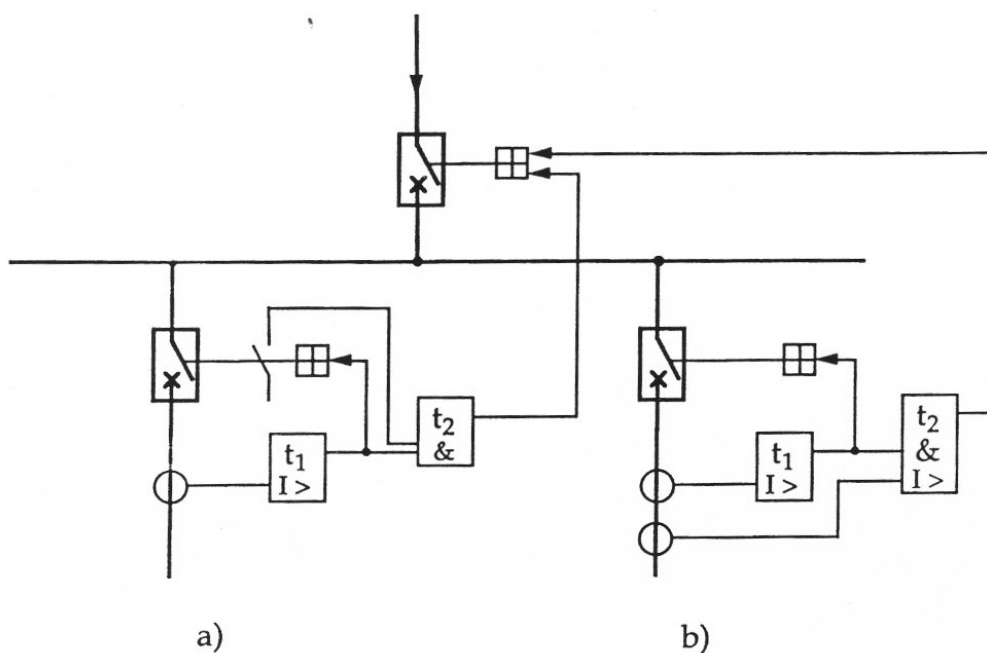
Võimsuslüli tõeekaitse on mõeldud selleks puhuks kui releekaitse annab käsu võimsuslüli väljalülitada aga võimsuslüli jääb suletuks. Sel juhul lühis lülitatakse välja fiidri teise otsa reservkaitse poolt, aga see toimub liiga aeglaselt ja ka tundlikkus pole nõutaval tasemel. Võimsuslüli tõeekaitse toimib kiiremini kui fiidri teise otsa reservkaitse (kaitse teine aste), kuigi võimsuslüli tõeekaitse on viitkaitse.

Vastutusrikkad jaotusseadmed (kogumislaidid) varustatakse võimsuslülitite tõeekaitsega.

Ebasoovitav on võimsuslüli tõeekaitse ja lattidekaitse väärrakendumine, seepärast rakendatakse mitmeid abinõusid, mis vähendavad mõlema kaitse väärrakendumise tõenäosust. Võimsuslüli tõeekaitse ja lattidekaitse on ühised väljalülitusahelad. Võimsuslüli tõeekaitse võimalikud skeemid on toodud joonistel 12.1 ja 12.2.



Joon. 12. 1. Võimsuslüli tõeekaitse koos toitva fiidri kaitsega.



Joon. 12.2 Võimsuslüüti tõrkekaitse.

12.2 Koormusvähenduskaitse

Koormusvähenduskaitse (süsteemikaitse) ülesandeks on süsteemi koormuse vähendamine järsu võimsusvajaku korral süsteemis. Aktiivvõimsuse puudujäägi korral (nt genereeriva võimsuse väljalülitumisel ebapiisava pöörleva reservi olemasolul) langeb kogu sünkroontööpiirkonnas sagedus. Reaktiiv- ja aktiivvõimsusevajak põhjustab lokaalse pingelanguse ja vastavalt sellele on kaks koormusvähenduskaitset:

- alasedus-koormusvähenduskaitse
- alapinge-koormusvähenduskaitse

Esimese kaitse kaitseobjektiks on elektrisüsteem tervikuna või süsteemist eraldunud osa (sünkroonpiirkond), teise - süsteemi osa võimsusvajaku piirkonnas. Mõlemad kaitset on paljuastmelised st astmed on erinevate sagedus-, pinge- ja ajasätetega. Tavaliselt hõlmavad mõlemad kaitset ka koormustaastusautomaadi, mis sageduse ja pinge normaalväärtuse taastumisel lülitavad koormuse vastavalt etteantud ajaprogrammile taas sisse, kontrollides samas pidevalt süsteemi sagedust ja pinget. Süsteemi sageduse või süsteemi osa pinge normaalväärtuse taastamiseks väljalülitatava koormuse suurus määratakse sageduse ja pinge koormustundlikkuste alusel, mis saadakse süsteemi staatilistest koormuskarakteristikuist.

Elektrisüsteemi staatilised koormuskarakteristikud. Elektrisüsteemi püsitalitlusel on aktiivvõimsuse P ja reaktiivvõimsuse Q tarbimine nii pingest U kui sagedusest f . Karakteristikuid $P(U,f)$ ja $Q(U,f)$ nimetatakse süsteemi staatilisteks

koormuskarakteristikuteks. Pinge karakteristikud $P(U)$ ja $Q(U)$ määratakse konstantsel sagedusel ja sageduskarakteristikud $P(f)$ ja $Q(f)$ konstantsel pingel. Vastavad karakteristikud on toodud joonistel 11.1 ja 11.2. Antud talitluspunktis (nt pingel U_0 ja sagedusel f_0) määratakse nende karakteristikute tõusud, mis iseloomustavadki koormuse pinge- ja sagedustundlikkust.

Tavaliselt on pinge aktiivkoormustundlikkus oluliselt väiksem reaktiivkoormuse omast ja sageduse aktiivkoormustundlikkus oluliselt suurem reaktiivvõimsuse omast.

Alasagedus-koormusvähenduskaitse ülesandeks on süsteemi kogu pöörleva reservi aktiveerimise järel süsteemi koormuse osaline väljalülitamine sageduse järsu languse korral, taastamaks sageduse normaalväärtus.

Kaitse peab efektiivselt toimima sageduse langemisel nii kogu süsteemis kui tema osadeks jaotumise korral. Seetõttu paigaldatakse kaitse paljudesse süsteemi alajaamadesse ja on mitmeastmeline. Kaitse peab taastama süsteemi sageduse tasemel 49,0 Hz (Läänes 49,9 Hz).

Eestis on kaitsel kaks põhiastet:

1. Sagedussätteid 48,8-47,2 Hz, alaastmed sammuga 0,2 Hz, ajasätteid -0,5 s
- 2.1 Sagedussätteid ja väljalülitatavad fiidrid on samad, mis 1. põhiastmel, ajasätteid 30-60 s sammuga 5 s.
- 2.2 Sagedussätteid 49,1 Hz, ajasätteid 10-25 s sammuga 5 s.

Eesti elektrisüsteem eraldub Venemaa elektrisüsteemist sageduse langemisel 47,0 Hz ja sageduse langemisel alla 47,0-46,5 Hz eralduvad süsteemist osa elektri jaamu, et säilitada omatarbeseadmete talitlus (Narva 1-3 jk, Iru Kohtla-Järve ja Ahtme).

Eestis peab umbes 55% (Ignalina TEJ suure võimsuse tõttu) koormusest olema vaadeldava kaitse poolt välja lülitatav, Soomes on see 20%.

Normaalsageduse taastamiseks vajaliku koormuse väljalülitamise määr, olenevalt sageduslangusest, arvutatakse, nagu eelpool öeldud, elektrisüsteemi aktiivkoormuse staatilise sageduskarakteristiku alusel:

$$P_k = P_0 + P_1 f_* + P_2 f_*^2 + P_3 f_*^3 + P_4 f_*^4$$

kus P_0 on sagedusest sõltumatu koormus, $P_1 \dots P_4$ sageduse 1. kuni 4. astmega võrdeline koormus, $f_* = f/f_n$, f_n on nimisagedus.

Valemis () esinevate koormuste näiteid: P_0 - elektrotermilised (sh hõõglambid) ja alaldusseadmed; P_1 - metallilõikepingid, veskid, kolbpumbad, kompressorid; P_2 - võrgukaod; P_3 ja P_4 madal- ja kõrgrõhutsentrifugaal-pumbad ning -ventilaatorid. Need on teatavasti põhilised soojuselektri jaamade omatarbeseadmed.

Alapinge-koormusvähenduskaitse ülesandeks on süsteemi sõlmpunktis koormuse osaline väljalülitamine pinge järsu languse korral, taastamaks pinget normaalväärtus.

Järsust reaktiiv- ja aktiivvõimsusvajakust tingitud pingelangus on sageduslangusega võrreldes vähem ränk süsteemi talitlustõrge nii oma oluliselt väiksema ulatuse kui sünkroonmasinate reaktiivvõimsusega ülekoormatavuse tõttu. Seejuures tagab sünkroonmasinate reaktiivvõimsuse vajaliku suurenemise nende pinget automaatreguleerimine. Viimane positiivne asjaolu avaldub ainult sünkroonmasinatele küllalt lähedastes sõlmedes.

Normaalpinge taastamiseks vajaliku koormuse väljalülitamise määr, olenevalt pingelangusest, arvutatakse sõlmepinge reaktiiv- ja aktiivkoormustundlikkuste alusel.

Tavaliselt on koormuse põhiosa asünkroonmootorid. Nende töömoment on võrdeline pinge ruuduga. Kui töömoment väheneb koormusmomendini siis mootor seiskub (vastavat pinget nimetatakse seiskumisingeks). Pinge langemise korral mootorid pidurduvad ja nende libistus suureneb. Alates libistuse väärtusest umbes 0,2 (see leiab aset seiskumisingest märksa kõrgemal pingel) asünkroonmootorite vool suureneb käivitusvooluni (nimipingel keskmiselt viiekordne nimivool), mis põhjustab pinge edasise suure languse - pingekollapsi. Alapinge-koormusvähenduskaitse väldib selle nähtuse ja tagades sellega koormuse stabiilsuse.

12.3 Sünkronismikaotuskaitse

13 SISSELÜLITUSAUTOMAADID

13.1 Automaatne taaslülitamine

Põhimõisted

Automaatne taaslülitamine (ATL) tähendab enerisüsteemi sidemete ja tarbijate toite automaatset taastamist pärast elektrisüsteemi elemendil (-tidel) esinenud lühise väljalülitamist nende samade elementide taassisselülitamise teel. Reservelemendiks on süsteemi sama talitluselement see on kõige odavam reserveerimismoodus. Õhuliinidel on TLA edukus 60 ... 90% (Soomes peetakse normaalseks 90%). Madalamatel talituspingetel (keskpingetel) on taaslülituse edukuse protsent madalam ja kõrgematel pingetel kõrgem. Automaatset taaslülitamist rakendatakse õhu-ja kaabelliinidel, lattide puhul ja üksikutel trafodel.

Taaslülitusega seondub 4 ajamõistet:

- *avatusaeg* on ajavahemik, mille jooksul automaattaaslülituse käigus vastava võimsuslüliti poolus(ed) on avatud (hõlmab ka võimsuslüliti kontaktide vahel esineva kaarlahenduse kestuse), – avatusaeg iseloomustab ainult võimsuslüliti toimimist taaslülitusel
- *pingepaus* on ajavahemik automaattaaslülitusel, mille jooksul liin või selle faas ei ole ühendatud mingi võrgupingega (radiaalliini korral pingepaus ühtib avatusajaga)
- *edastus- e voolupaus* on ajavahemik automaattaaslülitusel, mille jooksul liin või selle faas ei edasta energiat (radiaalliini korral edastuspaus ühtib pingepausi ja avatusajaga)
- *valmiduspaus* on ajavahemik pärast automaattaaslülitust, mille möödumisel taaslülitusautomaat on valmis (valmisoleku määrab reeglina võimsuslüliti) alustama järgmist taaslülitust võrgu järgmise lühise korral.

Automaatset taaslülitamist eristatakse:

- väljalülitatavate faaside arvu järgi, 1- faasi ja 3-faasi taaslülitust. Maandatud neutraaliga võrkudes (110 kV ja enam) on enamus lühiseid - ühefaasilised maalühised. Sellises olukorras on otstarbekas välja lülitada vaid üksainus faas.
- kordsuse järgi - mitu korda ATL toimub. Kasutatakse ühe-, kahe- ja kolmekordset taaslülitust. Eestis on kõige levinum 1- kordne ja mujal 2- kordne taaslülitus. Tänapäeval kasutatavad mikroprotsessorkaitsed võimaldavad kuni 10- kordset taaslülitust.
- voolupausipikkuse järgi. Voolupaus on ajavahemik lühise väljalülitamisel viimasena väljalülitatud lüliti väljalülitamisest kuni esimesena sisselülitatud lüliti sisselülituseni. Esimesel taaslülitamisel on voolupausi pikkus (t_p) tavaliselt väiksem-võrdne 0,5 sekundit (kiirtaaslülitus). Kui voolupaus on pikem, siis nimetatakse seda viittaaslülituseks, seda kasutatakse 2. ja 3. TLA korral.

Kahepoolse toitega liini taaslülitus on keerukam kui ühepoolse toitega liini taaslülitus. Voolupausi määramisel on kaks tingimust:

- 1) Paus peab olema pikem deioniseerimisajast t_{di} : $t_p > t_{di}$ ($t_{di} = 0,15 \dots 0,2$ s)
- 2) $t_p \geq t_Q$, kus t_Q - võimsuslüliti valmidusaeg järgmise lühise väljalülitamiseks:

U, kV	t_p , s
35-110	0,2 - 1,0, 3.faasi TLA
400	0,4, 3 faasi TLA $\cong 1$, 1-faasi TLA

Läänes on voolupausi pikkus pärast ebaedukat kiirtaaslülitust 30 ... 90 sekundit, idas aga 10 ... 30 sekundit. Kolmas tsüklil on idas 60 sekundit.

Taaslülitus automaadiga varustatud elektrisüsteemi elemendi käsitsi sisselülitamisel taaslülitus blokeeritakse umbes 10 sekundiks. Lühise olemasolul käsitsisisselülitusel eeldatakse elemendil püsilühise olemasolu.

Automaatne taaslülitamine teostamine

Mikroprotsessortechnika kasutuse korral kuulub taaslülitusautomaat tavaliselt ühe moodulina integreeritud juhtimisseadmesse.

Vaatleme nüüd kuidas toimib taaslülitusautomaat, mis on koostatud elektromehaanistest releedest, kuna neid on käesoleval hetkel piisavalt palju kasutusel Eesti energiasüsteemis.

1. Käivitus. TLA käivitub mittevastavusest, st käivitub siis kui võimsuslüliti juhtimisvõti on asendis "SEES" aga võimsuslüliti on tegelikult asendis "VÄLJAS".
2. Viide teostatakse ajareleega
3. Taaslülituse ühekordsus ja TLA blokeering käsitsi sisselülitamisel lühisele tagatakse kondensaatori laadimisajaga, sest taaslülituse väljundrelee toimib vaid kondensaatori laengu arvel.
4. Kahekordsel taaslülitamisel on kaks kondensaatorit. Kolmekordsel kolm jne.
5. Taaslülituse keelamine, näiteks kui TLA mõne kindla kaitse rakendumisel ei tohi toimida, toimub kondensaatori tühjendamisega lisatakistusele, mis on ühendatud kondensaatoriga paralleelselt.

Kahepoolse toitega liini automaatne taaslülitamine.

Väljalülitamise korral võib kaduda elektrisüsteemi osade vahel sünkronism ja tekitab küsimus sünkronismi olemasolust enne taaslülitust. Kasutatakse järgmisi taaslülitusautomaaate:

1. Asünkroone taaslülitus. Sisselülitamisel elektromootorsete jõudude (E1 ja E2) vahelised faasinihked võivad olla meelevaldsed ja sisselülitamisel tekkivad voolud võivad ületada lühisvoolusid (maksimaalne sisselülitusvool on siis kui nurk ($\delta = 110^\circ \dots 135^\circ$). Määravad on siin sünkroniseeritavate võrkude takistused. Piisavalt

- suurte takistuste korral on asünkroone TLA lubatud. Siia kuuluvad ka kiir TLA ja ühefaasiline TLA.
2. Automaatsünkroniseerimisega taaslülitamine. Enne lülitust toimub süsteemiosade sünkroniseerimine.
 3. Pinge puudumise või sünkronismi olemasolu kontrolliga TLA (vaata joonist 13.1).

13.2 Automaatsünkroniseerimine

Põhimõtted

Sünkroniseerimine tähendab sünkroongeneraatori (mootori) lülitamist süsteemi selliselt, et oleks tagatud selle generaatori sünkroone talitus. Ka eraldi elektrisüsteemi osade paralleeltöösse lülitamisel peab olema tagatud sünkronism.

Sünkroniseerimisel kasutatakse kahte põhimõtet:

- Isesünkroniseerimine - generaator lülitatakse võrkku ilma ergutuseta, sünkroonkiirusele lähedasel pöörlemiskiirusel. Pärast võrkku lülitamist lülitatakse sisse generaatori ergutus.
- Täpissünkroniseerimine

Isesünkroniseerimist tavaliselt maailmas ei kasutata, sest see põhjustab:

- suurt tasandusvoolu
- suurt pingekadu
- süsteemi töö häirimine kuni sünkronismi tõmbumiseni (aeg 1-2 sekundit)

Enamusestes Lääne elektrivõrkudes on piisavalt suur pöörlevreserv ja seega puudub vajadus kiiresti uusi generaatoreid võrkku lülitada. Läänes toodetud seadmed ei ole tavaliselt ka üledimensioneeritud.

Endises NSVL maades ja Venemaal kasutatakse seda sünkroniseerimismeetodit avariiolukordades ja väiksevõimsusega generaatorite sünkroniseerimisel.

Täpissünkroniseerimisel tuleb täita järgmised tingimused:

1. $U_G \approx U_S$ (generaatori ja süsteemi pinged)
2. $f_G \approx f_S$ (generaatori ja süsteemi sagedused)
3. $\delta \approx 0$ (pingete vaheline nurk lülitamise hetkel)

Vaatleme olukordi kus need tingimused ei ole täidetud.

Täidetud ei ole esimene tingimus. Piirjuhtumil generaatori pinge võrdub nulliga ja täpissünkroniseerimine asendub isesünkroniseerimisega.

Kui sageduste erinevus on liiga suur, siis generaator võib mitte tõmbuda sünkronismi ja süsteemis tekkib dünaamilise staabilsuse rikkumisele lähedane olukord.

Kõige ohtlikum on kolmanda tingimuse rikkumine. Pingete vahelise nurga muutuse põhjustab sünkroniseeritava generaatori ja süsteemi sageduste erinevus (seda ei ole praktiliselt kunagi võimalik viia nullini). Näiteks kui sageduste vahe on 1 Hz siis sekundi jooksul teeb generaatori emj vektor süsteemi pinge vektori suhtes ühe täisringi. Generaatori pöörlemiskiirus sünkroniseerimise hetkel peaks olema suurem kui süsteemi sagedus, mis välistab generaatori ja turbiini mootoritluse. Halvimal juhul kui nurk on 180° , siis tasandusvool on võrdne kahekordse maksimaalse lühisvooluga generaatori klemmidel ja sellise voolu tagajärjel võivad puruneda või vigastuda:

- generaatori või turbiini võll,
- turbiinilabad,
- generaatori laupühendused,
- vigastuda turbiini ja generaatori laagrid
- generaatori rootor

Sellise ekstreemse vea võimalus puudub generaatori isesünkroniseerimisel. Täpissünkroniseerimise aeg on pikem kui aeg isesünkroniseerimisel. Pikem aeg on tavaliselt tingitud generaatori kiirusregulaatorite ebastabiilsest talitlusest generaatori tühijooksul.

Täpissünkroniseerimisel kasutatakse automaatsünkronisaatoreid. Vaatleme automaatsünkronisaatorit millel on konstantne ennetusaeg. Kõikidel võimsuslülititel on mingi sisselülitusaeg, tavaliselt vahemikus 0,04 ... 0,4 sekundit. Selleks, et võimsuslülitid kontaktid sulguksid ajahetkel kui pingetevaheline nurk on võrdne nulliga (täpissünkroniseerimise kolmas tingimus), tuleb sisselülitamis käsk anda võimsuslülitid lülitusaja võrra varem. Automaatsünkronisaatori põhimõtteline skeem on toodud joonisel 9.1.

Ennetusaja määramine.

- Analoogsünkronisaatorid
- Numbrilised e mikroprotsessorsünkronisaatorid

Ennetusaeg on numbriliste automaatsünkronisaatorite korral 0, 03 ... 0,6 s ja analoogautomaatsünkronisaatoritel 0,1 ... 1 sekund.

13.3 Reservilülitusautomaat

Põhimõtted.

Automaatset reservilülitamist kasutatakse põhiliselt endistes sotsblokki riikides. Automaatse reservilülitamise otstarve on:

1. Toite taastamine automaatselt pärast põhitoiteallika väljalülitumist mistahes põhjusel reservtoite sisselülitamise teel.
2. Mehhanismide (pumpade, ventilaatorite jne) grupis, reservmehhanismi sisselülitamine talitleva mehhanismi väljalülitumisel ja/või tehnoloogilise parameetri (rõhk jne) languse korral.

Reservlülitus on alati ühekordne.

Reservtoite sisselülitamiskäsu annab töötoite võimsuslülitati automaatika oma abikontakti kaudu (pumpade korral rõhuandur).

Reservilülitusautomaatide (RLA) põhiliigid:

1. Kasutusala järgi:
 - 1.1 Toite RLA
 - 1.2 Trafode RLA
 - 1.3 Liinide RLA
 - 1.4 Lattide ehk sektsioonide RLA
2. Funktsioneerimise suuna järgi:
 - 2.1 Ühepoolne funktsioneerimine - on eraldi töötoiteliin ja töötrafo ja reserv toiteliin ja reservtrafo. Kasutatakse põhiliselt elektrjaamade omatarbe toiteskeemides.
 - 2.2 Kahepoolne funktsioneerimine - üks on töös ja teine automaatses reservis.

Liinide RLA toimimine on toodud skeemil 13.1.

13.4 Automaattaastus

14. SÜSTEEMI TALITLUSE AUTOMAATREGULEERIMINE

Automaatreguleerimine on selline automaatjuhtimine, mille ülesandeks on mingi protsessi teatud parameetri muutmine etteantud viisil. Automaatreguleerimine on pideva sisendsignaali ja tänapäeval põhiliselt diskreetse väljundsignaali ARS.

Automaatreguleerimis süsteeme (ARS) liigitatakse järgnevalt:

1. Regulaatori sidestatuse järgi:

1.1 Edasisidega ARS

Regulaatorile antakse teave vähemalt ühe sisendi kohta. Regulaator peab kompenseerima häiringu mõju objektile nii, et reguleeritav väljundsuurus saaks muutuda etteantud viisil.

1.2. Tagasisidega ARS.

Teave antakse väljundi kohta.

1.3. Edasi- ja tagasisidega ARS

Kasutatakse laialdaselt generaatorite ja trafode pingereguleerimisel.

2. Liigitus reguleerimisülesande järgi:

2.1. $x(t) = \text{const.}$; Tegemist on stabiliseerimissüsteemiga. (Näiteks; pingereguleerimine ja sageduse reguleerimine).

2.2. $x(t)$ = aja deterministlik funktsioon ehk programmireguleerimine.

2.3. $x(t)$ - aja juhuslik funktsioon, so järgiv ARS. Tulemus pole ette teada ja seda kasutatakse sõjanduses.

3. Liigitus reguleeritava suuruse sõltuvuse järgi häiringust: $y(t)$

Seda sõltuvust iseloomustab stabiilsustegur : $k_s = \Delta y / \Delta f$, siin f on häiring.

3.1. $k_s = 0$; astaatiline reguleerimine, (sageduse reguleerimine süsteemis)

3.2. $k_s > 0$; positiivse stabiilsusteguriga reguleerimine on stabiilne (pingereguleerimine)

3.3. $k_s < 0$; negatiivse stabiilsusteguriga reguleerimine

4. Liigitus reguleerimiseaduse järgi.

Veasignaali võrdub:

$$\epsilon = Y - X$$

Reguleerimiseadus on reguleeriva toime sõltuvus veasignaalist,

$$Z = Z(\epsilon).$$

Vaatleme tagasisidega automaatreguleerimissüsteeme.

- Proportsionaalne (P), $Z = k \epsilon$
- Integraalne (I),
- Proportsionaalne-integraalne (PI),

- Proportsionaalne-diferentsiaalne (PD)
- Proportsionaalne-integraalne- diferentsiaalne (PID),

14.1 Pinge reguleerimine

Kui Idas räägitakse ja kirjutatakse elektrisüsteemi, võrgu ja trafode pinge, aga generaatorite jt sünkroonmasinate ergutuse (automaat)reguleerimisest, siis Läänes kasutatakse alati terminit *pinge reguleerimine*. Pingeregulaatorit nimetatakse vastavalt kasutatavale reguleerimiseseadusele *proportsionaal-* e *P-toimega* regulaatoriks (Eestis ainult sellised ongi) ja *proportsionaal-diferentsiaal-* e *PD-toimega* regulaatoriks. Viimast nimetatakse Idas tugeva toimega ja P-regulaatorit nõrga toimega regulaatoriks. Reguleeritav talitusparameeter on ju alati pinge. Sünkroonmasina ergutusvool (võib ulatuda kiloamprieni) on ju erguti poolt võimendatud pinge-regulaatori reguleertoime (enamasti mõne ampri piires muutuv alalisvool). Loomulikult võib pingeregulaator reageerida ka häiringule, nagu koormusvool või ülekandefaasinurk.

Pinge reguleerimine süsteemis toimub põhiliselt: trafode, kondensaatorite, generaatorite ja sünkroonmootorite ergutuse kaudu. Pingeregulaatorit nimetatakse vastavalt kasutatavale reguleerimiseseadusele:

- proportsionaal- ehk P-toimega regulaatorid (Eestis ainult sellised ongi),
- proportsionaal-diferentsiaal- ehk PD-toimega regulaatorid.

Pingeregulaator võib reageerida:

- **pingele**
- koormusvoolule
- ülekandefaasinurk

Tavaliselt pingeregulaator reageerib pingele. Reageerimine koormusvoolule ja ülekandefaasinurgale on reageerimine süsteemi talitluse häiringule.

Vaatleme generaatorite ja trafode pinge reguleerimist. Generaatorite puhul on ergutusvool erguti poolt võimendatud juhttoime. Pinge reguleerimine süsteemis on seotud reaktiivvõimsuse reguleerimisega ning pinge muutumine põhjustab reaktiivvõimsusvoogude muutumise süsteemis. Pinge reguleerimise kõige tähtsam ülesanne on süsteemi paralleeltöö stabiilsuse (eriti staatilise stabiilsuse) tagamine. Generaatorite ergutid võib jaotada järgmiselt:

- generaatoriga samal võllil olev alalisvoolugeneraator (kuni generaatori võimsuseni 150 MW)
- mittejuhitava alaldiga vahelduvvoolugeneraatorid sagedustega 400 ...500 Hz
- juhitavate alalditega vahelduvvoolu generaatorid (50 Hz). Nende suur toimekiirus tagab süsteemi stabiilsusnõuded.

Trafo saab pinget reguleerida ülempingemähise keerdude arvu astmelise muutmise teel. Regulaatoril peab olema tundetus tsoon, mis peab olema suurem kui üks pingeaste. Regulaator on aeglasetoimeline, sest kasutatakse elektromehaanilist ümberlülitit ja viidet mõnikümne sekundit.

Generaator, Trafo	Nimetus	y(t)	f(t)	Reg. tüüp	Valem
Generaator	Kompaundeerimine		I_G	P	$I_e = k_2 I_{Gr} + k_3 I_{Ga}$
	Faasikompaundeerimine		I_G	P	
	Pingekorrektor	ΔU_G		P	$I_e = k_1 \Delta U_G$
	Tugevatoimega pingereguleerimise süsteem	ΔU_G	I_G, δ	PD	Valem 1
Trafo	Pingeregulaator	ΔU_T	I_T	P	$n_t = n_t (k_{16} I_T + k_{17} \Delta U_T)$

Valem 1:

$$I_e = k_5 I_G + k_6 \delta + k_7 \Delta U_G + k_8 \frac{dI_G}{dt} + k_9 \frac{d\delta}{dt} + k_{10} \frac{dU_G}{dt}$$

Seda reguleerimisseadust-valemit kasutatakse siis, kui on kõrgendatud nõuded süsteemi stabiilsusele. Selle valemi kasutamisel on tülikas saada teavet δ kohta, mis nõuab väga töökindla sidekanali olemasolu, et saada emj nurka pika liini teisest otsast. Lihtsam on kasutada valemit:

$$I_e = k_{11} \Delta U_G + k_{12} \frac{dU_G}{dt} + k_{13} \Delta f + k_{14} \frac{df}{dt} + k_{15} \frac{dI_G}{dt}$$

Pingete vaheline nurk on siin asendatud sagedusega, seega pole vaja kasutada sidekanalit.

Põhimõisted:

Kompaundeerimine - see on edasisidega süsteem, st regulaator reageerib otse häiringule. **Ülesandeks on kompenseerida häiring.** Proportsionaalne regulaator. Seda reguleerimissüsteemi iseloomustab suur toimekiirus ja samas reguleerimissüsteemi ebatäpsus.

Faasikompaundeerimine - reageerib generaatori kompleksvoolule. Generaatori pinge praktiliselt ei olene koormusnurgast φ .

Pingekorrekter - on pingeregulaator, mis reageerib reguleeritavale suurusele, st tagasisidega reguleerimissüsteem.

14.2 Sageduse reguleerimine

Pajudes Lääne elektrisüsteemide ja ühendsüsteemide tarvis on kehtestatud elektrienergia kvaliteedile sageduse f (f_n - nimisagedus) osas küllaltki ranged nõuded

$$f = f_n \pm 0,1 \text{ Hz} \quad (14.1)$$

kusjuures sünkroonaja hälve

$$\Delta t = \frac{1}{f_n} \int_0^t (f - f_n) dt \leq 10 \text{ s} \quad (14.2)$$

Tegelikult realiseeritakse neid nõudeid täpsemalt: tavaliselt ei ületa sageduse hälve $\pm 0,05$ Hz ja sünkroonaja hälve 5 s.

Venemaa kehtivas elektrienergia kvaliteedi standardis GOST-13109-89 lubatakse pidevat sagedushälvet $\pm 0,2$ Hz ja lühiajalist $\pm 0,4$ Hz. Lisaks sellele lubatakse veel ühendalektrisüsteemi avarijärgses talitluses (mis jääb standardis määratlemata) hälvet $+ 0,5$ Hz kuni $- 1,0$ Hz kuni 90 tunni jooksul aastas. Sünkroonaja täpsust ei normita üldse.

Sageduse suuri ($- 0,5 \dots 0,75$ Hz) ja kestvaid hälbeid registreeritakse Eesti elektrisüsteemis (sagedust reguleerib Venemaa ühtne elektrisüsteem) igal aastal peamiselt kütuse nappuse (võibolla seda loetaksegi avarijärgseks talitluseks) tõttu Venemaa elektrijaamades. Sageduse reguleerimise nii madal tase on Venemaa ühtse elektrisüsteemi töökindluse (sh stabiilsuse) madala taseme kõrval peamisi põhjusi, mis ei võimalda Venemaa ega Baltimaade elektrisüsteemidel lülituda sünkroonkoostöösse Euroopa mandri ühendalektrisüsteemiga UCPTe. Koostööd peetakse võimalikuks ainult alalisvooluühenduste kaudu.

Sageduse ja aktiivvõimsuse reguleerimise kvaliteeti loetakse Euroopa mandriosa ühendalektrisüsteemi UCPTe koostöö taseme oluliseks näitajaks. Konkreetse reguleerimisploki (nt Centreli – Poola, Slovakkia, Tšehhi, Ungari ühendalektrisüsteem) toimimistaset iseloomustab UCPTe reguleerimise koguhälve

$$\Delta R = \Delta P + K \Delta f \quad (14.3)$$

mis peaks võimalikult vähe erinema nullist. Seoses (14.3) ΔP on vahetusvõimsuse hetkhälve plaanitud väärtusest, Δf sageduse hetkhälve ja K võrdetegur.

Centreli jaoks $K = 4000$ MW/Hz. Ühe aasta jooksul (01.10.1996–30.09.1997) jäi Centreli tunnikaupa integreeritud koguhälvete väärtustest 99% piiridesse ± 80 MWh. Seda hinnatakse täiesti positiivselt – Centrel-ploki adekvaatse osalemisena UCPTe ühendsüsteemi talitluses.

Elektrisüsteemi sageduse reguleerimine on tihedasti seotud aktiivvõimsuse reguleerimisega. Põhihäiringuks sageduse reguleerimisel on ju süsteemi aktiivkoormuse muutumine. Elektrisüsteemi sageduse ja aktiivvõimsuse automaatreguleerimine (seda

võib nimetada lihtsalt genereerimise automaatregeerimiseks) toimub kolmel tasandil:

- primaarreguleerimine
- sekundaarreguleerimine
- tertsaarreguleerimine

Primaarreguleerimine toimub täiesti detsentraliseeritult turbiinide kiirusregulaatoritega, mis on iga turbiini lahutamatuks osaks. Gaasi- ja auruturbiinide regulaatorid on kiiretoimelised proportsionaalregulaatorid. Hüdroturbiinide regulaatorid on aeglase-toimelised proportsionaal-integraalregulaatorid.

Sekundaarreguleerimise ülesandeks ühendsüsteemis on sageduse ja süsteemidevahelise vahetusvõimsuse hälvete elimineerimine ning isoleeritud süsteemis sageduse reguleerimine. See toimub kogu reguleerimisala tsentraalse sagedusregulaatori poolt vastava kommunikatsioonisüsteemi kaudu iga turbiini regulaatorile ja igale süsteemidevahelisele ühendusele iga mõne sekundi järel etteantud võimsuse uue väärtuse andmise teel. Regulaator on proportsionaal-integraalne, tänapäeval enamasti numbriline.

Tertsaarreguleerimine kujutab endast elektrisüsteemi aktiivkoormuse optimaalset jaotamist reaalajas vastava arvuti abil. Etteantud võimsuste optimaalväärtused edastatakse kommunikatsioonisüsteemile iga mõne minuti järel.

KIRJANDUS

- 1 ABB tootekataloogid ja tootetutvustused.
- 2 Anthony M. A. Electric Power System Protection and Coordination: A Design Handbook for Overcurrent Protection. N. Y. a. o.: McGraw-Hill, Inc. 1995. 395 p.
- 3 Denno K. Electric Protective Devices: Protection with Energy Saving. N. Y. a. o.: McGraw-Hill, Inc. 1994. 295 p.
- 4 GEC Alsthom'i (sh AEG) tootekataloogid ja tootetutvustused.
- 5 Hakola T. Muuntajan suojaus. // INSKO:n julkaisu 16-84 II. 1984. 28 s.
- 6 Hakola T. Suojareleistus. // INSKO:n julkaisu 157-91 VII. 1991. 18 s.
- 7 Horowitz S. A., Phadke A. G. Power System Relaying. Tauton, England, N. Y. a. o.: Research Studies Press Ltd, John Wiley & Sons, Inc. 1995. 319 p.
- 8 IEV Chapter 191: Dependability and quality of service – Part 3: Dependability and quality of service in electric power systems – Sections 21 to 30. Committee draft. Geneva. 1996. 39 p.
- 9 Lehtonen M., Hakola T. Neutral Earthing and Power System Protection. Vaasa, Finland: ABB Transmit Oy. 1996. 119 p.
- 10 Mörsky J. Relesuojaustekniika. S. I. Otatieto. 1992. 459 s.
- 11 Panu K., Taimisto S., Nousmaa I. Cooperation between Instrument Transformers and Protective Relays. // Sähkö. 1971. N:o 2. Pp. 3–8.
- 12 Povh D., Renz K., Tyll H. Neue technologien für optimierten Netzbetrieb. // Elektrizitätswirtschaft. 1998. Heft 4. S. 44–48.
- 13 Power System Protection. / Ed. by The Electricity Council. Stevenage, UK and N. Y.: Peter Peregrinus Ltd. 1990.
 - Vol.1: Principles and Components. 521 p.
 - Vol. 2: Systems and Methods. 326 p.
 - Vol. 3: Application. 473 p.
- 14 Protective Relaying: Theory and Applications. / Ed. by Elmore W. A. ABB Power T&D Company, Inc. N. Y. a. o.: Marcel Dekker, Inc. 1994. 369 p.
- 15 Protective Relays: Application Guide. GEC Alsthom Measurements Ltd. 1987. 464 p.
- 16 Rahvusvaheline elektrotehnika sõnastik. / Tõlge inglise jt keeltest. Kuuekeelne (eesti, inglise, soome, saksa, rootsi, vene) arvutisõnastik. Kasutatav ka kõigi kuue keele paarissõnastikuna, ka väljatrükina. Terminite määratlused eesti, inglise ja vene keeles. / Programmipaketi *TermIn* autor M. Meldorf. Tõlkijad: R Hausmann, A. Lemsalu, K. Möller, R. Oidram, P. Raesar, E. Risthein, E Sepping, H. Tammoja, O. Tapupere, E. Tiigimägi, G. Väljamäe. Tõlke toimetaja E. Tiigimägi. Tln. 1996. Käsikiri (väljatrükk) + arvutidisketid + kasutusjuhend. Käesolevas töös on kasutatud sõnastiku kahte köidet:
 - Elektroenergeetika. 486 lk.
 - Juhtimistehnika. 381 lk.

- 17 Rothe C. Schutztechnik in Elektroenergiesystemen. Berlin: Verlag Technik. 1991. 388 S.
- 18 Siemens'i tootekataloogid ja tootetutvustused.
- 19 Standard EVS-IEC 38:1996: IEC standardpinged.
- 20 Taimisto S. Maasulkusuojaus keskijänniteverkossa. // INSKO:n julkaisu 55-75. 1973. 36 s.
- 21 Taimisto S. Sähkölaitosten suojaustekniikka I: relesuojauksen perusteet. // INSKO:n julkaisu 43-77. 1973. 14 s.
- 22 Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa: ABB Strömberg. 1990. 586 s.
- 23 Tubant H.-P., Focken B. Künftige Entwicklung und Aufgaben des Verbundnetzes. // Elektrizitätswirtschaft. 1996. Heft 25. S. 1663–1670.
- 24 Warrington A. R van C. Protective Relays: Theory and Practice. Vol. 2. London, N. Y.: Chapman and Hall. 1985. 434 p.
- 25 Англо-русский словарь по релейной защите и автоматизации энергосистем. / Под ред. Г. Семенова и др. Вааса: ABB Network Control & Protection. 1994. 54 с.
- 26 Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа. 1991. 496 с.
- 27 Баринов В. А., Совалов С. А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат. 1990. 440 с.
- 28 Концепция развития электроэнергетики. // Электрические станции. 1991. N 11. С. 2–65.
- 30 Меллер (Möller) ?. Ю. Статистический расчет выдержек времени релейной защиты. // Электричество. 1970. N 6. С. 27–29.
- 31 Окин А. А., Портной М. Г., Тимченко В. Ф. Об обеспечении надежности параллельной работы Евро-Азиатского объединения энергосистем. // Электричество. 1998. N 2. С. 2–14.
- 32 Совалов С. А., Семенов В. А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат. 1988. 416 с.
- 33 Управление мощными энергообъединениями. / Ред. С. А. Совалов. М.: Энергоатомиздат. 1984. 256 с.
- 34 Феосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат. 1984. 550 с.
- 35 Шабад М. А. Выбор характеристик и уставок цифровых защит серии SPACOM: Методические указания с примерами. S.I. ABB. 1995. 39 с.
- 36 Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ: Конспект лекций. Санкт-Петербург. 1995. 50 с.

Lisa 1 RELEEKAITSE TÄRKTÄHISEID

Releekaitse arvtähist võeti kasutusele USAs ja levivad kogu maailmas (IEC 617, ja IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) C.37.2-1991 (ANSI - American National Standards Institute). Laialdaselt kasutatakse ka kaitse muid tärgtähisteid. Releekaitstes enamkasutatavaid arv- jm tärgtähisteid:

- 21 - distantskaitse, ka $Z<$ või $3Z<$
- 21N – maalühisdistsantskaitse, ka $Z_{0<}$, $Z_{E<}$, $Z_{i<}$
- 24 - liigvookaitse, ka 59F, $(U/f)>$ või $I_{5f}>$
- 25 - sünkronisaator, sünkronismikontroll, ka SYNC
- 26 - aparaadi termokaitse
- 27 - alapingekaitse, ka $U<$
- 28 - gaasi- (Buchholzi) kaitse
- 32 - võimsussuunakaitse, ka $P\rightarrow$ (32F) või $P\leftarrow$ (32R)
- 37 - alavoolu- või alavõimsuskaitse, ka $I<$, $P<$
- 40 - ergutuskaotuskaitse, ka $\Phi<$
- 46 - vooluasümmeetriakaitse, ka $I_2>$ või $I_n>$
- 47 - pingesümmeetriakaitse, ka $U_2>$ või $U_n>$
- 49 - masina ja trafo termokaitse, ka $\Theta>$
- 50 - hetkliigvoolukaitse (voolulõige), ka $I>>$
- 51 - viitliigvoolukaitse (viitvoolulõige, maksimaalvoolukaitse), ka $I>$
- 59 - ülepingekaitse, ka $U>$
- 59N - summaülepingekaitse, ka $U_{0>}$
- 63 - liigrõhukaitse, ka $p>$
- 67 - suundliigvoolukaitse, ka $I_{>>}$, $I_{>}$
- 50N, 51N, 67N - vastavad maalühiskaitseid, ka $I_{0>>}$, $I_{0>}$; $I_{E>>}$, $I_{E>}$; $I_{i>>}$, $I_{i>}$; $I_{0>>}$, $I_{0>}$; $I_{E>>}$, $I_{E>}$; $I_{i>>}$, $I_{i>}$
- 77 - kaugmõõteseade
- 78 - sünkronismikaotuskaitse, ka $\delta+180^\circ$
- 79 - taaslülitusautomaat, ka $O\rightarrow I$
- 80 - joakaitse
- 81 - sageduskaitse, ka $f<$ või $f>$
- 85 - sidekanaliliides
- 86 - keeld, toimimisblokeering
- 87 - diferentsiaal- ja võrdluskaitse, ka $3I_d$, sh sõltuva sättega (pidurduse-ga) diferentsiaalkaitse; viimast tähistatakse ka $3I_d/I$
- 87N - maalühisdiferentsiaalkaitse, ka I_{d0} , I_{dE} , I_{di}
- 90 - regulaator

Märkused:

- 1 Kaitse tähist kasutatakse ka vastava mõõterelee tähistamiseks.
- 2 Esitatud tärgtähistid vastavad põhiliselt standardile IEC 617 ja on küllalt laialdaselt kasutusel.
- 3 Tähttähistid:
Z - impedants

U - pinge

f - sagedus

I - vool (mõnikord märgitakse sümboli I ette arv, mis näitab, mitme faasi voolu kaitse kasutab, nt 2I, 3I)

P - aktiivvõimsus

Φ - magnetvoog

Θ - temperatuur

δ - ülekandefaasinurk (nurk ekvivalentelektromotoorjõudude vahel)

O ja I - avatud (väljas) ja suletud (sees) - võimsuslüli kohta.

4 Indeksid:

5f - 5. harmoonik

2 või n - vastujärgnevus

0 - nulljärgnevus

0, E või i - maalühis-

d - diferentsiaal-

5 Kui kaitse on mitu astet, võib nende tähistamiseks kasutada vastavat arvu tärgtähisteid, nt kolmeastmeline voolukaitse: I>>>, I>>, I>.

Lisa 2 EESTI-INGLISE-VENE SÕNASTIK