

Valik ja kasutamine keskpinge jaotusvõrkudes

1. **Sissejuhatus**

2. **MO (metalloksiid) keskpinge liigpingepiirikud**
 - 2.1 Liigpingepiiriku konstruktsioon
 - 2.2 Tööpõhimõte
 - 2.3 Valiku parameetrid

3. **Piirikute valimine**
 - 3.1. Ajutiste liigpingete mõju MO liigpingepiirikutele
 - 3.2. Liigpingepiiriku nimipinge U_r tähendus
 - 3.3. Piiriku valimine ja kestevpinge U_c kindlaksmääramine
 - 3.4 Näited ja eriolukorrad
 - 3.4.1. Maalühiskompensatsiooniga või kõrgeoomilise isoleeritud neutraaliga võrgud
 - 3.4.2 Kõrgeoomilise isoleeritud neutraaliga ja automaatselt maalühisel väljalülituvad võrgud
 - 3.4.3 Madalaoomilised maandatud neutraaliga ($E \leq 1,4$) võrgud
 - 3.4.4 Madalaoomilised maandatud neutraaliga ($E > 1,4$) võrgud
 - 3.4.5 Liigpingepiirik faaside vahel (Neptuni lülitus)
 - 3.4.6 Kõrgem harmoonilistega talitluspinge

4. **Kaitse toime**
 - 4.1 Liigpingepiiriku kaitsenivoo
 - 4.2 Liigpingepiiriku kaitsepiirkond

5. **Erijuhud**
 - 5.1 Õhuliiniüleminekuga kaabliõigu liigpingekaitse
 - 5.2 Transformaator kaabli lõpus
 - 5.3 Transformaator on ühendatud ainult ühepoolselt välgu poolt kahjustatava õhuliiniga
 - 5.4 Liigpingepiirik gaasitäitega keskpinge lülitusseadmes
 - 5.5 Generaator on ühendatud välgu poolt kahjustatava keskpingeliiniga
 - 5.6 Mootorite liigpingekaitse
 - 5.7 Kõrgpingekaablite metallmantlikaitse
 - 5.8 MO liigpingepiirikud alalispingele

6. **Abi liigpingepiirikute õigeks kasutamiseks**

1. Sissejuhatus

Seadmed elektrienergia jaotussüsteemis on tundlikud mitmete nähtuste suhtes, liigpinge on üks nendest. Liigpinged kahjustavad elektriseadmeid, kuna seadmete pingetaluvust ei ole võimalik ökonoomilistel põhjustel mistahes kõrgele viia. Samuti ei ole reeglina võimalik liigpingeid vältida ja seepärast kasutatakse selleks mõeldud kaitseseadmeid, mis peavad tagama võrgu ökonoomilise ja töökindla käidu. See kehtib nii kõrge- kui ka kesk- ja samuti madalpingevõrkude kohta.

Kõige suuremaks liigpingete poolt põhjustatavaks ohuks elektriseadmetele on transientliigpinged (impulsikujulised). Need tekivad atmosfäärilahenduste ja lülitamiste mõjul. Transientliigpingete eest kaitsmiseks peetakse kõige efektiivsemateks liigpingepiirkuid. Piirik paigaldatakse kaitstavale seadmele võimalikult lähedale ja see töötab liigpingeimpulsi jaoks nagu möödaviigu tee (juhhib impulsi kaitstavast objektist mööda).

Liigpinge suurus on antud enamasti ühikutes *p.u.* (per unit). See on määratletud valemiga

$$1 p.u. = \sqrt{2} \cdot U_m / \sqrt{3}$$

kus U_m on seadme faaside vaheline maksimaalselt lubatud pinge efektiivväärtus normaalses tööolukorras. Tegelik süsteemipinge on reeglina U_m -st väiksem.

U_m (kV)	3.6	7.2	12	17.5	24	36	42
1 <i>p.u.</i> (kV)	2.9	5.9	9.8	14.3	19.6	29.4	34.3

Tabel 1: 1 *p.u.* suurused erinevatele U_m -le

Transientliigpingete kõrval esinevad elektrivõrkudes veel ajutised liigpinged. Need on reeglina võrgusageduslikud liigpinged, mis võivad tekkida võrgu häiretest. Kokkuvõttes võib võrgus esinevad liigpinged jagada järgmistesse kategooriatesse:

– Ajutised, võrgusageduslikud liigpinged

Need esinevad näiteks peale koormuse avariilist vähenemist või maalühise puhul ja nende kestvus võib olla 0,1 sekundist kuni mõne tunnini. Nende amplituud ei ületa tavaliselt oluliselt $\sqrt{3}$ *p.u.* ja seetõttu ei paku need enamasti ohtu seadmetele. Kuid siiski osutuvad need piiriku valiku puhul väga otsustavaks teguriks.

Ferroresonants transformaatoris võib samuti tekitada väga suuri ja enamasti võrgusageduslikke liigpingeid. Sädevahemikuta piirikud hoiavad ära ferroresonantsi tekkimisel transformaatori isolatsiooni kahjustused. Piirikud ise koormatakse aga seejuures reeglina üle ja need saavad termiliselt kahjustada. Eriti moodsad väikeste kadudega transformaatorid, mis tühijooksul on ühendatud ühesisendilise kaabliõiguga, on tihti piirikute kahjustuste tekitajaks, mida põhjustab ferroresonants.

– Lülitusliigpinged

Lülitusliigpinged tekivad tihti lülitamiste käigus ja osutuvad reeglina tugevalt sumbuvateks võnkuvateks protsessideks. Võnkumiste sagedus on enamasti alla mõne kHz ja amplituudväärtus võib ulatuda kuni 3 *p.u.* -ni.

Kõrge amplituudiga järske impulsse võib kohata lülitamiste ajal domineerivas induktiivses toiteahelas. Siin võib liigpinge tõusuperiood olla vahemikus 0,1 kuni 10 μ s ja amplituudväärtus võib ulatuda kuni 4 *p.u.* -ni.

Samuti võivad järske liigpingeid tekitada õhuliinide ja kaablite sisse- ja väljalülitamised. Kuna nende amplituud on tavaliselt alla 2,2 *p.u.*, siis loetakse neid võrgule ohututeks. Kuigi võib esineda ka kriitilisi väärtusi (kuni 7 *p.u.*), kui kaabli väljalülitus toimub liiga aeglaselt ja esinevad korduvläbilöögid.

Laias mõttes loetakse lülitusliigpingeteks ka liigpingeid, mis on põhjustatud võrgu lühisest või maaühendusest. Amplituudid on enamasti üsna väikesed. Teisest küljest kui need järgnevad üksteisele kiirelt (vahelduvad maaühendused), võib sagedane ja korduv koormamine tekitada sädevahemikuta liigpingepiirikes termilise ülekoormuse.

– Pikseliigpinged

Pikseliigpinged on põhjustatud atmosfääriliste elektrilahenduste poolt. Juhul kui õhuliini tabab pikse otsene tabamus tekivad eriti järsud impulsid amplituudväärtusega kuni mitu megavolti. Kuid enamasti ei jõua need impulsid seadmeteni, kuna õhuliinile paigaldatud isolaatoritel toimub ülelööki (loomulik liigpingekaitse). Peale sellist isolaatorite ülelööki alles jääv amplituud ulatub keskpinge võrgus siiski veel kuni 10 *p.u.* -ni.

Ka pikselöögi läheduses olevas õhuliini soontes indutseeritakse liigpinge. Need indutseeritud liigpinged saavutavad oma tippväärtuse peale mõnda μ s ja vaibuvad seejärel jälle kiiresti. Amplituudväärtus võib siiski ulatuda keskpinge võrgus kuni 10 *p.u.*

Pikseliigpinged osutuvad keskpinge võrgus kõige äärmuslikemateks liigpingete vormiks. Liigpingepiirikute ülesanne on need liigpinged seadmetele taluvateks muuta. Samal ajal piiriku enda rike, näiteks ülekoormuse tõttu, ei tohi põhjustada rohkem kui minimaalset vältimatut kahju.

2. MO (metalloksiid) keskpinge liigpingepiirikud

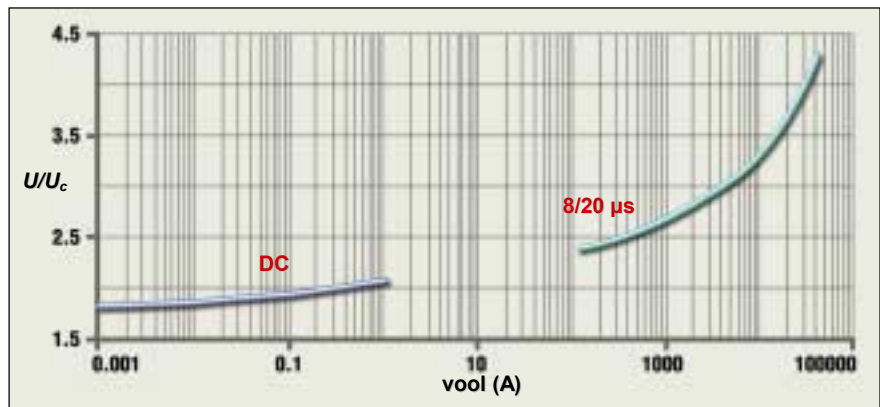
Juba umbes 15 aastat kasutatakse kõrgepingevõrkudes enamasti ainult MO liigpingepiirikuid. Keskpinge võrgus paigaldati siiski alles mõned aastad tagasi märkimisväärsed kogused tavalisi sädevahemikuga ventiillahendeid, mis koosnesid SiC resistorist ja järjestikulistest sädevahemikest. Tänapäeval kasutatakse keskpinge võrgus juba enamasti ilma sädevahemikuta metalloksiid (lühendatult MO) liigpingepiirikuid. Selle põhjus oli sama nagu kõrgepingevõrguski piiriku põhjalikum kaitse, seda eriti väga järskude liigpingete puhul ja saastatud keskkonda paigaldamisel. Täielikult ilma sädevahemikuta lahendus võimaldas üle minna piiriku polümeerkestale. Samas on polümeerkestal ka mitmed teised eelised nagu suurem töökindlus (niiskuskindlus) ja oluliselt väiksem oht piiriku rikked (korpuse kildudeks purunemine portselankorpuse puhul).

2.1 Liigpingepiiriku konstruktsioon

Põhimõtteliselt koosnevad MO piirikud ainult kahest elemendist. Üks on niinimetatud aktiivosa, mis koosneb üksteise peale asetatud, enamasti silindrikujulistest MO plokkidest (resistorplokid). Teine on isoleeritud väliskest. Piirikule antakse mehaaniline tugevus kas väliskesta abil (näit. portselankorpus) või polümeerisolatsiooniga piirikutel aktiivosa abil. Viimasel juhul kasutatakse selleks klaaskiudstruktuuri, mis siis katab kas täielikult MO plokid või pressib piisava jõuga üksteise peale asetatud plokkide otsad omavahel kindlalt kokku. Tänu oma lihtsale ja mehaaniliselt tugevale aktiivosa ehitusele võivad mõned polümeerisolatsiooniga piirikud teatud juhtudel võtta üle tugiisolaatori funktsiooni.

2.2 Tööpõhimõte

Liigpingepiirik piirab selle klemmidele rakendatud pinget, kus ta koos liigpingeallika impedantsiga või toiteliini laineimpedantsiga moodustab pingejaguri. Piiriku takistus on mittelineaarne, mistõttu ülevalpool teatud piiri klemmide pinget tõuseb suhteliselt vähem kui voolu suurenemine. Mida suurem seejuures on mittelineaarsus, seda kitsam on piiriku jääkpinge piirkond.



Joonis 1: tüüpiline voolu-pinge tunnusjoon 10 kA MO piirikule (klass 1)

Kuna MO piirikutel ei ole sädevahemikku ja nende mittelineaarsus on nii suur, et normaalkäitumistingimustes läbib seda ainult väga väike aktiivvoolukomponent siis läheb piirik peaaegu viivitusega „juhtivasse“ olekusse üle (olenevalt kasutatavatest MO resistorploki $U-I$ tunnusjoonest). Teisisõnu ei esine viivitust, nagu seda oli ventiillahenditel kus esmalt oli vaja ülelööki sädevahemikus. See tähendab, et MO piirikutega kaasnevad kaks head eelist. Esiteks, MO liigpingepiirik suudab edukalt piirata ka järsked impulsid praktiliselt kohe. Teiseks, madala amplituudiga lülitusimpulsid ei jää kunagi piiriku poolt märkamata.

Liigpinge vaibumisel lahendusvool väheneb samaaegselt (vastavalt MO plokkide tunnusjoonele) nii, et MO piirikutes energia järgnevusvoolu ei teki. See tõsiasi mängib eriti suurt rolli just alalispingesüsteemide kaitsmisel, kuna siin ei ole voolu loomulikku nulliga ristumist, mis võimaldaks sädevahemikust elektrikaart kustutada. MO piirikuid võib seetõttu põhimõtteliselt kasutada nii 50/60 Hz, 16 2/3 Hz kui ka alalispingesüsteemides, juhul kui kasutatavate MO plokkide omadused seda lubavad.

2.3 Valiku parameetrid

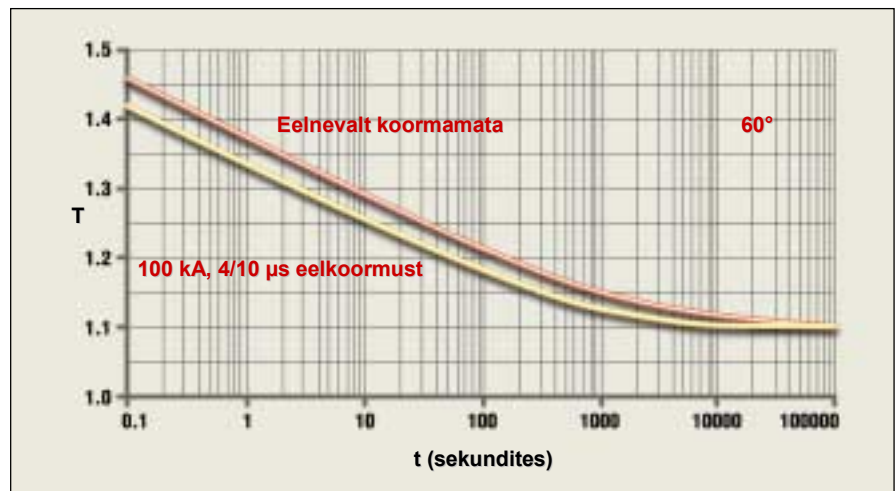
Piirikute valikul on tähtis jälgida kahte olulist parameetrit. Esiteks suurim lubatud kestevpinge U_c , mille juures piirik peab töötama kindlalt ja muutumatult palju aastaid. Teiseks voolu taluvusvõime, näiteks nimilahendusvool I_n koos liini lahendusklassiga.

3. Piirikute valimine

3.1 Ajutiste liigpingete mõju MO liigpingepiirikutele

Puuduvate sädevahemikkude tõttu on resistorplokid MO piirikus kestvalt pingestatud võrgusagedusliku vahelduvpingega. Normaalingimustes läbib neid peamiselt mahtuvuslik vool koos väga väikese aktiivtakistusliku mittesiinuselise voolukomponendiga. See aktiivtakistuslik osa tekitab piirikus püsikaod, mille tulemusena soojeneb piirik natukene üle keskkonnatemperatuuri. Pinge tõustes kasvavad aktiivtakistuslik osa ja kaod järsult. Kuid siiski tänu piiriku soojusmahutavusele ei hävine see kohe, vaid selle asemel soojeneb kiiresti rohkem või vähem üles. Juhul kui ajutine liigpinge taandub õigeaegselt lubatud nivoole ei saa piirik tõenäoliselt kahjustada. Kui kaua ja millise pinge juures võib piirik töötada ilma termiliste kahjustusteta võib leida vahelduvpinge-aja karakteristikult (joonis 2). Alumine kõver näitab olukorda, kus piirik on lisaks puhtale liigpingekoormusele koormatud eelnevalt ka kõrgergeetiliste impulssidega (5 kA ja 10 kA, klass 1 piirikute puhul 4/10 μ s liigvooluimpulsiga, mille amplituud on 65 kA või 100 kA). Teine, ülemine kõver kehtib olukorra kohta, kus esineb ainult vahelduvpingeline liigpingekoormus.

Piiriku vahelduvpinge-aja karakteristik väärtused on toodud kas arvudes või piiriku suurima lubatava kestevpinge U_c suhte abil.



Joonis 2: vahelduvpinge-aja karakteristik, TOV graafik ($T = \frac{U_{TOV,max}}{U_c}$)

Järgmine näide seletab graafiku kasutamist:

10 kA, klass 1 piirik mille $U_c = 6$ kV võib piiramata kaua töötada ühendusklemmide vahelisel pingel 6 kV. Ajahetkel $t = 0$ esineb lahendusprotsess mille energia muutus piirikus vastab umbes lahendusvoolule 100 kA (4/10 μ s). Koheselt peale lahendust järgneb maaühendus, mistõttu pinge „tervetes faasides“ tõuseb umbes 7,7 kV –ni ($T = 7.7/6.0 \approx 1,28$). Võrgu rikkemääramissüsteem on seatud selliselt, et selline rike lülitatakse välja vähem kui 3 s jooksul. Graagik näitab, et piirik saab parajasti just sellise koormusega hakkama. Väljalülitus ei tohi seega toimuda hilisemal ajahetkel, kuna sellisel juhul asetseb punkt ülevalpool alumist kõverat ja piirik võib saada termiliselt kahjustatud.

3.2. Liigpingepiiriku nimipinge U_r tähendus

Nimipinge U_r ei oma suurt praktilist tähendust kasutajale, kuna selle väärtus sõltub otseselt testitingimustest, mis määratakse käidutsükli testiga vastavalt normile IEC 60099-4. Nimipinge on mõeldud üksnes tugisuuruseks käidutingimuste kindlaks määramisel.

3.3. Piiriku valimine ja kestevpinge U_c kindlaksmääramine

Piiriku suurima lubatava kestevpinge U_c valimiseks tuleb kõigepealt leida pinge, mis rakendatakse normaaltöölukorras piiriku klemmidele. Siinjuures tuleb eristada, kas piirik on ühendatud faasi ja maa vahele, faaside vahele või neutraali ja maa vahele. Pinget saab enamasti arvutada faasidevahelise maksimaalse süsteemipinge abil. Juhul, kui see pinge ei ole teada või kui see aja jooksul muutub, tuleb arvutamisel kasutusele võtta seadmestikule lubatud kõrgeim pinge U_m .

Kolmefaasilises süsteemis võivad peale maalühist esineda ajutised võrgusageduslikud liigpinged, mille suurus on kindlaks määratud neutraalpunkti maandusega. Liigpinge kestvus sõltub võrgu tööprotsessist. Jäikmaandatud neutraaliga võrgud lülitatakse tavaliselt välja mõne sekundi jooksul. Isoleeritud ja resonantsmaandatud neutraaliga võrgud võivad jääda sellistes olukordades tööle kuni mõni tund. Eeldatava ajutise liigpinge suurust kirjeldatakse tihti nn. maalühisteguri E abil. Ajutine liigpinge U_{TOV} arvutatakse siis järgmiselt:

$$U_{TOV} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \cdot E$$

kus U_m võib asendada süsteemipingega U_s juhul, kui see väärtus on kindlalt teada.

Selleks, et MO-piirikud töotaksid vastavalt võrgusüsteemi nõudmistele, peab olema kestevpinge U_c valimisel täidetud kaks tingimust:

- U_c peab olema samaväärne või suurem piiriku klemmidele rakendatud võrgusageduslikust kestevpingest. Maaga ühendatud piirikutele kehtib järgmine tingimus:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

kusjuures ka siin U_m võib asendada süsteemipingega U_s .

- Olenevalt ajutisest liigpingest peab piirikule langev koormus asetsema vahelduvpinge-aja karakteristikule kantud kõverast allpool või ühtima sellega. Kontrollimiseks tuleb lisaks ajutise liigpinge suurusele määratleda veel selle maksimaalne ajaline kestvus. Ohutuse mõttes tuleks alati kasutada mõlemast kõverast alumist, välja arvatud mõned põhjendatud erandjuhud. Juhul, kui vastav tööpunkt asetseb ülevalpool kõverat ei saa valitud piirikut sellesse võrku paigaldada. Sellisel juhul tuleb kasutada suurema kestevpingega piirikut.

$$U_c \geq \frac{U_{TOV}}{T}$$

kus T on määratud kindlaks süsteemi väljalülitusajaga t ja vahelduvpinge-aja karakteristikuga.

3.4 Näited ja eriolukorrad

3.4.1 Maalühiskompensatsiooniga või kõrgeoomilise isoleeritud neutraaliga võrgud

Tavaliselt ei ületa nendes võrkudes maalühise poolt tabamata „tervete faaside“ soone-maa vaheline pinge väärtust U_m .

$$U_c \geq U_m$$

piirikutele, mis on ühendatud faasi ja maa vahele.

Maksimaalne pinge transformaatore neutraalpunkti on $U_m / \sqrt{3}$:

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

piirikutele, mis on ühendatud transformaatore neutraalpunkti ja maa vahele.

Siiski tuleb arvestada, et maalühistegur E võib teatud olukorras resonantsnähtuse tõttu saavutada väärtuse kuni 1,85. Sellistel juhtudel tuleb kestevpinget U_c vastavalt tõsta.

3.4.2 Kõrgeoomilise isoleeritud neutraaliga ja automaatselt maalühisel väljalülituvad võrgud

Ajutiste liigpingete suurus on siin sama nagu maaühendusvoolu kompenseerimisega võrkudes. Kiire väljalülitus võimaldab siiski valida madalama kestevpingega U_c piirikuid, millel on parem kaitsenivoo.

$$U_c \geq \frac{U_m}{T}$$

piirikutele, mis on ühendatud faasi ja maa vahele.

$$U_c \geq \frac{U_m}{T \cdot \sqrt{3}}$$

piirikutele, mis on ühendatud transformaatore neutraalpunkti ja maa vahele.

3.4.3 Madalaoomilised maandatud neutraaliga ($E \leq 1,4$) võrgud

Niikaua kui võrgus on madalaoomiliselt maandatud piisavalt paljude transformaatore neutraalpunktid, ei ületa maalühistegur terves võrgus väärtust 1,4. Suurte maaühendus- või lühisvoolude tõttu toimub sellistes võrkudes väljalülitus väga kiiresti, nii et ka siin võib valida madalama kestevpingega U_c piirikuid parema kaitsenivoo saavutamiseks.

$$U_c \geq \frac{1,4 \cdot U_m}{T \cdot \sqrt{3}}$$

piirikutele, mis on ühendatud faasi ja maa vahele.

Maandamata transformaatoreite neutraalpunktide pinge võib ulatuda maksimaalselt kuni

$$U_{TOV} = 0,4 \cdot U_m$$

$$U_c \geq \frac{0,4 \cdot U_m}{T}$$

piirikutele, mis on ühendatud transformaatoreite neutraalpunktiga ja maa vahele.

3.4.4 Madalaoomilised maandatud neutraaliga ($E > 1,4$) võrgud

Juhul kui transformaatoreite neutraalpunktid maandatakse maaühendus- või lühisvoolude piiramiseks läbi kaarekustutuspooli, tõuseb pinge „tervetes“ faasides kuni väärtuseni U_m . Puhtalt oomilise takistuse puhul võib pinge tõusta isegi kuni 5% üle U_m väärtuse.

$$U_c \geq \frac{1,05 \cdot U_m}{T}$$

oomilise maanduse puhul.

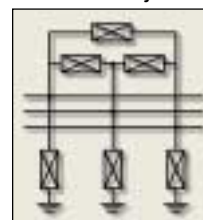
3.4.5 Liigpingepiirik faaside vahel (Neptuni lülitus)

Teatud kohtades nagu kaarahjuseadmete transformaatoreites esinevad lülitusliigpinged, mille puhul piirikute tavaline lülitus maa suhtes osutub ebapiisavaks. Sellistel juhtudel võib tihti kaitsenivood parandada sellega, kui paigaldatakse faaside vahele lisapiirikud.

Kaitse koosneb sellisel juhul kuuest liigpingepiirikust - kolm faaside vahel ja kolm faasi ja maa vahel:

$$U_c \geq U_m$$

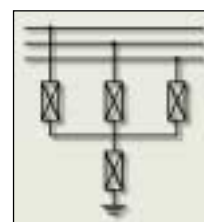
kõikidele piirikutele.



Üks variant sellest lülituskeemist on nn. neptuni lülitus, mille nimetus tuleb skeemi kuju järgi. Ka selline lülitus pakub kaitset nii faaside vahel kui ka maa suhtes. Erinevus kuue piirikuga variandist on 33% kõrgem kaitsenivoo. Suurema kaitsenivoo põhjuseks on see, et piirikutele peab valima suhteliselt kõrge kestevpinge U_c :

$$U_c \geq 0,667 \cdot U_m$$

kõikidele piirikutele.



3.4.6 Kõrgem harmoonilistega talitluspinge

Mittelineaarse $U-I$ karakteristiku tõttu on MO piirikutele otsustavaks väärtuseks talitluspinge amplituudväärtus. Kui pinge on suurte moonutustega siis peab võrgus arvestama kõrgemate harmoonilistega, mistõttu pinge amplituudväärtus võib üsna märkimisväärselt kalduda kõrvale $\sqrt{2}$ kordsest efektiivväärtusest. Niikaua kui kõrvalekalded on väiksemad kui 5%, võib kestevpinge väärtust vastavalt korrigeerida. Suuremate kõrvalekallete puhul peaks piirikute valimine käima kooskõlastatult piirikute tootjaga.

Sama kehtib ka MO piirikute kasutamisel türistorventiilide naabruses. Pingetõusud, lülitusimpulsid ja püsikomponendid viitavad sellele, et vaatluse alla peab võtma täiendavad valikukriteeriumid.

4. Kaitse toime

4.1 Liigpingepiiriku kaitsenivoo

Piiriku kaitsenivoo U_{res} defineeritakse nagu maksimaalne jääkpinge piiriku klemmidel, mis tekib kui piirikut läbib nimilahendusvool (8/20 μ s). Enamike keskpingevõrku paigaldatud piirikute nimilahendusvool on 5 kA või 10 kA. Nimilahendusvoolu kuju on 8/20 μ s -ga kindlaks määratud ja see peab iseloomustama välgulahendusel esinevat liigpingeimpulssi. Välguvooluimpulsside jääkpinge on spetsifikatsioonilehtedel tavaliselt ära märgitud ka mitmekordse nimilahendusvoolu ja nimilahendusvoolu osade kohta.

Lülitusliigpingetel on võrreldes välguliigpingetega tunduvalt väiksemad amplituudid. Seetõttu pakuvad huvi ka maksimaalsed jääkpinged, mille lülitusimpulsside kuju on 30/60 μ s. Need on samuti toodud spetsifikatsioonilehtedel erinevate amplituudide kohta, nagu näiteks 125 A ja 500 A.

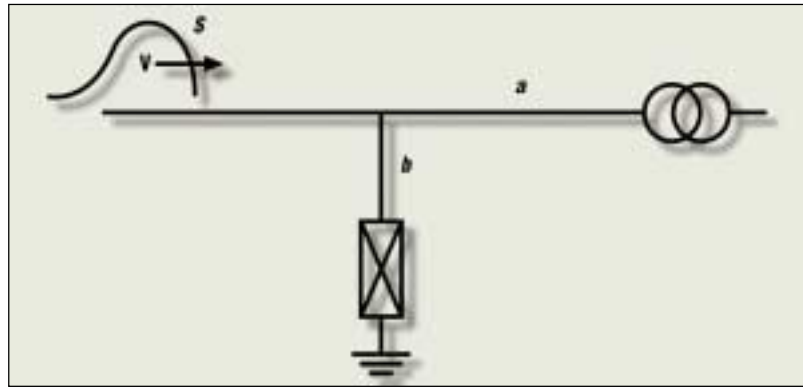
4.2 Liigpingepiiriku kaitsepiirkond

Liigpingeimpulssid omandavad õhuliinides ja kaablites kulglaine kuju. See tähendab, et soone pinge hetkeväärtused ei sõltu enam mitte ainult ajast, vaid ka asukohast piki soont kus seda mõõdetakse. Pinge erinevus võib olla eriti suur just nende kohtade lähedal kus juhi takistus muutub, nagu näiteks õhuliini-kaabli üleminekul või hargnemiskohtades. Selle põhjuseks on peegeldumine nn. peegelduspunktides. Piirikute kasutamisel tähendab see seda, et pinge, millega koormatakse seadet, ei ole alati sama piiriku jääkpingega antud hetkel. Mida kaugemale on piirik seadmest paigaldatud seda suurem võib see erinevus olla. Piiriku ja seadme omavahelise teatava vahemaa kaugusel võib eeldada, et piirik ei paku seadmele enam mingit kaitset. Seda kriitilist vahemaad loetakse piiriku kaitsepiirkonnaks. Piirikud peavad olema alati selliselt asetatud, et seadme ja piiriku vaheline elektriline vahemaa oleks väiksem kui see kaitsepiirkond.

Keskpingesüsteemides võib piiriku kaitsepiirkonna L esialgselt orienteeruvalt välja arvutada järgmise valemi abil:

$$L = \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \left[\frac{BIL}{1,2} - U_p \right]$$

kus v = 300 m/ μ s (valguse kiirus);
 BIL = kaitstava seadme nominaalne välgu pingepulsi nivoo;
 U_p = piiriku kaitsenivoo (jääkpinge nimilahendusvoolul);
 S = liigpingeimpulsi järskus.



Joonis 3: liigpingepiirkute skemaatiline paigutus

Tüüpilised S väärtused on 1550 kV/ μ s puupostidega õhuliinidele ja 800 kV/ μ s maandatud traversiga õhuliinidele. Olenevalt nendest väärtustest tulenevad keskpinge võrkudes umbes sellised kaitsepiirkonnad:

$$L = 2,3 \text{ m}$$

puupostidega õhuliinidel;

$$L = 4,5 \text{ m}$$

maandatud traversiga õhuliinidel.

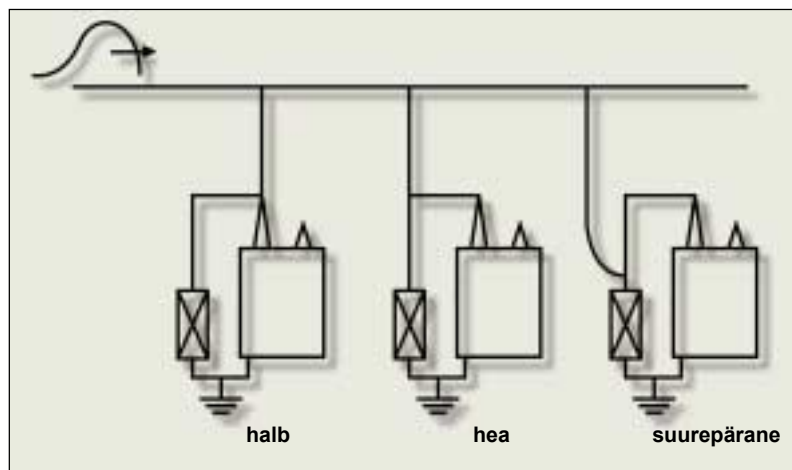
Joonisel 3 toodud lihtsustatud aseskeemis ei tohi löikude a ja b summa ületada kaitsepiirkonda L :

$$a + b \leq L$$

Seejuures eeldatakse, et piiriku maaühendusjuhe on nii lühike, et selle võib jätta arvestamata. Juhul kui see nii ei ole, tuleb see vahemaa löigule b juurde liita.

Praktikas ei saa lihtsalt jätta tähele panemata transformaatoreid mahtuvuse mõju kaitsepiirkonnale. Mahtuvus võib drastiliselt vähendada kaitsepiirkonda L , mis olenevalt löigu b pikkusest võib ulatuda kuni 80%. See efekt avaldub eriti tõsiselt puupostidega liinidel. Kuni süsteemipingeni 24 kV ulatub löigu b maksimaalne pikkus seega umbes 1 m -ni. Kaitsepiirkond L on antud juhul umbes 2 m ja löigule a jääb sellest umbes 1 m. Üle 24 kV süsteemipingel väheneb löigu b maksimaalne pikkus ainult 0.6 m -ni.

Selge on, et kaitseefekt on täielikult määratud piiriku asukohaga ja liinijuhtme konfiguratsiooniga. Optimaalse kaitseefekti saavutamiseks tuleks piirik paigaldada kaitstavale seadmele võimalikult lähedale ja kinnitada õhuliin otse piiriku külge. Joonisel 4 on toodud piiriku kolm ühendusvarianti, mis on mõeldud transformaatore kaitsmiseks. Kolmas variant on kõige parem, juhul kui transformaatore ja liigpingepiiriku vahelist ala ei ole enam võimalik vähendada. Esimene variant on kõige halvem, kuna siin on selge, et piiriku kaitseefekti on võimalik ilma eriliste pingutusteta väga lihtsalt paremaks muuta.



Joonis 4: piiriku erinevad ühendusvariandid transformaatore kaitsmiseks

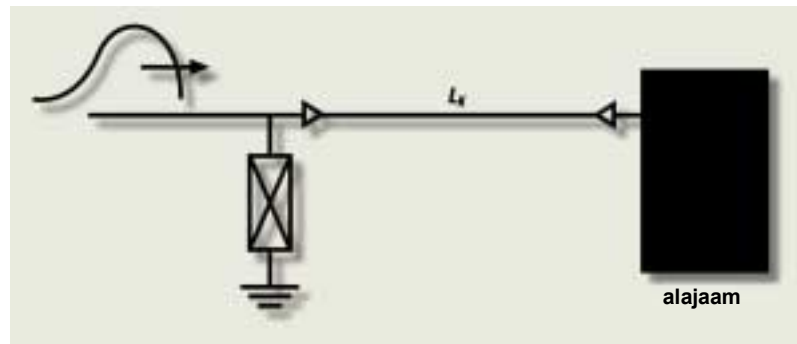
Teatud juhtudel (näit. puupostliinide korral) võib osutuda väga raskeks kui mitte lausa võimatuks mitte ületada lõigu b nõutud maksimaalset pikkust 1 m või 0,6 m. Nendel juhtudel võib aidata liini konfiguratsiooni muutmine. Reeglina piisab enne transformaatoreit viimase kolme õhuliini masti traversite maandamisest. See vähendab liigpinge järskust piisavalt, et kaitsepiirkond oleks küllaldane. Sellise lahenduse puuduseks on see, et lühiste ja maaühenduslühiste keskmine arv süsteemis kipub kasvama, saavutades umbes sama väärtuse nagu maandatud traversiga süsteemis. Üks teine, parem lahendus seisneb selles, et selle lisamaandamise asemel paigaldatakse viimasele postile enne transformaatoreit veel üks teine piirikute komplekt. Ka selliselt väheneb liigpinge järskus, kuid lühiste ja maaühenduslühiste arv süsteemis ei kasva.

5. Erijuhud

5.1 Õhuliiniüleminekuga kaablilõigu liigpingekaitse

Kaablilõigud peavad olema enamasti mõlemast otsast liigpingepiirikutega kaitstud. Lühikeste lõikude korral võib osutda piisavaks ühepoolne kaitse.

Kaabel, mis ühendab õhuliini jaotusseadmetikuga on õhuliinist tulevate liigpingete poolt kergesti kahjustatav. Seetõttu peab piirikud paigaldama õhuliinist kaablisse ülemineku juurde. Teisele poole kaablit ei ole piirik vajalik juhul, kui kaabli pikkus L_K ei ületa tabelis 2 toodud väärtusi.



Joonis 5: õhuliini sisend alajaama

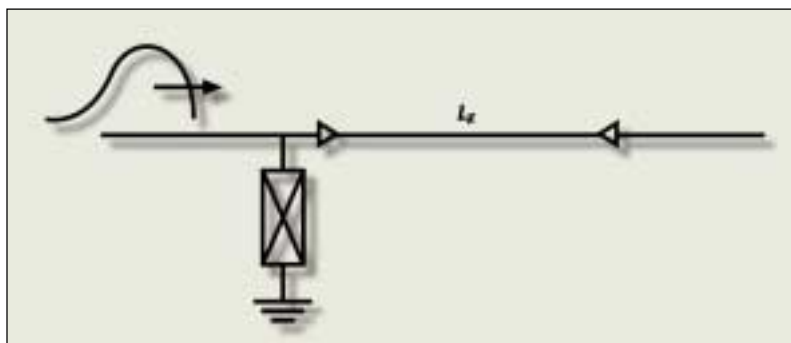
Teisest küljest jälle seadmetik jaotla sees, mis on ühendatud selle lühikese kaabli otsa, on ohustatud peegeldumiseefektiga kaabli otsas. Seetõttu võib osutada vajalikuks paigaldada piirikud ka kaabli selle otsa juurde.

U_m (kV)	L_K (m)			
	puupost		maandatud travers	
$Z(\Omega)$	30	60	30	60
3.6	∞	∞	∞	∞
7.2	64	45	64	50
12	40	30	40	32
17.5	25	21	26	22
24	28	23	28	24
36	22	20	22	20

Tabel 2: lülitusseadme ja õhuliini vahelise kaabli maks. pikkus L_K (ainult ühepoolse piirikutega kaitse puhul)

Kaabli otsmuhvide optimaalseks kaitsmiseks ja kulglainete vähendamiseks tuleb paigaldada piirikud kaabli otsmuhvi lähedale. Juhis indutseeritud pinge võimalikult madalal hoidmiseks peavad olema kõik kaabli ja piiriku vahelised ühendusjuhid (lisaks ka maandusühendused) nii lühikesed kui võimalik. Kaabli ekraan või mantel peab olema ühendatud piiriku maandusühendusega.

Kaablitele, mis on asetatud kahe õhuliinilõigu vahele võib osutada piisavaks paigaldada liigpingepiirikud ainult ühe otsa õhuliini-kaabli üleminekule, ehkki liigpinged võivad siseneda mõlemalt poolt. Piirikute kaitsetoime liigpingete vastu, mis sisenevad kaablisse selle kaitsmata poole poolt, on väga nõrk ja seetõttu saab seda lahendust ainult siis arvesse võtta kui on tegemist väga lühikese kaabliga.



Joonis 6: lühike kaabel õhuliinide vahel

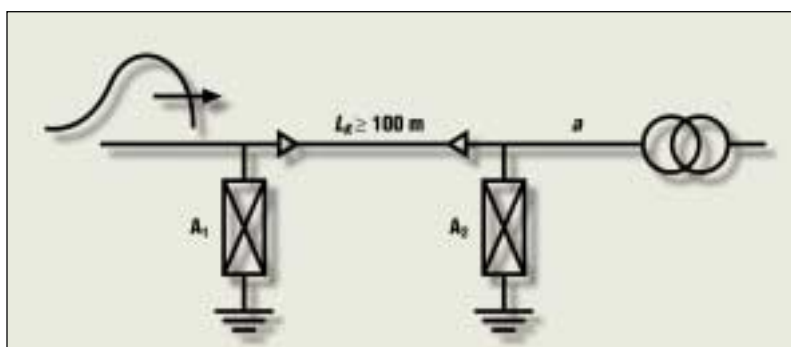
Piiriku kaitsepiirkond on eriti väike, kui kaabel on paigaldatud ühe lõiguna maandamata puupostliini vahele (v. tabel 3), kuna sellise skeemi kohaselt isolatorite poolt pakutav „loomulik liigpingekaitse“ (v.t. alguses) on otsese pikse tabamuse korral väga piiratud. Tabelis toodud L_K väärtused kehtivad piirikutele, millel on nimilähendusvool $I_n = 10$ kA tingimusel, et kogu kaabliõigus on lainetakistus konstantne. Kaabliharud ja teised peegelduspunktid osutuvad peegeldumisi arvestades pikkuse L_K täiendava lühendamise tulemuseks.

U_m (kV)	L_K (m)			
	puupost		maandatud travers	
$Z(\Omega)$	30	60	30	60
3.6	7	3	17	10
7.2	9	4	22	13
12	9	4	19	14
17,5	6	3	15	13
24	10	5	17	15
36	8	4	15	14

Tabel 3: kahe õhuliini vahelise ühepoolse kaitsega kaabli maks. pikkus L_K (piiriku ja kaabli vahelise ühenduse pikkus on maks. 1 m)

5.2 Transformaator kaabli lõpus

Juhul kui kaabli pikkus L_K ületab eelnevates tabelites toodud väärtusi, osutub vajalikuks paigaldada teine komplekt piirikuid. Järgmiseks küsimuseks oleks see, et kui kaugelt oleks teine piirik A_2 suuteline järgi ühendatud transformaatorit kaitsma. Ka siin osutub piiriku ja transformaatori vaheline kaugus määravaks.



Joonis 7: kaabli otsa ja transformaatori vahele on paigaldatud teine piirik

Järgnevas näites on taas transformaator ühendatud kaabli kaudu, mille pikkus L_K on rohkem kui 100 m, välgu poolt kergesti kahjustatava õhuliiniga. Eelnevale selgitusele tuginedes on piirikud vajalikud nii õhuliinist kaablisse üleminekul kui ka kaabli teises otsas. Piirik A_1 on mõeldud liinipoolseks kaitseks ja piirik A_2 piirab kaabli otsas peegeldumisel tekkivad liigpinged. Piirikud on ühendatud otse otsmuhvi kaablikinga külge.

U_m (kV)	a (m)			
	puupost		maandatud travers	
$Z(\Omega)$	30	60	30	60
3.6	300	300	500	500
7.2	43	37	53	53
12	20	14	20	14
17,5	17	10	16	10
24	19	12	19	12
36	16	11	20	11

Tabel 4: kaabli otsa ja transformaatori vaheline maks. lubatud vahemaa a sellisel juhul, kui teine piirik on monteeritud otse kaabli otsa külge

Kui kaugus a ei ületa tabelis 4 toodud väärtusi, siis sellise paigalduse puhul on transformator juba piirikutega A_2 küllaldaselt kaitstud. Transformaatori mahtuvuseks on arvutuste juures võetud 2 nF. Mahtuvuse väiksemad väärtused pikendavad maksimaalset lubatud vahemaad.

5.3 Transformaator on ühendatud ainult ühepoolselt välgu poolt kahjustatava õhuliiniga

Üldiselt vajavad liigpingete eest piirikutega kaitsmist ainult need trafõhendused, mis on ühendatud välgu poolt kahjustatava õhuliiniga. Kõrgepingetransformaatorite puhul, mis ühendab kõrgepingevõrgu keskpinge võrguga ja kus ainult kõrgepingevõrku loetakse välgu poolt kahjustatavaks, osutub teatud olukorras liigpingekaitse siiski ka keskpinge pool vajalikuks.

Kuna välgu liigpinged on väga kiirelt toimuvad protsessid, siis umbes 40% algsest liigpinge amplituudist kantakse mahtvuslikult üle ka transformaatori keskpinge poolele. Nõuetekohaselt võib selliste liigpingete piiramiseks paigaldada keskpinge poolele pika kaabli, madala impedantsiga kondensaatori või nende kahe elemendi kombinatsiooni. Kuid siiski annab liigpingepiirikute kasutamine nende lahendustega võrreldes kaks olulist eelist:

- induktiivselt üle kantud liigpinged võivad kondensaatori abil veelgi suureneada. Selle lisapinge koormuse piiramine nõuab hoolikalt valitud jadalülituses võnkesummutustakisteid. Sädevahemikuta liigpingepiirikute puhul sellist efekti üldse ei esine.
- transformaatori primaar- ja sekundaarmähise vahelise läbilöögi puhul koormatakse ka keskpinge poolseid seadmeid võrgusagedusliku kõrgepingega. Juhul kui keskpinge poole kaitsmiseks on piirikud paigaldatud, hävinevad need väga lühikese aja jooksul ja tekib lühis. Piirik nn. „ohverdab“ ennast ja kaitseb seeläbi järgi ühendatud seadmeid, mistõttu kahjustused piirnevad enamasti ainult transformatoriga. Kuna piirikute välja töötamisel on arvesse võetud ka nende hävinemine ükskõik missugusel põhjusel, siis reeglina on see tunduvalt vähem mõtlemapanev kui sama asi teiste seadmete puhul (näiteks kondensaatorid).

Piirikute poolt pakutav parim kaitse on eriti ilmne transformaatori puhul, mis ühendab generaatorit kõrgepingevõrguga.

Samalaadselt toimib ka keskpinge- ja madalpingevõrgu vaheline ühendus. Ka siin kantakse keskpinge võrgu välgu liigpinged läbi transformaatori mahtvuslikult madalpingevõrku üle. Seetõttu on soovitatav kasutada liigpingepiirikuid ka madalpinge poolel isegi siis, kui ainult keskpinge poolt vaadeldakse välgu poolt kahjustatavana.

Loetakse vaidlustatavaks, et kas ja millisel määral suudavad madalpinge liigpingepiirikud kaitsta kogu transformaatorit, kui ainult madalpinge poolt vaadeldakse välgu liigpingete poolt kahjustatavana. Paljud spetsialistid on arvamusel, et selline kaitse on täiesti piisav. Kuid siiski ikka enam ja enam teatakse transformaatrite kahjustustest, mis viitavad madalpinge poolsetele välgu liigpingetele. Sellistel juhtudel oletatakse, et suhteliselt aeglasel transientliigpingel madalpinge poolel transformeeritakse induktiivselt keskpinge poolele, kus need tekitavad isolatsiooni läbilöögi. Kõrge välgu intensiivsusega piirkondades on soovitatav paigaldada piirikud mõlemale poole transformaatorit isegi siis, kui ainult madalpinge poolt vaadeldakse välgu poolt kahjustatavaks.

5.4 Liigpingepiirik gaasitäitega keskpinge lülitusseadmes

Gaasitäitega keskpinge lülitusseadmetes kasutatakse reeglina spetsiaalseid siseruumi liigpingepiirikuid, mis paigaldatakse kaabli otsmuhvide vahetusse lähedusse. Juhul kui lülitusseade on ühendatud välgu poolt kahjustatava õhuliiniga, peab piirikute nimilahendusvool ulatuma 10 kA –ni (klass 1) ja seda isegi siis kui õhuliinist kaablist üleminekukohal on ühed 10 kA piirikud juba paigaldatud. Kui kaabliõhk on pikk, võib kaaluda ka 5 kA piirikute paigaldamist lülitusseadmesse, kuna eeldatav allesjääv lahendusvool nõrgeneb kaabli pikkuse tõttu ja õhuliinist kaablist üleminekukohal olevad piirikud võtavad suurema osa lahendusvoolust enda peale.

Juhul kui piirikud on mõeldud puhtalt kaablivõrgus olevate lülitusliigpingete piiramiseks, piisab enamasti 5 kA piirikute paigaldamisest, kuna eeldatavad lahendusvoolud on suhteliselt väikesed.

Kindlasti peab jälgima tootja poolt ette antud piirikute vahelisi ja samuti ka piirikute ja maandatud osade vahelisi minimaalseid õhkisolatsioonivahemikke. Neid võib vähendada ainult juhul, kui selle uue konfiguratsiooniga on läbi viidud põhjalik isolatsiooni taluvuse test.

5.5 Generaator on ühendatud välgu poolt kahjustatava keskpingeliiniga

Kui koormuse all töötav generaator eraldatakse äkitselt võrgust, tõuseb generaatori pinge hüppeliselt üles, kuni jõuab sekkuda pingeregulaator, mis reguleerib pinge uuesti alla. Sellise ajutise liigpinge suhet normaaltalituspingega nimetatakse koormuse vähendamise faktoriks ϑ . Selle väärtus võib ulatuda kuni 1,5. Reguleerimisaeg t jääb enamasti 3 ja 10 sekundi vahele. Vajaminevate piirikute kestevpinge U_c valimine toimub nende kahe suuruse abil, nagu seda on kirjeldatud peatükis 3.3.

$$U_c \geq \frac{\vartheta \cdot U_m}{T}$$

piirikutele, mis on ühendatud faasi ja maa vahele.

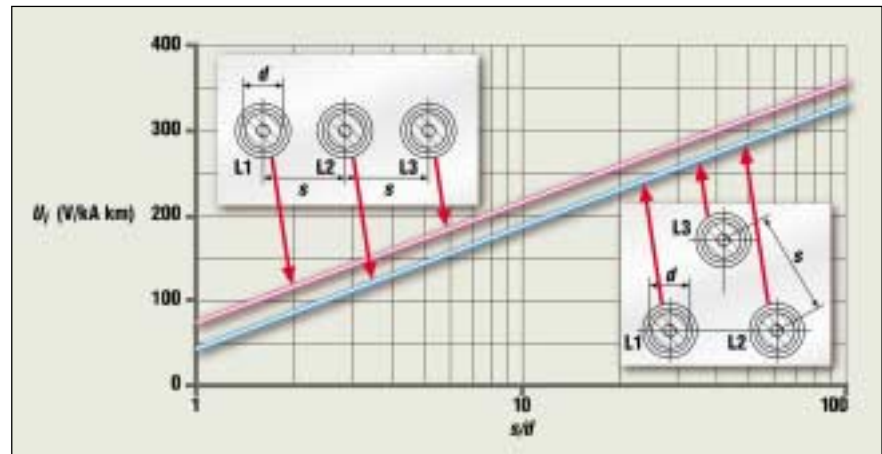
5.6 Mootorite liigpingekaitse

Kui kõrgepingemootoreid lülitatakse välja käivitamise hetkel tekib liigpingete oht, mida põhjustab mitmekordne korduvsüüde lülitis. Korduvsüüded esinevad enamasti siis, kui vool väljalülitamisel on alla 600 A. Mootorite kaitsmiseks tuleb liigpingepiirikud paigaldada otse mootori klemmidele või teisel juhul võimsusüliti juurde. Piirikute valik tuleks läbi viia vastavalt lõigus 3 toodud soovitudele.

5.7 Kõrgepingekaablite metallmantlikaitse

Termilistel põhjustel ja piki kaablit kadude vähendamise eesmärgil maandatakse 1-sooneliste kõrgepingekaablite mantel või ekraan enamasti ainult ühelt poolt. Sellisel juhul tuleks kaabli maandamata ots kaitsta transientliigpingete eest piirikutega.

Piirikute valiku kriteeriumi otsustavaks väärtuseks on pinge U_i , mis lühise puhul indutseeritakse piki kaablit. See pinge sõltub kaabli geomeetriast ja kaablikanalisse paigaldusest ning ei ületa reeglina 0,3 kV kA lühisvoolu ja km kaabli pikkuse kohta. Talitluspunkt, mis tuleneb indutseeritud pinge U_i suurusest ja ajahetkest t (aeg mis kulub kuni lühisvoolude väljalülitamiseni), peab asetsema allpool vahelduvpinge-aja karakteristiku kõverat.



Joonis 8: kaabli mantlis või ekraanis indutseeritud pinge u_i kA lühisvoolu ja km kaabli pikkuse kohta sõltuvalt geomeetriast

$$U_c \geq \frac{U_i}{T} = \frac{u_i \cdot I_k \cdot L}{T}$$

piirikutele, mis on ühendatud mantli või ekraani ja maa vahele.

kus I_k on maksimaalne lühisvool ja L on maandamata kaabliõigu pikkus.

5.8 MO liigpingepiirikud alalispingele

Ka alalispingevõrkudes esinevad välgu või lülitustegevuse tõttu liigpinged, mis võivad seada ohtu nii masinade kui ka seadmete. Tänapäev ei ole kahjuks liigpingepiirikute kasutamise kohta nendes võrkudes avaldatud ühtegi rahvusvahelist standardit või juhendit. Sellest hoolimata võib ka nendes võrkudes kasutada edukalt piirikuid seadmete kaitsmiseks. Eriti ideaalsed on sädevahemikuta MO piirikud, kuna nende puhul ei teki peale transientliigpingetega koormamist energia järgnevusvoolu probleemi, mis kõrvaldatakse tavaliselt tehes suhteliselt suuri kulutusi.

Teistsuguse koormuse tõttu resistorplokkidele ei saa vahelduvpingesüsteemis kasutatavaid liigpingepiirikuid nii lihtsalt alalispingetesüsteemis kasutada. Piirikute paigaldamisel alalispingetesüsteemi tuleb sellisel juhul tingimata jälgida, et see oleks ka tootja poolt heaks kiidetud. Valmistajafirmaga tuleks konsulteerida ka nimelt seoses piirikute dimensioneerimisega seotud küsimustes.

6. Abi liigpingepiirikute õigeks kasutamiseks

Mitmete liigpingeteemaliste arutluste käigus kasutajatega on selgunud, et piirikute kasutamise alane konsulteerimine on väga teretulnud. Tüüpiline olukord, kus asjatundja soovitused oleksid vajalikud on kindlasti tehnoloogia muutumisel, näiteks sädevahemikuga ja portselankorpusega piirikute üleminekul polümeerkestaga MO piirikutele ning samuti ka uute piirikute õige valiku tegemisel, kui olemasolevaid vanu seadmeid hakatakse täiustama. Uued kasutusala, nagu alalispingevõrgud või kogu seadmestiku liigpingekaitse arengukontseptsioon, vajavad tihti esialgse olukorra ja tingimuste põhjalikku analüüsi.

Seetõttu pakume me oma klientidele lisaks antud artiklis toodud soovitustele ka nõustamist ja igakülgset abi kõigis liigpingekaitse alastes küsimustes.