

## 8 Elektrivõrgu releekaitse

Tehniliste rikete ja ka personali süü tõttu võib elektrivõrgus tekkida avariolukord. Operatiivjuhtimise ülesanne on vältida avarii laienemist ning seejärel avarii likvideerida. Enamasti on aga avarii kulg niivõrd kiire, et seda võivad lokaliseerida ainult automaatikaseadmed. Kaitseotstarbeliste automaatide hulka kuuluvad releekaitseseadmed, reservilülitusautomaadid, taaslülitusautomaadid ja koormusvähendusautomaadid.

### 8.1 Releekaitse alused

Releekaitse ülesanne on vähendada avariist tingitud kahju avarii kiire likvideerimise ja selle laienemise vältimise teel. Releekaitse ei hoia avariid ära, kuid avastanud rikke, lülitab vigastatud elektriseadmed kiiresti ning selektiivselt välja. Rikked avastatakse mingi tunnussuuruse põhjal. Näiteks isolatsioonirikkeid avastatakse kas lühisvoolu või maaühendusvoolu järgi. Releekaitse-seadmete toimekiirust iseloomustab rakendusaeg, mis nüüdisaegsetel kõrgepingeliiniseadmetel on vaid 5 ms. Kui aga talitlushäiring (nt ülekoormus) on mõne aja jooksul lubatud, siis piirdub releekaitseseade vaid sellekohase signaaliga. Releekaitseseadmed moodustavad elektrivõrgu ja -jaamade automaatikaseadmetest umbes 80%. Mikroprotsessoritel põhinevad kohtterminalid täidavad releekaitse ülesannete kõrval ka automaatjuhtimise ning andmehõive ja -edastamise funktsioone.

#### 8.1.1 Releekaitse toimimispõhimõtted

Kaitse toimimist iseloomustatakse viie põhiomaduse järgi:

- tunnussuurus
- rakendumise ajaline järgnevus
- tunnussuuruse muutumise suund kaitse mõõteosa rakendumisel
- toimekiirus
- selektiivsuse tagamise viis.

Need omadused on aluseks ka kaitsete liigitamisel.

**Tunnussuurus** on füüsikaline suurus, millele kaitse mõõteosa reageerib. Tunnussuurus on kaitse-seadmete kõrval omane ka mõõteosaga lülitus- ja automaatikaseadmetele. Ühel kaitse-seadmel võib olla mitu tunnussuurst ja nende koguarv ulatuda mitmekümneni. Kompleksarvulise suuruse korral võivad tunnussuursteks olla moodul ja faas või imaginaar- ja reaalosa. Perioodiliselt muutuva kolmefaasilise suuruse korral on tunnussuursteks sümmeetrilise päri-, vastu- või nulljärgnevuskomponendi, nende kombinatsiooni või mingi harmooniku efektiivväärtus, harvemini ka hetkväärtus. Tunnussuursti võib jagada nelja rühma:

- elektrilised – vool, pinge, sagedus, kahe elektrilise suuruse vaheline faasinurk, takistus (üldjuhul impedants), võimsus
- ühe või mitme elektrilise suuruse funktsioon – voolu ruudu integraal, elektrilise suuruse tuletis, pinge ja sageduse suhe
- kaitseobjekti otstes või rööpahelates esinevate elektriliste suuruste erinevus
- mitteelektrilised – valgus, temperatuur, gaasimaht, gaasi- ja vedelikuvoo kiirus ning rõhk.

Rakendumise ajalise järgnevuse järgi jagatakse kaitse põhi- ja reservkaitseks. **Põhikaitse** on prioriteetne kaitse rikke eraldamisel või anormaaltalitluse lõpetamisel. Elektrivõrgu oluliste elementide kaitseks kasutatakse sageli kahte põhikaitset (enamasti on üks neist täiuslikum). Näiteks kasutatakse 330 kV liinidel lühisekaitseks kahte viieastmelist distantskaitset. Jaotusvõrgu ja selle elementide kaitse koosneb paljudest kaitseeadmetest, mis peavad töötama koordineeritult. Koordineeritud kaitse peab tagama rikete kiire, selektiivse, aukudeta ja töökindla väljalülitamise kogu võrgu ulatuses.

Kaitse töökindlust tõstetakse reservkaitsega. **Reservkaitse** peab rakenduma siis, kui etteantud aja jooksul pole rike eraldatud või anormaaltalitus lõpetatud põhikaitse või võimsuslüliti tõrke tõttu. Eristatakse järgmisi reservkaitse liike:

- ahela lähireservkaitse, mis saab voolu ja pinget põhikaitse mõõtetrafodest või teistest samasse primaarahelasse lülitatud mõõtetrafodest
- alajaama lähireservkaitse, mis saab voolu ja pinget põhikaitse mõõtetrafodega samas alajaamas paiknevatest, kuid teistesse primaarahelatesse lülitatud mõõtetrafodest
- kaugreservkaitse, mis asub põhikaitsega alajaamast eemal olevas alajaamas.

Kaitse rakendumist põhjustava tunnussuuruse muutumissuuna järgi eristatakse **üle-** ja **alაკaitseid**. Üle- ehk liigkaitse (ka maksimaalkaitse) rakendub tunnussuuruse kasvul. Sii kuuluvad näiteks liigvoolukaitse, diferentsiaal- ja võrdluskaitse, aga ka ülepinge-, ülesagedus-, sünkronismikaotus-, võimsuslüliti tõrke-, elektrikaare-, gaasi-, termo- ja rõhukaitse. Alაკaitse (ka minimaalkaitse) rakendub tunnussuuruse vähenemisel, näiteks distantskaitse, alapinge- ja alაკageduskaitse.

Toimekiiruse järgi jagatakse kaitse **hetk-** ja **viitkaitseteks**. Kui hetkkaitse rakenduskiirust piiravad vaid tehnilised võimalused, siis viitkaitse rakenduskiirust aeglustatakse tahtlikult mingi viitega. Hetkkaitse toimekiirus peab olema suur ja tagama elektrisüsteemi stabiilsuse säilimise. Kaitse peab olema kiire ka elektrisüsteemi elementide võimalike vigastuste ulatuse piiramiseks, automaatse taaslülituse edukuse suurendamiseks ja remondi kestuse, mahu ja maksumuse vähendamiseks ning tarbijate väiksema häirituse tagamiseks. Lõpptulemusena summeerub lühise kestus releekaitse rakendusajast ja võimsuslüliti väljalülitusajast. Nüüdisaegsete kiiremate kaitsete vähim rakendumisaeg on 5 ms ja

võimsuslülite väljalülitusaeg 20...80 ms. Õhuliinide korral lisandub rele rakendusajale liigpingepiirikute toimeaeg, mis ei ületa 2,5 ms.

**Selektiivsus** on kaitse võime tuvastada rikke asukoht. Kaitse peab olema selektiivne ehk valiv selleks, et eraldada lühisekoht võrgust võimalikult väikese arvu elementide väljalülitamisega. Rikkis objekti tuvastamise korral on tegu **objektiselektiivsusega**, rikkis faasi tuvastamisel aga **faasiselektiivsusega**.

Eristatakse **absoluutset** ja **suhtelist selektiivsust**. Absoluutselt selektiivne on kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus tulenevad elektriliste suuruste võrdlemisest objekti otstes. Siia kuuluvad pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse. Sellised kaitseid vajavad toimimiseks sidekanalit abijuhtme, kõrgsagedus- või mikrolainekanalid kujul. Kaitsetsoon hõlmab objekti otstes paiknevate voolu- trafode vahelise ala. Absoluutselt selektiivne kaitse on üldjuhul üheastmeline, harva kaheastmeline nagu lattide ja trafo pikidiferentsiaalkaitse. Absoluutselt selektiivne kaitse on alati hetkkaitse ning ei saa olla välisobjektide reservkaitseks.

Suhteliselt selektiivne on näiteks voolu- ja distantskaitse, mille toimimine ja selektiivsus põhinevad elektriliste suuruste mõõtmisel kaitseobjekti ühes otsas. Suhteliselt selektiivne kaitse on tihti mitmeastmeline, mille esimene aste on hetkkaitse, ülejäänud viitkaidseid. Suhteliselt selektiivne kaitse võib toimida välisobjektide reservkaitseksena.

Olulised on releekaitse hõlmavus, tundlikkus ja töökindlus. **Hõlmavus** tähendab, et releekaitse peab haarama kõiki elektrivõrgu elektriseadmeid. **Tundlikkus** osutab kaitse võimele reageerida võimalikult väikestele tunnussuuruse muutustele selektiivsust kaotamata. Voolukaitse tundlikkust väljendab **tundlikkustegur**, mis avaldub valemiga

$$k_{tund} = I_{k\ sise}^{\min} / I_s$$

kus  $I_{k\ sise}^{\min}$  – siselühisvoolu minimaalne väärtus  
 $I_s$  – sättevool.

Takistuskaitsel (impedantskaitsel) avaldub tundlikkustegur kujul

$$k_{tund} = Z_s / Z_{k\ sise}^{\max}$$

kus  $Z_{k\ sise}^{\max}$  – siselühise maksimaalne takistus  
 $Z_s$  – sätteväärtus.

Põhikaitse tundlikkustegur  $k_{tund} \geq 1,5 \dots 2,0$ , reservkaitsel  $k_{tund} > 1,2$ . **Töökindlus** väljendub kaitse õiges toimimises. Kaitse peab reageerima elektrisüsteemi riketele ja anormaaltillustele adekvaatsete väljalülitus- või muude juhttoimesignaalide väljastamisega. Samas ei tohi kaitse väljastada toimesignaale elektrivõrgu normaaltalitluse korral.

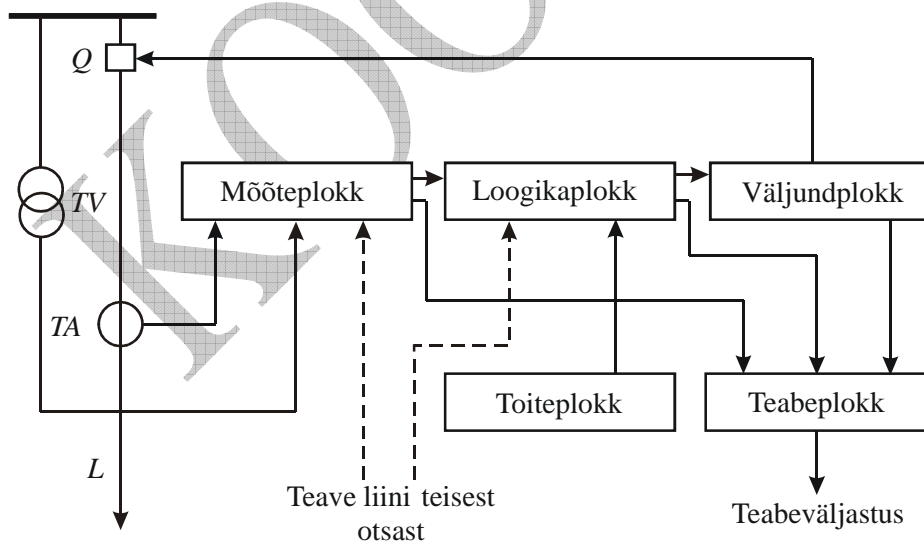
Kaitse väär toimimine jaguneb rakendustõrkeks ja liigrakendumiseks. Kaitse **liigrakendumine** tähendab kaitse rakendumist elektrisüsteemi rikke või muu

anormaalsuse puudumisel, aga ka rikke või muu anormaalsuse esinemisel, mille korral see kaitse ei tohi rakenduda. **Rakendustõrge** on kaitse mitterakendumine rakendusvajaduse korral. Tõrked jagunevad **riistvaratõrgeteks** ja **põhimõttelisteks tõrgeteks**. Esimene tähendab kaitse vale toimimist kaitselemendi tõrke tagajärjel, teine aga vale toimimist vea tõttu kaitse projekteerimisel, konstrueerimisel, sätestamisel või kasutamisel. Digitaalkaitse tarkvaratõrge on põhimõtteline tõrge. Kui riistvaratõrkeid on võimalik tuvastada hooldetesti- misel, siis põhimõttelised tõrked jäävad seal enamasti avastamata.

Kaitstava objekti järgi liigitatakse kaitseid **elemendi-** ja **süsteemikaitseteks**. Elemendikaitse põhiliigid on

- liigvoolukaitse, mille tunnussuuruseks on kas faasivool või voolu sümmeetrilised komponendid. Vajaduse korral täiendatakse voolukaitset pingeloaga (pinge blokeeringuga)
- distantkaitse, mille tunnussuurus on takistus, enamasti impedants. Kasutatakse nii faasidevaheliste lühiste kui maalühiskaitseks
- pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse tunnussuurusteks on voolumoodulite ja -faaside (diferentsiaalkaitse) või voolu suuna (võrdluskaitse) erinevus kaitseobjekti otstes
- põikdiferentsiaalkaitse tunnussuuruseks on voolu erinevus kaitseobjekti rööpahelate vahel.

Elemendikaitseid on ka ala- ja ülepingekaitse, pingekaotuskaitse, sünkronismi- kaotuskaitse, sageduskaitse, võimsuslüli tõrkekaitse, gaasikaitse jm.



Joonis 8.1 Elemendikaitse plokk skeem: TV – pingetrafo, TA – voolutrafo, Q – võimsuslüli, L – liin (kaitseobjekt)

Joonisel 8.1 on elemendikaitse plokskeem. Kaitse põhiplokid on mõõte- ja loogikaplokk. Mõõteplokk saab teavet kaitseobjekti seisundi kohta voolutrafost *TA* ja pingetrafost *TV*. Vajaduse korral (diferentsiaal- ja võrdluskaitse) kasutatakse teavet ka elemendi teisest otsast. Mõõteploki väljundtoime suunatakse loogikaplokki. Seal kontrollitakse kaitse rakendamiseks vajalike loogikatingimuste täitmist. Kui loogikatingimused on täidetud ja kaitse mõõteplokk ei ole ettenähtud aja jooksul ennistunud, rakendub kaitse, andes väljundplokki kaudu juhttoime võimsuslülitile. Kaitse ja tema üksikute plokkide toimimise teave edastatakse teabeplokile. Kaitse saab toite akupatareist või puhvertoiteallikast.

**Süsteemikaitse** ehk **avariitõrjeautomaatika** olulised liigid on koormusvähenduskaitse ja koormustaastusautomaatika. **Koormusvähenduskaitse** ülesanne on koormust osaliselt välja lülitada genereeriva aktiiv- või reaktiivvõimsuse puudujäägi korral või alapinge esinemise korral. Genereeriva võimsuse puudujäägi tunnuseks on alasagedus. Alasageduskoormusvähenduskaitset nimetatakse ka sagedusautomaadiks ja alapingekoormusvähenduskaitset koormuse väljalülitusautomaadiks. Mõlemad kaitsete seatakse üles alajaamades ning neil on palju astmeid erinevate sagedus- või pinge- ning ajasätetega. Tavaliselt liituvad nende kaitsetega ka **koormustaastusautomaadid**, mis sageduse või pinge normaalväärtuse taastumisel lülitavad koormuse etteantud ajaprogrammi järgi taas sisse, kontrollides seejuures sagedust või pinget. Lisaks üksikkoormuste väljalülitamisele võimaldab alasageduskoormusvähenduskaitse vältida avarii laienemist ühendsüsteemi jagamisega üksikuteks eraldi töötavateks süsteemideks ning tagada soojuselektrijaama taaskäivitamist jaama omatarbesüsteemi eraldamisega ülejäänud elektrisüsteemist.

### 8.1.2 Traditsiooniline releekaitse

Traditsiooniline releekaitse põhineb elektromehaanilistel releedel. Nüüdisajal on elektromehaanilised releed asendumas mikroprotsessoripõhiste releedega. Eesti energiasüsteemis on praegu kasutatavatest releedest enamik veel elektromehaanilised.

**Elektromehaanilise relee** põhiosa on ankrust ja ikkest koosnev magnetahel. Relee rakendumine tähendab relee kontakti või kontaktide sulgumist või avanemist. Kontakti liikuv osa on mehaaniliselt seotud ankruga ning ankru asendi muutumise tulemusel kontakt kas sulgub või avaneb ja relee rakendub. Relee rakendub, kui on täidetud tingimus

$$M_{töö} > M_{tak} + M_{hõõre}$$

Rakendumiseks vajaliku töömomendi  $M_{töö}$  tekitab magnetvoog, mis luuakse ühte või mitut mähist läbiva vooluga. Töömoment peab ületama takistusmomendi  $M_{tak}$ , mis luuakse tavaliselt vedru abil, ja hõõrdemomendi  $M_{hõõre}$ . Relee ennistub, kui

$$M_{tak} > M_{töö} + M_{hõõre}$$

Relee rakendumisel on töömoment alati suurem kui ennistumisel, sest rakendunud releel on ankru ja ikke vaheline õhupilu väiksem ja ankrut suudab kinni hoida ka rakendusvoolust väiksem vool. Seega on ka relee ennistusvool rakendusvoolust väiksem. Ennistusvoolu  $I_e$  ja rakendusvoolu  $I_r$  suhet nimetatakse **ennistusteguriks**  $k_e$

$$k_e = I_e / I_r$$

Elektromehaanilisi releesid võib töömomendi tekitamise viisi järgi liigitada

- elektromagnetilisteks
- elektrodünaamilisteks
- induksioondünaamilisteks
- induksioonreleedeks
- magnetelektrilisteks
- polariseeritud releedeks.

Esimese nelja tüüpi relee töömoment on võrdeline voolu ruuduga või kahe erineva voolu korrutisega. Nende releede rakendusvõimsus on 0,1...10 VA. Suure rakendusvõimsuse tõttu on nende releede tundlikkus väike. Arvestades, et lühisvoolud ulatuvad kümnekordse nimivooluni ja enamgi, võib relee töömoment ulatuda sajakordse normaalmomendi väärtuseni. Seetõttu peab relee konstruktsioon olema mehaaniliselt tugev, mis omakorda tingib relee suuri mõõtmeid. Magnetelektrilistes ja polariseeritud releedes on üks voolumähis asendatud püsिमagnetiga. Selle tulemusel on need releed oluliselt tundlikumad ja nende töömoment võrdeline vooluga.

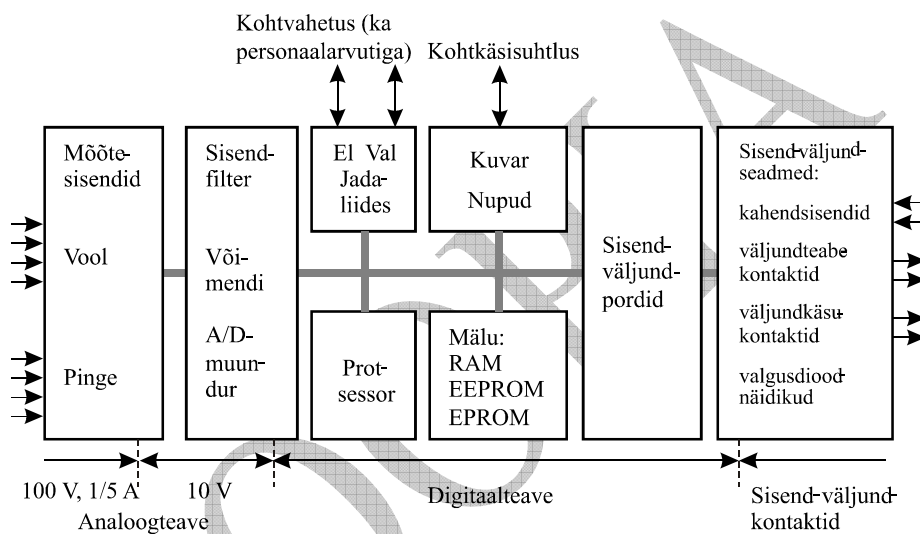


Joonis 8.2 Elektromehaaniline aegrelee

Oluline on voolu liik. Induktsioontüüpi releed saavad olla ainult vahelduvvoolureled. Elektromagnetilised ja elektrodünaamilised releed võivad olla nii vahelduv- kui ka alalisvoolureled. Magnetelektrilised ja polariseeritud releed on tundlikud alalisvoolureled, mille rakendusvõimsus on vaid mõni millivatt. Joonisel 8.2 on kujutatud elektromehaaniline aegrelee, mille põhiliseks osaks on elektromagneti abil käivitav mehaaniline kellamehhanism. Releel on kaks kontakti – impulss- ja sulgekontakt. Elektromehaanilisi aegreleesid toodeti nii alalis- kui vahelduvpingele.

### 8.1.3 Mikroprotsessoripõhine relekaitse

Nüüdisaegsed relekaitse seadmed põhinevad mikroprotsessoritel. Kaitsetoimingu kõrval on sellistel seadmetel veel automaatika, andmehõive ja andmeedastuse funktsioonid. Tulemuseks on **kohtterminalid**. Kohtterminalide kaitsetoimingutest on enim levinud liigvoolu- ja maalühiskaitse. Vaid ühe fiidriga piirduvaid kohtterminale nimetatakse ka **fiidriterminalideks**. Mikroprotsessorkaitse funktsionaalne plokk skeem on joonisel 8.3. Kohtterminali korral lisandub skeemile veel toiteplokk, mis saab välistoite akupatareist või puhvertoiteallikast.



Joonis 8.3 Mikroprotsessorkaitse plokk skeem

Mõõtesisendite plokis eraldatakse elektriliselt kaitseobjekti voolu- ja pingetrafoade väljundsuurused kaitseahelast. Mõõtesisendite nimisuurused on tavaliselt 1 või 5 A ja 100 V.

Muundurplokis pinge- ja voolukõverad filtreeritakse, võimendatakse ja digiteeritakse. Signaalide digiteerimine põhineb diskreetimisel, kus fikseeritakse 2...40 väärtust voolu- ja pingekõvera ühe perioodi kohta. Diskreetimissageduse 2 korral, mida kasutatakse lihtsa voolukaitse puhul, mõõdetakse mõlema poolperioodi amplituudväärtused. Sellega välistatakse lühisvoolu aperioidilise komponendi mõju kaitse toimimisele. Muundurploki väljundiks on mõõtesuuruste arväärtused.

Jadaliidese kaudu toimub kohtterminali teabevahetus. Siia siseneb teave liini teisest otsast, toimub kaitse kaugsättestamine, edastatakse mõõte- ja seisundiandmed ning rikkesalvestus. Võimalik on kohtteabevahetus alajaamas paikneva tööjaamaga kohtvõrgu kaudu või sülearvutiga. Liidesed on elektrilised või

toimivad valguskaabli abil, mille pikkus kuni 2000 m. Andmevahetus suuremate kauguste korral toimub kaugterminali vahendusel laivõrgu kaudu.

Kuvar ja sõrmistik võimaldavad suhtlemist terminaliga kohapeal. Nende abil saab terminali sätestada ja kontrollida.

Protsessoreid on kohtterminalis üks või enam. Täiuslikumatel distantskaitsetel on igal kaitseastmel oma protsessor. Protsessorid töötlevad kohalikke ja mujalt saabuvald andmeid etteantud algoritmide ja sätete järgi. Toimekiirus võib 32-bitiste sõnade puhul olla kuni 100 MIPS (*millions of instructions per second* – miljon käsku sekundis).

Mäluplokk koosneb muutmälust (*RAM*), programmeeritavast elekterkustutusega püsivälust (*EEPROM*) ja programmeeritavast püsivälust (*EPROM*). Kaitse kasutajal on ligipääs muutmälule ja sätete osas ka programmeeritavale püsivälule. Muutmälus säilitatakse käidu- ja rikkeandmeid, mis sisaldavad ajamärgenditega varustatud sündmusi ja talitusparameetreid. Andmete säilimise muutmälus tagab patareitoide. *EEPROM*-mälus säilitatakse kaitse tarkvara. Programmeeritavas püsivälus säilivad salvestatud sätted ka abitoite katkemisel.

Sisend-väljundpordid võimaldavad sisend- ja väljundseadmetega nelja liiki andmevahetust:

- kahendsisendid sama kaitseobjekti muude kaitsete (nt trafo gaasi- ja rõhu- kaitse) teabe sisestamiseks
- väljundteabekontaktid toimivad kaitse rakendamisel ja kaitse tõrke tuvastamisel
- väljundkäasukontaktid annavad võimsuslülititele väljalülitamiskäsu
- valgusdiodinäidikud teavitavad kaitse rakendumisest või kaitse tõrke tuvastamisest.

Nii väljundteabe- kui väljundkäasukontaktid on elektromehaanilised.

Mikroprotsessorkaitse on traditsioonilise releekaitsega võrreldes rida eeliseid:

- sama riistvara (kohtterminali) võib tarkvara muutmise abil rakendada eri kaitseseadmete realiseerimiseks
- samal kaitseel on võimalik kasutada kuni nelja sätet, millest aktiveeritakse üks koht- või kaugkäsu
- kaugsättestamise võimalus
- kaitse tundlikkus, töökiirus ja täpsus on oluliselt suuremad kui traditsioonilistel releedel
- kaitse tunnussuurust on lihtne esitada mitme parameetri funktsioonina
- mitmekordse viit- ja kiirtaaslülituse võimalus
- kaitse enda korrasoleku autokontroll
- oluliselt väiksem gabariit ja juhtmestusvajadus
- kaitse riistvara võib kasutada mitmesuguste juhtimis- ja seireülesannete täitmiseks.

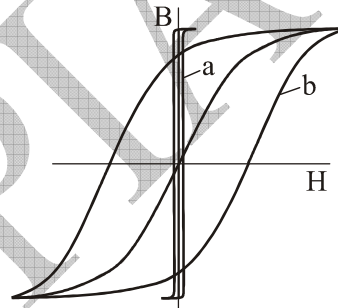


### 8.1.4 Mõõteandurid

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

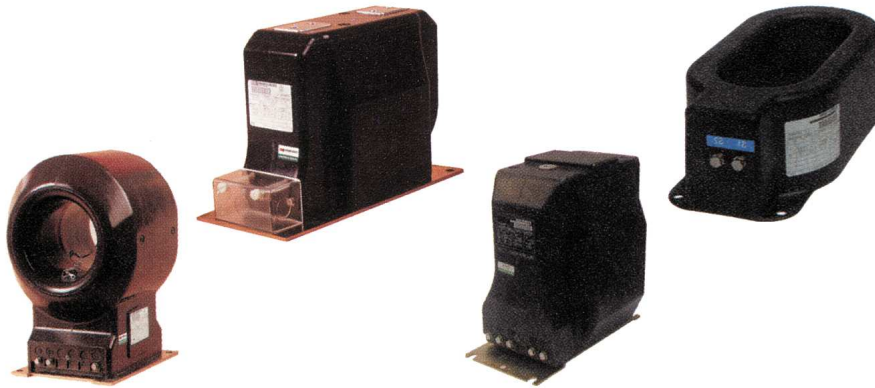
- vähendada voolu ja pinget sekundaarahelale sobivate väärtusteni
- eraldada (isoleerida) primaarahel sekundaarahelast
- vältida mõõteriistade liigkoormust
- võimaldada seire- ja juhtimisseadmete paigutamist primaarseadmetest eemale.

Mõõteandurid jagunevad **voolu-** ja **pingeanduriteks**, neist enam kasutatavad on **voolu-** ja **pingetrafo**. Voolutrafo jagunevad rakenduseesmärkide poolest **mõõte-** ja **kaitsetrafo**deks. Nende trafode ferromagnetilised omadused erinevad (joonis 8.4). Mõõtevoolutrafo peavad täpselt toimima vaid nimivoolu piirkonnas, kaitsevoolutrafo aga edastama adekvaatselt ka suuri anormalseid voole. Mõõtetrafo de täpsust hinnatakse **voolu-** ja **nurgavigade** järgi. Elektrienergia müügil ei tohi mõõtevoolutrafo de täpsusklass olla halvem kui 0,5, mis tähendab, et nimikoormusel ei tohi vooluviga ületada 0,5% ja nurgaviga 30'. Kaitsevoolutrafo de põhi-probleem on vea suurenemine suure voolu korral ning aperioidilisest primaarlühisvoolust ja sellest tingitud südamikujääkvoost põhjustatud lisaviga. Kaitsevoolutrafo de täpsusklassid on 5P ja 10P (tähis P osutab kaitsetrafole). Voolutrafo talitus on lähedane lühitalitlusele. Seetõttu on voolutrafole ohtlik sekundaarahela katkemine, mille korral voolutrafo siirdub hetkega lühitalitlusest tühijooksutalitlusele. Tulemuseks on ohtlikult kõrge kuni kümne kilovoldini ulatuv pinge. Sellele lisandub voolutrafo südamiku oluline kuni sada korda normaalset ületav kuumenemine. Kaablite vooluanduritena kasutatakse **Rogowski vööd**, mis kujutab endast toroidalusele sümmeetriliselt mähitud õhksüdamikuga pooli. Toroidi keskelt viiakse läbi voolujuht. Joonistel 8.5 ja 8.6 Merlin Gerlin voolu- ja pingetrafo de.



Joonis 8.4 Mõõtevoolutrafo (a) ja kaitsevoolutrafo (b) südamiku magneetimiskõver

Pingetrafo de jagunevad samuti mõõte- ja kaitsetrafo deks. Pingetrafo talitus on lähedane tühijooksutalitlusele ja seepärast on pingetrafole ohtlik lühis sekundaarahelas, mille tulemusena trafo mähised kuunenevad. Ülikõrgetel pingetel kasutatakse peamiselt mahtvuslikust pingejagurist ja pingetrafo st koosnevat mahtvuslikku pingejagurtrafo t. Kasutusel on ka resistants- ehk aktiivtakistus-pingejagurid. Kaitsepingetrafo de täpsusklassid on 3P ja 6P.



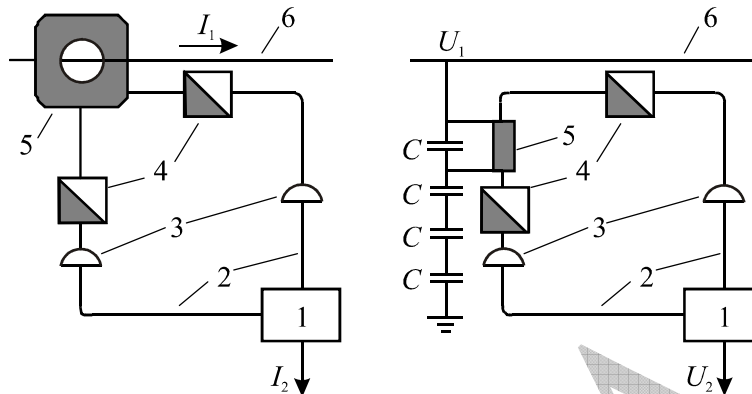
Joonis 8.5 Voolutrafod



Joonis 8.6 Pingetrafod

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 sümmeetriskeskmeta kristall. Pockelsi efektile põhinevas pingetajuris (joonis 8.7a) muutub elektrivälja tugevusega võrdeliselt valguse murdumisnäitaja. Voolutajur (joonis 8.7b) tugineb Faraday efektile, mille kohaselt valguse võnketasandi pöördenurk muutub võrdeliselt magnetvälja tugevusega. Mõlemal juhul edastatakse mõõteteeave lõppmuundurisse valgusjuhi kaudu. Valgusallikaks on valgusdiodid ja lõppmuunduriks fotodiodid. Joonisel 8.7 on elektroonikaplokk 1, valgusjuht 2, lääts 3, polarisaator 4, kristall 5 ja primaarahel 6.

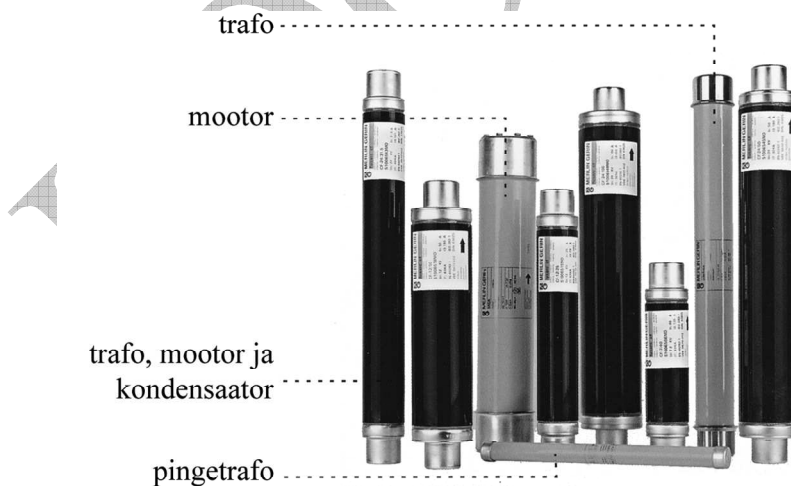


Joonis 8.7 Pinge (a) ja voolu (b) valgusanduri põhimõtteskeem

## 8.2 Keskpingevõrgu kaitse

### 8.2.1 Kaitseadmed keskpingel

Keskpingel leiavad kaitseadmetena kasutamist **sulavkaitsmed** ja **kaitsereleed**. Keskpinge sulavkaitsmete toimimispõhimõte on sama mis madalpingelgi (p 3.3.1). Oluline on, et sulavkaitsme toimekiirus oleneb voolu väärtusest ja tunnusjoon peab sobima kaitstava objekti (trafo, mootor, kondensaatorpatarei) omadustega. Joonisel 8.8 on komplekt firma Merlin Gerlin sulavkaitsmeid.



Joonis 8.8 Keskpingesulavkaitsmed

Kaitserelee ei katkesta vooluahelat iseseisvalt, vaid annab rakendumisel lülitus-seadmele lahtussignaali, mille põhjal lülitusmehhanism käivitub ja lüliti katkestab vooluahela.

### 8.2.2 Kaitse sätete valik

Kaitse tunnussuuruse säte määratakse kõikidele kaitsetele ühtemoodi. Sätte määramisel lähtutakse selektiivsustingimustest, mis maksimaalkaitse ja minimaalkaitse jaoks on erinevad. Maksimaalkaitisel peab tunnussuuruse **sätteväärtus**  $x_s$  olema suurem kui **välistusväärtus**  $x_v$ , mille korral kaitse ei tohi rakenduda. Seega on mitterakendumise tingimus

$$x_s > x_v$$

Minimaalkaitisel peab tunnussuuruse sätteväärtus olema välistusväärtusest väiksem. Seega on mitterakendumise tingimus

$$x_s < x_v$$

Sätte üldvalem on

$$x_s = k_v x_{arv}$$

kus  $x_{arv}$  – tunnussuuruse arvutuslik välistusväärtus

$k_v$  – välistustegur.

Maksimaalkaitisel võrdub tunnussuuruse arvutuslik välistusväärtus suurima võimaliku välistusväärtusega  $x_{arv} = x_v^{\max}$  ja välistustegur on ühest suurem  $k_v > 1$ , tavaliselt  $k_v = 1,05 \dots 2,0$ . Minimaalkaitisel võrdub tunnussuuruse arvutuslik välistusväärtus vähima võimaliku välistusväärtusega  $x_{arv} = x_v^{\min}$  ja välistustegur on ühest väiksem  $k_v < 1$ , näiteks distantskaitisel  $k_v = 0,85$ .

Viitkaitse korral tuleb arvestada kaitse ennistumisega, mille vältimiseks kasutatakse sätteväärtuse leidmisel **ennistustegurit**  $k_e < 1$

$$x_s = (k_v / k_e) x_{arv}$$

Näiteks vanematel volureleedel on ennistustegur  $k_e \geq 0,8$ .

Tavaliselt lülitatakse kaitseadmed keskpingevõrku läbi mõõtetrafode, mis transformeerivad primaarvoolu  $I^{prim}$  ja -pinge  $U^{prim}$  releele sobivaks sekundaarvooluks  $I^{sek}$  ja -pingeks  $U^{sek}$ . Sel juhul tuleb arvestada mõõtetrafo **ülekandeteguriga**  $n_T$  ning volutrafode korral ka lülitusskeemist sõltuva **skeemiteguriga**  $k_{sk}$ . Tähtühenduse korral  $k_{sk} = 1$ , kolmnurkühenduse korral  $k_{sk} = \sqrt{3}$  ja nulljärgnevusvoolu mõõtmisel  $k_{sk} = 3$ .

Voolukaitsele toimiva sekundaarvoolu sätteväärtus  $I_s^{sek}$  leitakse valemiga

$$I_s^{sek} = k_{sk} I_s^{prim} / n_{TA}$$

ning pingekaitsele rakenduva sekundaarpinge sätteväärtus  $U_s^{sek}$  valemiga

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

kus  $n_{TV}$  on pingetrafo ülekandetegur.

Eeltoodu põhjal avaldub sekundaartakistuskaitse sätteväärtus valemiga

$$Z_s^{sek} = \left( \frac{U_s^{prim} / n_{TV}}{(I_s^{prim} / n_{TA}) k_{sk}} \right) = \frac{U_s^{prim} n_{TA}}{I_s^{prim} n_{TV} k_{sk}} = Z_s^{prim} \left( \frac{n_{TA}}{n_{TV} k_{sk}} \right)$$

Kaitse ajasätte määramise vajadus tekib viitkaitsete korral. Ajasäte peab olema suurem kui välislühise kestus  $t_{k\text{väl}}$

$$t > t_{k\text{väl}}$$

Liinide jadatühenduse korral peab selektiivsuse tagamiseks liini  $j$  viitkaitse ajasäte  $t_{kj}$  olema **varuaja**  $t_{varu}$  võrra suurem lühise kestusest toiteallikast kaugemale jäävas naaberliinis  $j-1$

$$t_{kj} = t_{k\ j-1} + t_{varu}$$

Lühise kestus liinis võrdub liini väljalülitusajaga, mis koosneb kaitse  $KA$  rakendusajast ja võimsuslüliti  $VL$  väljalülitusajast. Seega

$$t_{k\ j-1} = t_{KA\ j-1} + t_{VL\ j-1}$$

Liini tegelik väljalülitusaeg võib hälbida oodatavast väärtusest nii positiivses kui ka negatiivses suunas. Väljalülitamisaja hälbeid võetakse arvesse positiivse ja negatiivse veaga  $t^+$  ja  $t^-$ . Kaitse selektiivsuse tagamiseks peab arvestama võimalusega, et liini  $j-1$  väljalülitusaeg võib olla positiivse vea võrra pikem ja liinil  $j$  negatiivse vea võrra oodatust lühem. Seega tuleb varuaega suurendada  $t_j^- + t_{j-1}^+$  võrra. Elektromehaaniliste releede korral peab arvestama ka relee võimaliku ennistumisega ja suurendama varuaega liini  $j$  relee ennistusaja  $t_k^e$  võrra. Kokku võttes saab liini  $j$  kaitsva viitrelee ajasätte avaldada valemiga

$$t_{kj} = t_{k\ j-1} + t_{Q\ j-1} + t_{j-1}^+ + t_j^- + t_k^e + t_{varu}$$

kus viimase viie liikme summa moodustab selektiivsuse tagamiseks vajaliku **välistusaja** ehk **selektiivsusastme**  $\Delta t_j$

$$\Delta t_j = t_{Q\ j-1} + t_{j-1}^+ + t_j^- + t_k^e + t_{varu}$$

ning  $t_{kj} = t_{k\ j-1} + \Delta t_j$ . Orienteerivad välistusajad on tabelis 8.1.

Tabel 8.1 Elektromehaaniliste releede välistusajad

Välistusaja komponendid	Sõltumatu viitega kaitse s	Sõltuva viitega kaitse s
$t_Q$	0,04...0,35	0,04...0,35
$t^+ + t^-$	0,03...0,25	0,1...0,4
$t_k^e$	0	0,2
$t_{varu}$	0,1	0,2
Välistusaaeg $\Delta t$	0,17...0,7	0,54...1,15

Erinevate releekaitsepõlvkondade keskmised välistusajad on

- elektromehaanilistel kaitsetel  $\Delta t = 0,5$  s
- staatilistel kaitsetel  $\Delta t = 0,3$  s
- mikroprotsessorkaitsetel  $\Delta t = 0,15$  s.

Viitkaitse ajasäte võib olla konstantne või sõltuda tunnussuurusest. Vastavalt on tegemist kas sõltumatu või sõltuva viitega kaitsega. Tavaliselt on sõltuva viitega kaitse tunnussuurusteks vool või takistus. Joonisel 8.9 on erinevate kaitsetüüpide tunnusjooned.

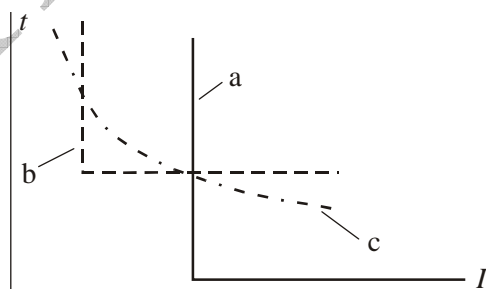
### 8.2.3 Voolukaitse

Elektrivõrkudes on voolukaitse tähtis koht. Voolukaitse põhielementideks jaotusvõrgus on sulavkaitsmed, kaitseülilid ja kaitserleed. Kaitseüliliteid kasutatakse vaid madalpingevõrkudes. Sulavkaitsmed leiavad madalpingevõrkude kõrval rakendust ka kesk- ja isegi kõrgepingevõrkudes nimipingeni kuni 110 kV. Põhiliselt rakendatakse kesk- ja kõrgepingevõrkudes voolukaitseks siiski liigvoolureleesid. Kaitseks lühisvoolude vastu on oluline koht ka alaja liigpingereleedel. Liigvoolukaitse lülitab rikkis ahela välja. Ahela tagastamiseks kasutatakse taaslülitusautomaate.

Liigvoolukaitse tunnussuuruseks on vool – liigvoolukaitse rakendub sättevoolu ületava voolu korral. Liigvoolukaitsele esitatavad nõuded on

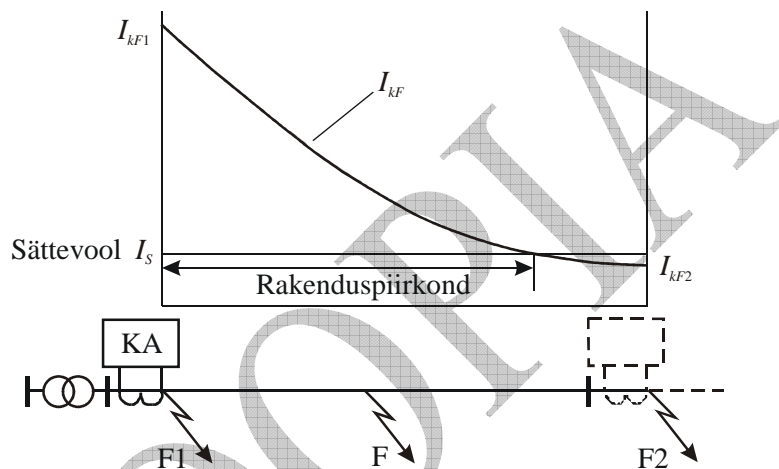
- selektiivsus – rikke korral väljalülitatav võrguosa peab olema nii väike kui võimalik
- kiirus – rikke põhjustatud kahjud peavad jääma võimalikult väikeseks
- tundlikkus – kaitse peab reageerima võimalikult väikesele voolu muutusele
- hõlmavus – kõik võrgu elemendid ja kogu võrk peavad olema kaitstud
- lihtsus ja töökindlus
- katsetatavus talitlust katkestamata.

Liigvoolukaitse võib olla nii hetkkaitse kui sõltumatu või sõltuva viitega. Voolukaitsete tüüpilised tunnusjooned on joonisel 8.9.



Joonis 8.9 Kaitse tunnusjooned: hetkkaitse (a), sõltumatu viitega viitkaitse (b), sõltuva viitega viitkaitse (c)

**Hetkkaitse** viide ei ole tahtlikult sätestatud, vaid on tingitud kaitse vähimast tehniliselt võimalikust rakendusajast. Hetkvoolukaitse rakendumisaeg on 5...100 ms. Hetkkaitse selektiivsus tagatakse kaitse poolt kaitstava piirkonna piiritlemisega. Hetkkaitse ei tohi rakendada, kui viga tekib tema kaitsetsoonist väljaspool. Hetkkaitse rakenduspiirkond määratakse suurima lühisvoolu  $I_k$  järgi, kui lühis tekkis kaitstava liini või elemendi kaugeimas punktis, kus lõpeb vaadeldava kaitse poolt kaitstav lõik. Ühepoolse toitega radiaalliinis hakkab lühisvool kasvama, kui lühisekoht nihkub toiteallika poole. Hetkkaitse sätestamist ühepoolse toitega liini kaitsmiseks illustreerib joonis 8.10.



Joonis 8.10 Hetkkaitse toimimispõhimõtte ühepoolse toitega radiaalvõrgus

Hetkkaitse KA sättevool  $I_s$  valitakse tingimusel, et kaitse ei tohi rakendada, kui lühispunkt asub järgmises kaitstavas tsoonis ehk kaugemal kui  $F2$ . Selle tagamiseks peab kaitse sättevool  $I_s$  olema suurem kui punktis  $F2$  esinev suurim lühisvool  $I_{kF2}$ . Sättevoolu arvutamiseks kasutatakse **välüstustegurit**  $k_v$

$$I_s = k_v I_{kF2}$$

Välüstusteguri 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 on kujutatud joonisel 8.10, või analüütiliselt, avaldades esmalt lühisvoolu funktsioonina lühisekoha kaugusest  $I_k = I_k(l)$  ja leides seejärel otsitava rakenduspiirkonna  $l$  avaldisest

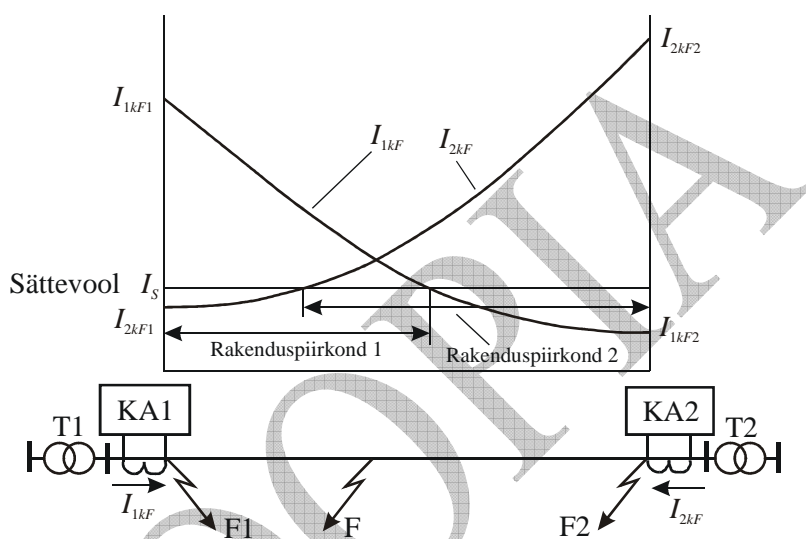
$$I_s = k_v I_k(l)$$

Kahepoolse toitega liinil paiknevad kaitseesadmed liini mõlemas otsas ja lühisvool muutub sõltuvalt lühise asukohast joonise 8.11 järgi. Esmalt leitakse trafo  $T1$  poolt tulev lühisvool  $I_{1kF2}$  tingimusel, et lühis on punktis  $F2$ , ja trafo  $T2$  poolt tulev lühisvool  $I_{2kF1}$  tingimusel, et lühis on punktis  $F1$ . Kahepoolse

toitega liini mõlemas otsas asuva kaitse sättevoolud peavad olema võrdsed ja arvutatakse suurema lühisvoolu järgi. Joonise 8.11 kohaselt on  $I_{2kF1}$  suurem kui  $I_{1kF2}$  ja seega arvutatakse antud näite puhul sättevool valemiga

$$I_s = k_v I_{2kF1}$$

Nüüd kujuneb liini keskele 1. ja 2. rakenduspiirkonna ühine lõik, kus esineva lühise korral rakenduvad kohe mõlemad hetkkaitseid  $KA1$  ja  $KA2$ . Rõhutagem, et hetkkaitset kasutatakse põhikaitseks, mitte reservkaitseks.



Joonis 8.11 Hetkkaitse toimimispõhimõtte kahepoolse toitega liinil

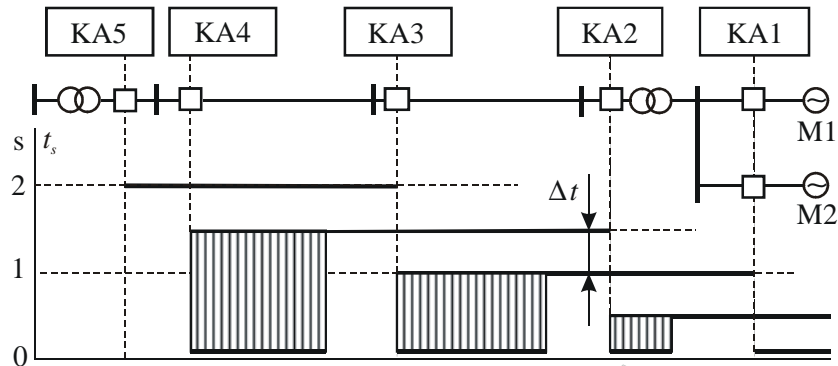
**Sõltumatu viitega voolukaitse** rakendumisaeg sätestatakse vajaduse kohaselt ja see võib ulatuda mitme sekundini. Sageli on sõltumatu viitega voolukaitse kaheastmeline, kus teatud voolu väärtusest suuremate voolude korral hakkab kaitse toimima hetkkaitseks.

Sõltumatu viitega liigvoolukaitse selektiivsus tekitatakse rakendusviite sobiva valikuga. Viidete valikut alustatakse toitepunktist kõige kaugemal paiknevast võrgu punktist, kus viite suuruseks võetakse hetkkaitse rakendusaeg. Edasi valitakse rakendusviited astme põhimõttel, mille järgi on suunal koormus – toiteallikas asuva iga järgmise kaitse viide välistusaja ehk selektiivsusastme võrra suurem eelmise kaitse viitest

$$t_j = t_{j-1} + \Delta t_j$$

Selektiivsusaste  $\Delta t_j$  peab olema nii suur, et piirkonna  $j-1$  kaitse jõuaks rakenduda ja lüliti lahutada enne, kui kulub ära piirkonna  $j$  kaitse viiteaeg. Selektiivsusastme arvutamist on käsitletud punktis 8.2.2. Ajaselektiivsuse kujundamise näide on joonisel 8.12.





Joonis 8.12 Sõltumatu viitega kaitsete sätestamine ja ühildamine hetkkaitsetega radiaalvõrgus

Nagu näha joonisel 8.12, võib sõltumatu viitega kaitse toimida nii põhi- kui ka reservkaitsena. Näiteks kui mootori lühise korral põhikaitse KA1 ei rakendu, toimib reservkaitsena kaitse KA2. Selliselt kujundatud aegselektiivsus põhjustab põhikaitsetele suhteliselt suuri viiteaegu. Viiteaegade vähendamiseks kombineeritakse sõltumatu viitega kaitset hetkkaitsetega. Sellised kaheastmelised kaitset rakenduvad omal kaitsepiirkonnas tekkivate rikete korral kiiresti. Hetkkaitse mõju on joonisel 8.12 tähistatud viirutatud aladega.

**Sõltuva viitega voolukaitse** rakenduskiirus on pöördvõrdeline voolu suurusega, mis tagab suuremate voolude kiirema väljalülitamise ja väiksemate voolude korral suurema viite. Tunnusjoon võib sõltuvalt vajadusest olla järsem või laugem. Standardi IEC 60255 kohaselt eristatakse nelja tüüpilist tunnusjoont:

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

Kaitse rakendusaeg arvutatakse valemiga

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

kus  $k$  – sätteajategur

$I$  – vool

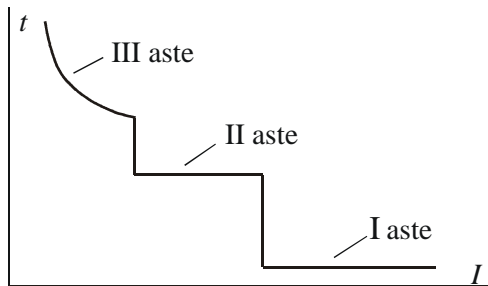
$I >$  – voolusäte

$\alpha, \beta$  – tegurid.

Tegurid  $\alpha$  ja  $\beta$  sõltuvad tunnusjoone tüübist:

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

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



Joonis 8.13 Kolmeastmelise kaitse tunnusjoon

8.13. Kaitse teist ja kolmandat astet kasutatakse tavaliselt reservkaitsetena. Näiteks jaotusvõrgu jadaahelas toimivad toiteallika pool paiknevate releede kõrgemad astmed kaugemal olevate releede kaitsetsoonide reservkaitsetena. Selektiivsus tagatakse nii sättevooluga kui ka sättejaga, mille alusel eristatakse **vooluselektiivsust** ja **ajaselektiivsust**.

Kolmeastmelise liigvoolukaitse toimimispõhimõtet aitab selgitada joonis 8.14. Arusaadavuse parandamiseks on siin kaitse III aste samuti sõltumatu viitega. Kaitse astmeid iseloomustavad järgmised seosed:

- I aste on hetkkaitse, mille sättevool  $I_s^I$  arvutatakse järgmise kaitsetsooni alguse lühisvoolu  $I_k$  järgi, kasutades I astme välistustegurit  $k_v^I$

$$I_{sj}^I = k_v^I I_{kj-1}^I$$

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

Joonisel 8.14 on I astme rakenduspiirkonnad  $A_j B_j$  ja  $A_{j-1} B_{j-1}$ .

- II astme viiteaeg arvutatakse valemiga

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

kus  $\Delta t$  on selektiivsuste ja  $t_j^I$  hetkkaitse rakendusviide, mis antud näite kõikidel releedel on sama suur. II astme sättevoolud arvutatakse järgmise kaitse I astme sättevoolu järgi, kasutades II astme välistustegurit  $k_v^{II}$

$$I_{sj}^{II} = k_v^{II} I_{sj-1}^I$$

$$I_{sj-1}^{II} = k_v^{II} I_{sj-2}^I$$

Joonisel 8.14 on II astme rakenduspiirkonnad  $B_j C_j$ ,  $B_{j-1} C_{j-1}$  jt.

- III astme viiteaeg leitakse seostest

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

$$t_{j-1}^{III} = t_{j-1}^{II} + (n-1)\Delta t \quad \text{või} \quad t_{j-1}^{III} = t_{j-2}^{III} + \Delta t$$

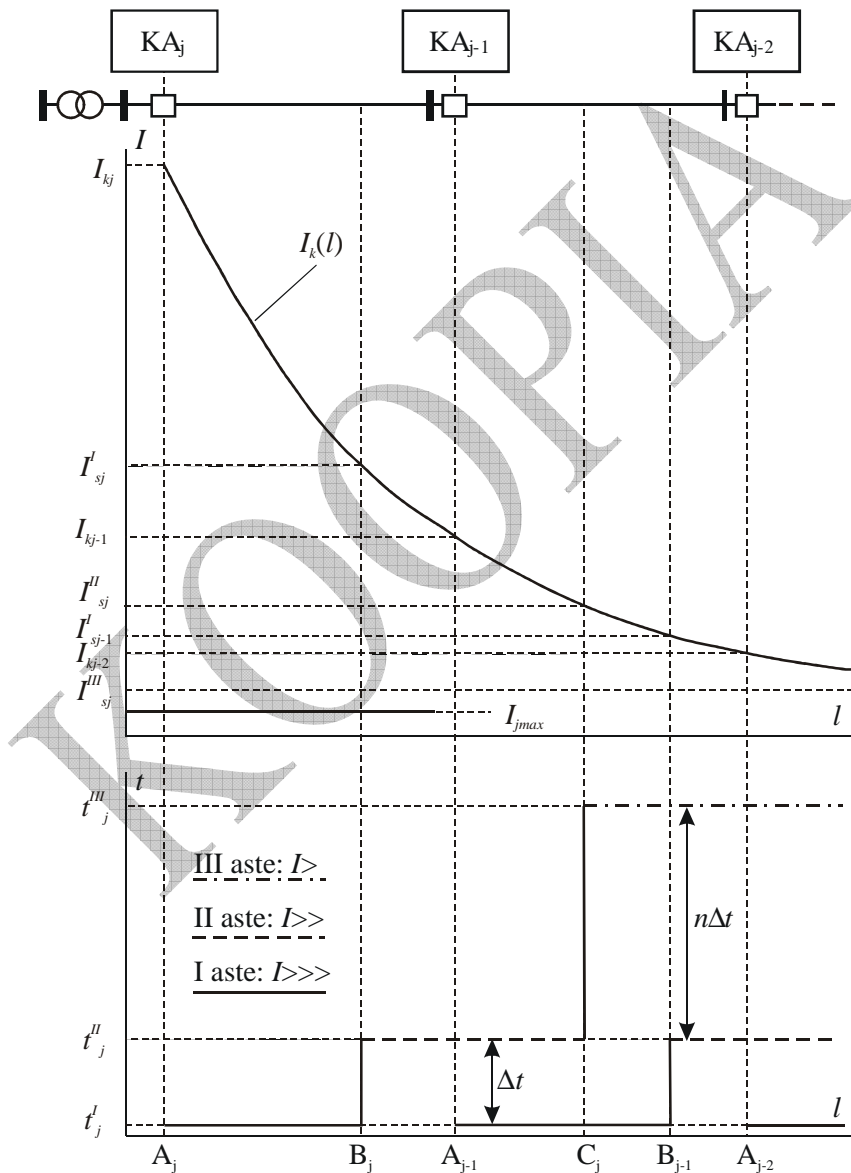
kus  $n$  on rele järjekorranumber jadaahelas, kui lugemist on alustatud toiteallika suhtes kõige kaugemast releest. III astme sättevoolu arvutatakse valemiga

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

kus  $k_v^{III}$  – III astme välistustegur

$k_e$  – relee ennistustegur, mis näitab kaitse ennistusvoolu suhet rakendusvoolu ja on enamasti  $k_e = 0,6 \dots 0,9$

$I_{j\max}$  – suurim võimalik koormusvool.

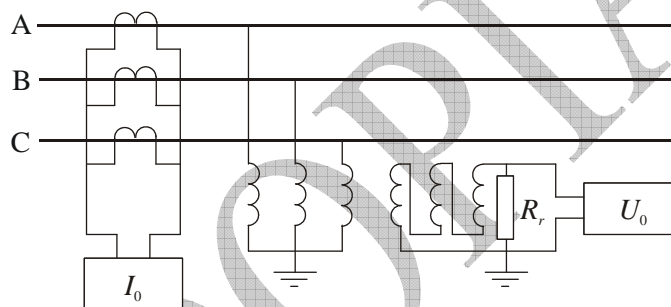


Joonis 8.14 Kolmeastmelise liigvoolukaitse toimispõhimõte

$I_{j\max} = 5I_{nM}$ , kui tegu on asünkroonmootoritega, ja  $I_{j\max} = 4I_n$ , kui segakoormusega. Välistustegurid sõltuvad konkreetsetest tingimustest ja valitakse tavaliselt piirides  $k_v = 1,1 \dots 1,5$ .

### 8.2.4 Maalühiskaitse

Maalühiskaitse on ette nähtud kaitseks keskpingevõrgus esinevate maaühendusriikete korral. Maalühiskaitse tunnussuurused on nulljärgnevuspinge ja -vool, mille mõõtmiseks lülitatakse pinge- ja voolutrafad kõikidesse faasidesse. Nulljärgnevusvoolu määramiseks ühendatakse voolutrafad rööpselt ja mõõdetakse kolme faasi summaarset voolu, mis teatavasti võrdub kolmekordse nulljärgnevusvooluga. Nulljärgnevuspinge mõõtmiseks ühendatakse pingetrafade primaarmähised tähte ja sekundaarmähised avatud kolmnurka. Õhuliinide nulljärgnevusvoolu ja -pinge mõõteskeemid on joonisel 8.15.



Joonis 8.15 Õhuliinide nulljärgnevusvoolu ja -pinge mõõteskeemid

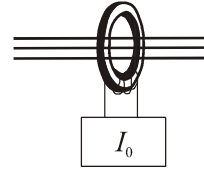
Maalühiskaitse töökindluse seisukohalt on oluline, et ühes mõõtekohas kasutatud mõõtetrafod oleksid kõikides faasides identsed. Lisaks peaksid faaside koormusvoolud olema samas suurusjärgus. Nulljärgnevusvoolude piisavalt täpseks mõõtmiseks ei tohiks voolutrafade ülekandetegurid olla liialt suured. Pingetrafade puhul tuleb arvestada ferreesonantsist põhjustatud ohtudega, mille vähendamiseks ühendatakse pingetrafade avatud kolmnurka oomiline takistus  $R_r = 20 \dots 30 \Omega$  võimsusega  $300 \dots 800 \text{ W}$ .

Kaablite nulljärgnevusvoole mõõdetakse kõiki kolme faasijuhet aheldava ühise mõõtetrafoga nii, nagu on näidatud joonisel 8.16. Õhuliinidega võrreldes on kaablitel võimalik mõõta nulljärgnevusvoole tunduvalt täpsemalt suurusega isegi alla  $0,5 \text{ A}$ . Seepärast soovitatakse nulljärgnevusvoolusid mõõta just kaablite peal. Nulljärgnevuspinget saab hõlpsalt mõõta õhuliinidel. Kaablite nulljärgnevuspinget õnnestub määrata vaid kaablite otstes, kus tekib juurdepääs faasijuhtidele. Nulljärgnevuspinge järgi rakenduv maalühiskaitse ei saa olla selektiivne, kuna maaühendusel tekkiv nulljärgnevuspinge on kogu galvaaniliselt ühendatud võrgus ligikaudu ühesuurune. Nulljärgnevuspinge tekkimine annab küll tunnistust maaühenduse olemasolust, kuid mitte selle asukohast.

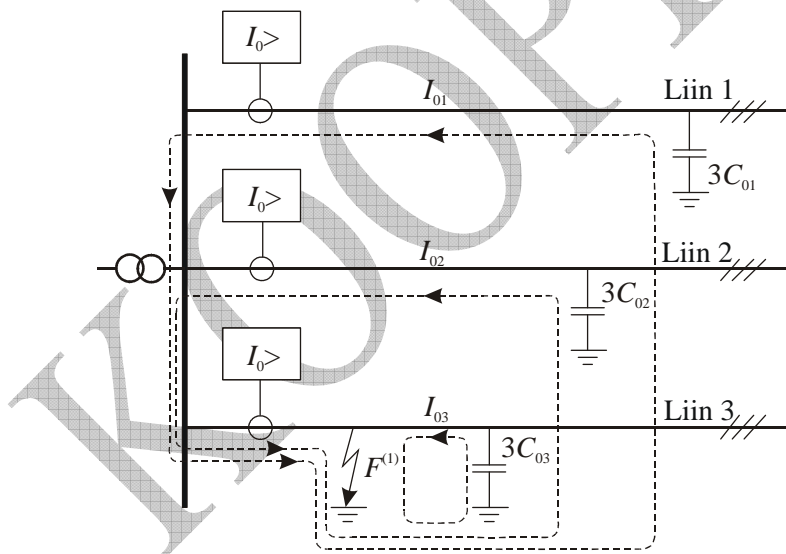
Seepärast kasutatakse nulljärgnevuspingereleesid peamiselt maaihenduse olemasolu kindlakstegemiseks ja sellest teatamiseks.

Maalühiskaitse selektiivsuse saavutamiseks tuleb kasutada nulljärgnevusvoolureleesid. Nulljärgnevusvoolureleed võivad olla suunatundlikud või mitte. Mittesuunatundliku rele juures on oluline, et võrgu maaihendusvool oleks tunduvalt suurem kaitstava liini tavalisest nulljärgnevusvoolust.

Maalühiskaitse töökindluse tõstmiseks kasutatakse nulljärgnevuspingerelee blokeeringut. Kui nulljärgnevuspingerelee ei ole rakendunud, siis ainult nulljärgnevusvoolu olemasolu ei ole veel maaihenduse tunnuseks ja maalühiskaitse ei rakendu. Kui maaihendusvool ei ole piisavalt suur, tuleb vigastatud liini kindlakstegemiseks mõõta nulljärgnevusvoolu suunda suunatundlike releede abil, arvestades, et vigastatud liini maaihendusvoolu suund on vastupidine vigastamata liinide nulljärgnevusvoolude suunale. Selgitav skeem on joonisel 8.17.



Joonis 8.16 Kaabelliinide nulljärgnevusvoolu mõõteskeem

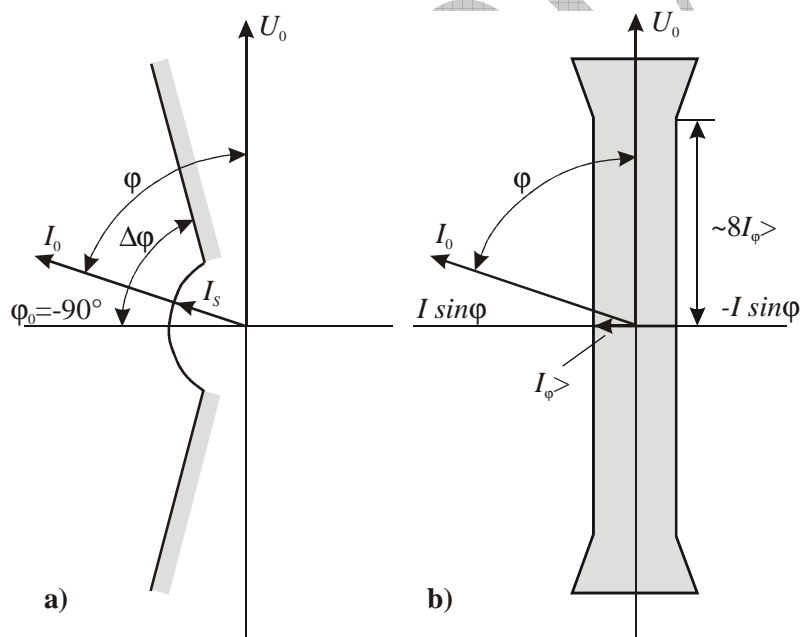


Joonis 8.17 Nulljärgnevusvoolude kulgemine maaihendusel

Isoleeritud neutraaliga võrkude maalühiskaitseks kasutatakse enamasti suure tundlikkusega nulljärgnevusvoolukaitset, vajadusel suunatud nulljärgnevusvoolukaitset. Maalühiskaitse rakendumise tulemusel lülitatakse vigastatud liin välja ja sellega ühendatud tarbijatel tekib toitekatkestus. Enamasti järgneb väljalülitamisele edukas kiirtaaslülitus ja tekkinud pingepaus ei ületa tavaliselt 0,2...0,4 s. Siiski häirib see oluliselt eelkõige arvutikasutajaid, aga ka tootmisprotsesse ning automaatikaseadmete tööd.

Elektrivarustuskindlust saab suurendada maaühenduste arvu vähendamisega. Keskpingevõrkudes moodustavad maaühendused 60...70% kõigist riketest. Erinevalt faasidevahelistest lühistest ei põhjusta ühefaasiline maaühendus keskpingevõrgus häiringuid madalpingetarbijatele, kuid maaühendusega kaasnevad rikkekohas maaühenduspinged, mille suurus sõltub maaühendusvoolust ja maandustakistusest ja mis võivad olla ohtlikud rikkekoha lähedal olevatele inimestele ja loomadele. Elektriõhutuseeskirjad lubavad maaühendus-, puute- ja sammupinget enamalt 70 V. Suuremate pingete korral peab maalühiskaitse liini välja lülitama.

Maaühendusvoolu suuruse määrab galvaanilises ühenduses olevate liinide kogupikkus. Keskpingevõrgu laiendamine ühe alajaama piires suurendab ka maaühendusvoolu. Maaühendusvoolu saab piirata uute toitealajaamade ehitamisega või kaarekustutuspoolide kasutamisega. Maaühenduse kestust ja toitekatkestuste ulatust saab vähendada selektiivse ja kiiretoimelise maalühiskaitse abil.



Joonis 8.18 Suunatud maalühiskaitse toimimise tsoonid: analoogrelee (a) ja reaktiivvoolu mõõtev mikroprotsessorrelee (b)

**Suunamata maalühiskaitse** kasutamise eelduseks on piisavalt suurt maaühendusvoolu tekitava galvaaniliselt ühendatud võrgu ehk taustvõrgu olemasolu. Näiteks joonisel 8.17 toodud skeemi korral läbib kolmanda liini releekaitse voolutrafot kogu taustvõrgu poolt genereeritav maaühendusvool. Kolmanda liini maalühiskaitse säte peab rahuldama tingimusi

$$I_s > I_{03} \text{ ja } I_s < I_{0taust}$$

kus  $I_s$  – sättevool

$I_{03}$  – liiniga 3 algava võrguosa poolt genereeritav maatuvuslik maaihendusvool

$I_{0taust}$  – vaadeldavat releekaitsekomplekti läbiv taustvõrgu poolt genereeritav maaihendusvool.

Kui neid tingimusi ei ole võimalik rahuldada, siis tuleb kasutada **suunatud maalühiskaitset**. Joonisel 8.18 on toodud suunatud maalühiskaitse tüüpilised rakenduspiirkonnad isoleeritud neutraaliga võrkudes. Tunnusjoonel *a* on analoogrelee toimimise tsoonid. Relee rakendub, kui on täidetud tingimused:

- nulljärgnevusvool ületab sättevoolu
- nulljärgnevuspinge ületab sättepinget
- nulljärgnevusvoolu ja nulljärgnevuspinge vektorite vaheline nurk  $\varphi$  on vahemikus  $\varphi_0 \pm \Delta\varphi$ , kus  $\varphi_0 = -90^\circ$  ja  $\Delta\varphi = \pm 80^\circ$ .

Tunnusjoonel *b* on reaktiivvoolu mõõtva mikroprotsessormaalühiskaitse rakendustsoonid. Kaitse rakendub, kui nulljärgnevuspinge ja reaktiivvoolu väärtused ületavad vastavaid sätteid. Suunatud maalühiskaitsete mitterakendustsoonid on joonisel 8.18 tähistatud rastriga.



Joonis 8.19 Fiidriterminalid

Resonantsmaandatud võrgus kompenseeritakse mahtuvuslikku maahendusvoolu toitetrafo neutraali ühendatud kaarekustutuspooli induktiivvooluga. Täielikult kompenseeritud võrgus läbib maahenduskohta ainult maahendusvoolu aktiivkomponent, mille suurus sõltub kaarekustutuspooli, võrgu isolatsiooni ja lühisekoha aktiivtakistusest. Seega saab resonantsmaandatud võrgu maalühiskaitse reageerida vaid maahendusvoolu aktiivkomponendile. Nulljärgnevusvoolu reaktiivkomponendi väärtus on suhteliselt tühine ja tema märk sõltub sellest, kas võrk on ala- või ülekompanseeritud. Maahendusvoolu väiksuse tõttu soovitatakse nulljärgnevusvoole mõõta kaabli ümber paigaldatud voolutrafodega. Maalühiskaitse töökindluse tõstmiseks resonantsmaandatud võrgus kasutatakse nulljärgnevuspingerelee blokeeringut.

Nüüdisajal ühitatakse nii lühisvoolukaitse kui ka maalühiskaitse mikroprotsessoripõhistesse fiidriterminalidesse. Firma Siemens fiidriterminalid näeb joonisel 8.19.

### 8.2.5 Trafode kaitse

Trafode kaitse kujundamisel peetakse silmas trafode talituslikke iseärasusi. Faasidevaheliste lühiste ja maalühiste kõrval võivad trafodes tekkida ka keerdevahelised lühised.

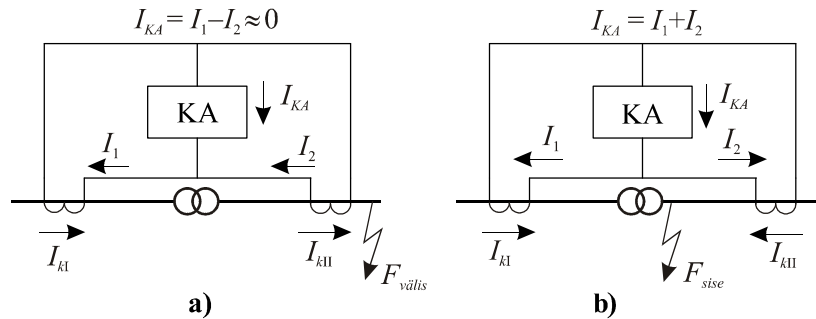
Trafo vigastuste ja lühiste põhjustajateks on tihti mitmesugused anormaal-talitlused, nagu trafo ülekoormus, välislühise liigvoolud, õlitaseme alanemine paagis ilma paagi vigastuseta jm. Trafo vigastumist soodustavad kommutatsiooniliigvoolud ja -pinged. Trafo pingestamisel tekib magneetimisvoolu tõuge, mille suurim hetkväärtus võib ületada trafo nimivoolu kuni kümme korda  $i_{\mu\max} \leq 10I_n$ . Magneetimisvool sumbub siiski kiiresti, juba 0,3...0,5 s pärast on see nimivoolust väiksem. Koormamata trafo väljalülitamisel tekitab induktiivsustesse ja mahtuvustesse salvestunud energia võnkuva liigpinge, mille suurim hetkväärtus võib ületada nimipinget kuni 5 korda. Pinge kasvades toimub lüliti lahknevate pooluste vahel kaare taassüttimine, mis piirab liigpinge liigset kasvu, ja seetõttu on tegelikult esinev liigpinge mõnevõrra väiksem, piirdudes 3...3,5-kordse nimipingega. Trafo kaitsmise juures tuleb silmas pidada ka trafo mähiste lülitusgrupist tingitud voolu ja pinge faasinurkade muutumist trafos, mistõttu voolu ja pinge faasid võivad ülem- ja alampingepoolle erineda.

Nagu muid elektrivõrgu elemente kaitstakse ka trafosid põhi- ja reservkaitsega. Põhikaitseks kasutatakse

- pikidiferentsiaalkaitset
- gaasikaitset
- rõhukaitset.

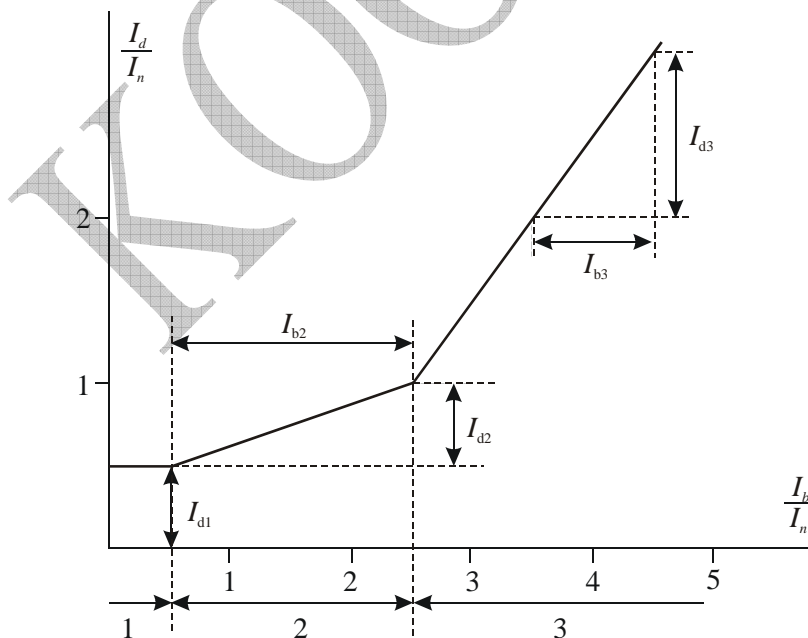
Voolukaitset rakendatakse reserv- ja ülekoormuskaitseks. Väikse võimsusega trafode korral võib voolukaitse olla trafo põhikaitseks.





Joonis 8.20 Trafo diferentsiaalkaitse toimispõhimõte välis- (a) ja siselühisel (b)

**Trafo pikidiferentsiaalkaitse** toimispõhimõtet selgitab joonis 8.20. Kui lühis tekib väljaspool trafo kaitsetsooni (joonis 8.20a), siis läbib voolutrafode mähiseid samasuunaline vool. Voolukaitset KA läbib vaid väike hälbevool  $I_{KA}$ . Voolutrafode ülekandesuhete valik peab normaaltalitusel tagama kaitset läbiva hälbevoolu puudumise või võimalikult nullilähedase väärtuse  $I_{KA} = I_1 - I_2 \approx 0$ . Välislühise korral hälbevool küll suureneb, kuid jääb oma absoluutväärtuselt endiselt väikeseks. Diferentsiaalkaitse voolusäte määrataksegi hälbevoolu järgi nii, et oleks tagatud kaitse mitterakendumine välislühise korral. Siselühise korral (joonis 8.20b) kulgevad voolutrafodes voolud eri suundades ja kaitset läbib suhteliselt suur sätevoolu ületav summaarne vool  $I_{KA} = I_1 + I_2$ . Seega on trafo diferentsiaalkaitse absoluutselt selektiivne, rakendudes vaid siselühise korral ja mitte rakendudes välislühise korral.



Joonis 8.21 Trafo diferentsiaalkaitse tunnusjoon

Nüüdisaegsetel mikroprotsessoripõhistel trafo pikidiferentsiaalkaitsetel kasutatakse voolust sõltuvaid sätteid, mille tüüpiline tunnusjoon on joonisel 8.21. Siin on  $I_d$  kaitse suhteline säte ja  $I_b$  trafot läbiv suhteline vool. Kaitse esimese tsooni sättevool  $I_{d1}$  on trafot läbivast voolust sõltumatu, kuid sõltub trafo suhtelisest magneetimisvoolust, voolutrafode veast ja trafo pinge reguleerimisvahemikust. Teise tsooni sättevoolu tunnusjoone tõus  $I_{d2}/I_{b2}$  oleneb voolutrafode täpsusklassist ja pinge reguleerimisvahemikust. Kolmandas tsoonis võrdsustatakse tavaliselt sätte tunnussuuruse tõus kahekordse teise tsooni tunnussuuruse tõusuga  $I_{d3}/I_{b3} = 2(I_{d2}/I_{b2})$ .

**Gaasikaitse** on ainus mitteelektrilise tunnussuurusega kaitse, mida kasutatakse trafo põhikaitseks. Seda kaitset tuntakse ka **Buchholzi kaitse**na. Gaasikaitse on kaheastmeline ja kahe tunnussuurusega kaitse:



Joonis 8.22 Buchholzi rele

- esimese astme tunnussuuruseks on õli liikumiskiirus relees
- teise astme tunnussuuruseks on gaasihulk relees, selle astme rakendumine annab signaali juhtimiskeskusesse.

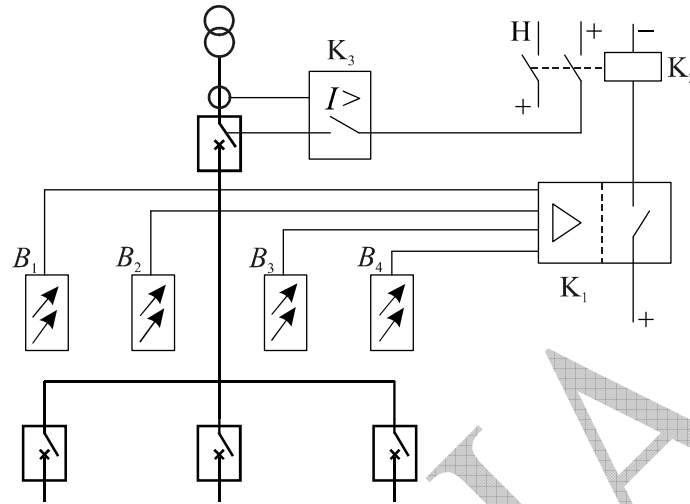
Gaasikaitse paikneb trafopaagi ja õlipaagi vahelises torus. Trafo kaane kalle peaks olema umbes 1,5%, et elektrikaare toimel trafoõli lagunemisel tekkinud gaasid läbiksid gaasireleed. Buchholzi rele on joonisel 8.22.

**Voolukaitse** tunnussuurusteks võivad olla voolu sümmeetrilised komponendid – päri-, vastu- ja nulljärgnevusvool  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_0$ . Nulljärgnevusvoolu asemel kasutatakse ka kolme faasi summavoolu, mis võrdub kolmekordse nulljärgnevusvooluga  $3I_0$ . Vajadusel võib voolukaitse reageerida ka voolu suunale ehk kompleksvoolule.

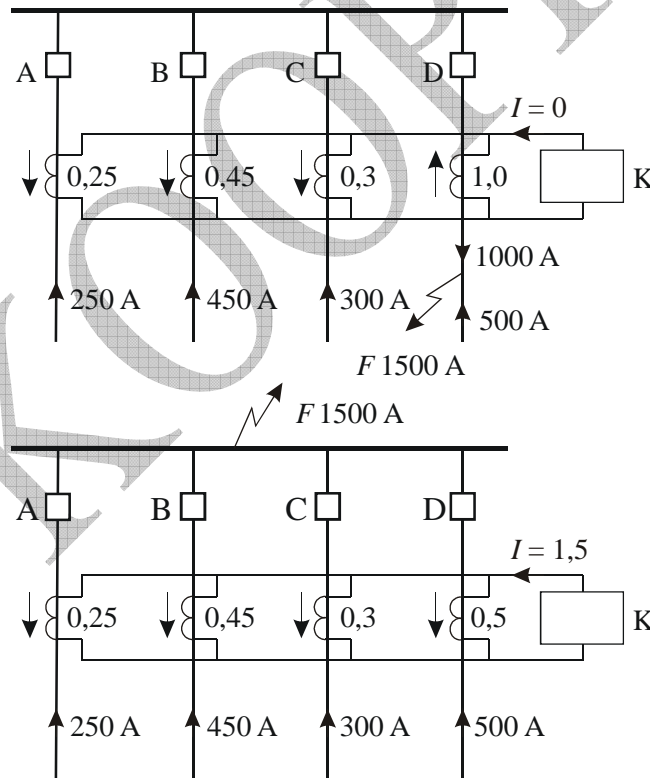
Kaitse töökindluse suurendamiseks lisatakse voolukaitsele **pingeblokeering**, et samal ajal voolu suurenemisega kontrollida faasi- või liinipinge vähenemist ja/või vastujärgnevuspinge suurenemist.

### 8.2.6 Jaotla lattide kaitse

Alajaamade ja jaotlate latid on elektrisüsteemi sõlmpunktideks ja neil esinevad lühised peaksid olema eriti lühiajalised. Lihtsamal juhul kasutatakse lattide kaitseks liigvoolukaitset. Oluliste lattide töökindluse tõstmiseks kasutatakse täiendavalt elektrikaarekaitset ja diferentsiaalkaitset.



Joonis 8.23 Elektriarekaitsega latikaitse



Joonis 8.24 Lattide diferentsiaalkaitse

**Elektrikaarekaitse** tunnussuuruseks on elektrikaarega kaasnev valgusimpulss. Elektrikaarekaitsega latikaitse skeem on joonisel 8.23. Kui rakendub vähemalt üks valgusanduritest  $B_1 \dots B_n$ , siis rakendub rele  $K_1$  ja abirelee  $K_2$ , mis omakorda lülitab sisse abitoitepinge liigvoolukaitsele  $K_3$ . Kui samaaegselt on liigvoolukaitse  $K_3$  avastanud lühisvoolu, siis kaitse  $K_3$  rakendub ja võimsuslüliti lülitatakse välja. Lühisvoolu puudumisel loetakse releed  $K_1$  rakenduma sundinud valgusimpulssi elektrikaarega mitte seotuks ning voolublokeeringu tõttu liigvoolukaitse ei rakendu ja võimsuslüliti jääb sisselülitatuks.

**Lattide diferentsiaalkaitse** toimimist selgitavad skeemid on joonisel 8.24. Välislühise korral vool releed ei läbi  $I = 0$ , kuid lattidel esineval lühise ehk siselühise korral läbib releed vool, mis joonisel on  $I = 1,5$  ühikut.

### 8.3 Süsteemikaitse

Süsteemikaitse on ette nähtud elektrisüsteemi stabiilse töö toetamiseks. Jaotusvõrgus toimivatest süsteemikaitsetest on olulisemad koormusvähenduskaitse ja võimsuslüliti tõrkekaitse.

#### 8.3.1 Koormusvähenduskaitse

Koormusvähenduskaitse ülesandeks on süsteemi koormuse vähendamine järsu võimsusvajaku korral. Aktiivvõimsuse puudujäägi tekkimisel näiteks genereeriva võimsuse väljalülitumise tõttu ning ebapiisava pöörleva reservi korral langeb kogu süsteemi sagedus. Reaktiivvõimsusevajak põhjustab lokaalse pingeanemise. Vastavalt sellele esineb kahte liiki koormusvähenduskaitseid – alaseduskormusvähenduskaitse ja alapingekoormusvähenduskaitse. Alaseduskormusvähenduskaitse kaitseobjektiks on elektrisüsteem tervikuna või süsteemist eraldunud sünkroonpiirkond. Alapingekoormusvähenduskaitse kaitseobjektiks on süsteemi osa reaktiivvõimsusvajaku piirkonnas, näiteks mingi alajaama toitepiirkonnas. Mõlemad kaitseid on paljuastmelised ja igal astmel on omad sagedus-, pinge- ja ajasätted. Sageduse ja pinge normaalkäitumise taastumisel täidavad mõlemad kaitseid ka koormustaastusfunktsioone, lülitades koormuse vastavalt etteantud programmile taas sisse, kontrollides samas pidevalt süsteemi sagedust ja pinget.

Süsteemi sageduse langemisel või süsteemiosa pinge alanemisel vajaliku väljalülitatava koormuse suurus oleneb sageduse ja pinge koormustundlikkusest. Teavet sageduse ja pinge koormustundlikkusest saadakse süsteemi staatilistest koormuskarakteristikutest  $P(U, f)$  ja  $Q(U, f)$ , mis väljendavad aktiivvõimsuse  $P$  ja reaktiivvõimsuse  $Q$  tarbimise sõltuvust nii pingest  $U$  kui ka sagedusest  $f$ . Koormuste pingekarakteristikud  $P(U)$  ja  $Q(U)$  määratakse konstantsel sagedusel ja sageduskarakteristikud  $P(f)$  ja  $Q(f)$  konstantsel pingel. Iseloomulikud karakteristikud on joonisel 1.9. Nende karakteristikute tõusud iseloomustavadki koormuse pinge- ja sagedustundlikkust mingis etteantud talitluspunktis, näiteks

pingel  $U_0$  ja sagedusel  $f_0$ . Tavaliselt on pinge aktiivkoormustundlikkus oluliselt väiksem kui reaktiivkoormustundlikkus. Sageduse aktiivkoormustundlikkus on taas oluliselt suurem reaktiivkoormustundlikkusest.

**Alasageduskoormusvähenduskaitse** rakendub, kui sagedus langeb sätteväärtusest madalamale. Sageduse normaalväärtuse taastamiseks lülitab alasagedus-koormusvähenduskaitse osa koormusi välja etteantud järjekorras. Kaitse peab efektiivselt toimima sageduse langemisel nii kogu süsteemis kui selle osadeks jaotumise korral. Seetõttu paigaldatakse kaitse paljudesse süsteemi alajaamadesse ja on mitmeastmeline. Vajaliku koormuse väljalülitamise määr on sageduse languse ulatusest. Väljalülitatav koormus  $P_k$  leitakse 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  $P_0$  – sagedusest sõltumatu koormus

$P_1 \dots P_4$  – sageduse 1. kuni 4. astmega võrdeline koormus

$f_*$  – nimisagedusele  $f_n$  taandatud suhteline sagedus  $f_* = f/f_n$ .

Koormuste  $P$  indeksid 1...4 tähistavad siin erinevat tüüpi koormusi, näiteks tähistab  $P_0$  elektrotermilisi (sh hõõglambid) ja alaldusseadmed,  $P_1$  metallilõikepinke, kütuseveskeid, kolbpumpe ja kompressoreid,  $P_2$  võrgukadusid  $P_3$  ja  $P_4$  madal- ja kõrgrõhu tsentrifugaalpumpasid ning -ventilaatoreid, mis on põhilised soojuselektrijaamade omatarbeseadmed.

**Alapingekoormusvähenduskaitse** ülesandeks on taastada pinge alanemise korral pinge normaalväärtus koormuse osalise väljalülitamisega. Järsust reaktiivvõimsusvajakust tingitud pingealanemine on sageduslangusega võrreldes süsteemi talitlusele vähem ohtlik häiring. Reaktiivvõimsusvajakut on lihtsam korvata kui aktiivvõimsusvajakut, kuna sünkroongeneraatori reaktiivvõimsuse suurendamiseks piisab generaatori ergutusvoolu suurendamisest pinge automaatregulaatori abil. Lisaks on sünkroonmasinatel reaktiivvõimsuse suurendamine üle nimiväärtuse tehniliselt lubatav. Generaatorite kaasamine pingetaastusprotsessi on siiski piiratud tulenevalt pingealanemise lokaalsest iseloomust. Kui pingealanemise piirkond generaatori klemmideni ei ulatu, siis pinge automaatregulaator ei käivitu, genereeritav reaktiivvõimsus ei suurene ning pinge taastamiseks on vaja osa koormusi välja lülitada. Väljalülitamiste määr on pingealanemise sügavusest ning sõlmepinge reaktiiv- ja aktiivkoormustundlikkusest.

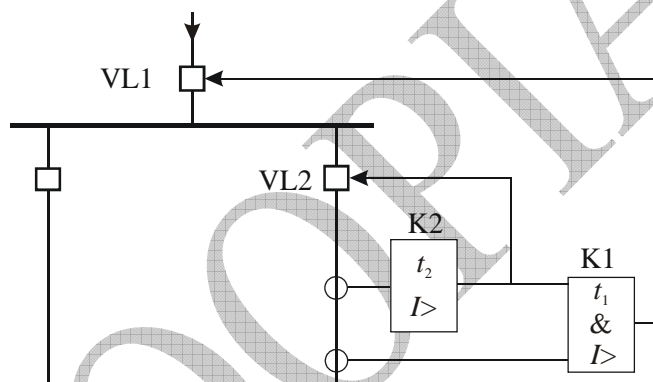
Tavaliselt moodustavad koormuse põhiosa asünkroonmootorid, mille töömoment on võrdeline pinge ruuduga. Kui pingealanemise tõttu töömoment väheneb koormusmomendini siis mootor seiskub. Vastavat pinget nimetatakse seiskumispingeks. Pinge kahanemise korral mootorid pidurdavad ja nende libistus ja vool suurenevad. Juba seiskumispingest märksa kõrgemal pingel kasvab libistuse väärtus enam kui 0,2 võrra ja asünkroonmootori vool läheneb

käivitusvoolule, mis ligikaudu võrdub viiekordse nimivooluga. Selline suur voolu kasv põhjustab pinge kiirenevat alanemist üha laiemal alal ning kogu protsess viib lõppkokkuvõttes elektrisüsteemi pingekollapsini. Alapingekoormusvähenduskaitses väldib pingekollapsi teket ja tagab süsteemi stabiilsuse.

Aktiiv- ja reaktiivvõimsusvajaku möödumisel rakendub koormustaastusautomaatika, mis hakkab väljalülitatud koormusi tagasi sisse lülitama, toimides analoogiliselt koormusvähendusautomaatikale, kuid vastupidises järjekorras.

### 8.3.2 Võimsuslülitite tõrkekaitse

Võimsuslülitite ja selle ajamite mehaaniliselt keerukad ja vaatamata sellele, et võimsuslülitite talitusvalmidust pidevalt kontrollitakse on oluline tagada elektrisüsteemi kaitset ka võimsuslülitite tõrke korral.



Joonis 8.25 Võimsuslülitite tõrkekaitse

Võimsuslülitite tõrkekaitse on ette nähtud juhaks kui põhikaitses annab võimsuslülitile väljalülitamiskäsu, kuid võimsuslülitite kontaktid jäävad suletuks. Sel juhul rakendub reservkaitses ja annab võimsuslülitile uue väljalülitamiskäsu. Reservkaitses puudusteks on aga suhteliselt suurest viitest tingitud rakendumise aeglus ja ebapiisav tundlikkus. Seepärast kasutatakse vastutusrikastes jaotlates lühise kiiremaks väljalülitamiseks tavakaitses lisaks võimsuslülitite tõrkekaitset. Tõrkekaitse on tundlik väikese viitega voolurelee, mis toimib kiiremini kui reservkaitses.

Võimsuslülitite tõrkekaitse näide on joonisel 8.25. Esitatud skeem toimib tõrkekaitseks võimsuslülitile VL2. Voolureleede K1 ja K2 rakendusvoolud on samad, kuid relee K1 rakendusviide  $t_1$  on suurem relee K2 rakendusviitest  $t_2$ . Kui läbi võimsuslülitite VL2 kulgev vool ületab relee K1 rakendusvoolu, siis esmalt rakendub relee K2 ja annab lülitile VL2 väljalülitamiskäsu. Võimsuslülitite VL2 tõrke korral rakendub relee K1 viitega  $t_1$  ja edastab väljalülitamissignaali võimsuslülitile VL1. Antud skeemi korral on K1 dubleeriv kaitses K2.

## 8.4 Lülitusautomaatika

### 8.4.1 Taaslülitusautomaat

Automaatne taaslülitus tähendab lühise tõttu väljalülitatud liini või elektrivõrgu osa kiiret uuesti sisselülitamist. Võrgu normaalne talitus taastub ja taaslülitus on edukas, kui sisselülitamisele eelnenud lühikese pingepausi ajal lühis kaob. Vastasel juhul releekaitse lülitab lühise uuesti välja ja pärast teistkordset pingepausi lülitab taaslülitusautomaat lüliti uuesti sisse. Kuna lühise kadumise tõenäosus iga järgneva tsükliga väheneb, siis tavaliselt piirdatakse 1...2-kordse taaslülitusega. Kui lühisest vabaneda ei õnnestu, on tegu ebaeduka taaslülitusega ja lühisega liin või elektrivõrgu osa lülitatakse lõplikult välja. Taaslülituse edukus sõltub oluliselt lühise asukohast ja iseloomust. Parimad tingimused edukaks taaslülituseks on kaarlühiste korral, kus enne taaslülitust esineva pingepausi ajal lühiskaar kustub. Näiteks õhuliinidel on taaslülituse edukus on 60 ... 90%. Madalamatel talitluspingetel on taaslülituse edukuse protsent väiksem. Automaatset taaslülitust rakendatakse õhu- ja kaabelliinidel, lattidel ja üksikutel trafodel. Taaslülituse korral osutub reservelemendiks sama, äsja lühise tõttu väljalülitatud talitluselement. Seepärast võib taaslülitust vaadelda kui kõige odavamalt reserveerimismoodust.

Automaatsel taaslülitusel on olulised ajaintervallid avatusaeg, pingepaus, voolupaus ja valmiduspaus. **Avatusaeg** on ajavahemik, mille jooksul automaattaaslülituse käigus vastava võimsuslüli poolused on avatud (hõlmab ka võimsuslüli kontaktide vahel esineva kaarlahenduse kestuse). Avatusaeg iseloomustab ainult võimsuslüli toimimist taaslülitusel. **Pingepaus** on ajavahemik, mille jooksul liin või selle faas ei ole ühendatud võrgupingega. **Voolupaus** on ajavahemik, mille jooksul liin või selle faas ei edasta energiat. **Valmiduspaus** on ajavahemik pärast automaattaaslülitust, mille möödumisel taaslülitusautomaat on valmis alustama järgmist taaslülitust võrgu järjekordse lühise korral. Valmiduspaus on määratud võimsuslüli valmidusajaga järgmise lühise väljalülitamiseks.

Automaatset taaslülitust liigitatakse väljalülitatavate faaside arvu järgi, kordsuse järgi ja voolupausi pikkuse järgi. Väljalülitatavate faaside arvu järgi eristatakse **ühe-** ja **kolmefaasilist taaslülitust**. Ühefaasilise taaslülituse otstarbekus tuleneb sellest, et enamik elektrivõrkudes toimivatest lühistest on ühefaasilised, mille korral lülitatakse välja ainult rikkis faas. Kasutatakse **ühe-**, **kahe-** ja **kolmekordset taaslülitust**. Kordsus näitab taaslülituste arvu. Eestis on kõige levinum ühekordne taaslülitus. Tänapäevased mikroprotsessorkaitsed võimaldavad kuni kümnekordset taaslülitust. Voolupausi pikkuse määrab ajavahemik lühisekoha eraldamisel viimase lüliti väljalülitamisest kuni taaslülitusel esimese lüliti sisselülitamiseni. Esimene taaslülitus on tavaliselt **kiirtaaslülitus**, mille korral voolupausi kestus ei ületa 0,5 sekundit. Teisel ja kolmandal korral kasutatakse **viittaaslülitust**, mille voolupausid kestavad üle 0,5 sekundi.

Voolupausi kestuse määramisel peab olema täidetud kaks tingimust:

- voolupaus peab olema pikem deioniseerimisajast  $t_p > t_{di} = 0,15 \dots 0,2$  s
- voolupaus ei tohi olla lühem võimsuslüliti valmidusajast järgmise lühise väljalülitamiseks  $t_p \geq t_{VL}$ .

Tüüpilised kiirtaaslülituse voolupausi kestused on tabelis 8.2.

Tabel 8.2 Kiirtaaslülituse voolupausi kestused

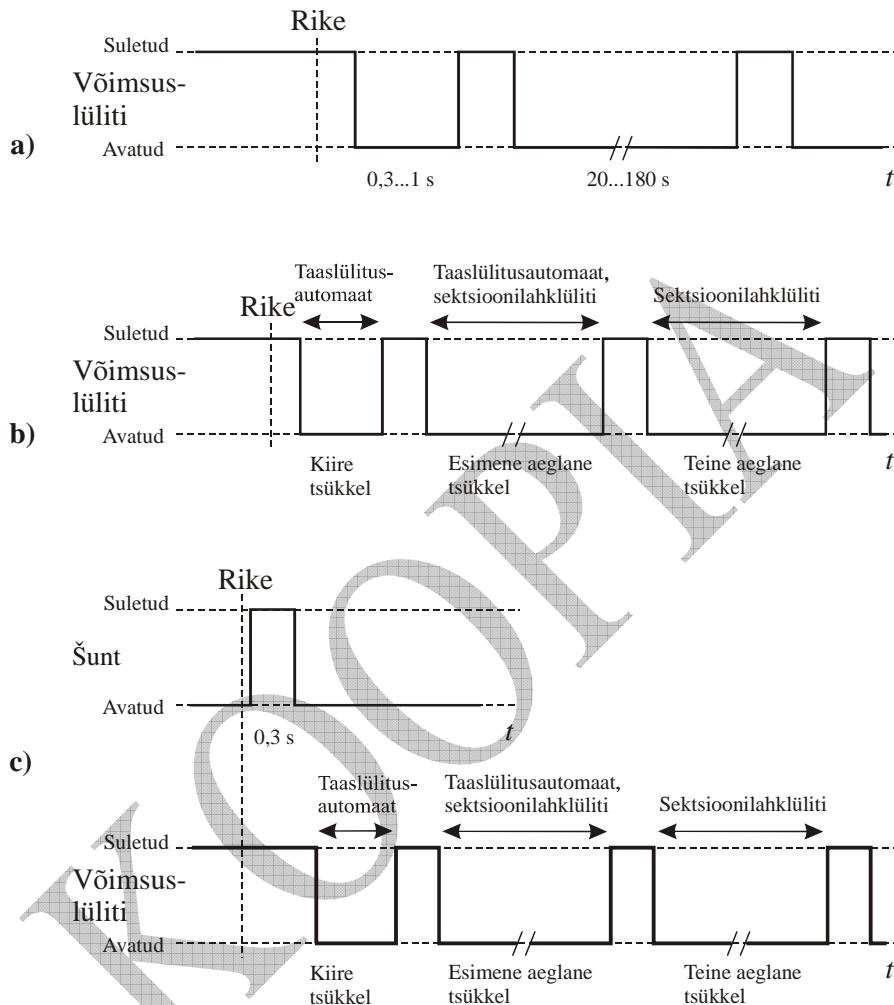
Faaside arv ja nimipinge	$t_p$ sek
Kolmefaasiline 35...110 kV	0,3 - 1,0
Kolmefaasiline 330 kV	0,4
Ühefaasiline	1,0

Automaatse taaslülituse tehnikaid on illustreeritud joonisel 8.26. Alajaamapoolisel taaslülitamisel (joonis 8.26a) on taaslülituse paus esmalt 0,3...1 s ja seejärel, kui lühis ei ole kadunud, veel 20...180 s. Kui lühis ei ole ka siis kadunud, lülitatakse fiider lõplikult välja. Taaslülitusel sektsioneerimisega (joonis 8.26b) lülitatakse teise voolupausi ajal välja sektsioonilahklüliti, mille abil püütakse lühisega fiider ülejäänud võrgust eraldada. Taaslülitatuks osutub nüüd vaid osa fiidreid. Kui pärast teist taaslülitust selgub, et lühis jäi püsima, järgneb teisele voolupausile veel kolmas, mille jooksul lülitatakse välja mõni teine sektsioonilahklüliti. Seda tehnikat on otstarbekas rakendada siis, kui fiidritele on paigaldatud lühise asukoha määramist võimaldavad rikkeindikaatorid. Taaslülitust šundiga (joonis 8.26c) kasutatakse maandamata neutraaliga võrgus. Maaühenduse korral lülitatakse esmalt lühikeseks ajaks sisse šuntvõimsuslüliti, mis ühendab rikkis faasi maaga ja kustutab rikkekohas esineda võiva elektrikaare. Kui selle tulemusena maaühendus kaob, taastub normaalolukord tarbijate toidet katkestamata. Vastasel juhul järgneb tavaline taaslülitus sektsioneerimisega või ilma.

Maandamata neutraaliga või kaarekustutuspoolidega võrgus võivad rikkekoha maaühendusvoolud jääda väiksemaks releekaitse selektiivseks tööks vajalikest vooludest. Selle tulemusena ei lülitata maaühenduse elektrikaart välja ja kaare kestev põlemine võib kahjustada terminiselt lähedalpaiknevaid elektriseadmeid. Vilkuv elektrikaar tekitab lisaks ohtlike liigpingeid. Selliste olukordade vältimiseks kasutatakse mitmes riigis, näiteks Austrias ja Prantsusmaal rikkis faasi või kaarekustutuspooli šunteerimist. Rikkis faasi šunteerimise tulemusel muutub pinge faasis nulliks ja elektrikaar kustub. Kaarekustutuspooli šunteerimisel muutub resonantsmaandatud võrk lühiajaliselt jäikmaandatud võrguks,



kus väike maahendusvool asendub suure lühisvooluga, mis omakorda tagab kaitse kiire ja selektiivse rakendumise.



Joonis 8.26 Automaatse taaslülitamise tehnikad

Rikke väljalülitamise tulemusena võib elektrisüsteem jaguneda mittesünkroonselt töötavateks alamsüsteemideks. Sellised juhtumid on võimalikud ka jaotusvõrgus, kui väljalülitatud firder sisaldab generaatoreid. Sünkronismi kadumise tingimustes eristatakse kolme võimalikku taaslülitustehnikat: asünkroonne taaslülitus, automaatsünkroniseerimisega taaslülitus ja pinge puudumise või sünkronismi kontrolliga taaslülitus. **Asünkroonne taaslülituse** korral võivad taasühendatavate osade elektromotoorjõudude vahelised faasinihked olla suvalised, mistõttu sisselülitamisel tekkinud vool võib ületada isegi lühisvoolu. Seetõttu on asünkroonne taaslülitus lubatud vaid lülituskoha suhtes suure

lühistakistusega võrguosade ühendamisel. Elektromotoorjõudude vahelise faasinihke liigse suurenemise piiramiseks voolupausi ajal kasutatakse siin vaid kiirtaaslülitust. Lubatav on ka ühefaasline taaslülitus. **Automaatsünkroniseerimisega taaslülitusel** toimub enne sisselülitamist süsteemiosade sünkroniseerimine. **Pinge puudumise või sünkronismi olemasolu kontrolliga taaslülitusel** automaatsünkroniseerimist ei toimu, kuid taaslülitus on lubatud siis, kui ühendatavate pooluste vahel pinge puudub või sünkronism ühendatavate osade vahel on säilinud.

#### 8.4.2 Sünkroniseerimisautomaat

Sünkroniseerimine on tegevus, mis peab tagama pärast elektrisüsteemi osade paralleeltöösse lülitamist või sünkroongeneraatori või -mootori sisselülitamist nende sünkroonse talitluse. Sünkroniseerimisel kasutatakse kahte põhimõtet – isesünkroniseerimist ja täpissünkroniseerimist.

**Isesünkroniseerimisel** lülitatakse võrku ergutamata generaator, mille pöörlemiskiirus on lähedane sünkroonkiirusele. Seejärel lülitatakse sisse generaatori ergutus. Enamasti isesünkroniseerimist ei kasutata, kuna selle tulemusel võivad tekkida suured tasandusvoolud ja pingekaod ning süsteemi töö on oluliselt häiritud 1...2 sekundi vältel kuni sünkronismi tõmbumiseni. Isesünkroniseerimist võidakse kasutada avariiolukordades suhteliselt väikese võimsusega generaatorite kiireks võrku lülitamiseks.

**Täpissünkroniseerimisel** tuleb täita järgmised tingimused:

- generaatori ja süsteemi pinged peavad olema ligikaudu võrdsed,  $U_G \approx U_S$
- generaatori ja süsteemi sagedused peavad olema lähedased,  $f_G \approx f_S$
- pingete vaheline nurk lülitamise hetkel peab olema ligikaudu null,  $\delta \approx 0$ .

Kui esimene tingimus ei ole täidetud ja  $U_G \approx 0$ , asendub täpissünkroniseerimine isesünkroniseerimisega. Kui sageduste erinevus on liiga suur, siis generaator võib mitte tõmbuda sünkronismi ja süsteemis tekib dünaamilise stabiilsuse kadumise oht. Kõige ohtlikum on kolmanda tingimuse rikkumine. Pingetevaheline nurk muutub, kui sünkroniseeritava generaatori ja süsteemi sagedused on märgatavalt erinevad (väikest erinevust ei ole praktiliselt kunagi võimalik kaotada). Näiteks, kui sageduste vahe on 1 Hz siis teeb generaatori elektromotoorjõu vektor süsteemi pinge vektori suhtes sekundi jooksul ühe täispöörde. Halvimal juhul, kui elektromotoorjõu vektorite vaheline nurk on  $180^\circ$ , võrdub tasandusvool kahekordse maksimaalse lühisvooluga generaatori klemmidel ja nii suure voolu tagajärjel võivad generaatori võll, turbiini labad, laupühendused, laagrid või rootor puruneda või viga saada. Sellise ekstreemse vea võimalus on generaatori isesünkroniseerimisel välistatud.

Täpissünkroniseerimise pikem aeg võrreldes isesünkroniseerimisega on põhjustatud generaatori kiirusregulaatorite ebastabiilsest talitlusest tühijooksul.

Täppissünkroniseerimiseks kasutatakse automaatsünkronisaatoreid, mis annavad lülile sisselülituskäsu teatava ennetusajaga, milles arvestatakse lüliti sisselülitustoiminguks kuluvat aega. Võimsuslülitite sisselülitusaeg on tavaliselt vahemikus 0,04...0,4 sekundit.

### 8.4.3 Reservilülitusautomaat

Reservilülitusautomaatika on ette nähtud varuseadme sisselülitamiseks põhiseadme väljalülitamise või rikke korral. Reservilülitusautomaatikat kasutatakse peamiselt kahel juhul:

- toite automaatseks taastamiseks reservtoite sisselülitamise teel pärast põhitoiteallika väljalülitumist mistahes põhjusel
- tehnoloogilisel protsessil reservmehhanismi sisselülitamiseks talitleva mehhanismi väljalülitumisel või tehnoloogilise parameetri ohtlikul hälbilisel, näiteks elektrijaama pumpade või ventilaatorite rikke või rõhu languse korral.

Reservilülitus on alati ühekordne. Varuseadme sisselülitamiskäsu annab põhiseadme võimsuslülitite automaatika oma abikontakti kaudu. Pumpade korral annab reservilülituskäsu rõhuandur.

Reservilülitusautomaate liigitatakse nii kasutusala kui ka toimimispõhimõtte alusel. Kasutusala järgi eristatakse toiteallikate, trafode, liinide ja latiseksioonide reservilülitusautomaate. Toimimispõhimõtte alusel eristatakse ühe- ja kahepoolseid automaate. Ühepoolne reservilülitamine toimub ainult põhiseadmelt varuseadmele, mitte vastupidi. Sel juhul kasutatakse varuseadet põhiseadme ajutiseks asendamiseks, näiteks põhiseadme rikke kõrvaldamise või hooldetööde tegemise ajaks, kuid mitte pidevaks tööks põhiseadmena. Ühepoolse reservilülituse tüüpiline kasutuskoht on elektrijaamade omatarbe toiteskeemides, kus reservtoiteliin koos reservtrafoga moodustavad põhitoiteliini ja -trafo suhtes eraldi ahela. Kahepoolne on põhiseadme vaheline reservilülitus, kui üks põhiseade on töös ja teine reservis.

## 8.5 Jaotusvõrgu rikete käsitlemine

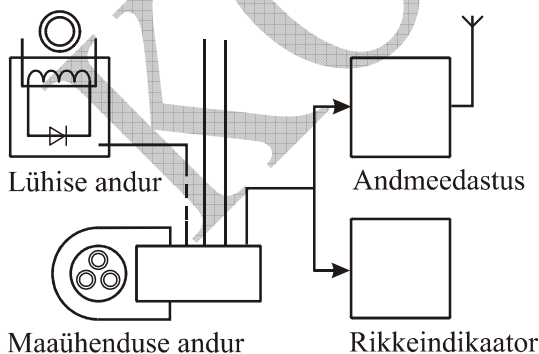
Elektrikatkestuste ja muude talitlushäiringute käsitlemisel on esmane ülesanne välja selgitada rikke asukoht ja iseloom ning seejärel taastada tarbijate toide. Operatiivpersonalil on abiks infosüsteemid, mis sisaldavad andmeid võrgu talitluse kohta, aga ka tõenäoliste rikete tekkekohtadest ja likvideerimise võimalustest. Rikkekohta määramiseks arvutatakse mõõteandmete alusel selle elektriline kaugus. Ühefaasilistel maaühendustel raskendab rikkekoha määramist suurtes piirides varieeruv rikketakistus. Väga efektiivsed on kaugloetavad rikkeindikaatorid, kuid need vajavad sideliine. Kui rikke asukoht on kindlaks tehtud või seda oletatakse, tehakse elektritoite taastamiseks vajalikud lülitused lahkülütite abil. Siin on suureks abiks kaugjuhitavad lahkülütid.

### 8.5.1 Lühisekoha lokaliseerimine

Kui tegemist on püsirikkega ja automaatne taaslülitus on ebaedukas, peab operatiivpersonal lühisekoha võimalikult kiiresti lokaliseerima ja lahklülitite abil eraldama ning vaadeldava fiidri taas sisse lülitama. Tavaliselt on fiider varustatud piisava hulga lahklülititega, et sel teel kiiresti taastada enamiku tarbijate (neid võib olla sadu ja tuhandeid) toide. Vaid väheste tarbijate toitekatkestus kestab kogu rikke likvideerimise aja.

Rikkekoha leidmise lähtekohaks on lühise elektriline kaugus, mis määratakse kindlaks lühisvoolu alusel. Selleks edastatakse releekaitselt saadud andmed dispetšisüsteemi ja võrreldakse arvutusliku lühisvooluga. Lühisvool arvutatakse jooksvalt või eelnevalt talitluse planeerimise käigus fiidri iga 50- kuni 500-meetrise segmendi kohta. Lühisekoha määramiseks saab kasutada ka distantskaitset, mis arvutab lühise impedantsi ja mõnikord ka rikkekoha kauguse. Lühisekoha määramise täpsus on umbes 1 km. Põhiline vigade allikas on rikkekoha üleminekutakistus. Kuna see ei ole teada, eeldatakse, et tegemist on jääklühisega. Siit tuleneb võimalik positiivne viga – rikkekoht võib olla lähemal kui arvutuslikult saadud kaugus. Teiseks vigu põhjustavaks teguriks on koormusvool lühise ajal. Kui rikkekoht on suhteliselt kaugel, võivad pinge ja sellest tulenevalt ka koormusvoolud fiidri alguses säilida. Sel juhul on tegelik lühisvool väiksem mõõdetust, rikkekoht on kaugemal kui arvatud ja võimalik viga negatiivne. Täiendava vea rikkekoha kauguse määramisel põhjustavad mõõtetrafod ja muud mõõteseadmed. Ka võrguelementide takistused, trafode astmelülitite asendid ei pruugi olla täpselt teada.

Jaotusvõrgu mitmeharulise skeemi korral on tõsiseks probleemiks, kuidas määrata rikkis skeemiharu. Siin on olulised täiendavad andmed ja operatiivpersonali kogemus. Näiteks tugeva tuule korral tuleb riket otsida ennekõike õhuliini lõikudelt, mis kulgevad metsas ja on risti tuule suunaga.

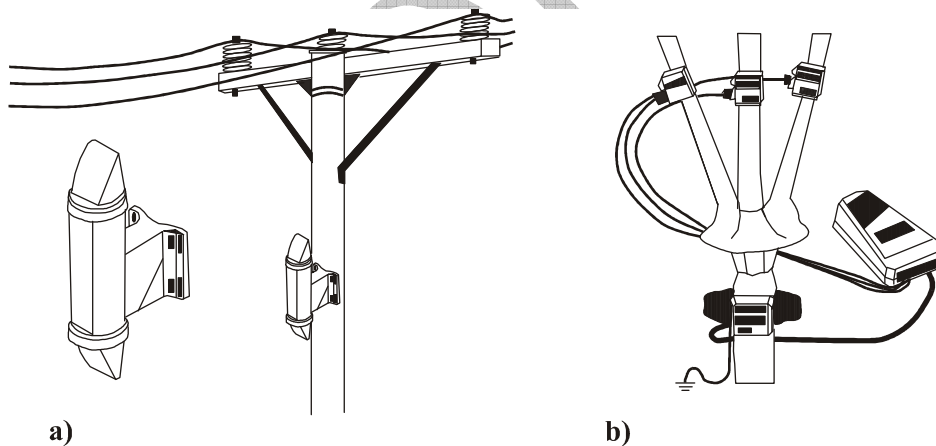


**Joonis 8.27 Kaabelliini rikkeindikaatori põhimõtteskeem**

Territooriumil, kus töötab ekskavaator, on võimalik kaabli vigastus. Nende ja muude asjaolude arvestamine kiirendab rikkekoha leidmist. Võimalik on rakendada ekspertsüsteemi, mis kasutab ära nii kättesaadava teabe kui ka rikkekauguse arvutuslikud tulemused ning

väljastab otsuse tõenäolise rikkekoha kohta. Lähtekohaks on operatiivpersonali kogemused, mis formaliseeritakse ja salvestatakse ekspertsüsteemi teadmusbaasi.

Efektiivne vahend rikkekoha kiireks ja täpseks määramiseks on 6...35 kV liinidel **rikkeindikaator**, mis toimib nii lühiste kui ka maaühenduste korral. Joonisel 8.27 esitatud kaabelliini rikkeindikaatori lülitusskeemil on vooluanduriks valgusdiodid, mille valgustugevus sõltub elektrijuhtme magnetvälja tugevusest. Valguse edastamiseks indikaatorile kasutatakse valguskaablit. Maaühendusvoolu anduriks on summavoolu trafo, mis kujutab endast kõiki kolme faasijuhtet haaravat metallriba. Ka maaühendusvoolu andur on indikaatoriga ühenduses valgusjuhtme abil. Õhuliini korral kasutatakse magnet- ja elektriväljatundlikkusel põhinevaid voolu- ja pingeandureid, mis võivad asetseda 3...5 m kaugusel elektriliini juhtmetest. Õhuliinide indikaator on võimeline reageerima ka maaühendusvooludele, mõõtes nulljärgnevuskomponendi poolt tekitatud magnetvälja. Rikkeindikaatori efektiivsuse tagab sidekanal, milleks suurte kauguste korral on raadioühendus, linnades aga andmesidekaabel või ka telefoniühendus. Õhuliinide ristumispunktidest kirjeldatud vooluandur ei sobi magnetväljade interferentsi tõttu. Seal tuleks kasutada lülititega komplekteeritud voolutrafosid. Kasutatakse ka lihtsaid mehaanilise, vedelik- või valgusanduriga rikkeindikaatoreid, mis enamasti ei ole seotud sidekanaliga, vaid on jälgitavad ainult kohapealt. Rikkeindikaatorite näited on joonisel 8.28



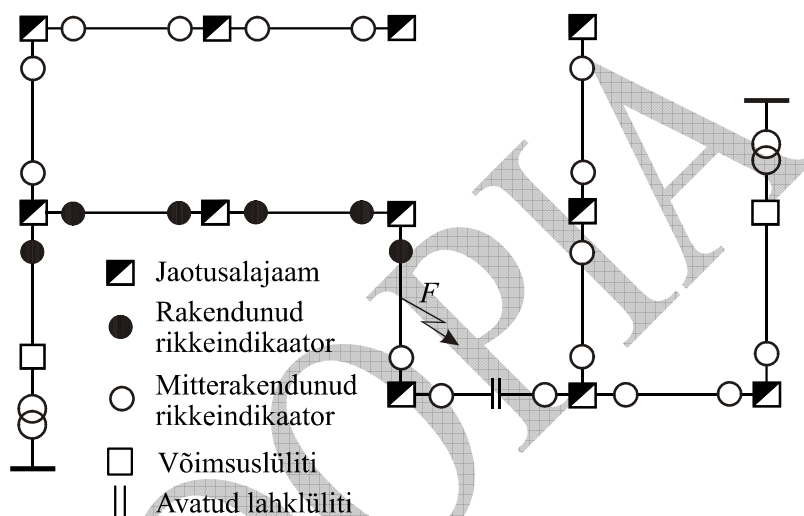
Joonis 8.28 Õhuliini (a) ja kaabelliini (b) rikkeindikaator

Rikkeindikaatori väljundteave sõltub selle tööpõhimõttest. Lihtsamal juhul toimib rikkeindikaator nagu voolurelee ja väljastab vaid voolu suuruse. Voolu suuna määramiseks tuleb lisaks mõõta ka pinget. Rikkeindikaatorite lülitusskeemi näide on joonisel 8.29

Kokku võttes toimub rikkekoha lokaliseerimine järgmiselt:

- releekaitse salvestab rikketeabe voolu, rikke tüübi, rikkega seotud faaside ja fiidri ning taaslülituse kohta
- lähima küsitlustsükli ajal formeeritakse kaugterminalis alarmiteade

- järgmise küsitlustsükli ajal edastatakse alarmiteade juhtimiskeskusesse
- dispetšisüsteem analüüsib teadet ja vajaduse korral saadab kaugterminali kaudu kohtterminalile päringu lisateabe kohta
- kohtterminal vastab päringule
- dispetšisüsteem täiendab teadet lisaandmetega (võimsusvood alajaamas jm) ning edastab teabe jaotusvõrgu talitluse tugisüsteemile *DMS*
- talitluse tugisüsteem arvutab rikkekoha kauguse ja vastavate funktsioonide olemasolul pakub välja rikke asukoha.



Joonis 8.29 Kaabelliini rikkeindikaatorite lülitusskeem

### 8.5.2 Maaühenduskoha lokaliseerimine

Enamik keskpinge-jaotusvõrgu rikkeid on **ühefaasilised maaühendused**, mis isoleeritud ja eriti resonantsmaandatud võrgus ei põhjusta suuri voole. Erinevalt lühistest võib osa maaühendustest kaduda ka iseenesest ilma releekaitse ja taastülitusautomaatika abita. Väikeste maaühendusvoolude korral võib rikkekoha otsida ka fiidrit välja lülitamata.

Maaühendusega isoleeritud neutraaliga võrgus võib kaasnedagi vilkuv elektrihaar. Elektrihaar rikub isolatsiooni ja on tuleohtlik. Ka tekitab vilkuv elektrihaar nimipinget mitmekordselt ületavaid liigpingeid, kusjuures igal kaare taastütmisel liigpinge tippväärtus kasvab. Vilkuva elektrihaare põhjustatud liigpingeid iseloomustab tabel 8.3. Seega on elektrihaare tekkimisel maaühenduse kiire väljalülitamine vältimatu. Maaühenduse kiire väljalülitamine on oluline ka suhteliselt väikeste, alla  $100 \Omega$  jäävate üleminekutakistuste korral. Muudel juhtudel võib maaühendus säilida kuni rikkekoha kindlakstegemiseni. Maaühenduskoha kiireks väljalülitamiseks võib kasutada **neutraalimaandusautomaati**,

mis rakendudes maaihenduse tunnuste ilmnemisel, maandab lühikeseks ajaks trafo neutraali läbi väikese aktiivtakistuse. Tulemuseks on lühis, mis põhjustab releekaitse kiire ja selektiivse rakendumise. Resonantsmaandatud võrkudes esineb vilkuvat elektrikaart harva. Kuid ka siin võib kasutada neutraali-maandusautomaati, tagamaks maaihenduse kiirele väljalülitamisele lisaks ka selle asukoha määramise.

Tabel 8.3 Kaare süttimisel ( $n = 1$ ) ja taassüttimistel ( $n = 2, 3, 4, 5$ ) tekkivate liigpingete tippväärtuste kordsus faasinimipinge suhtes

Kaare süttimise järjekorranumber	Liigpinge kordsus $U_{max} / U_{fn}$
$n = 1$	2,22
$n = 2$	3,28
$n = 3$	3,80
$n = 4$	4,04
$n = 5$	4,14

Kõige keerulisem ülesanne maaihenduste korral on nende kiire ja täpne tuvastamine. Tuleb tõdeda, et probleemi keerukuse tõttu ei ole tänaseks loodud ühtset ja universaalset maaihenduste tuvastamise meetodit. Siiski on selleks välja töötatud mitu viisi:

- *Transientvoolu identifitseerimine.* Maaihendusega kaasneb keerukas voolu siirdeprotsess, milles löökvoolu väärtus on enamasti piisavalt suur, kuid sõltub pinge faasist, mille juures maaihendus tekib. Kui pinge väärtus maaihenduse tekkemomendil on nullilähedane, jääb ka löökvool väikeseks ja maaihendus raskesti tuvastatavaks.
- *Nulljärgnevuspinge mõõtmine.* Kaitse reageerib, kui maaihendusel esinevast pingete asümmeetriast tingitud nulljärgnevuspinge ületab teatud sätteväärtust, näiteks 30% nimipingest. Nii on võimalik avastada maaihenduse olemasolu sõltumata selle asukohast, kuid maaihenduskoha suure üleminekutakistuse korral võib rike jääda märkamatuks.
- *Nulljärgnevusvoolu impulsi mõõtmine.* Kui muuta kaarekustutuspooli induktiivsust, siis muutub vaid maaihenduses oleva faasi vool. Sellest tulenevat nulljärgnevusvoolu muutust saab fikseerida releega. Pooli induktiivsuse muutmiseks kasutatakse kaarekustutuspooli lisamähisega ühendatud kondensaatorit, mida perioodiliselt, sagedusega 0,5...1 Hz sissevälja lülitades saavutatakse resulteeriva induktiivsuse muutus suurusjärgus 3%.
- *Aktiivvõimsusrelee.* Normaaltalitusel võrdub nulljärgnevuskomponendi aktiivvõimsus vaid kadudega kaarekustutuspoolis. Rikke korral lisanduvad kaod rikkega faasis. Aktiivvõimsusrelee reageerib kadude muutumisele. Need kaod on siiski suhteliselt väikesed, mistõttu kasutatavalt kaitselt nõutakse eriti suurt tundlikkust ja mõõtetrafodelt eriti suurt täpsust.

- *Reaktiivvõimsusrelee.* Maandamata neutraali korral võib jälgida nulljärgnevuskomponendi reaktiivvõimsust, mis rikke tekkimisel järsult kasvab ja on maaühenduse tunnus. Meetod ei ole kasutatav kompenseeritud võrgus, kus reaktiivvõimsus sõltub kompenseerimise astmest.
- *Viienda harmooniku mõõtmine.* Kaarekustutuspool ei avalda olulist mõju kõrgemate harmoonikute levikule, sest kõrgetel sagedusel on pooli takistus suur. Resonantsmaandatud võrk töötab juba viiendale harmoonikule (sagedus 250 Hz) nagu isoleeritud neutraaliga võrk. Rikke tuvastamiseks jälgitakse viienda harmooniku voolu efektiivväärtuse ja amplituudi muutusi või sellest põhjustatud magnet- ja elektrivälja muutusi.
- *Faasivoolude mõõtmine.* Kuigi maaühenduses oleva faasi vool on koormuste sümmeetria korral lähedane tervete faaside voolule, võib faasivoolude hoolika võrdlemise teel rikke siiski avastada.
- *Rikkeindikaatorite rakendamine* kaitse otstarbeks on põhimõtteliselt võimalik, kuid nõuab sidekanalit.
- *Faasikohane numbriline distantsskaitse* võib avastada ka maaühendusi.

Maaühenduse korral toimib rikkeindikaator vaid siis, kui neutraal on isoleeritud või võrk osaliselt kompenseeritud, sest täielikult kompenseeritud võrgus võib maaühendusest tingitud summavool osutada liiga väikeseks. Väikeste maaühendusvoolude puhul võib rikkekoha määramiseks kasutada rikkevoolu ostsillogrammi, mis on fikseeritud piisavalt väikese sammuga suurusjärgus 0,0001 s. Seejärel leitakse rikkekoht siirdeprotsessi analüüsimise teel. Maaühenduse tekkimisel rikkis faasi mahtuvus maa suhtes kaob ja ülejäänud kahe faasi pinge tõuseb. Tekib siirdeprotsess, mis on paremini jälgitav tervetes faasides. Siirdevoolude ja -pingete amplituud, sagedus ja sumbumiskiirus sõltuvad võrgu parameetritest ja maaühenduse asukohast. Rikkis faasis on suuruste muutumissagedus 100...800 Hz, muudes faasides 500...2500 Hz.

Rikkekoha kaugust võib siirdeprotsessist lähtudes määrata diferentsiaalvõrrandi alusel, Fourier' teisenduse abil või vähimruutude meetodil. Esimesel meetodil eeldatakse, et rikkis faasi pinge ja vool muutuvad diferentsiaalvõrrandi

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

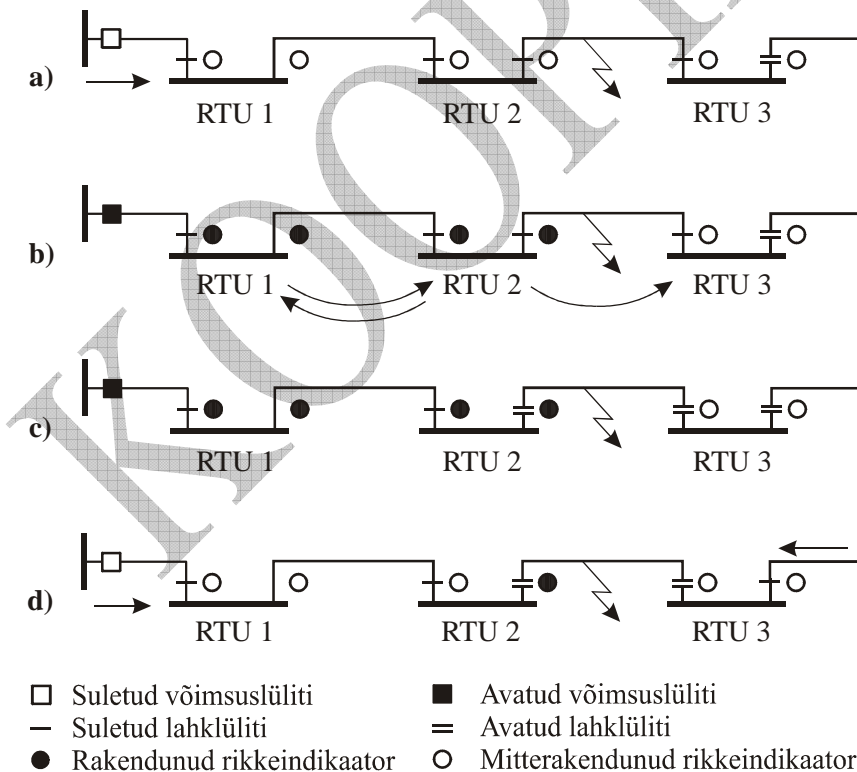
kohaselt. Lahendades võrrandi induktiivsuse  $L$  suhtes ja teades liinide induktiivsusi, võib hinnata rikkekoha kaugust. Fourier' teisendusega leitakse maaühenduse siirdeprotsessi pinge- ja vooluspekter, milles domineerivate sageduste järgi arvutatakse rikkekoha kaugus. Vähimruutude meetodi rakendamine seisneb siirdeprotsessi arvutustulemuste sobitamises tegelike graafikutega. Vähimruutude meetod annab parima tulemuse, kuid on ülejäänud meetoditest keerukam ja ebastabiilsem ning tulemustes võib esineda eksimisi. Kui rikkekoha üleminekutakistus ei ületa 50  $\Omega$ , võib kirjeldatud meetoditega saavutada maaühenduskoha määramise täpsuseks 1...2 km.



Maaihenduskohta võib otsida ka fiidrit välja lülitamata. Siinjuures peab maaihendusvool olema piisavalt väike, et ei tekiks elekrikaart ega ohtu inimesele. Ka ei tohi maaihendusvool põhjustada häiringuid sideliinides ja kahjustada torujuhtmeid. Maaihenduskoha otsimise aega piiravad nõuded seadmete liigse ülekoormuse vältimiseks. Nii võivad faasipinge tõusu tõttu mõõtetrafod rikneda, kui maaihendus kestab üle 8 tunni. Sageli on kaarekustutuspool arvestatud tööks piirvoolul vaid 2 tundi jne. Rikkekoha leidmiseks tuleb maaihendus esmalt tuvastada, seejärel määrata fiider ja liini sektsioon ning lõpuks avastada rikkekohat. Tavaliselt jääb rikkekoha lõplik avastamine operatiivbrigaadi ülesandeks.

### 8.5.3 Rikete isoleerimine ja toite taastamine

Rikke korral lülitab võimsuslülitid fiidri välja. Seejärel tuleb leida ja lahklülitite abil isoleerida rikkekohat ning fiider taas sisse lülitada. Tegevus on küllalt keerukas ja tuleb täita lühikese aja jooksul vähendamaks tarbijate toitekatkestuse kestust ja sellest tulenevat majanduslikku kahju.



Joonis 8.30 Rikete automaatse käsitlemise skeem

**Rikete haldamine** haarab lisaks rikkekoha lokaliseerimisele rikke isoleerimiseks ja toite taastamiseks vajalikke tegevusi. Lülituste plaani koostamine tugineb lülituste imiteerimisele, mis tagatakse vajalike normaaltalitluse ja lühisvoolude arvutustega. Imiteerimine võimaldab optimeerida rikete haldamisega seotud tegevusi. Ühtlasi määratakse ka üksikute elektritarbijate toitekatkestuse aeg, andmata jäänud energia maksumus jms. Samad tegevused sobivad ka plaaniliste lülituste korral. Juhul kui lülitusvõimalusi on mitu, saab võrgu skeemi ka optimeerida. Rikkekoht isoleeritakse **kaugjuhitavate lahklülititega**. Seejärel rikketa sektsioonide toide taastatakse. Vajaduse korral kasutatakse ära reservühendused naaberfiidritega. Kontrollitakse ka tehniliste piirangute täitmist, nagu ülekoormust ja pingekadu.

Kaugjuhitavate lahklülitite korral on rikke isoleerimist ja toite taastamist võimalik automatiseerida. Rikke automaatse käsitlemise näide on joonisel 8.30. Rikke tekkimisel (a) rikkeindikaatorid rakenduvad ja rikkega fiidri võimsuslüliti lülitatakse välja. Seejärel (b) toimub kaugterminalide *RTU1*, *RTU2* ja *RTU3* vahel infovahetus, mille tulemusena selgitatakse välja rikkega liinisektsioon ning (c) lülitatakse välja rikkis sektsiooniga külgnevad lahklülitid. Lõpuks (d) lülitatakse sisse fiidri võimsuslüliti ja võimalusel lülitatakse alajaama 3 toide ümber mõnele naaberfiidrile.