



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju uurimine tarbijate pingetele programmiga PSCAD

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja

prof H. Tammoja

Juhendaja

dots Ü. Treufeldt

Lõpetaja

T. Post

Tallinn 2015

Autori deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

Autor: Tiit Post

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju uurimine tarbijate pingetele programmiga PSCAD

Kuupäev: 27.05.2015

...lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Energeetika teaduskond

Instituut: Elektroenergeetika instituut

Õppetool: Energiasüsteemide õppetool

Töö juhendaja(d): dots. Ülo Treufeldt

Töö konsultant (konsultandid):

Tarbijate ootus on, et elekter on kvaliteetne ning pidevalt kättesaadav. Tänapäeva maailmas on üha rohkem kasutusel erinevaid seadmeid, mis on elektrikvaliteedi osas tundlikud, seepärast on kvaliteedinäitajad ka standarditega normeeritud. Standardite ja normidega määratud tarbijate elektrikvaliteeti ja varustuskindlust häirivad mitmesugused rikked võrgus, mis on põhjustatud erinevatest faktoritest: ilmastik, inimlik eksimus, seadmete vananemine jne. Uurimustöö eesmärk on uurida, kuidas mõjutavad madal- ja keskpinge võrkudes aset leidvad tüüpilised rikked tarbijate pingekvaliteeti.

Rikete mõju uurimiseks ja modelleerimiseks kasutatakse töös elektrivõrgu modelleerimis- ja arvutusprogrammi PSCAD. PSCAD programmi abil modelleeritakse tüüpilisemaid jaotusvõrkudes esinevaid rikkeid (ühefaasiline, kahefaasiline, kolme faasiline ja juhtmete katkemine) jaotusvõrgu erineva konfiguratsiooni korral (jaotustrafode erinevad lülitusgrupid, lühisekohad, kaablivõrk või õhuliinivõrk). Töö tulemusel saadakse graafiliselt ja numbriliselt tulemused erinevate situatsioonide korral. Leitakse kriitilised rikete liigid pingekvaliteedi seisukohalt ning tuuakse välja.

Märksõnad: liigpinged, transiendid, pingelohk, toitekatkestus, rikked, maaühendused, pingete asümmeetria

Summary of the diploma work

<i>Author:</i> Tiit Post	<i>Kind of the work:</i> Master's degree
<i>Title:</i> Modeling failures impact on consumers voltages in distribution networks using program PSCAD	
<i>Date:</i> 27.05.2015	<i>pages</i>
<i>University</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering <i>Chair:</i>	
<i>Tutor(s) of the work:</i> dots. Ülo Treufeldt <i>Consultant(s):</i>	
<p>Consumers expectation is that electricity is a high quality, and continuously available. Nowadays more and more different electrical devices, sensitive to power quality, are in use. Therefore quality indicators are standardized. These standardized quality indicators are disturbed by different faults, caused by the weather, human error, equipment failures, etc. The aim of the research is to investigate how typical faults taking place in low and medium voltage networks influence on consumers voltages.</p> <p>To research and model the influence, network simulating program named PSCAD is used. In program PSCAD typical failures and short-circuits like single- phase short-circuit, two-phase short- circuit and three- phase short- circuit are simulated on different network configurations (overhead power line, cable lines, different transformers). Results in different situations are presented graphically and numerically.</p>	
<i>Key words:</i> overvoltage, transient, voltage sag, interruption, failure, short-circuit to earth, voltage unbalance	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	6
Teema põhjendus:	6
Töö eesmärk:.....	6
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	6
Lähteandmed:.....	7
Lõputöö konsultandid (vajadusel):.....	7
Essõna	8
Lühendite ja sümbolite loetelu	9
Sissejuhatus.....	11
1. Elektri kvaliteet	13
1.1 Elektrikvaliteedi mõiste	13
1.2 Elektrikvaliteedi näitajad	14
1.2.1 Katkestused	15
1.2.2 Aeglased pingemuutused ja pingetase.....	16
1.2.3 Kiired pingemuutused	17
1.2.4 Liigpinged	19
1.2.5 Pinge asümmeetria	21
1.2.6 Võrgusagedus.....	22
2. Rikked ja nende mõju tarbija pingetele.....	23
2.1 Lühise olemus	23
2.2 Rikete liigid ja nende mõju	23
2.2.1 Sümmeetriliste komponentide teooria	24
2.2.2 3 faasiline lühis	27
2.2.3 2 faasiline lühis	29
2.2.4 2 faasiline lühis maaga	33
2.2.5 Ühefaasiline lühis.....	39
2.2.6 1 faasiline maalühis keskpingevõrgus.....	43
2.2.7 Juhtmete katkemine.....	47
3. Rikketalitluse modelleerimine programmiga PSCAD.....	52
3.1 Võrguarvutusprogramm PSCAD	52
3.2 PSCAD mudel.....	52
Lõputöö kokkuvõte	57

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju uurimine tarbijate pingetele PSCAD programmiga
Üliõpilane:	Tiit Post; 105022AAVM
Lõputöö juhendaja:	Dots. Ülo Treufeldt
Õppetool:	Energiasüsteemide õppetool
Õppetooli juhataja:	Heiki Tammoja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	27.05.2015

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju on vaja uurida, kuna rikked tekitavad erinevaid liigpingeid ja rikuvad pingekvaliteeti. Liigpingete ja pingekvaliteedi suhtes on paljud tarbijad tundlikud. Seega teema on oluline jaotusvõrkude haldajatele ja tarbijatele.

Uurimistöös kasutatakse elektrivõrkude modelleerimisprogrammi PSCAD, millega on võimalik modelleerida erinevaid rikkeid, neid omavahel kombineerida ning tulemusi nii numbrilisel kujul kui ka visuaalsete graafikute alusel analüüsida.

Töö eesmärk:

Töö eesmärk on uurida PSCAD programmi abil rikete mõju tarbijate pingetele. Tuua välja pingete seisukohalt kriitilised ja riskantsed rikked.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Uuritakse erinevate rikete mõju tarbijate pingetele: 1. maakaablivõrgus ja õhuliinivõrgus; 2. erinevate lülitusgruppidega ja võimsusega jaotustrafode korral; 3. erinevate rikkeasukohtade korral.

Lähteandmed:

Lähteandmeid saab käsiraamatutest (trafode ja liinide parameetrid jm), kehtivatest standardidest (pinge kvaliteedi nõuded), õpikutest ning loengukonspektidest ja kasutatavast programmist PSCAD.

Lõputöö konsultandid (vajadusel):

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Magistritöö teema „Jaotusvõrgus esinevate rikete mõju uurimine tarbijate pingetele programmiga PSCAD“ anti välja Elektroenergeetika teaduskonna dotsendi Hr Ülo Treufeldti poolt. Lõputöö jaoks vajalikud arvutustulemused ja simulatsioonid on saadud litsentseeritud võrguarvutusprogrammist PSCAD (Power Systems Computer Aided Design).

Lühendite ja sümbolite loetelu

a – faasikordaja

C – võrgu summaarne mahtuvus maa suhtes

\underline{E}_{ekv} – ekvivalentne elektromotoorjõud

\underline{I}_{kA} – A faasi lühisvool

\underline{I}_{kB} – B faasi lühisvool

\underline{I}_{kC} – C faasi lühisvool

\underline{I}_{kA1} – A faasi pärijärgnevus lühisvool

\underline{I}_{kA2} – A faasi vastujärgnevus lühisvool

\underline{I}_{k0} – nulljärgnevus lühisvool

k_a – asümmeetriategur

N – tarbimiskohtade koguarv

N_i – i -nda katkestusega haaratud tarbimiskohtade arv

R – lühisekoha üleminekutakistus isoleeritud neutraaliga võrgus

t_{ij} – tarbimiskohale j katkestusest i põhjustatud katkestusaeg

U – pinge hetkväärtus

U_n – nimipinge

\underline{U}_f – faasipinge

U_{max} – pinge maksimaalväärtus

U_{min} – pinge minimaalväärtus

U_1 – pärijärgnevuspinge

U_2 – vastujärgnevuspinge

\underline{U}_{A1} – A faasi pärijärgnevuspinge

\underline{U}_{B1} – B faasi pärijärgnevuspinge

\underline{U}_{C1} – C faasi pärijärgnevuspinge

\underline{U}_{A2} – A faasi vastujärgnevuspinge

\underline{U}_{B2} – B faasi vastujärgnevuspinge

\underline{U}_{C2} – C faasi vastujärgnevuspinge

\underline{U}_0 – nulljärgnevuspinge

\underline{U}_{kA} – A faasi rikkepinge

\underline{U}_{kB} – B faasi rikkepinge

\underline{U}_{kC} – C faasi rikkepinge

\underline{U}_{kA1} – A faasi pärijärgnevuspinge rikkesuurus

\underline{U}_{kA2} – A faasi vastujärgnevuspinge rikkesuurus

\underline{U}_{k0} – nulljärgnevuspinge rikkesuurus

\underline{U}_N – neutraali nihkepinge

\underline{U}_{M1} – esimese faasi pinge maa suhtes

\underline{U}_{M2} – teise faasi pinge maa suhtes

\underline{U}_{M3} – kolmanda faasi pinge maa suhtes

\underline{U}_{kAN} – A faasi rikkepinge neutraali suhtes

\underline{U}_{kBN} – B faasi rikkepinge neutraali suhtes

\underline{U}_{kCN} – C faasi rikkepinge neutraali suhtes

$\underline{z}_{1\Sigma}$ – summaarne pärijärgnevustakistus

$\underline{z}_{2\Sigma}$ – summaarne vastujärgnevustakistus

$\underline{z}_{0\Sigma}$ – summaarne nulljärgnevustakistus

\underline{z}_f – lühisekoha takistus

ΔU – pinge kõrvalekalle

δU – pinge muutumise ulatus

ω – nurksagedus

Sissejuhatus

Tänapäeva maailmas eeldatakse, et elekter on pidevalt olemas ning tarbijale kättesaadav. Enamus eluvaldkondadest nagu transport, tööstus ja teenindus on sõltuvuses elektrist ning elektrikatkestus põhjustab nendes valdkondades tööseisakuid ja suurt majanduslikku kahju.

Kuna elekter on tarbijatele järjest enam kätte saadavam, siis on pidevalt kasvamas ka erinevate igapäevaeluks vajalike elektriseadmete hulk. Järjest rohkem on võrgus igasugu peenelektroonika seadmeid, nagu televiisorid, arvutid jne. Need elektriseadmed on projekteeritud töötama kindlate parameetrite juures nagu nimisagedus ja –pinge ning kolmefaasiliste seadmete puhul eeldatakse, et pinge on kolmes faasis sümmeetriline. Osade elektriseadmete talitlust ei häiri mõningad kõrvalekalded nimisuurustest, aga üha rohkem on elektriseadmeid, mis ei kannata nende parameetrite muutusi. Osad seadmed lülituvad välja, teistel alaneb kiirus, osad teostavad valesid funktsioone jne. Selliste seadmete suure arvu ja pidevalt kasvava elektri hinna tõttu ootavad tarbijad üha rohkem, et nende poolt tasutud elekter oleks kvaliteetne.

Et elektrikvaliteet oleks üheselt mõistetav elektritootjatele ja –tarnijatele, elektriseadmete tootjatele ning tarbijatele, on paljud elektri tunnussuurused standarditega normeeritud. Standarditega on paika pandud võrgu poolt edastatava pinge nimisagedus ja suurus, kolmefaasilise süsteemi sümmeetria jne. ning nende näitajate lubatud kõrvalekalded. Neid standarditega määratud kvaliteedi näitajaid rikuvad aga paljud rikked jaotusvõrkudes. Rikete põhjuseid võib olla palju, nagu seadmete valetöötamised, isolatsiooni vananemine, ilmastik ja ka inimlik eksimus. Kõige sagedasemad ongi ilmastikust tingitud puude langemised liinijuhtmetele ja äikese löögid, kaabliisolatsiooni rikkumine ning inimlikest eksimustest tingitud kaablite läbikaevamised või liinijuhtmetesse sissesõidud.

Rikked põhjustavad kvaliteedinäitajate väljumist lubatud piiridest. Näiteks põhjustavad rikked pingelohkused, liigpingeid, pingete asümmeetriat ja ka toitekatkestusi.

Kvaliteedinäitajate väljumised lubatud piiridest põhjustavad omakorda ebamugavust tarbijatele ning võivad kahjustada elektriseadmeid. Liigpinged näiteks põhjustavad stressi ja enneaegset isolatsiooni vananemist ning võivad põhjustada isolatsiooni läbi- või ülelööke. Pingelohu korral võivad lülitusseadmed välja lülituda, pöörlevad seadmed seiskuda jne. Kolmefaasilise süsteemi pingete asümmeetria põhjustab pöörlevate masinate kuumenemist ja suurendab voolutarvet. Kõigi kvaliteedinäitajate suhtes on väga tundlikud peenelektroonikat sisaldavad seadmed, näiteks kodumajapidamistes olevad arvutid, nutitelerid jne.

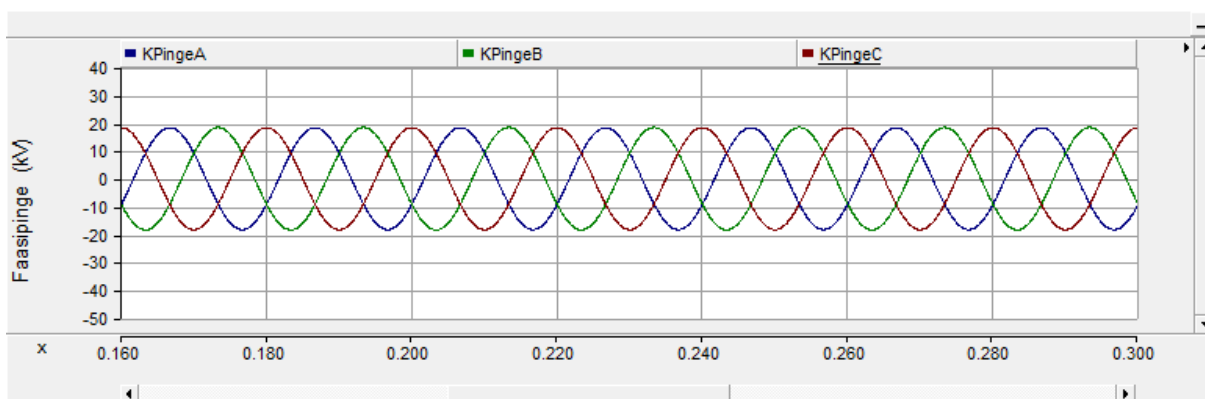
Kuna rikked oluliselt mõjutavad tarbijate seadmeid ning tarbijate rahulolu, on vaja uurida ja modelleerida pingeid rikete korral ning saada teada kuidas erinevad rikked mõjutavad tarbijate pingekvaliteeti.

Uurimistöö esimeses osas tuuaksegi välja standarditega normeeritud elektri kvaliteedinäitajad ja räägitakse nende olulisusest tarbijatele. Töö teises osas kirjeldatakse erinevaid tüüpilisi rikkeid elektrivõrkudes ning tuuakse välja nende mõju ning modelleerimise tulemused. Ning töö kolmandas on välja toodud modelleerimisprogrammi PSCAD mudel ning modelleeritud võrgu parameetrid.

1. Elektri kvaliteet

1.1 Elektrikvaliteedi mõiste

Elektritarvitid on projekteeritud talitlema optimaalselt nimiparameetrite (sagedus, pinge) juures. Ning seejuures eeldatakse, et pinge on siinuseline ja kolmefaasilises süsteemis sümmeetriline (joonis 1.1). Elektrikvaliteet kirjeldab nende parameetrite erinevust nimiväärtustest [1].

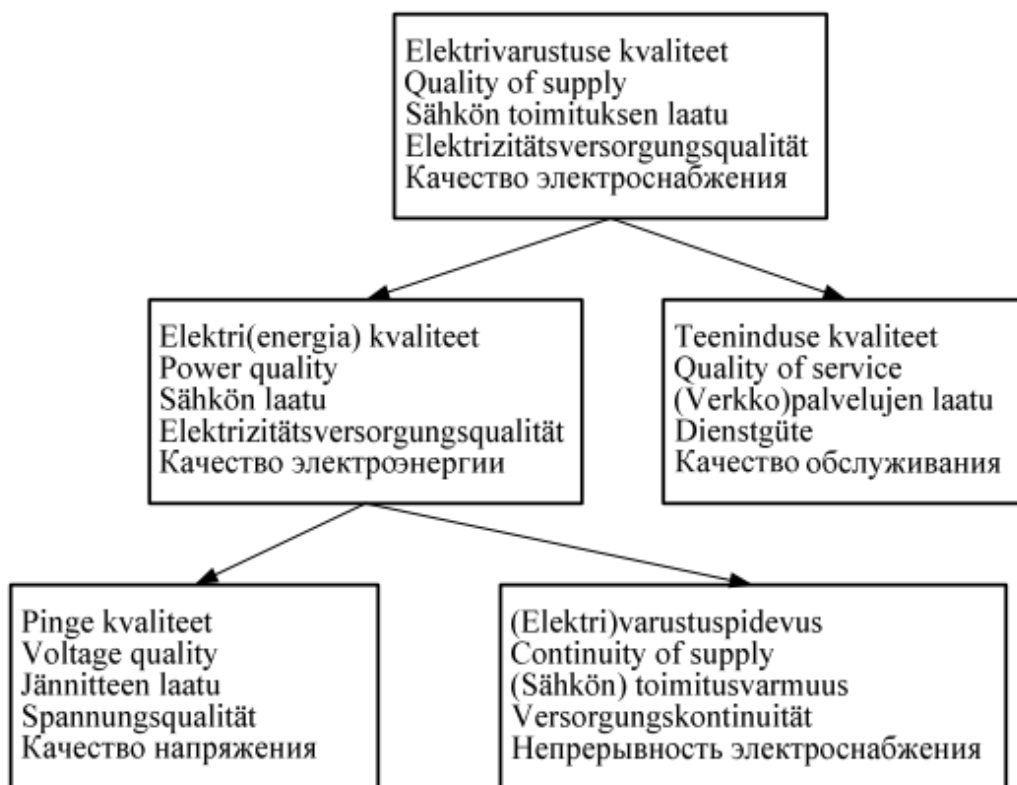


Joonis 1.1 Sümmeetriline kolmefaasiline pingesüsteem

Elektrivõrgu põhiülesandeks on elektritarbijate ökonoomne ja töökindel varustamine kvaliteetse elektrienergiaga, [2] kuid samas ka tarbija ei tohi oma elektriseadmetega võrku saastada, sest üks olulisem halva kvaliteedi põhjustaja ongi tarbija ise [1].

Halva elektrikvaliteedi allikad saabki jaotada üldiselt kahte gruppi: tarbijad, seadmed ja komponendid, ülekande- ja jaotussüsteemid. Kvaliteedi langus elektrivõrgus (ülekande- ja jaotussüsteemides) on siiski eelkõige tingitud elektriliinide häiretest, nagu näiteks pingepulsid, pinge lohud, pinge muhud, pinge ja voolu asümmeetrilisus, toitekatkestused ja harmoonikud [3].

Tarbija olukorra tervikuna määrab elektrivarustuse kvaliteet (joonis 1.2), mis koosneb elektri kvaliteedist ja elektrienergia tarnimisega seotud kvaliteedist [1].



Joonis 1.2 Elektivarustuse kvaliteet

1.2 Elektrikvaliteedi näitajad

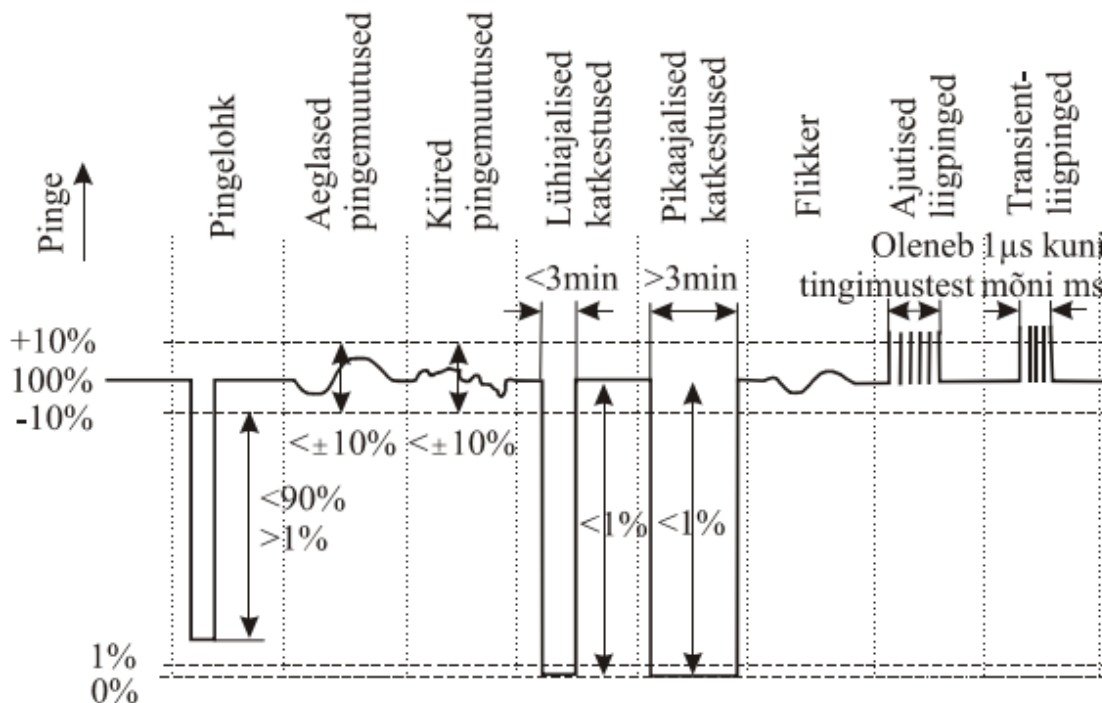
Enamus elektri kvaliteedi häiringutest on seotud toitepinge amplituudi või sagedusega.

Toitepinge kvaliteedi näitajad saab liigitada [1]:

- *võrgusagedus
- *pingetase ja aeglased pingemuutused
- *pingelohud ja kiired pingemuutused
- *lühiajalised toitekatkestused
- *pikaajalised toitekatkestused
- *võrgusageduslikud liigpinged
- *transientliigpinged
- *toitepinge asümmeetria
- *kõrgemad harmoonikad
- *vaheharmoonikud
- *signaalpinged

*alalliskomponendid vahelduvvoolu võrkudes

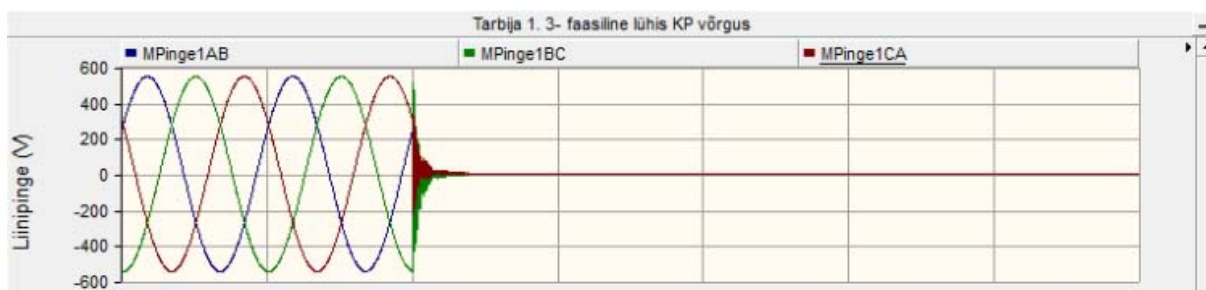
Olulisemad elektrikvaliteedi näitajad ning neid iseloomustavad omadused on joonisel 1.3 [1].



Joonis 1.3 Pingequaliteedi näitajad

1.2.1 Katkestused

Olukorda, kus elektrivõrgu teatud sõlme pinge muutub nulliks või läheneb sellele nimetatakse toitekatkestuseks (joonis 1.4). Nullilähedane on IEC standardi järgselt madalam kui 1% nimipingest ja IEEE järgselt madalam kui 10% nimipingest. Toitekatkestus võib olla lühiajaline või pikaajaline toitekatkestus. Samuti eristatakse plaanilisi katkestusi ja rikest tingitud ootamatuid katkestusi [4].



Joonis 1.4 Madalpingetarbija toitekatkestus 3 faasilise lühise korral keskpinge võrgus

Toitepinge katkestused on üldiselt tingitud riketest (joonis 1.4), mis sellest tulenevalt välja lülitatakse. Ülejäänud katkestused on tingitud juhtmete katkemisest ja plaanilistest lülitamistest [4].

Pikaajaline toitekatkestus on sündmus, mille ajal toitepinge tarbijal langeb nullini ning ei taastu automaatselt. Pikaajaliseks loetakse toitekatkestusi kestusega üle 3 minuti [4]. Alla 3 minutilisi katkestusi loetakse lühiajalisteks. Keskpinge võrgu õhuliinide riketest 90% on mööduvad ning kaovad tavaliselt taaslülituse korral ning vaid 10% riketest on püsivad. Lühiajalised toitekatkestused sarnanevad pinelohkudele [1].

Võrguettevõtted kasutavad varustuskindluse hindamiseks üldjuhul kahte näitajat [5] [6]:

*toitekatkestuste erisagedus SAIFI- *System Average Interruption Frequency Index*

$$SAIFI = \frac{\text{kliendikatkestuste koguarv}}{\text{tarbimiskohtade arv}} = \frac{\sum_i N_i}{N} \quad (1.1)$$

kus

N_i – i-nda katkestusega haaratud tarbimiskohtade arv

N – tarbimiskohtade koguarv

*toitekatkestuse keskmine kestus kliendi kohta SAIDI- *System Average Interruption Duration Index*

$$SAIDI = \frac{\text{kliendikatkestuste kogukestus}}{\text{tarbimiskohtade arv}} = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{N} \quad (1.2)$$

kus

t_{ij} – tarbimiskohale j katkestusest i põhjustatud katkestusaeg

1.2.2 Aeglasel pingemuutused ja pingetase

Elektrivõrgu nimipinge on pinge, millega tähistatakse või tuvastatakse elektrivarustusvõrku ja millega seostatakse teatud talitluse tunnussuurus. Vastavalt standardile on avalike madalpingevõrkude standardnimipinge neljajuhtmelises kolmefaasilises võrgus on 230 V faasi ja neutraali vahel [7].

Elektrisüsteemi elemendid (masinad, seadmed, aparaadid) projekteeritakse optimaalselt talitlema nimipingel. Arvestades takistustest tingitud pingekadusid elektrisüsteemi elementides ja tarbijate koormuse ajalisi muutusi, pole võrgu kõikides punktides võimalik

kindlustada täpselt nimipingega võrdset talitluspinget. Seega võib tegelik töö- ehk talitluspinge nimipingest erineda [2].

Standarditega normeeritakse ka talitluspinge lubatud maksimaalsed hälbed (kõrvalekalded) nimipingest tarbijate liitumispunktides [2].

Pinge kõrvalekallet ehk pingehälvet arvutatakse valemiga [1]

$$\Delta U = U - U_n \text{ või } \Delta U = \frac{U - U_n}{U_n} 100\% \quad (1.3)$$

kus

ΔU – pinge kõrvalekalle

U – pinge hetkväärtus

U_n – nimipinge

Pinge efektiivväärtuse tõusu rohkem kui 10% nimisageduse juures kauemaks kui 1 minut nimetatakse ülepingeks. Ülepinged on üldjuhul põhjustatud suurte koormuste väljalülitamistest ja kondensaatorpatareide pingestamisest [8].

Pinge efektiivväärtuse langust alla 90% nimipingest kauemaks kui 1 minut nimetatakse alapingeks. Alapinge on üldjuhul põhjustatud ülepinge vastand tegevustest [8].

IEC standardi kohaselt võib võrgu normaaltalitlusolude korral toitepinge vahemik liitumispunktis erineda kuni +/-10% [9].

1.2.3 Kiired pingemuutused

Kiired pingemuutused on järjestikuliste pingemuutuste kogum või pingekõvera mähisjoone tuiklemine. Pinge kõikumist hinnatakse pinge muutumise ulatusega [1]

$$\delta U = U_{max} - U_{min} \text{ või } \delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_n} 100\% \quad (1.4)$$

kus

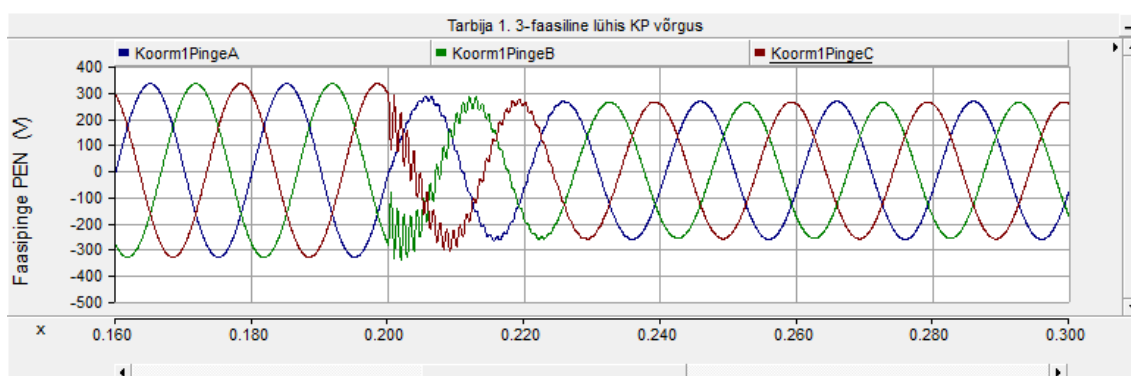
δU – pinge muutumise ulatus

U_{max} – pinge maksimaalväärtus

U_{min} – pinge minimaalväärtus

Kiired pingemuutused on tingitud rikest, suurte koormuste pingestamisest või juhtmete katkemisest. Sõltuvalt rikke asukohast ja süsteemi olukorrast võib rikke tulemuseks olla kas pingelohk, pingemuhk või jäädav katkestus [8].

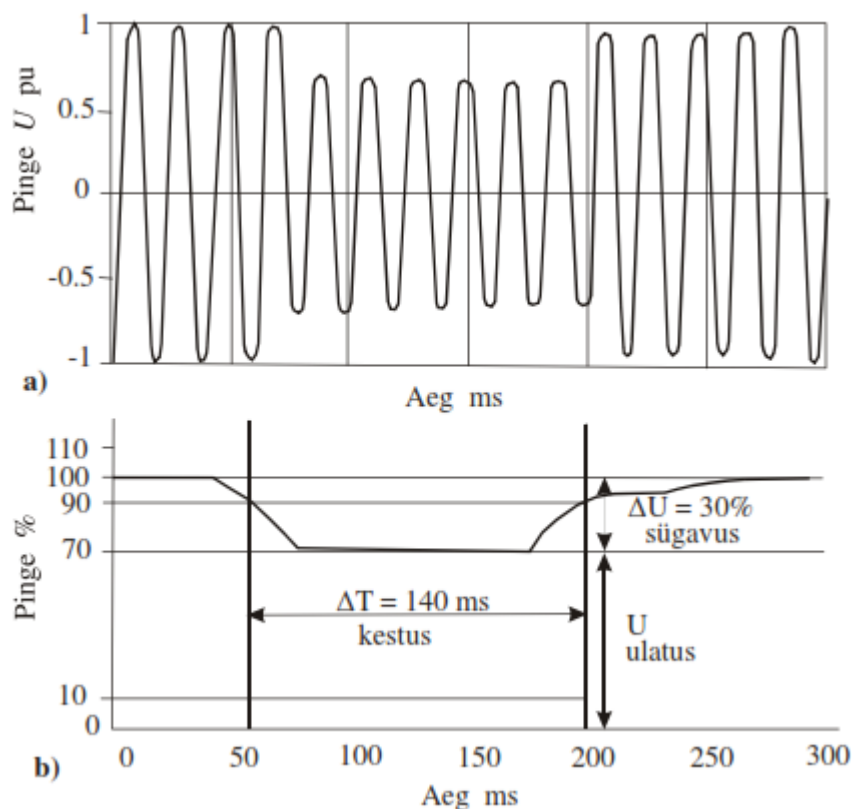
Pingelohk on toitepinge langus lühiajaliselt ning millele järgneb pinge taastumine. IEC standardi järgselt on pingelohk järsk toitepinge langus vahemikus 90% kuni 1% nimipingest kestusega 10ms kuni 1 minut. IEEE järgselt on pingelohk siis, kui pingelangus pingelohu kestel on vahemikus 90% kuni 10% nimipingest. Pingelohud on üldjuhul tingitud lühistest süsteemis, ülekoormusest ja suurte mootorite käivitamisest (joonis 1.5) [4].



Joonis 1.5 Pingelohk põhjustatuna kõrval fiidril toimuvast lühisest

Pingelohud on aktuaalsed tingituna nende mõjust erinevatele seadmetele: muutuva kiirusega seadmed, kontroll süsteemid ja arvutid. Osad seadmed väärtavad, kui pinge efektiivväärtus langeb alla 90% kauemaks kui üks või kaks tsüklit. Selliseid väärtusi esineb kümneid kordi aastas. Kui selline väärtus toimub protsessi kontrolliva seadmega võib ainult ette kujutada kui suured on kahjud. Katkestused on üldjuhul tingitud kohalikust jaotusvõrgust. Pingelohud seevastu võivad olla tingitud lühistest sadu kilomeetreid eemal ülekandevõrgus. Pingelohk on seega palju laialdasem probleem kui katkestus [4].

Pingelohke iseloomustatakse nende kestusega ΔT , sügavusega ΔU ja ulatusega U (joonis 1.6). Pingelohu kestus on üldjuhul 10ms kuni 1 minut. Pingelohu sügavus on nimipingest ja pingelohu ajal esineva vähima pinge efektiivväärtuse vahe. Pingelohu ulatus on säilinud pinge efektiivväärtus mingis punktis [1].



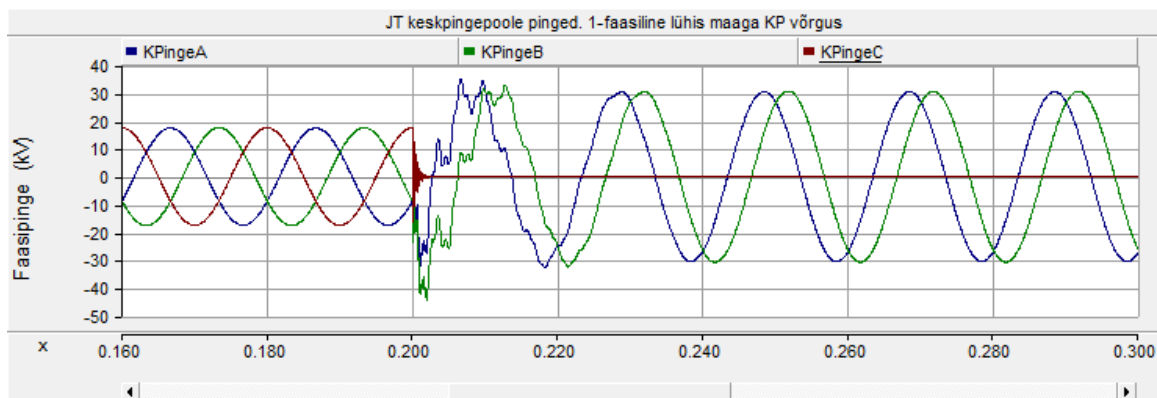
Joonis 1.6 Pinge hetk- (a) ja efektiivväärtused (b) pingelohu korral.

Rikke asukoht on põhiline faktor, mis määrab tarbija elektrikvaliteedi häiringu suuruse. Pingelohu sügavus sõltub sellest, kui kaugel on tarbija lühisekohast ja lühisvoolust. Pingelohk on seda suurem, mida lähemal on rikke toiteallikale [5].

Pingemuhk on pingelohu vastand. See on lühiajaline nähtus, mil pinge efektiivväärtus tõuseb. Pinge amplituudi väärtus on vahemikus 110 kuni 180% nimipingest ning kestus on vahemikus 0,5 tsüklit kuni 1 minut. Pingemuhud on harvemad kui pingelohud. Pingemuhk on üldjuhul tingitud suurte koormuste väljalülitamisest, kondensaatorpatarei pingestamisest ühefaasilisest maaühendusest [3].

1.2.4 Liigpinged

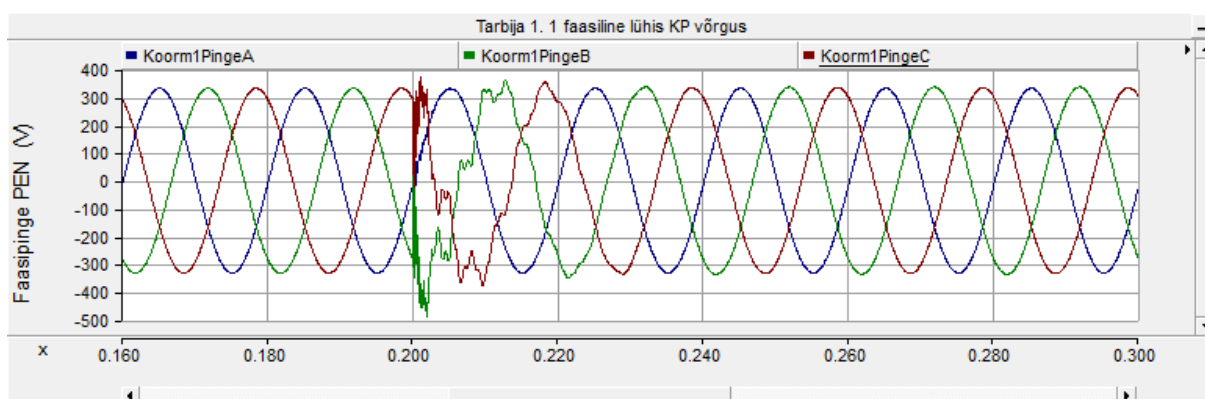
Erineva kestusega liigpingeid nimetatakse erinevalt. Liigpingeid väga lühikese kestusega ja suure amplituudiga nimetatakse transientliigpingeteks. Pikema kestusega liigpingeid kutsutakse võrgusageduslikeks liigpingeteks (joonis 1.7) [4].



Joonis 1.7 Transientliigpinge ja võrgusageduslik liigpinge 1 faasilisel maaühendusel keskpinge võrgus.

Võrgusageduslik liigpinge on suhteliselt pika kestusega liigpinge faasijuhtmete või faasijuhtmete ja maa vahel. See tekib tavaliselt lülitustoimingute või rikete tagajärjel. Tüüpilised võrgusageduslike liigpingete põhjused on ühefaasilised maalühised (joonis 1.7), ferresonants, PEN-juhtme katkemine madalpingevõrgus asümmeetrilise koormuse korral, trafo astmelüliti rikked või reaktiivvõimsuse ülekompenseerimine [1].

Madalpingesüsteemides võib rike keskpingevõrgus põhjustada lühisvoolu voolamise ajal ajutisi liigpingeid. Üldiselt ei ületa sellised liigpinged 1,5 kV efektiivväärtust (joonis 1.8). Isoleeritud neutraaliga keskpingevõrgus võib liigpinge küündida kuni 2,0 kordse lepingulise pinge väärtuseni [7].

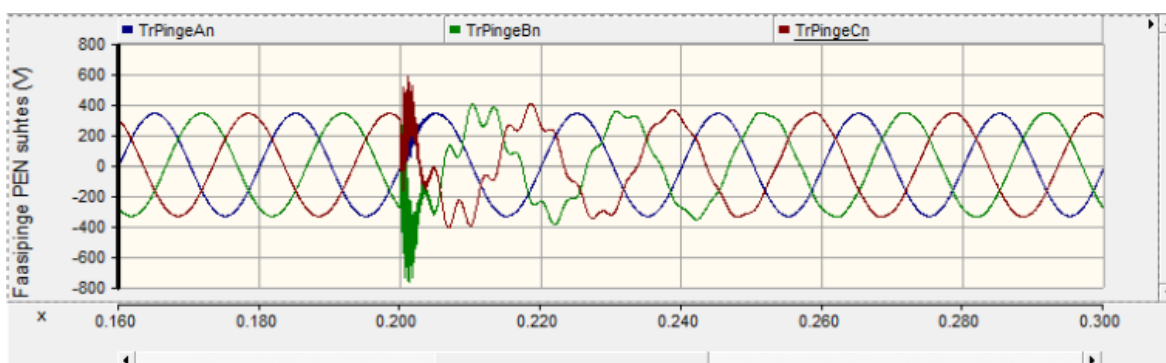


Joonis 1.8 Madalpinge tarbija faasipinge keskpingevõrgus esineva 1 faasilise maalühise korral.

Kiireid pinge häiringuid, tavaliselt kestusega üks tsüklil nimisagedusest või väiksem, kutsutakse transientideks. Üldiselt on transientliigpinged liitumispunktis põhjustatud äikesest (indutseeritud liigpinge) või lülitamistest [7]. Termin transient ei ole päris korrektne, kuna see peaks tähendama üleminekut kahe stabiilse oleku vahel.

Lülitustoiminguid selle definitsiooni järgi saab kutsuda transiendiks. Sündmusi tingitud pikselöögist mitte. Kuna aga need kaks on sarnased ajaskaalal, kutsutakse mõlemat transiendiks [4].

Transient liigpinge on võnkuv või mittevõnkuv liigpinge ehk impulssliigpinge, mis on tugevalt sumbuv ning kestab mõne millisekundi või vähem. Mittevõnkuvaid transiente iseloomustatakse nende frondi tõusu ja sumbumise ajaga. Võnkuvat transienti iseloomustatakse sagedusega, kestusega ja amplituudiga [1]. Lülitustransiendi sagedus on sadu hertse, seega piisavalt madal, et läbida trafo ning pääseda tarbija seadmeteni [5].



Joonis 1.9 Transientliigpinge tarbijal ühefaasilise maalühise korral keskpingevõrgus

1.2.5 Pinge asümmeetria

Pinge asümmeetria on kolmeefaasilise süsteemi seisund, mille ajal pinged süsteemis ei ole identsed suuruselt ja/või faasinurga erinevus ei ole täpselt 120 kraadi (joonis 1.10). Pinge asümmeetria korral esinevad pinge järgnevuskomponendid. Sellest tulenevalt hinnatakse süsteemi mittevastavust järgnevuskomponentide olemasolu järgi [3] [5].

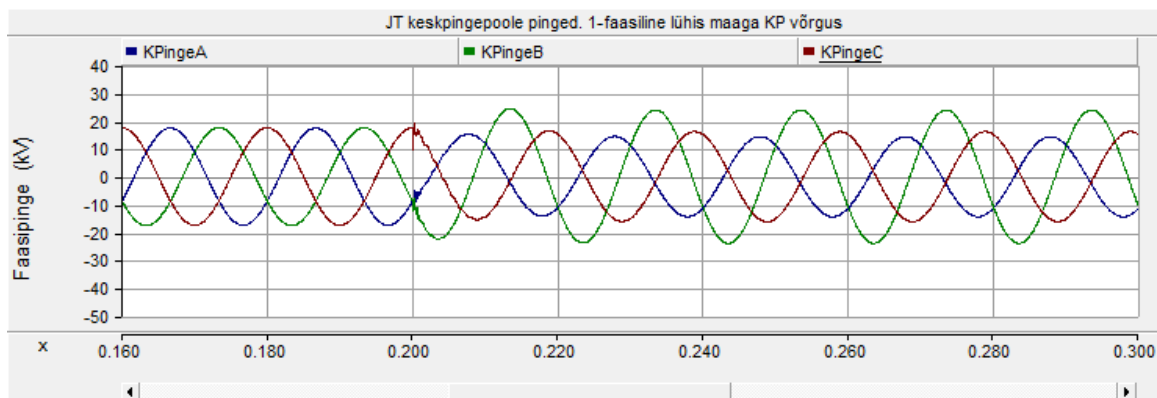
$$k_a = \frac{U_2}{U_1} 100\% \quad (1.5)$$

kus

k_a – asümmeetriategur

U_1 – pärijärgnevuspinge

U_2 – vastujärgnevuspinge



Joonis 1.10 Pingete asümmeetria keskpinge võrgus 1 faasilise maaühenduse korral takistusega üleminekutakistusega 1000 Ω

Keskpingevõrgus on sätestatud 2% nõue. EVS EN 50160 järgi peab normaaltingimustes vastujärgnevuskomponendi 10 minutilistest keskmistest väärtustest 95% jääma vahemikku kuni 2% pärijärgnevuskomponendist [10] [7].

Pinge sümmeetrilisus on väga oluline mootorite puhul, kuna mootorid töötavad kõige efektiivsemalt sümmeetrilise pinge korral. Asümmeetrilise pinge korral esineb pinge vastujärgnevuskomponent, mis põhjustab mootorite pöörlemise suunale vastupidise magnetvälja, mis omakorda põhjustab mootorite kuumenemist [5]. Nulljärgnevuskomponent tekitab neutraali nihke - pingetõusu keskpinge võrkude faasijuhtmete ja maa vahel, lisakoormuse isolatsioonile ja pingetrafoide magnetahelatele [1].

1.2.6 Võrgusagedus

Vahelduvvoolu elektriseadmete normaalseks toimimiseks peab võrgusagedus olema lähedane nimisagedusele. Standardi kohaselt on Eestis toitepinge nimisagedus normaaltingimustes 50 Hz ning põhisageduse 10 s jooksul mõõdetud keskväärtsus peab ühendsüsteemiga sünkroonselt ühendatud võrkudes olema [7]:

50 Hz \pm 1 % (st 49,5 Hz kuni 50,5 Hz) 99,5 % aastast;

50 Hz + 4 % / - 6 % (st 47 Hz kuni 52 Hz) 100 % ajast;

2. Rikked ja nende mõju tarbija pingetele

Elektrivõrgu normaalset talitlust häirivad mitmesugused rikked. Rikete esinemisel on tegemist rikketalitlusega. Sagedased rikete põhjustajad on välgulöögid, seadmete rikked või väärtõimimised, inimeste eksimused ja liigkoormused [1]. Laialdaselt võttes on kahte tüüpi rikkeid. Esimene tüüp on lühised, mis võivad olla põhjustatud isolatsiooni ülepingest ja vananemisest aja jooksul või liigpinge tõttu. Teine tüüp on elektrivoolu lakkamine või katkemised [11].

Elektrivõrgule ohtlikumateks tuleb pidada lühiseid. Lühised põhjustavad liigvoolusid, tekitavad ebanormaalseid pingeid ja võivad põhjustada tarbijate toitekatkestusi ning ohustada elektrisüsteemi stabiilsust. Lühiste toimel halveneb elektri kvaliteet ja väheneb elektrivõrgu töökindlus [1].

2.1 Lühise olemus

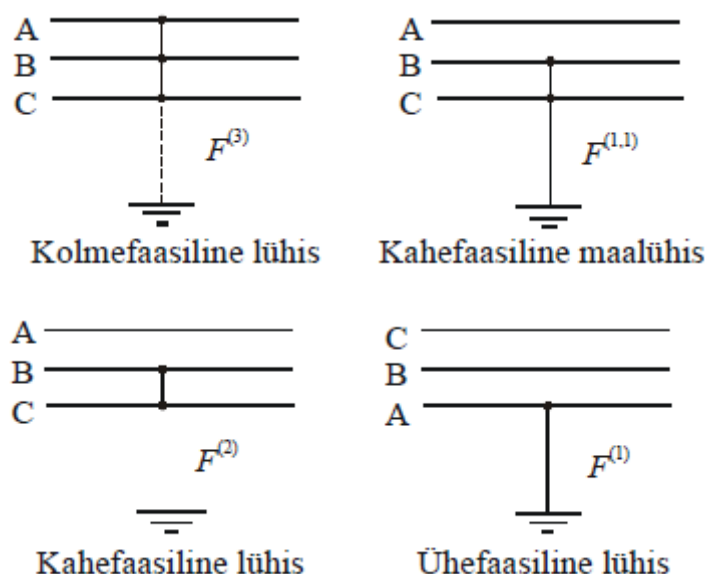
Lühis on olematu või väikese takistusega ebanormaalne ühendus vooluahelas kahe või enama normaalselt erineva potentsiaaliga punkti vahel. Lühise tagajärjel väheneb järsult elektri ahela üldine takistus, millega kaasneb voolu tunduv ja ohtlik suurenemine ning pinge märgatav alanemine. Eriti suur on voolu ja pinge muutumine lühisekoha lähedal. Lühisvoolud on tavaliselt kordades suuremad kui nimivool, maalühise korral esinevad ka lubamatult suured pinged ja võnkumised [12]. Lühise tõttu tekib toiteallikast ära lõigatud tarbijatel toitekatkestus, muudel tarbijatel pingelohk. Suur vool põhjustab elektrijuhtide liigkuumenemist ja tekitab juhtide vahel ohtlikke mehaanilisi jõudusid. Liigkuumenemine rikub isolatsiooni, vähendab mehaanilist vastupidavust ja tekitab seadme süttimise oht [1].

2.2 Rikete liigid ja nende mõju

Kolmefaasilises süsteemis liigitatakse lühiseid vooluringi kujunemise järgi: kolmefaasilisteks, kahefaasilisteks, kahefaasilisteks- ja ühefaasilisteks maalühisteks. Kolmefaasilise lühise korral on pinge lühise kohas kõigis kolmes faasis null sõltumata sellest, kas lühisekoht on maaga ühenduses või mitte. Ülejäänud lühiseliigid on asümmeetrilised [12].

Ühefaasilist lühist nimetatakse isoleeritud või resonantsmaandatud neutraaliga võrkudes maaühenduseks. Maaühendusvoolud on lühisvooludest tunduvalt väiksemad. Maaühenduse puhul kujutavad ohtu pingete suurenemine tervetes faasides, aga ka võimalikust vilkuvast elektrikaarest põhjustatud transientliigpinged [1].

Lühise liike iseloomustab joonis 2.1 [1]



Joonis 2.1 Lühise liigid

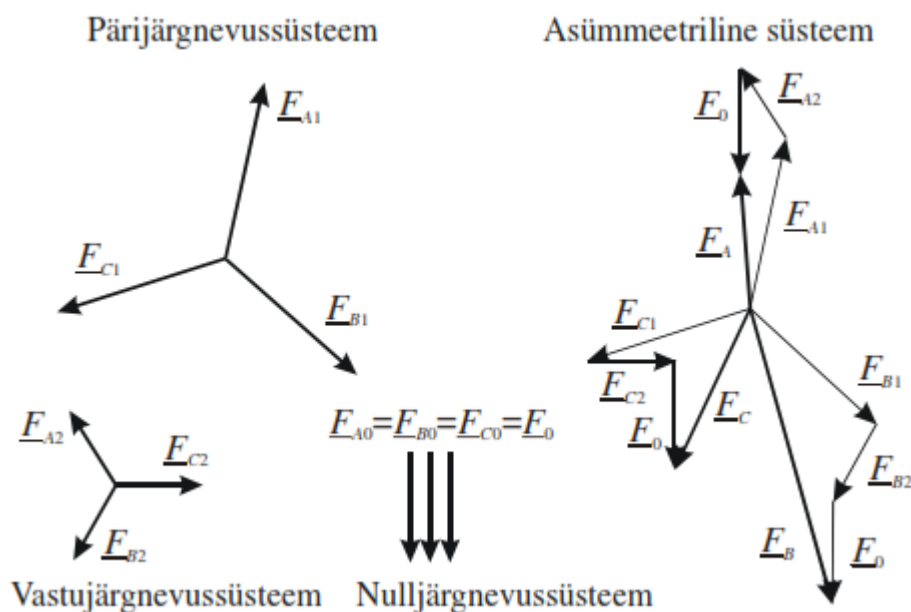
Lühiselikeidel on erinev esinemissagedus. Kesk- ja kõrgepingevõrkudes tuleb kõige sagedamini ette ühefaasilisi lühiseid. Lühise käigus võib lühise liik muutuda. Näiteks kaablites kipuvad ühefaasilised või kahefaasilised lühised üle kasvama kolmefaasilisteks lühisteks [13].

2.2.1 Sümmeetriliste komponentide teooria

Sümmeetriliste komponentide meetodit kasutatakse asümmeetriliste seisundite kirjeldamiseks. Kõik lühise liigid peale kolmefaasiliste lühiste on asümmeetrilised. Sümmeetriliste komponentide meetod seisneb kolmes eraldiseisvas vektorsüsteemis, mis kokku pannes moodustavad asümmeetrilise süsteemi. Meetodi järgi saab igat kolmefaasilist asümmeetrilist pingesüsteemi kirjeldada järgmiste kolme eraldiseisva vektorsüsteemiga [11]:

1. sümmeetriline kolmefaasiline süsteem, faasijärjestusega a-b-c ehk pärijärnevussüsteem;
2. sümmeetriline kolmefaasiline süsteem, faasijärjestusega a-c-b ehk vastujärnevussüsteem;
3. kolm vektorit, mis on võrdsed suuruselt ja faasilt ehk nulljärnevussüsteem;

Sümmeetrilised vektorsüsteemid on toodud joonisel 2.2 [1].



Joonis 2.2 Sümmeetrilised komponendid ja vastav asümmeetriline süsteem

Kuna asümmeetrilise süsteemi vektorid on eelnimetatud kolme vektori summa, saab näiteks asümmeetrilise pingesüsteemi kirja panna kujul [14]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

kus

\underline{U}_{A1} – A faasi pärjargnevuspinge

\underline{U}_{B1} – B faasi pärjargnevuspinge

\underline{U}_{C1} – C faasi pärjargnevuspinge

\underline{U}_{A2} – A faasi vastujargnevuspinge

\underline{U}_{B2} – B faasi vastujargnevuspinge

\underline{U}_{C2} – C faasi vastujargnevuspinge

\underline{U}_0 – nulljargnevuspinge

Kuna päri-, vastu- ja nulljargnevussüsteem on sümmeetrilised, saab faasi B ja C sümmeetrilisi komponente avaldada faasi A sümmeetriliste komponentide kaudu, võttes selleks kasutusele erilise ühikvektori \mathbf{a} ehk faasikordaja, mis pöörab temaga korrutatavat vektorit 120° vastupäeva [13]

$$a = e^{j120^\circ} = -0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.2)$$

Faasikordaja ruut a^2 pöörab temaga korrutatavat vektorit 240° vastupäeva [13]

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.3)$$

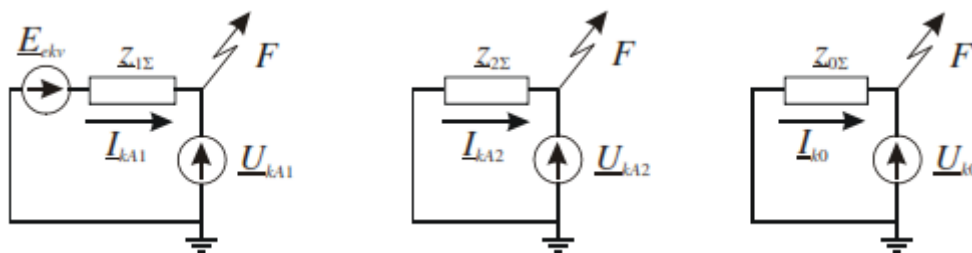
Kasutades nüüd valemeid 2.1, 2.2 ja 2.3 avaldub asümmeetriline pingesüsteem järgmiselt [11]

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_0 \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_{A1} + a^2 \underline{U}_{A2} + \underline{U}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Ning

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A1} &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C) \\ \underline{U}_{A2} &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C) \\ \underline{U}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Erinevalt kolmefaasilisest lühisest ei muutu asümmeetrilistel lühistel lühisekoha pinge mitte täielikult nulliks. Seepärast lülitatakse iga aseskeemi lühisepunkti täiendavalt päri-, vastu- või nulljärgnevuspingeallikas \underline{U}_{kA1} , \underline{U}_{kA2} või \underline{U}_{k0} (joonis 2.3) [1].



Joonis 2.3 Ekvivalentsed resulteerivad aseskeemid

Resulteerivate aseskeemide jaoks avalduvad Kirchhoffi võrrandid kujul [13]

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{kA1} &= \underline{E}_{ekv} - \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_{1\Sigma} \\ \underline{U}_{kA2} &= 0 - \underline{I}_{kA2} \underline{Z}_{2\Sigma} \\ \underline{U}_{k0} &= 0 - \underline{I}_{k0} \underline{Z}_{0\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

kus

\underline{E}_{ekv} – ekvivalentne elektromotoorjõud

\underline{I}_{kA1} – A faasi pärijägnevus lühisvool

\underline{I}_{kA2} – A faasi vastujärgnevus lühisvool

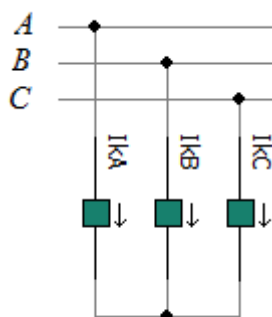
\underline{I}_{k0} – nulljärgnevus lühisvool

$\underline{z}_{1\Sigma}$ – summaarne pärijärgnevustakistus

$\underline{z}_{2\Sigma}$ – summaarne vastujärgnevustakistus

$\underline{z}_{0\Sigma}$ – summaarne nulljärgnevustakistus

2.2.2 3 faasiline lühis



Joonis 2.4 Kolmefaasilise lühise põhimõtteline skeem PSCAD programmis.

Kolmefaasilise lühise korral on pinge lühise kohas kõigis kolmes faasis null sõltumata sellest, kas lühisekoht on maaga ühenduses või mitte [1]. Kuigi kolmefaasiline lühis on sümmeetriline saab seda siiski analüüsida kasutades sümmeetriliste komponentide meetodit [11].

Kolmefaasilist lühist kirjeldatakse lühisekoha takistuse z_f lisamisega. Eeldatakse, et lühis tekib punktis F. Tegelik lühis tekib punktis F' lühisetakistuse z_f lisamisega. Pinged punktis F avalduvad järgmiselt [11]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{kA} &= \underline{I}_{kA} \underline{Z}_f \\ \underline{U}_{kB} &= \underline{I}_{kB} \underline{Z}_f \\ \underline{U}_{kC} &= \underline{I}_{kC} \underline{Z}_f \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

kus

\underline{U}_{kA} – A faasi pinge rikkesuurus

\underline{U}_{kB} – B faasi pinge rikkesuurus

\underline{U}_{kC} – C faasi pinge rikkesuurus

\underline{z}_f – lühisekoha takistus

\underline{I}_{kA} – A faasi lühisvool

\underline{I}_{kB} – B faasi lühisvool

\underline{I}_{kC} – C faasi lühisvool

Kuna kolmefaasiline lühis on sümmeetriline, siis vastu- ja nulljärgnevus süsteemi ei esine ning valemist 2.6 ja 2.7 saame

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{kA1} &= \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_f = \underline{E}_{pkv} - \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_{1\Sigma} \\ \underline{U}_{kA2} &= 0 \\ \underline{U}_{k0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{kA1} &= \frac{\underline{E}_{pkv}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_f} \\ \underline{I}_{kA2} &= 0 \\ \underline{I}_{k0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

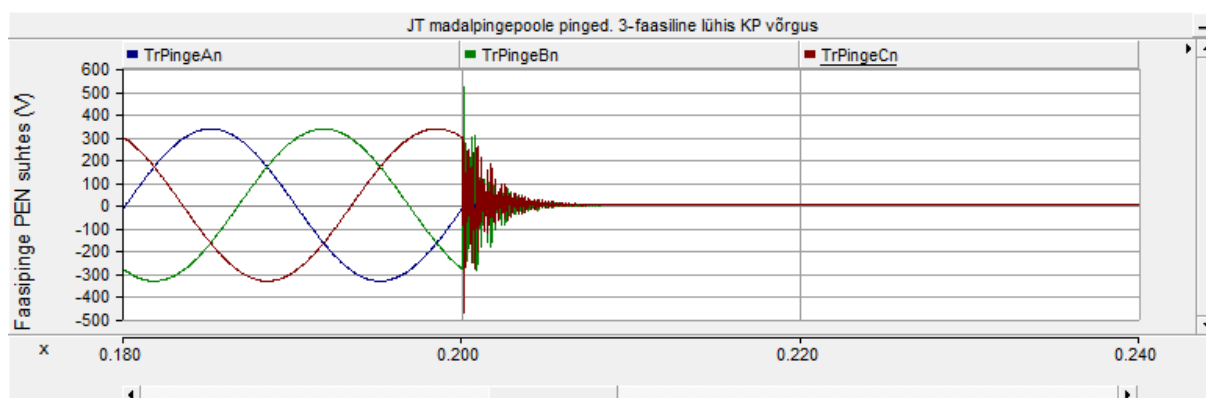
Seega

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{kA} &= \underline{I}_{kA1} \\ \underline{I}_{kB} &= a^2 \underline{I}_{kA} \\ \underline{I}_{kC} &= a \underline{I}_{kA} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Ning pinged punktis F avalduvad

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{kA} &= \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_f \\ \underline{U}_{kB} &= a^2 \underline{U}_{kA} = a^2 \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_f \\ \underline{U}_{kC} &= a \underline{U}_{kA} = a \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_f \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

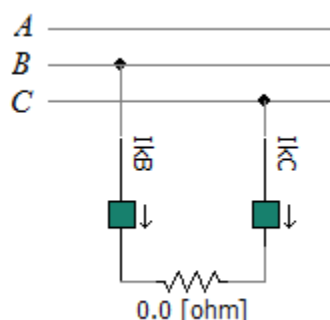
Jäiklühise korral $\underline{z}_f = 0$ ning pinge on kõigis kolmes faasis null [11].



Joonis 2.5 Faasipinge kolmefaasilise lühise korral.

Kolmefaasiline jääklühis põhjustab lühisekoha taga olevatel tarbijatel täieliku toitekatkestuse. Kolmefaasiline lühise olemus on keskpingevõrgus ja madalpingevõrgus samasugune, kuna hõlmatud on kõik kolm faasi. Kolmefaasiline lühis kõrvalharul põhjustab tarbijatel pingelohu (joonis 1.5). Keskpingefiidril toimuva kolmefaasilise lühise korral võivad lühise alghetkel madalpingevõrku kanduda kuni 2,6 kordsed transientliigpinged (joonis 2.5).

2.2.3 2 faasiline lühis



Joonis 2.6 Kahefaasilise lühise põhimõtteline skeem PSCAD programmis.

Kahefaasilise lühise lisavõrranditeks on [14]

$$\left. \begin{aligned} I_{kA} &= 0 \\ I_{kB} &= -I_{kC} \\ \underline{U}_{kB} - \underline{U}_{kC} &= I_{kB} Z_f \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Kahefaasilisel lühisel puudub ühendus maaga, seega puudub skeemist nulljärgnevuspingeallikas ning nulljärgnevus süsteemi ei eksisteeri. Avaldades valemis 2.12 esimese võrrandi sümmeetriliste komponentide kaudu ning arvestades, et $I_{k0}=0$, saame [14]

$$I_{kA1} = -I_{kA2} \quad (2.13)$$

Laiendades valemi 2.12 kolmanda lisavõrrandi pooli sümmeetriliste komponentide abil ning arvestades, et $\underline{U}_{k0}=0$ ja valemit 2.13, saame [14]

$$\underline{U}_{kA1} - \underline{U}_{kA2} = I_{kA1} Z_f \quad (2.14)$$

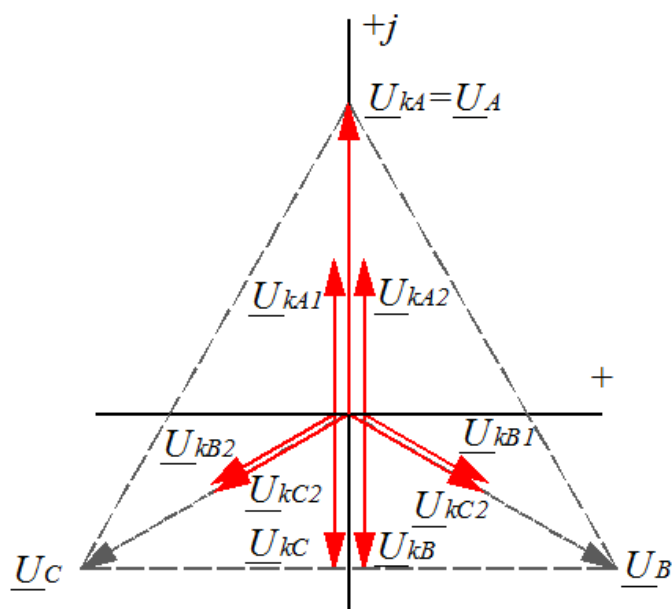
Kasutades nüüd põhivõrrandeid 2.6, saame [14]

$$I_{kA1} = -I_{kA2} = \frac{\underline{E}_{pkv}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_f} \quad (2.15)$$

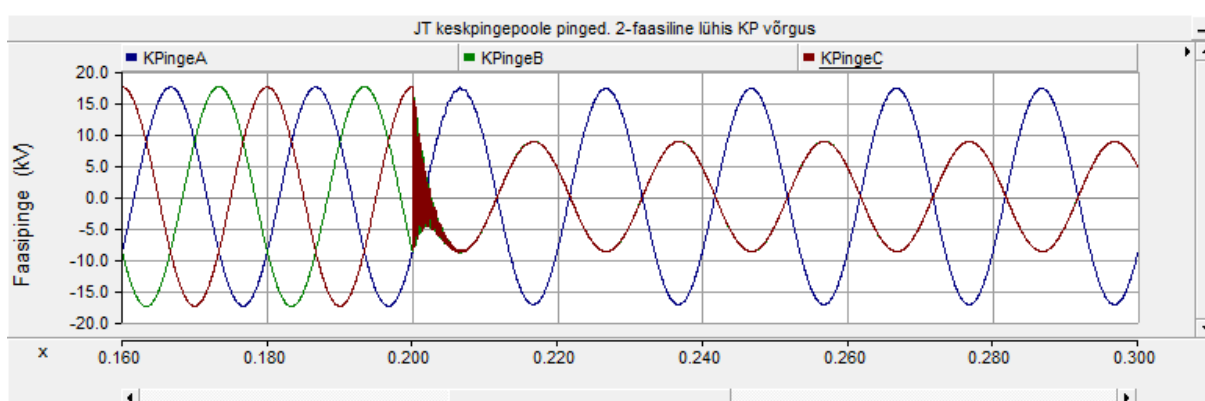
Arvestades nüüd valemeid 2.13 ja 2.14, $\underline{U}_{kA} = \underline{U}_{kA1} + \underline{U}_{kA2}$ ning teist põhivõrrandit 2.6, saame

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{kA} &= \left(\frac{2z_{2\Sigma} + z_f}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma} + z_f} \right) \underline{E}_{pkv} = I_{kA1} (2z_{2\Sigma} + z_f) \\ \underline{U}_{kB} &= I_{kA1} (a^2 z_f - z_{2\Sigma}) \\ \underline{U}_{kC} &= I_{kA1} (a z_f - z_{2\Sigma}) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Jäiklühisekorral $z_f=0$ [11].

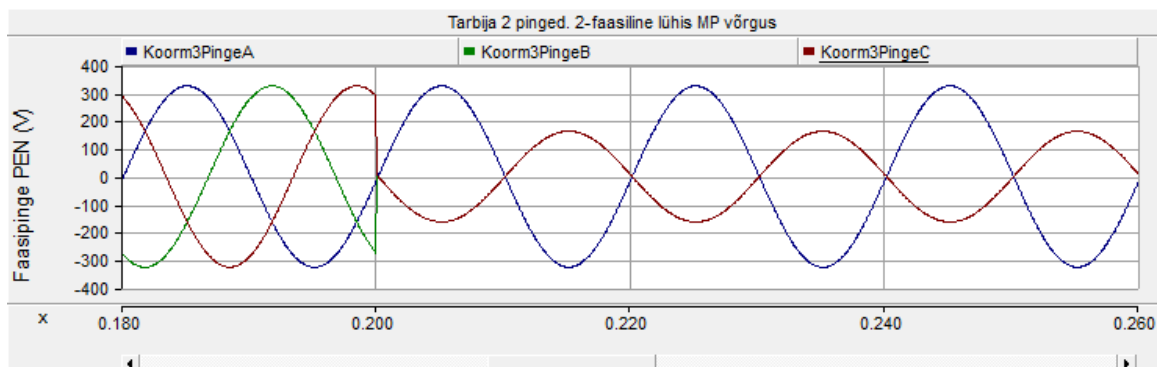


Joonis 2.7 Sümmeetrilistele komponentidele vastav pingete vektordiagramm 2 faasilisel lühisel.



Joonis 2.8 Keskpinge võrgu pinged kahefaasilisel lühisel korral keskpinge võrgus

Kuna lühisekohas puudub ühendus maaga, siis on 2 faasiline lühis keskpinge võrgus ja madalpinge võrgus ühesugune. Tabelist 2.1 on näha, et faasipinged on madalpinge võrgus esineva kahefaasilisel lühisel korral samas vahekorras nagu keskpinge võrgus.

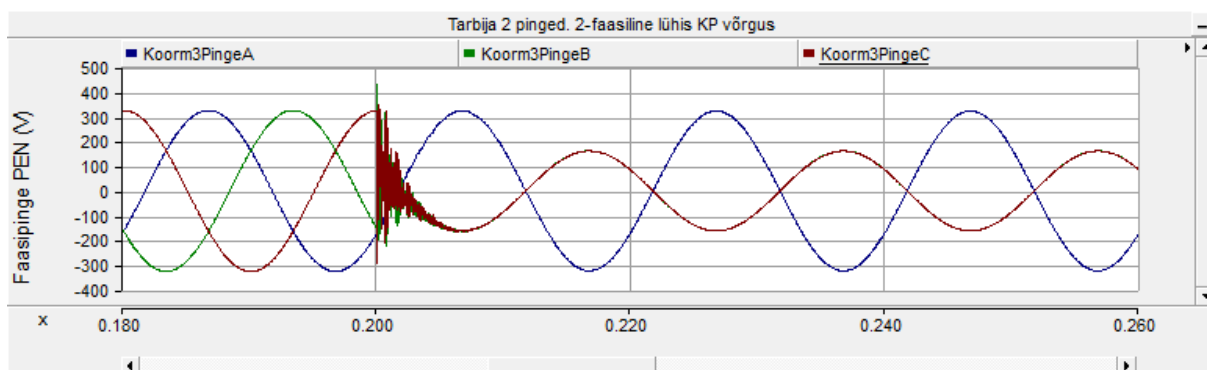


Joonis 2.9 Madalpingevõrgu faasipinged kahefaasilise lühise korral madalpingevõrgus.

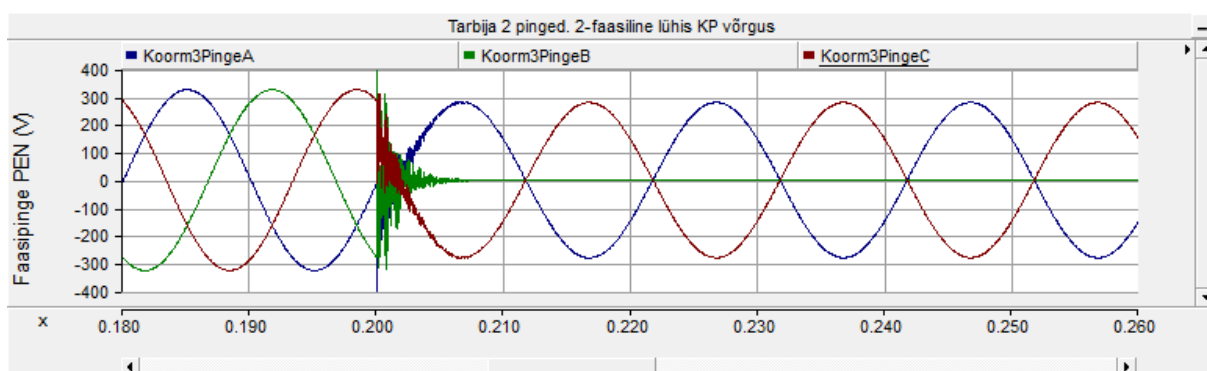
Vektordiagrammist joonis 2.7 ja graafikutelt 2.8 ning 2.9 on näha, et terves faasis jääb pinge võrdseks lühisele eelnenud pingega $\underline{U}_{kA} = \underline{U}_A$ ning lühistatud faaside pinged on pool terve faasi pingest ja kattuvad üksteisega sihilt $\underline{U}_{kB} = \underline{U}_{kC} = -\frac{1}{2}\underline{U}_A$. Kahefaasilise lühise korral võib esineda kuni 1,4 kordne transientliigpinge. Seega esineb kahefaasilise lühise korral ühefaasilistel tarbijatel lühisfaasides pingelohk sügavusega 50% ning kolmefaasilises süsteemis on suur asümmeetria.

Kahefaasilise lühise esinemisel keskpingevõrgus transformeeruvad pinged madalpinge võrku sõltuvalt trafo lülitusgrupist (tabel 2.1). Yyn trafode puhul kujunevad madalpingevõrgus faasipinged samas vahekorras nagu keskpingevõrgus- 100%, 50% ja 50% (joonis 2.10a), ning mõju madalpingetarbijatele on sama nagu madalpingevõrgu kahefaasilise lühise korral. Dyn trafode puhul kujunevad madalpinge võrgu pinged erinevalt, kuna madalpingevõrku transformeeruvad keskpinge faasipingete asemel liinipinged $\underline{U}_{kAB} = \underline{U}_{kB} - \underline{U}_{kA}$, $\underline{U}_{kCA} = \underline{U}_{kA} - \underline{U}_{kC} = -\underline{U}_{kAB}$ ja $\underline{U}_{kBC} = \underline{U}_{kC} - \underline{U}_{kB} = 0$. Pinged \underline{U}_{kAB} ja \underline{U}_{kCA} on normaalsest pingest $\frac{\sqrt{3}}{2}$ korda väiksemad ning nurk pingektorite vahel on normaalse 120° asemel 180° . Seega esinevad madalpingevõrgus pinged vastavalt ~87%, 0% ja 87% (joonis 2.10b), ning ühes faasis on täielik toitekatkestus. Kolmefaasilises süsteemis esineb suur pingete asümmeetria.

a)



b)



Joonis 2.10 Madalpingetarbija faasipinged Yyn (a) ja Dyn (b) trafo korral 2 faasilise lühise esinemisel keskpingevõrgus

Tabelis 2.1 on toodud katsetulemustele vastavad pingete suurused kahefaasilise lühise korral. Sulgudes toodud väärtused vastavad suurimale transientliigpinge väärtusele.

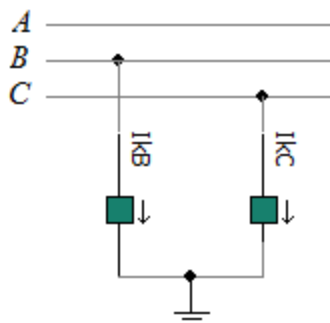
Tabel 2.1 Pinged kahefaasilisel lühisel suhtarvuna normaalpingest

Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	KP faasipinge			MP liinipinge			MP faasipinge neutraali suhtes		
		A	B	C	AB	BC	CA	A	B	C
D/Yn	KP 2f lühis	1,0	0,5	0,5	0,5 (1,3)	0,5	1,0	0,87	0,0 (1,4)	0,87
Y/Yn	KP 2f lühis	1,0	0,5	0,5	0,87	0,0 (1,3)	0,87	1,0	0,5 (1,4)	0,5
D/Yn	MP 2f lühis	1,0	1,0	1,0	0,87	0,0	0,87	1,0	0,5	0,5
Y/Yn	MP 2f lühis	1,0	1,0	1,0	0,87	0,0	0,87	1,0	0,5	0,5

*sulgudes toodud väärtus on transientliigpinge suurim väärtus

2.2.4 2 faasiline lühis maaga

Kahefaasilist maalühise selgitab joonis 2.11.



Joonis 2.11 Kahefaasilise maalühise põhimõtteline skeem PSCAD programmis.

Kahefaasilise maalühise korral on lisavõrranditeks [13]

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{kA} &= 0 \\ \underline{U}_{kB} &= 0 \\ \underline{U}_{kC} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Esimene lisavõrrand 2.17 avaldub sümmeetriliste komponentide kaudu

$$\underline{I}_{kA} = \underline{I}_{kA1} + \underline{I}_{kA2} + \underline{I}_{k0} = 0 \quad (2.18)$$

Teisest ja kolmandast lisavõrrandist 2.17 saame, et

$$\underline{U}_{kA1} = \underline{U}_{kA2} = \underline{U}_{k0} = \frac{1}{3} \underline{U}_{kA} \quad (2.19)$$

Teise ja kolmanda põhivõrrandi 2.6 vasemate poolte võrdsuse tõttu on võrdsed ka võrrandite paremad pooled $\underline{I}_{kA2} \underline{Z}_{2\Sigma} = \underline{I}_{k0} \underline{Z}_{0\Sigma}$, millest jäeldub, et [13]

$$\underline{I}_{kA2} = \underline{I}_{k0} \frac{\underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma}} \quad (2.20)$$

ja

$$\underline{I}_{k0} = \underline{I}_{kA2} \frac{\underline{Z}_{2\Sigma}}{\underline{Z}_{0\Sigma}} \quad (2.21)$$

Kasutades neid valemeid võrdsuses 2.18, saame avaldada [13]

$$\underline{I}_{k0} = -\underline{I}_{kA1} \frac{\underline{Z}_{2\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \quad (2.22)$$

$$\underline{I}_{kA2} = -\underline{I}_{kA1} \frac{\underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \quad (2.23)$$

Põhivõrranditest 2.6 saab nüüd avaldada [13]

$$\underline{U}_{kA1} = \underline{I}_{kA1} \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \quad (2.24)$$

Millest pärijärgnevusvool avaldub valemiga [13]

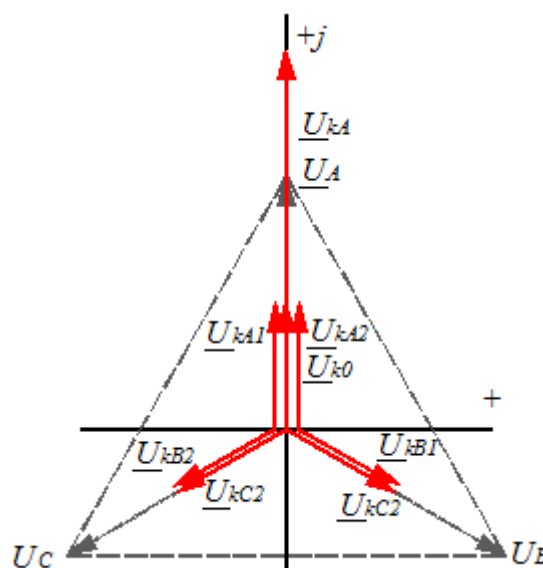
$$\underline{I}_{kA1} = \frac{\underline{E}_{ekv}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}}} \quad (2.25)$$

Jäiklühise korral on maalühises olevate faaside B ja C pinged lühisekohas võrdsed nulliga [13] (joonis 2.13)

$$\underline{U}_{kB} = \underline{U}_{kC} = 0 \quad (2.26)$$

Faasi A pinge avaldub [13]

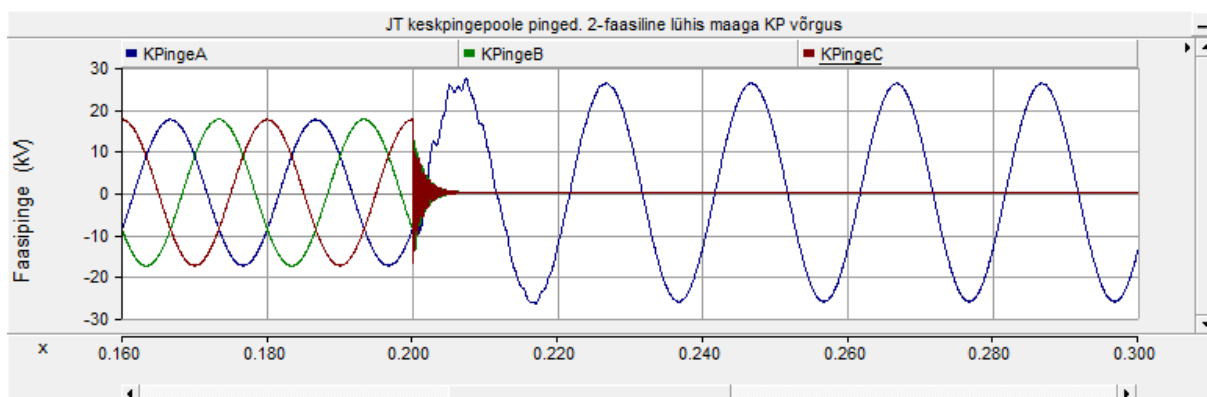
$$\underline{U}_{kA} = 3\underline{I}_{kA1} \frac{\underline{Z}_{2\Sigma} \underline{Z}_{0\Sigma}}{\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}} \quad (2.27)$$



Joonis 2.12 Kahefaasilise maalühise pingete vektordiagramm

Vektordiagrammilt joonis 2.12 ja jooniselt 2.13 on näha, et kahefaasilisel jäiklühisel maaga keskpingevõrgus on lühistatud faaside pinge maa suhtes 0, terves faasis suureneb pinge 1,5 korda., mis võib ületada isolatsioonile lubatud pinge väärtust. Madalpingevõrku võivad kanduda kuni 2,3 kordsed transientliigpinged. Maaühendustakistuse muutumisel $0 \rightarrow \infty$

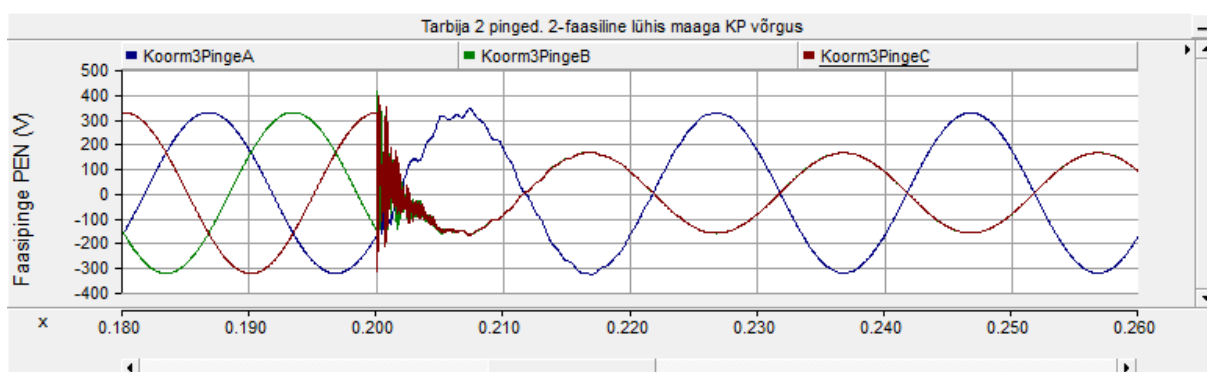
muutub pinge $\underline{U}_{kA} \rightarrow \underline{U}_A$, \underline{U}_{kB} ja \underline{U}_{kC} lähenevad kahefaasilise lühise pingetele $\underline{U}_{kB}^{(2)}$ ja $\underline{U}_{kC}^{(2)}$ ning lühise olemus muutub kahefaasiliseks lühiseks.



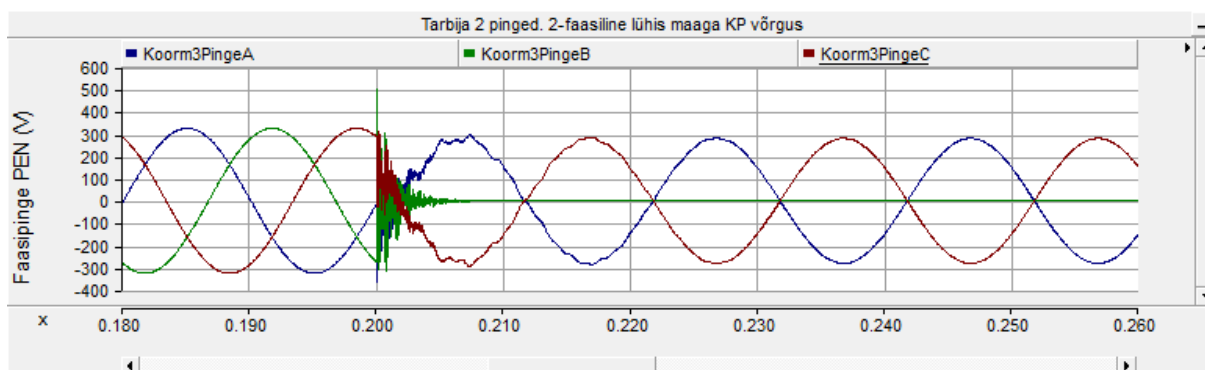
Joonis 2.13 Keskpinge võrgu lühisekoha pinged 2 faasilisel maalühisel keskpingevõrgus.

Madalpinge võrku transformeeruvad pinged sõltuvad jaotustrafa lülitusgrupist (joonis 2.14 ja tabel 2.2). Jooniselt 2.14 on näha, et madalpingevõrgus kujunevad pinged analoogselt kahefaasilise lühisega- Yyn trafo puhul 100%, 50%, 50% ja Dyn trafo puhul 87%, 0% ja 87%. Seega on keskpingevõrgus aset leidva kahefaasilise maalühise mõju madalpingetarbijale sarnane keskpingevõrgus aset leidva kahefaasilise lühisega. Maalühise korral on madalpingevõrku kanduv transiendi oht tunduvalt suurem.

a)



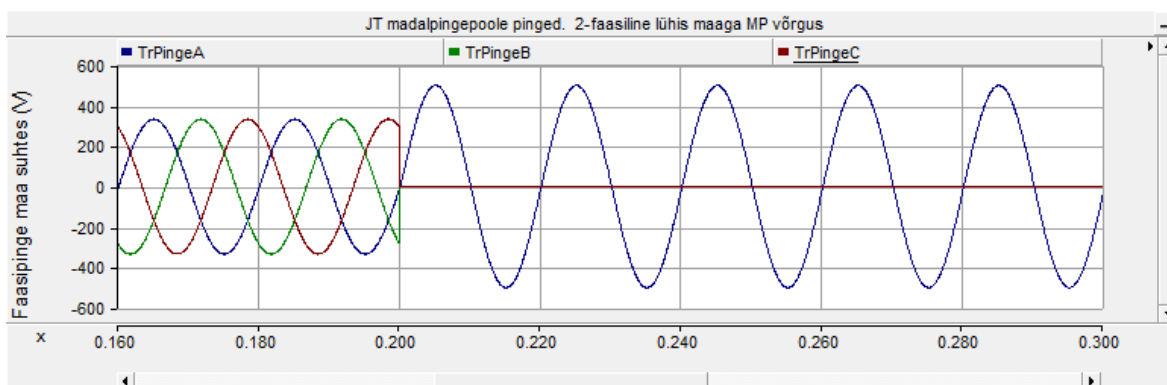
b)



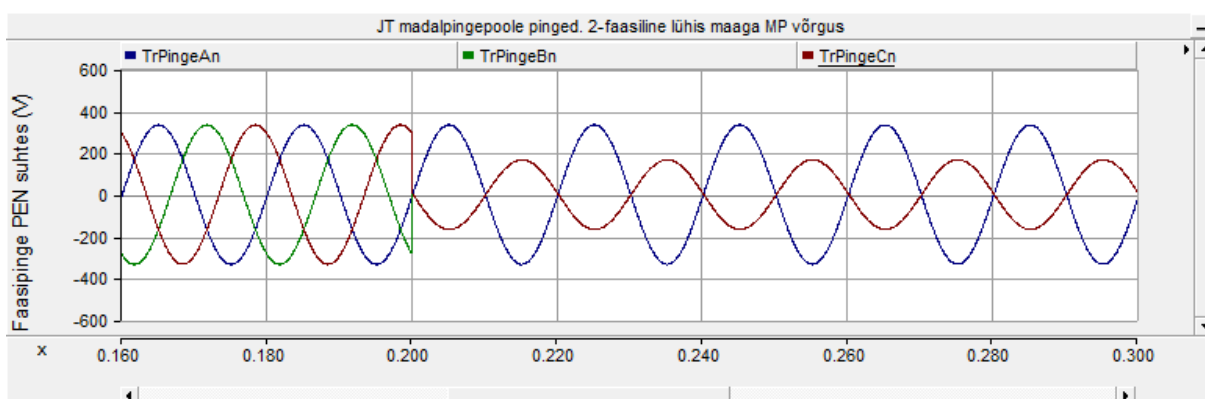
Joonis 2.14 Madalpingetarbija faasipinged Yyn (a) ja Dyn (b) trafo korral 2 faasilise maalühise esinemisel keskpingevõrgus

Kahefaasilisel jäiklühisel maaga madalpingevõrgus on lühistatud faaside pinge maa suhtes 0, terves faasis suureneb pinge maa suhtes 1,5 korda (joonis 2.15 a) analoogselt keskpingevõrgus esineva lühise korral. PEN juhi suhtes jääb terve faasi pinge muutumatuks ning lühistatud faaside pinged langevad 50% (joonis 2.15 b). Seega esineb madalpingetarbijatel kahes faasis pingelohk sügavusega 50% ning kolmefaasilises süsteemis suur asümmeetria.

a)



b)



Joonis 2.15 Faasipinged maa (a) ja PEN (b) juhi suhtes kahefaasilisel maaühendusel madalpingevõrgus

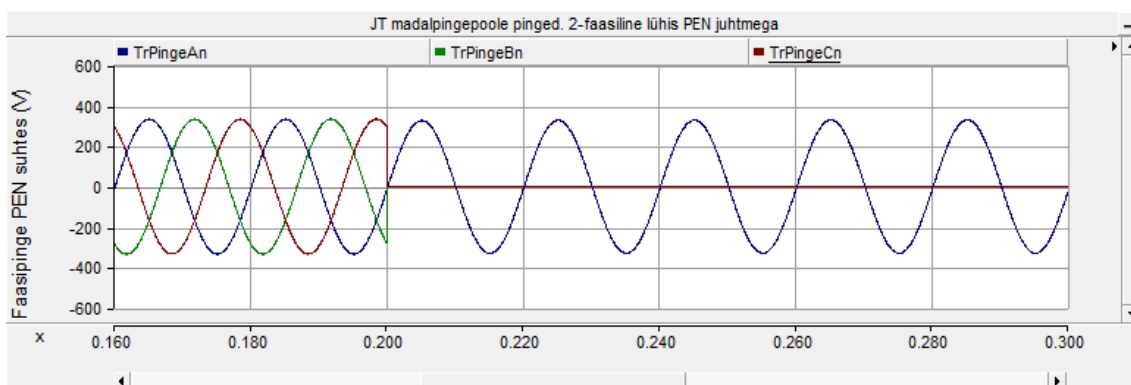
Tabel 2.2 Pinged kahefaasilisel lühisel maaga suhtarvuna normaalpingest

Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	KP faasipinge			MP liinipinge			MP faasipinge neutraali suhtes			MP faasipinge maa suhtes		
		A	B	C	AB	BC	CA	A	B	C	A	B	C
D/Yn	KP 2f lühis maaga	1,5 (1,73)	0,0	0,0	0,5 (2,3)	0,5	1,0	0,87 (2,2)	0,0	0,87	0,87 (2,2)	0,0	0,87
Y/Yn	KP 2f lühis maaga	1,5 (1,73)	0,0	0,0	0,87	0,0 (2)	0,87	10	0,5 (2)	0,5	1,0	0,5 (2)	0,5
D/Yn	MP 2f lühis maaga	1,0	1,0	1,0	0,87	0,0	0,87	1,0	0,5	0,5	1,5	0,0	0,0
Y/Yn	MP 2f lühis maaga	1,0	1,0	1,0	0,87	0,0	0,87	1,0	0,5	0,5	1,5	0,0	0,0

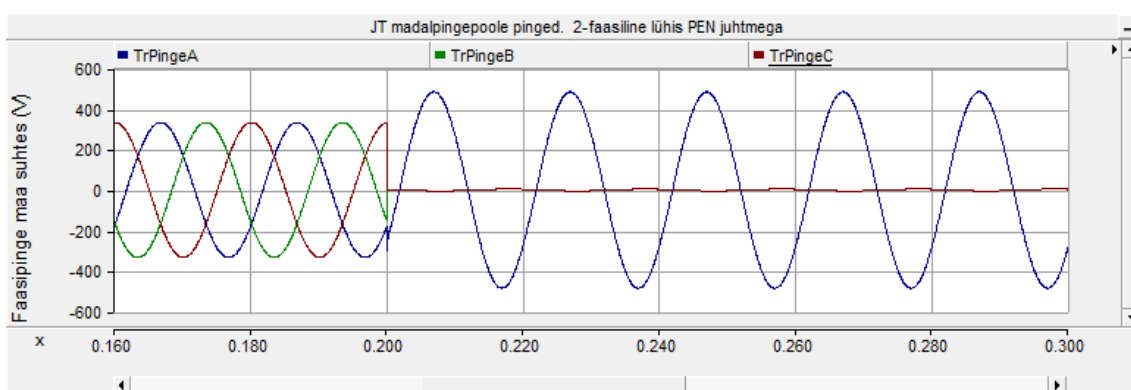
*sulgudes toodud väärtus on transientliigipinge suurim väärtus

Kahefaasilisel jäiklühisel PEN juhiga on lühistatud faaside pinge PEN juhi suhtes 0 ning nendesse faasidesse ühendatud ühefaasilistel tarbijatel esineb toitekatkestus. Kolme faasilises süsteemis on suur pingete asümmeetria. Terve faasi pinge võib tõusta kuni 1,5 korda (joonis 2.16b), sõltuvalt lühise kaugusest, trafo lülitusgrupist ja PEN juhi ning maandusjuhtide takistusest (tabel 2.3). Lühistatud faaside pinge maa suhtes on võrdne PEN juhi pingega maa suhtes. Liini lõpus olevate kahefaasiliste PEN lühiste korral on tulemused sarnased sõltumata jaotustrafode lülitusgrupist (tabel 2.3) ning graafikud on Dyn ja Yyn trafo puhul ühesugused. Jaotustrafode lähedal tekkiva lühise korral Dyn lülitusgrupiga trafode puhul pingetõusu terves faasis ei esine (joonis 2.16a).

a)



b)



Joonis 2.16 Madalpingevõrgu faasipinged kahefaasilisel lühisekorral PEN juhiga Dyn (a) ja Yyn (b) jaotustrafo korral

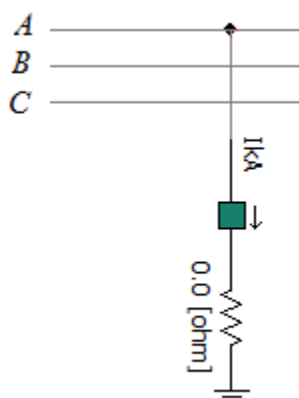
Tabel 2.3 Pinged kahefaasilisel lühisel PEN juhiga suhtarvuna normaalpingest

Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	Lühise asukoht	MP liinipinge			MP faasipinge neutraali suhtes			MP faasipinge maa suhtes		
			AB	BC	CA	A	B	C	A	B	C
D/Yn	2f lühis PEN juhiga	Liini lõpus	0,79	0,0	0,79	1,38	0,0	0,0	1,05	0,33	0,33
Y/Yn	2f lühis PEN juhiga	Liini lõpus	0,82	0,0	0,82	1,42	0,0	0,0	1,25	0,18	0,18
D/Yn	2f lühis PEN juhiga	AJ juures	0,57	0,0	0,57	0,94	0,0	0,0	0,94	0,0	0,0
Y/Yn	2f lühis PEN juhiga	AJ juures	0,85	0,0	0,85	1,40	0,0	0,0	1,45	0,0	0,0

*sulgudes toodud väärtus on transientliigipinge suurim väärtus

2.2.5 Ühefaasiline lühis

Ühefaasilise lühise skeem on joonisel 2.17.



Joonis 2.17 Ühefaasilise lühise põhimõtteline skeem PSCad programmis

Ühefaasilise lühise korral on lisavõrranditeks

$$\left. \begin{aligned} I_{kB} &= 0 \\ I_{kC} &= 0 \\ \underline{U}_{kA} &= I_{kA} \underline{Z}_f \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Kasutades võrrandeid 2.28 ja põhivõrrandeid 2.6, saame faasi A pärijärgnevusvoolu leida valemiga [11]

$$\underline{I}_{kA1} = \underline{I}_{kA2} = \underline{I}_{k0} = \frac{1}{3} \underline{I}_{kA} \quad (2.29)$$

Esimesest põhivõrrandist 2.6 ja teisest lisavõrrandist 2.28 saame avaldada [11]

$$\underline{U}_{kA} = 3 \underline{I}_{kA1} \underline{Z}_f = \underline{U}_{kA1} + \underline{U}_{kA2} + \underline{U}_{k0} = \underline{E}_{ekv} - \underline{I}_{kA1} (\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma}) \quad (2.30)$$

Ning

$$\underline{I}_{kA1} = \frac{\underline{E}_{ekv}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma} + 3 \underline{Z}_f} \quad (2.31)$$

Pingete sümmeetrilised komponendid lühisekohas avalduvad järgmiselt [11]

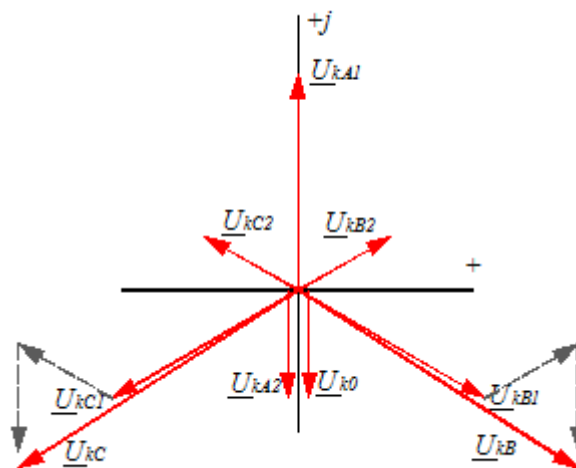
$$\begin{cases} \underline{U}_{kA1} = \underline{I}_{kA1} (\underline{Z}_{2\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma} + 3 \underline{Z}_f) \\ \underline{U}_{kA2} = -\underline{I}_{kA1} \underline{Z}_{2\Sigma} \\ \underline{U}_{kA0} = -\underline{I}_{kA1} \underline{Z}_{0\Sigma} \end{cases} \quad (2.32)$$

Jäikühenduse korral $\underline{Z}_f = 0$.

Kasutades nüüd faasikordajat a , saame faasi B ja C pinged [11]

$$\underline{U}_{kB} = a^2 \underline{U}_{kA1} + a \underline{U}_{kA2} + \underline{U}_{k0} \quad (2.33)$$

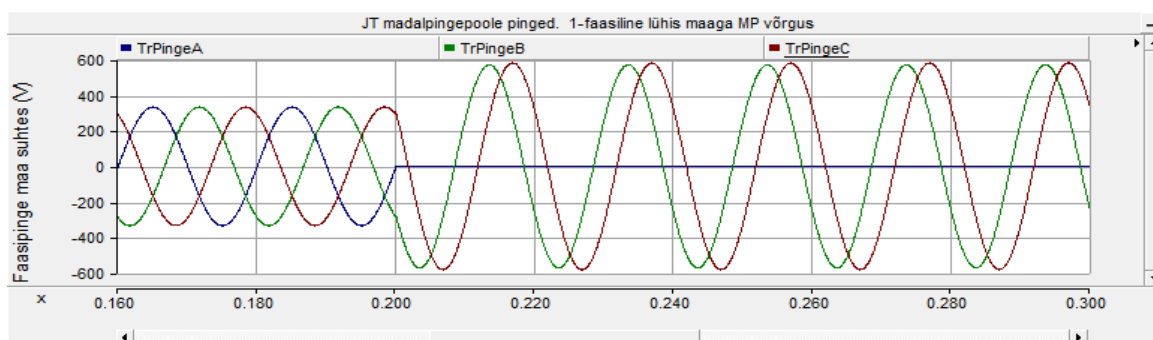
$$\underline{U}_{kC} = a \underline{U}_{kA1} + a^2 \underline{U}_{kA2} + \underline{U}_{k0} \quad (2.34)$$



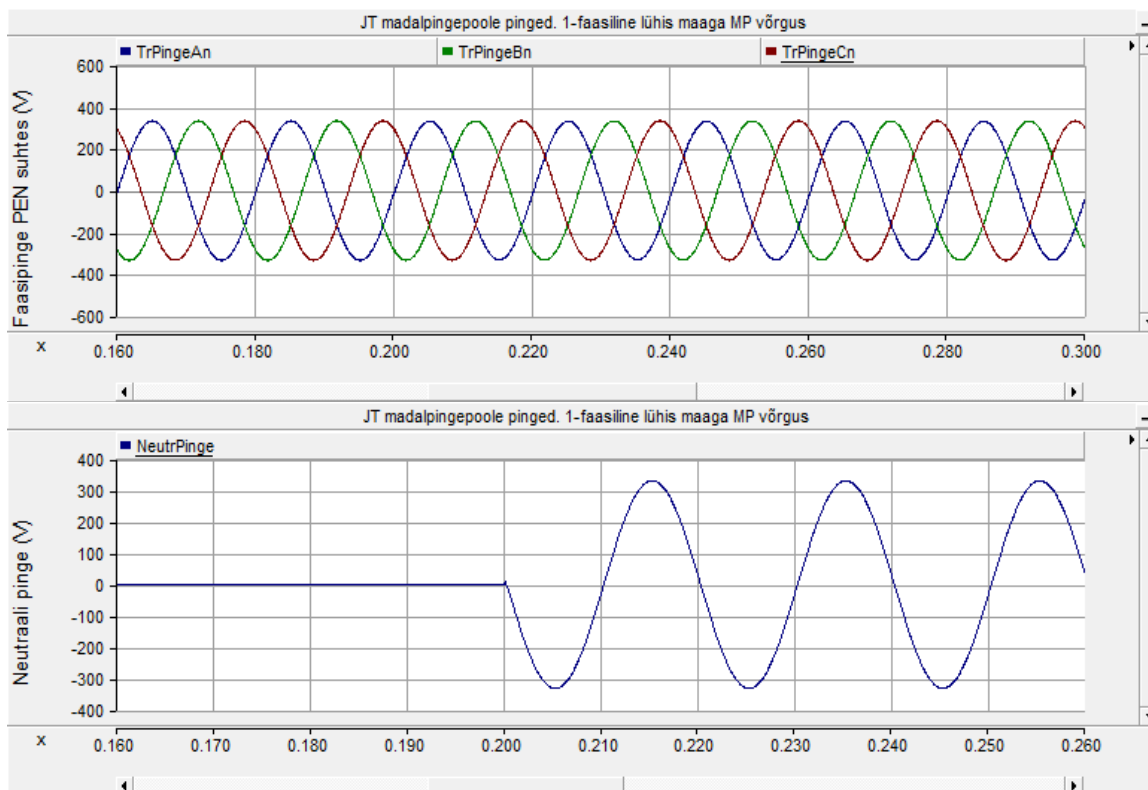
Joonis 2.18 Ühefaasilise lühise pingete vektordiagramm

Vektordiagrammilt joonis 2.18 on näha, et pingelühistatud faasis muutub nulliks ning tervetes faasides esineb pingetõus.

Madalpingevõrgus sõltub pingete kujunemine ühefaasilise lühise korral oluliselt sellest, kas lühis on maaga või PEN juhtmega ning jaotustrafa lülitusgrupist ja lühise asukohast. Ühefaasilise lühise korral maaga madalpingevõrgus langeb lühises oleva faasi pingemaa suhtes nulliks ning tervetes faasides pinged tõusevad (joonis 2.19). Faasipinged PEN juhi suhtes jäävad peaaegu muutumatuks (tabel 2.4), tarbijal võib tekkida kolmefaasilises süsteemis väike asümmeetria. Rikkekoha üleminekutakistuse suurenedes vähenevad pingetõusud tervetes faasides ning lühisfaasis pingemaa suureneb. Neutraaljuhise tõuseb pingemaa suhtes võrdseks faasipingega (joonis 2.20).



Joonis 2.19 Madalpingetarbija faasipinged maa suhtes ühefaasilisel lühisel maaga madalpingevõrgus



Joonis 2.20 Madalpingetarbija faasipinge PEN juhi suhtes ülal ja neutraali pinge maa suhtes all.

Tabel 2.4 Pinged ühefaasilise lühise korral maaga madalpingevõrgus suhtarvuna normaalpingest

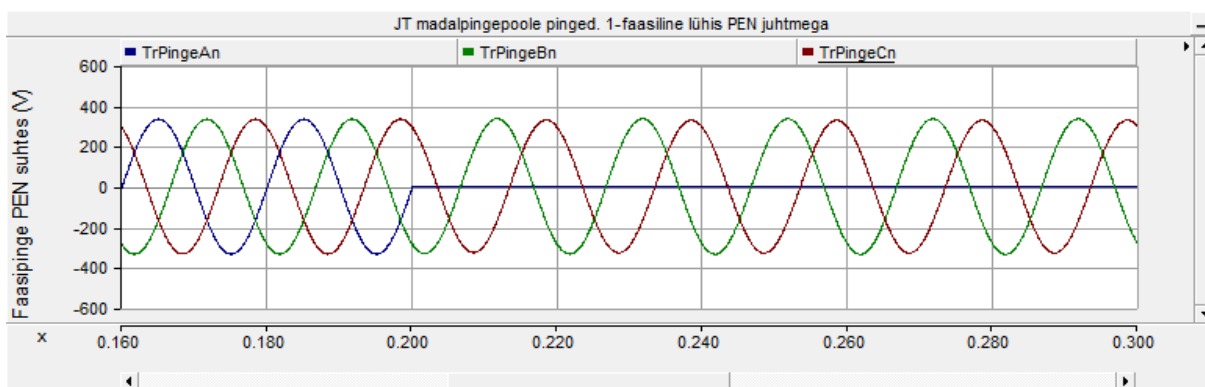
Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	Lühisekoha takistus	MP liinipinge			MP faasipinge neutraali suhtes			MP faasipinge maa suhtes		
			AB	BC	CA	A	B	C	A	B	C
D/Yn	1f maalühis	0	0,95	1,0	1,0	0,91	1,0	1,0	0,00	1,65	1,69
D/Yn	1f maalühis	10	0,99	1,0	1,0	0,98	1,0	1,0	0,75	1,13	1,13
Y/Yn	1f maalühis	0	0,96	1,0	1,0	0,83	1,1	1,0 (1,4)	0,00	1,66	1,69
Y/Yn	1f maalühis	10	0,99	1,0	1,0	0,95	1,0	1,00 (1,3)	0,73	1,15	1,14

*sulgudes toodud väärtus on transientliigpinge suurim väärtus

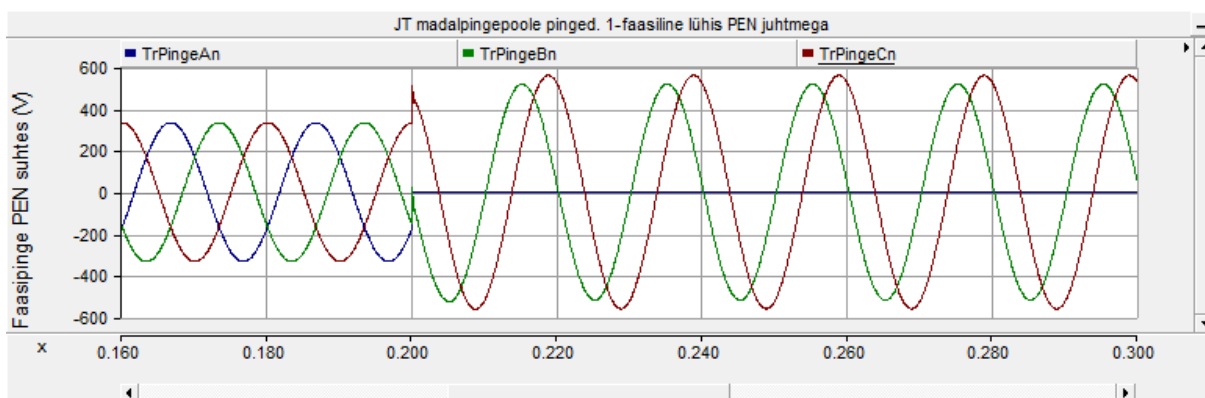
Ühefaasilisel lühisel PEN juhiga langeb pinge lühistatud faasis PEN juhi suhtes nulliks ning selles faasis olevatel ühefaasilistel tarbijatel esineb toitekatkestus. Kolmefaasilisest süsteemist on puudu üks faas ning seega esineb pingete asümmeetria. Tervetes faasides

pinged tõusevad sõltuvalt lühise kaugusest, trafo lülitusgrupist ning PEN ja maandusjuhtide takistusest. Tervetes faasides võib esineda kuni 1,7 kordne liigpinge. Liini lõpus olevate ühefaasiliste PEN lühiste korral on tulemused sarnased sõltumata jaotustrafode lülitusgrupist (tabel 2.5). Jaotustrafolähedal tekkiva lühise korral Dyn lülitusgrupiga trafode puhul pingetõuse tervetes faasides ei esine (joonis 2.21).

a)



b)



Joonis 2.21 Faasipinged PEN juhi suhtes ühefaasilisel lühisel PEN juhiga Dyn (a) ja Yyn (b) jaotustrafol korral

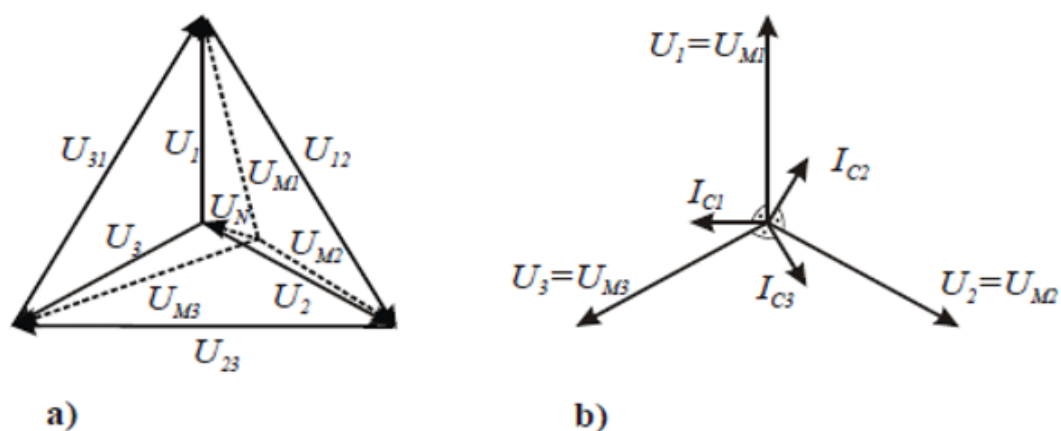
Tabel 2.5 Pinged ühefaasilise lühise korral PEN juhiga suhtarvuna normaalpingest

Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	Lühise asukoht	MP liinipinge			MP faasipinge neutraali suhtes			MP faasipinge maa suhtes		
			AB	BC	CA	A	B	C	A	B	C
D/Yn	1f lühis PEN juhiga	Liini lõpus	0,78	1,00	0,84	0,00	1,35	1,46	0,52	1,05	1,04
Y/Yn	1f lühis PEN juhiga	Liini lõpus	0,86	1,00	0,88	0,00	1,49	1,52	0,30	1,32	1,24
D/Yn	1f lühis PEN juhiga	AJ juures	0,58	1,00	0,57	0,05	1,00	0,95	0,01	1,00	0,98
Y/Yn	1f lühis PEN juhiga	AJ juures	0,90	1,00	0,97	0,14	1,48	1,54	0,03	1,53	1,65

2.2.6 1 faasiline maalühis keskpinge võrgus

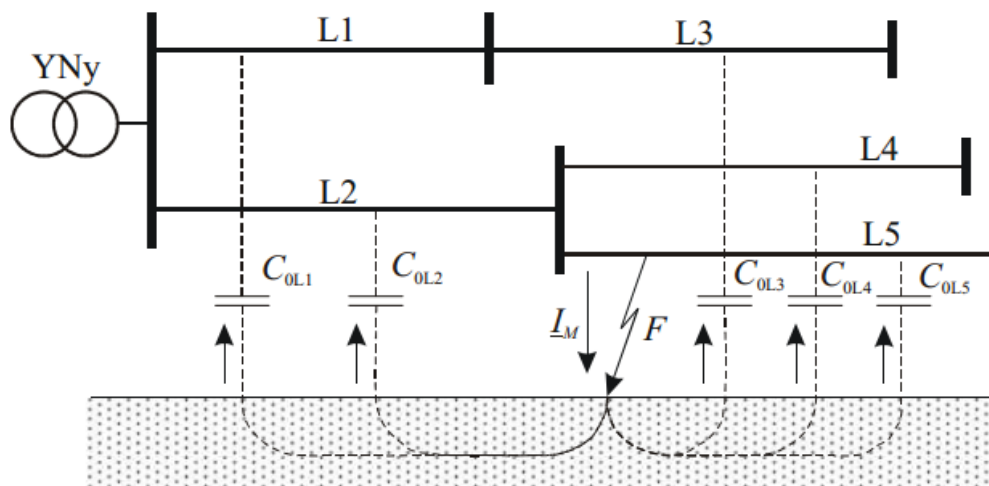
Keskpingevõrgus võib kolmefaasilise süsteemi neutraal olla maast isoleeritud, jäikmaandatud või maandatud läbi kaarekustutuspooli (resonantsmaandatud). Neutraali maandamisviisist sõltub võrgu rikketalitluse iseloom ja isolatsioonile mõjuvad pinged [1].

Isoleeritud neutraaliga elektrivõrgu ainsateks maaga ühendavateks elementideks on trafomähiste ja ülekandeliinide faaside mahtuvused maa suhtes ja isolatsiooni juhtivus (joonis 2.23). Mahtvuslike voolude erinevuse tõttu võivad faaside pinged maa suhtes olla vähesel määral ebasümmeetrilised. Olenemata sellest jäävad faaside vahelised pinged samaks ning selle tõttu tarbijad neutraali nihet ei tunneta (joonis 2.22) [1].



Joonis 2.22 Isoleeritud neutraaliga elektrivõrgu pingete vektordiagramm (a) ja sümmeetrilise isoleeritud neutraaliga elektrivõrgu pingete ja mahtvuslike voolude vektordiagramm (b)

Ühefaasilist lühist isoleeritud, resonantsmaandatud või suure takistuse kaudu maandatud võrgus nimetatakse maaühenduseks. Maaühendusvool sulgub põhiliselt läbi liinide ja maa vahelise mahtuvuse (joonis 2.23). Maaühendusvoolu suurus sõltub maaühenduskohaga galvaaniliselt ühendatud liinide nimipingetest, tüübist ja pikkusest [1].



Joonis 2.23 Maaühendusvoolu tekkimine isoleeritud neutraaliga võrgus

Lühise korral on faasipingete ebasümmeetria tavaliselt suur. Kui trafo faasipinged moodustavad sümmeetrilise tähe, siis avalduvad neutraali nihkepinge ja faaside pinged maa suhtes järgmiselt [1]

$$\underline{U}_N = -\underline{U}_f \frac{1}{1 + jR3\omega C} \quad (2.35)$$

$$\underline{U}_{M1} = \underline{U}_f \frac{jR3\omega C}{1 + jR3\omega C} \quad (2.36)$$

$$\underline{U}_{M2} = \underline{U}_f \frac{a^2(1 + jR3\omega C) - 1}{1 + jR3\omega C} \quad (2.37)$$

$$\underline{U}_{M3} = \underline{U}_f \frac{a(1 + jR3\omega C) - 1}{1 + jR3\omega C} \quad (2.38)$$

kus

\underline{U}_N – neutraali nihkepinge

\underline{U}_f – faasipinge

\underline{U}_{M1} – esimese faasi pinge maa suhtes

\underline{U}_{M2} – teise faasi pinge maa suhtes

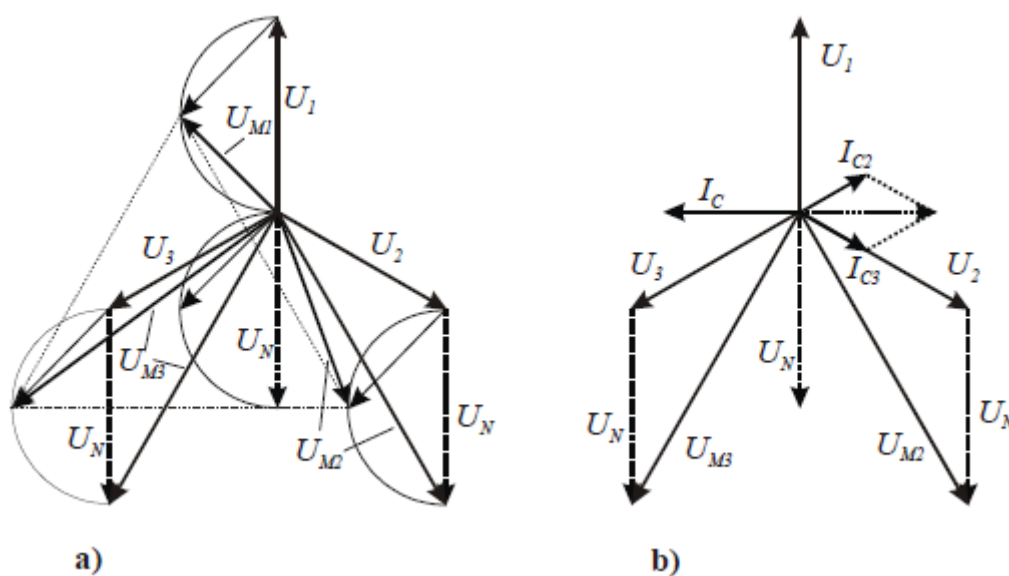
\underline{U}_{M3} – kolmanda faasi pinge maa suhtes

R – lühisekoha takistus

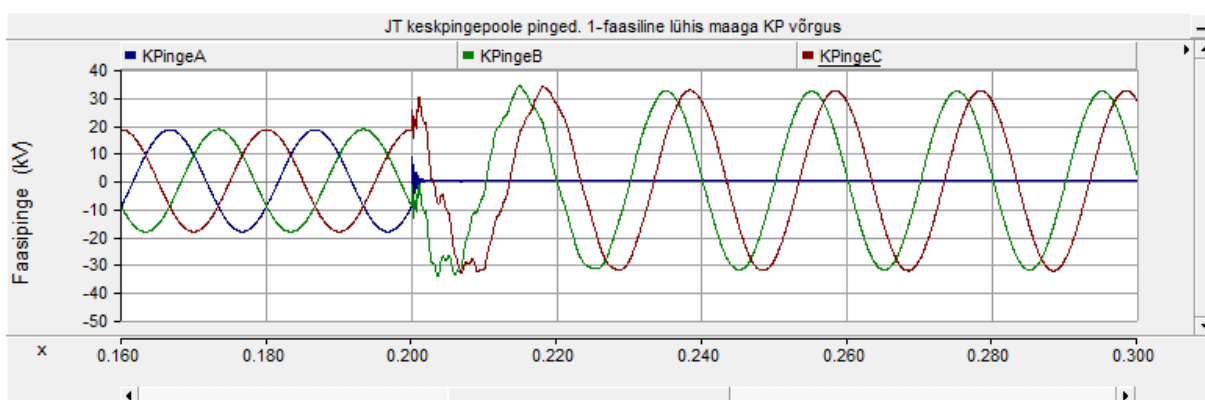
ω – nurksagedus

C – võrgu summaarne mahtuvus maa suhtes

Joonisel 2.24 on võrrandite alusel kujutatud ühefaasilise maalühise vektordiagrammi (Lühis faasis L1). Tingimusel, et lühis on metalne $R=0$, saab kirjutada $\underline{U}_{M1}=0$ ja $\underline{U}_N=-\underline{U}_1$. Pingete \underline{U}_{M2} ja \underline{U}_{M3} absoluutväärtused on $\sqrt{3} U_f$ ning nende vektorid moodustavad omavahel 60° nurga [1]. Vektordiagrammile vastav graafiline lainekuju on toodud joonisel 2.25.



Joonis 2.24 Pingete vektordiagramm ühefaasilise maalühise korral faasis L1 (a) ning pingete ja voolude vektordiagramm metalse maalühise puhul (b)



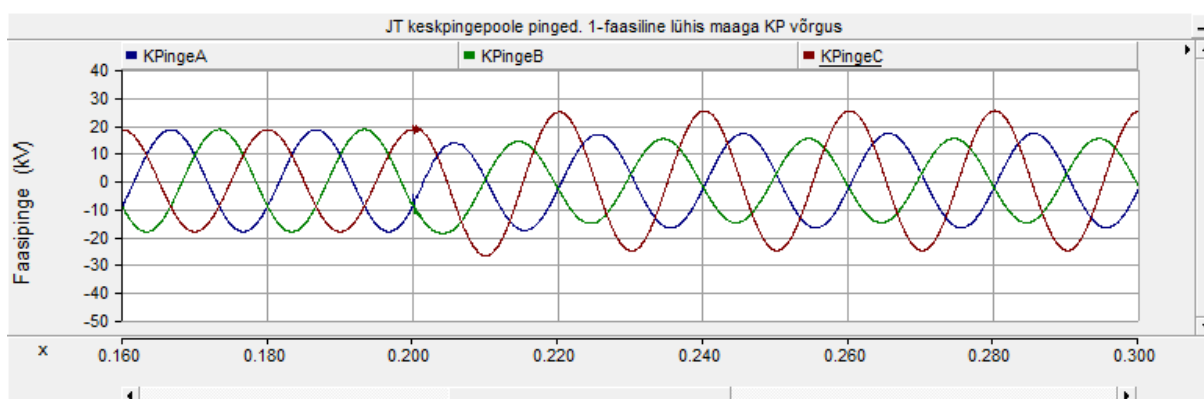
Joonis 2.25 Ühefaasiline maalühis keskpinge võrgus metalse lühise korral

Rikkekohta takistuse suurenemisel libiseb neutraali nihkepingevektori otspunkt piki poolringi (joonis 2.24), kuni lõpmata suure takistuse korral saabub normaaltalitlusele vastav seisund. Vektordiagrammilt selgub, et rikkekoha takistuse suurenemisel suureneb ka rikkefaasi L1 pinge maa suhtes [1]. Tervete faaside pinge maa suhtes sõltub rikkekoha takistusest erinevalt (joonis 2.26) (tabel 2.5). Tabelist on näha, et suuremate takistuste korral on pingete seisukohast olukord vähemohtlik.

Tabel 2.6 Pinged ühefaasilise maaühenduse korral keskpinge võrgus suhtarvuna normaalpingest

Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	Lühisekoha takistus [Ω]	KP faasipinge			MP faasipinge		
			A	B	C	A	B	C
D/Yn	1f maaühendus	0	1,76	1,76 (2,7)	0,00	1,00	1,01 (2,5)	1,00
D/Yn	1f maaühendus	10	1,76	1,76 (2,5)	0,03	1,00	1,01 (1,4)	1,00
D/Yn	1f maaühendus	1000	0,82	1,35 (1,41)	0,94	1,00	1,00	0,99
Y/Yn	1f maaühendus	0	1,76	1,76 (2,7)	0,00	1,00	1,01 (2,5)	1,01 (2,5)
Y/Yn	1f maaühendus	10	1,76	1,76 (2,5)	0,03	1,00	1,01 (1,4)	1,01 (1,4)
Y/Yn	1f maaühendus	1000	0,82	1,35 (1,41)	0,94	0,99	1,00	1,00

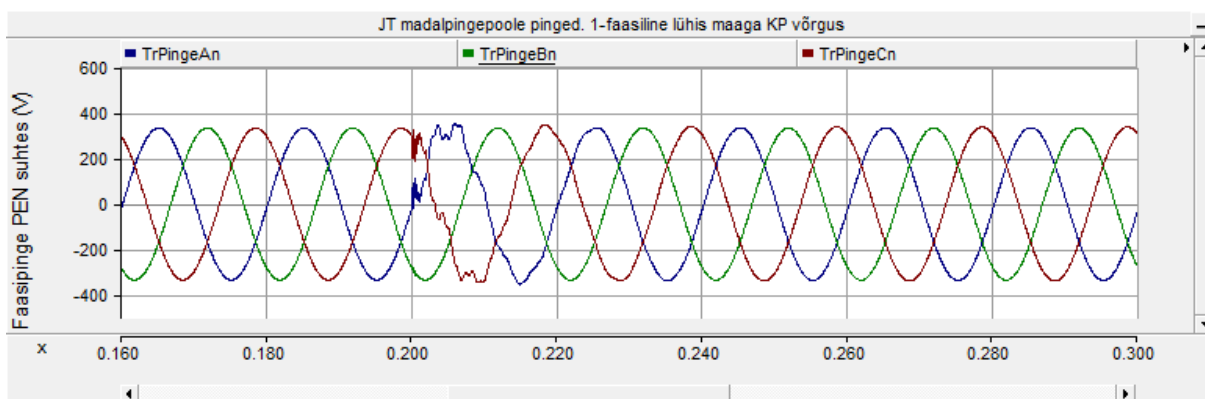
*sulgudes toodud väärtus on transientliigipinge suurim väärtus



Joonis 2.26 Ühefaasiline maalühis keskpinge võrgus. Lühisekoha takistus 1000 Ω

Isoleeritud neutraaliga keskpinge võrgus, vastavalt joonisele 2.24, esineva ühefaasilise maaühenduse korral tekib neutraali pingenihe ning seega jäävad faaside vahelised pinged muutumatuks. Vektordiagrammil (joonis 2.24) on toodud punktiiriga säiliv liinipingete kolmnurk. Sellest tulenevalt transformeeruvad madalpingepoolele kõikide faaside pinged

ning tarbija ühefaasilist maatühendust keskpinge võrgus peaaegu ei tunnetagi (tabel 2.5) (joonis 2.27). Madalpingevõrku jõuavad kuni 1,5 kordsed transientliigpinged.

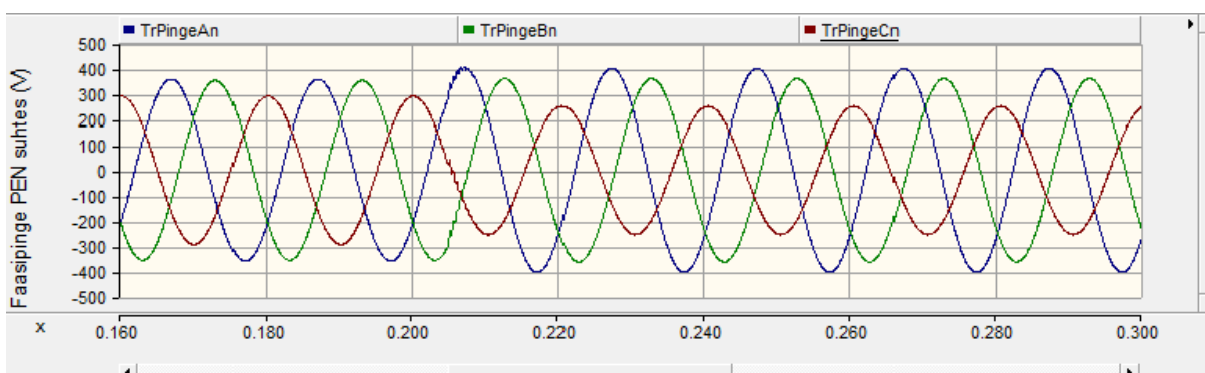


Joonis 2.27 Madalpingevõrgu faasipinged ühefaasilise lühise korral keskpinge võrgus

2.2.7 Juhtmete katkemine

Lühiste kõrval on olulisteks tarbijate elektrivarustust häirivateks rikeks juhtmete katkemised nii keskpinge- kui ka madalpingevõrgus. Kõige tüüpilisemad on tormituultest ja peale langevatest puudest põhjustatud õhuliinide faasijuhtmete katkemised. Lisaks võivad madalpingevõrkudes katkeda ka PEN- juhid ja maandusjuhid [1].

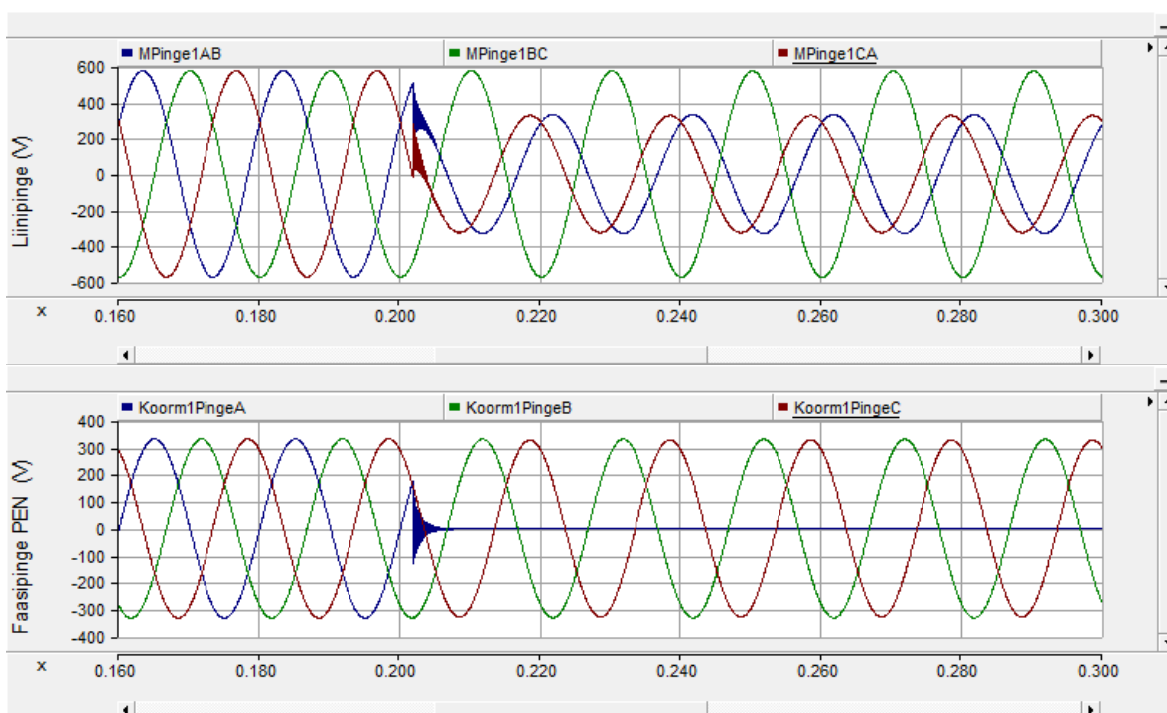
PEN- või maandusjuhi katkemine sümmeetrilise koormuse korral jääb tarbijatele tavaliselt märkamatuks, kui asümmeetrilise koormuse korral võivad tekkida olulised pingehäiringud [1].



Joonis 2.28 PEN juhi katkemine asümmeetrilise koormuse korral

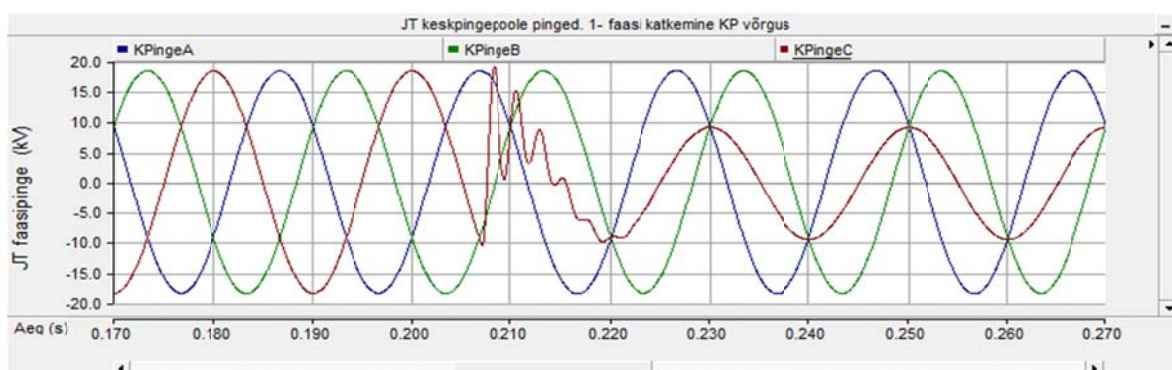
PEN- juhi katkemisel asümmeetrilise koormuse korral võivad pingehälbed tarbijate juures ulatuda kuni 25%-ni, erandjuhtudel ka kuni 70%-ni ja neutraali nihkepingsed küündida lubatud puutepinget tunduvalt ületava 130 kuni 140V-ni. Maandusjuhi katkemine on pingete seisukohalt mõnevõrra vähem ohtlik, aga elektriohutuse seisukohalt ei ole lubatav. Kõige ohtlikum on maandusjuhi ja PEN- juhi üheaegne katkemine [1].

Faasijuhtme katkemisel madalpingevõrgus langeb katkenud faasis pinge nulliks, mis põhjustab ühefaasilistel tarbijatel toitekatkestuse ning asümmeetriat kolmefaasilises pingesüsteemis (joonis 2.29).



Joonis 2.29 Tarbija liinipinged (ülal) ja faasipinged (all) ühe faasi katkemisel madalpingevõrgus

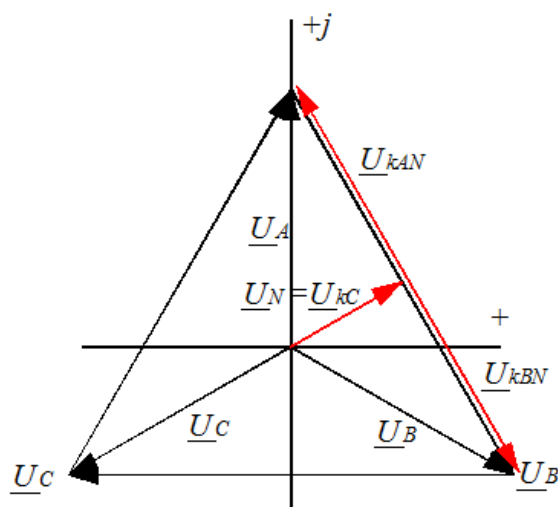
Faasijuhtme katkemisel keskpinge võrgus langeb keskpinge võrgus katkenud faasis pinge maa suhtes 50%-ni, tervetes faasides jääb pinge muutumatuks. Esineb neutraali nihe.



Joonis 2.30 Keskpinge võrgu faasipinged ühe faasi katkemisel keskpinge võrgus

Keskpinge võrgus faasijuhtme katkemisel kujunevad madalpingevõrgus pinged sõltuvalt jaotustrafo mähiste ühendusgrupist. Tähtühenduses keskpingemähisega Yyn tüüpi jaotustrafo jääb näiteks faasi C katkemisel faaside A ja B vahele alles liinipinge \underline{U}_{AB} (joonis 2.30), tekib neutraali pingenihe, mis on võrdne katkenud faasi pingega ning

neutraali suhtes tekivad uued faasipinged \underline{U}_{kAN} ja \underline{U}_{kBN} , mis sihilt kattuvad liinipingega \underline{U}_{AB} . Katkenud faasis muutub pinge neutraalpunkti suhtes nulliks.



Joonis 2.31 Pingete vektordiagrammid Yyn jaotustrafo keskpinge pool.

Jaotustrafo mähisteile rakenduvad faaside rikkepinged on vastavalt

$$\underline{U}_{kAN} = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_A \approx 0,87 \underline{U}_A \quad (2.39)$$

$$\underline{U}_{kBN} = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_B \approx 0,87 \underline{U}_B \quad (2.40)$$

$$\underline{U}_{kCN} = 0 \quad (2.41)$$

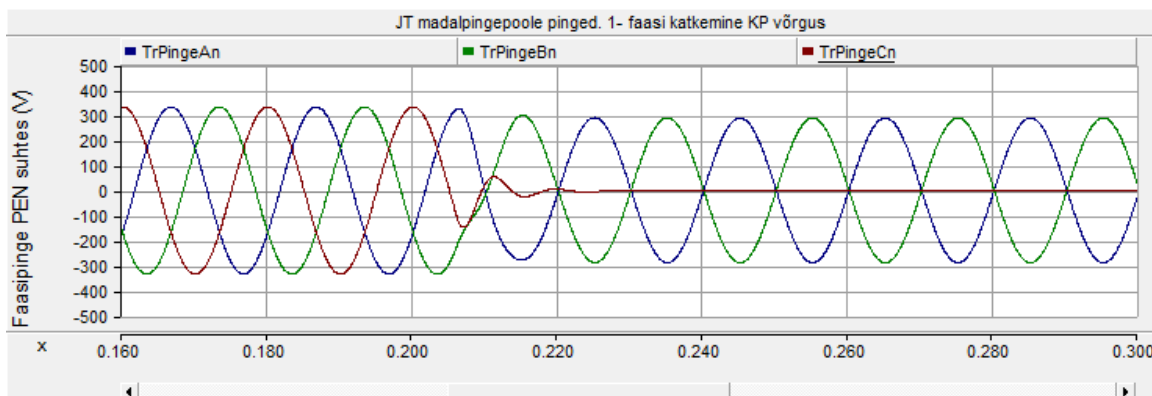
kus

\underline{U}_{kAN} – A faasi rikkepinge neutraali suhtes

\underline{U}_{kBN} – B faasi rikkepinge neutraali suhtes

\underline{U}_{kCN} – C faasi rikkepinge neutraali suhtes

Kuna faasi C pinge võrdub neutraali nihkepingega, siis ei teki sümmeetrilise koormuse korral trafo C-mähise sambasse magnetvoogu ning madalpinge poolele transformeeruvad faasipinged moodustavad samuti 87%, 87% ja 0% vastavatest normaalsetest pingetest (tabel 2.6) (joonis 2.32). Seega on madalpingepoolel ühes faasis olevatel ühefaasilistel tarbijatel toitekatkestus ning kolmefaasilises süsteemis on suur pingete asümmeetria.

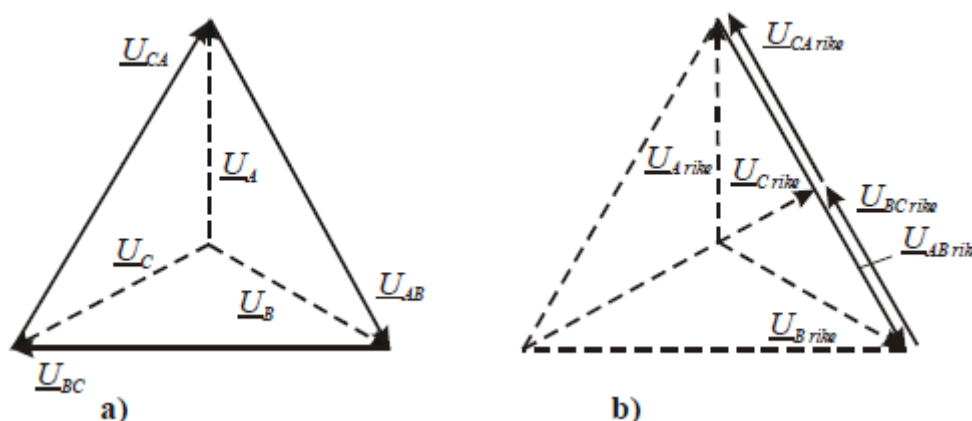


Joonis 2.32 Jaotustrafo madalpingepoole pinged ühe faasi katkemisel keskpinge võrgus Yyn jaotustrafo korral

Tabel 2.7 Pinged ühe faasi katkemisel keskpinge võrgus suhtarvuna normaalpingest

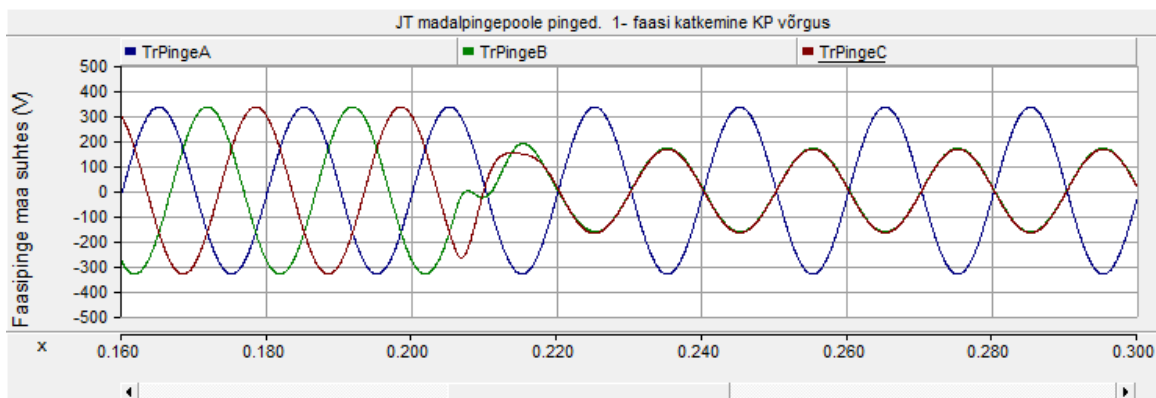
Trafo lülitusgrupp	Lühise liik	KP faasipinge			MP liinipinge			MP faasipinge neutraali suhtes		
		A	B	C	AB	BC	CA	A	B	C
D/Yn	Faasi katkemine	1,00	1,00	0,50	0,87	0,00	0,87	1,00	0,50	0,50
Y/Yn	Faasi katkemine	1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,87	0,87	0,00

Dyn tüüpi jaotustrafo korral rakenduvad keskpingemähistele liinipinged.



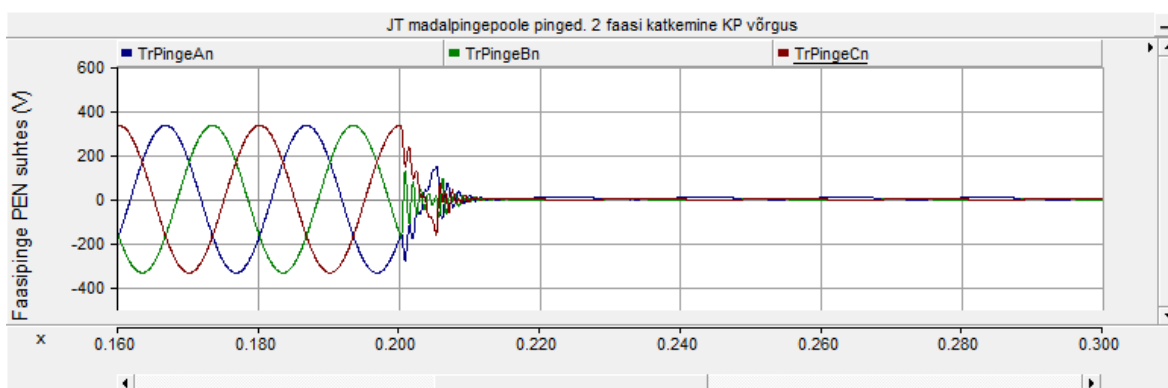
Joonis 2.33 Pingete vektordiagrammid Dyn jaotustrafo keskpinge poolel enne (a) ja pärast (b) faasi C katkemist keskpinge võrgus

Pärast faasi C katkemist väheneb katkenud faasi pinge maa suhtes kaks korda. Faaside A ja B pinged maa suhtes jäävad muutumatuks. Seega faasipinged maa suhtes keskpinge poolel peale faasi katkemist on 100%, 100% ja 50% ning madalpingepoole transformeeruvad faasipinged 100%, 50% ja 50% (tabel 2.6) (joonis 2.34) [1].



Joonis 2.34 Jaotustrafo madalpingepoole pinged ühe faasi katkemisel keskpinge võrgus Dyn jaotustrafo korral

Kahe ja kolme faasi katkemine keskpinge võrgus põhjustab madalpingetarbijatel täieliku toitekatkestuse sõltumata jaotustrafo lülitusgrupist, kuna vooluringi jaotustrafo primaarmähises ei teki.



Joonis 2.35 Jaotustrafo madalpingepoole pinged kahe faasi katkemisele keskpinge võrgus

3. Rikketalitluse modelleerimine programmiga PSCAD

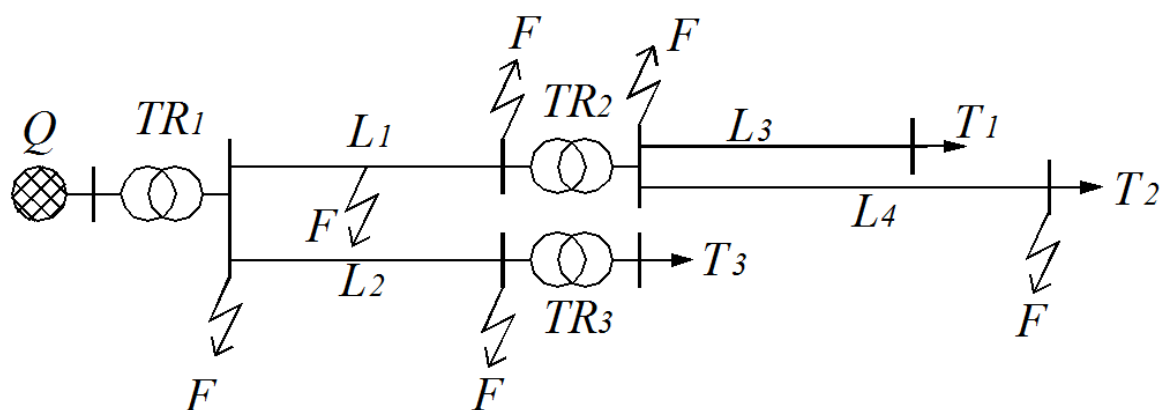
3.1 Võrguarvutusprogramm PSCAD

PSCAD võimaldab kasutajatel skemaatiliselt koostada vooluringe, käivitada simulatsioone, analüüsida tulemusi ning hallata andmeid täielikult integreeritud keskkonnas. PSCAD sisaldab eelprogrammeeritud ja testitud elemendikogu, alates lihtsatest passiivsetest elementidest ning lõpetades keerulistemate mudelitega nagu näiteks elektrimasinad, õhuliini mudelid ja kaablimudelid. Kui soovitud mudelit PSCAD programmiga kaasas ei ole, on võimalik kasutajal ise vastav mudel konstrueerida [15].

PSCAD programmi kasutavad insenerid ja teadlased, tootjad, konsultandid, samuti ka sõjavägi ja teadusasutused. Seda kasutatakse planeerimisel, projekteerimisel, uuringutel ja õppe-eesmärgil [15].

3.2 PSCAD mudel

Rikete mõju modelleerimiseks PSCAD programmis on vaja koostada vastav mudel. Antud uurimuses koosnes skeem ülekandevõrku modelleerivast süsteemiharust, keskpingevõrgust ja madalpingevõrgust (joonis 3.1). Erinevaid rikketüpe erinevate koormuste ja jaotustrafodega modelleeriti joonisel 3.1 toodud võimalikes lühisekohtades F .



Joonis 3.1 Moduleeritava võrgu põhimõtteskeem

,kus

Q- ülekandevõrku modelleeriv süsteemiharu, $U_n=115 \text{ kV}$

TR₁- toitetrafo, $S_n=10 \text{ MVA}$, $U_n=110/20 \text{ kV}$, Y_{dn}

L₁, L₂- keskpinge võrgu õhuliin, $l=20 \text{ km}$, AC70 või kaabelliin, $l=20 \text{ km}$, AHXCMK-WTC 3x95RM/25 (24 kV)

TR₂, TR₃- jaotustrafo, $S_n=1 \text{ MVA}$ või 160 kVA , D_{yn} või Y_{yn} , $U_n=20/0,4 \text{ kV}$

L₃- madalpinge kaabelliin, $l=100 \text{ m}$, 3x AXP4G240 või 1x AXP4G240 [16]

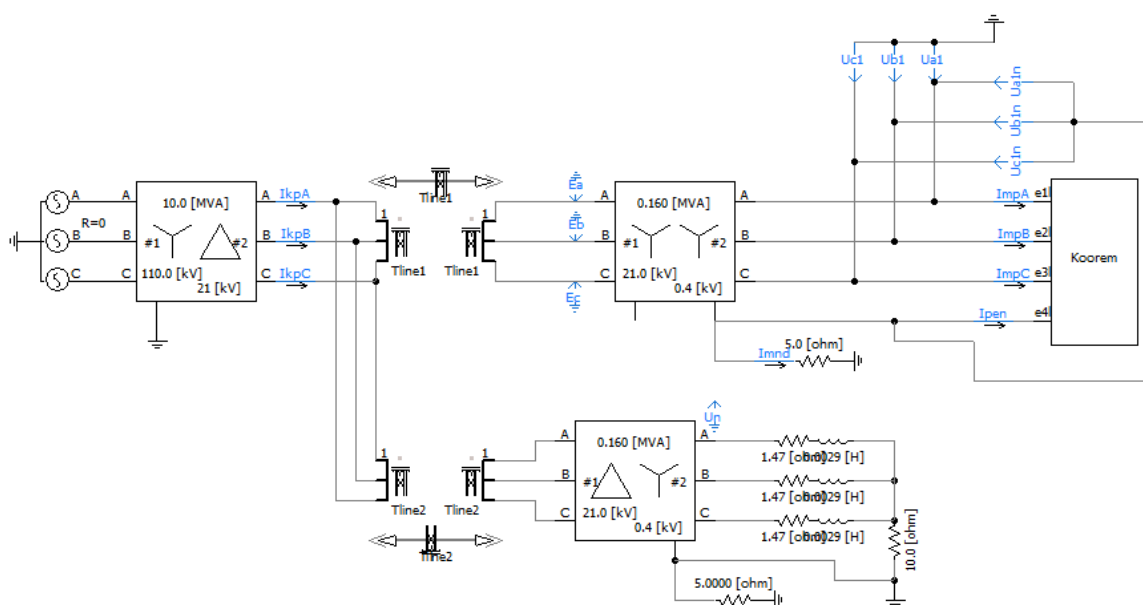
L₄- madalpinge kaabelliin, $l=500 \text{ m}$, AXP4G70 [17]

T₁, T₃- madalpingetarbija, $S_n=800 \text{ kVA}$ või 100 kVA , $\cos\varphi=0,85$

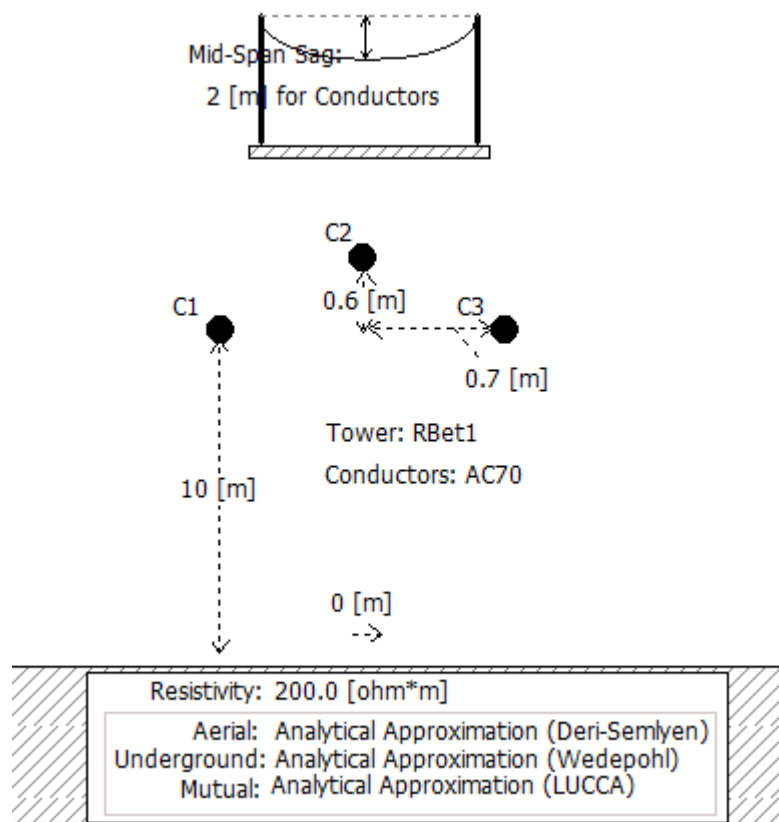
T₂- madalpingetarbija, $S_n=20 \text{ kVA}$, $\cos\varphi=0,85$

F- rikkekoht

Keskpinge õhuliinidega võrgu PSCAD mudel on joonisel 3.2, kus *Tline1* ja *Tline2* on isoleeritud neutraaliga keskpinge võrgu õhuliinid. Õhuliine modelleeritakse PSCAD programmis eelprojekteeritud elemendi *Tline* abil, seda täiendades *L₁* ja *L₂* parameetritega. Õhuliinide konfiguratsioon on toodud joonisel 3.3.



Joonis 3.2 Keskpinge õhuliinidega võrgu PSCAD mudel

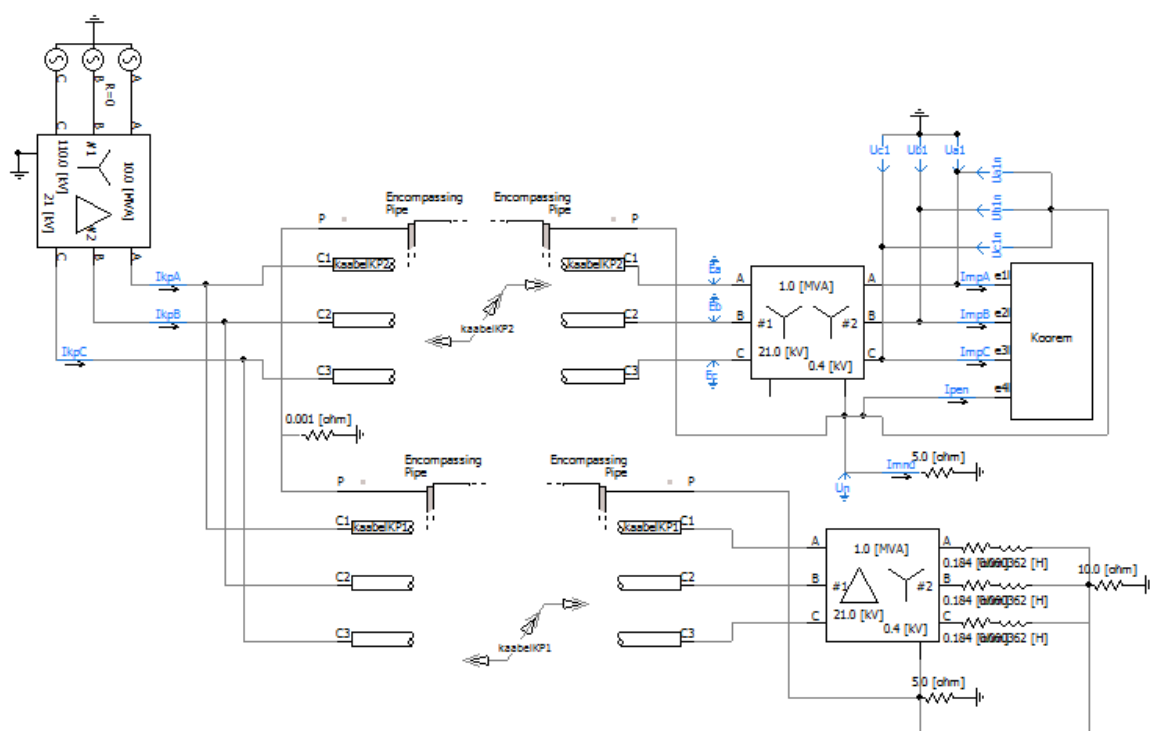


Joonis 3.3 Keskpinge õhuliini mudel

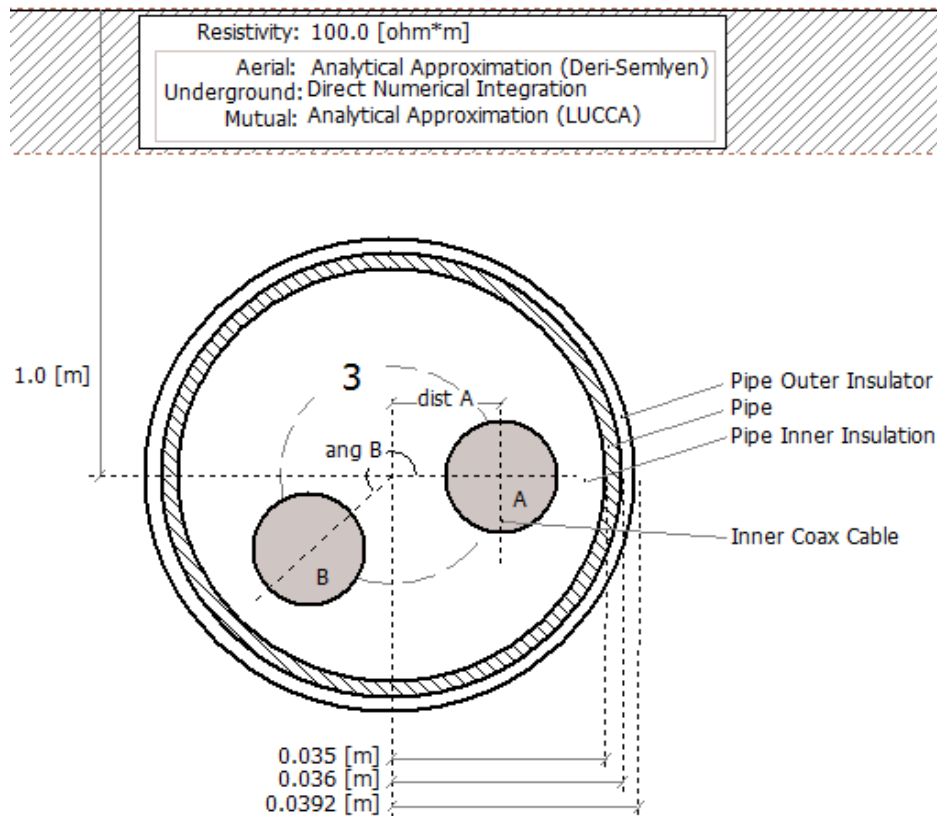
Keskpinge maakaabelliinidega võrgu PSCAD mudel on joonisel 3.4, kus *kaabelKP1* ja *kaabelKP2* tähistavad keskpinge maakaabelliine. Kaabelliine modelleeritakse PSCAD programmis eelprojekteeritud elemendi *Cable* abil, seda täiendades L_1 ja L_2 parameetritega. Kaabelliinide konfiguratsioon on toodud joonisel 3.5.

Õhuliinidel sisestatakse lisaks elektrilistele parameetritele mudelisse veel õhuliini mastide parameetrid ja maapinna parameetrid.

Kaabelliinide puhul tuleb mudelisse sisestada lisakaks veel juhtme asetus maapinnas, kõikide isolatsiooni- ja pooljuhtkihtide paksused ning dielektrilised läbitavused.

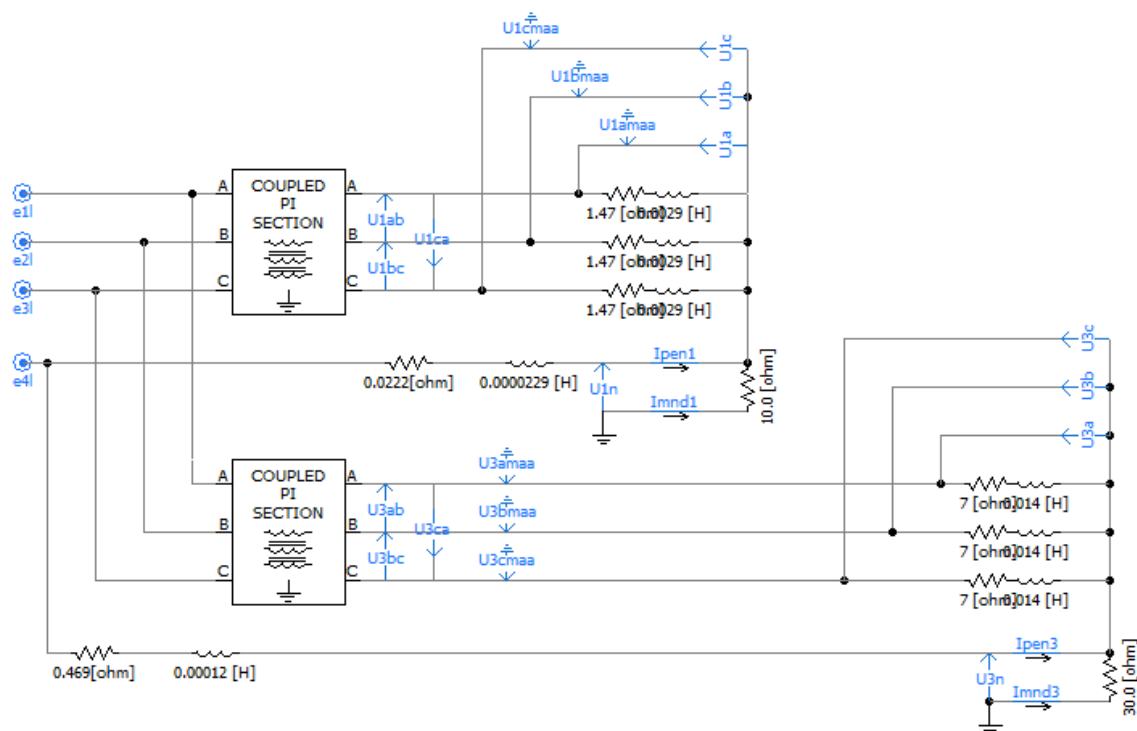


Joonis 3.4 PSCAD keskpinge kaablivõrgu mudel



Joonis 3.5 Keskpinge kaabelliini mudel

Madalpingevõrgu PSCAD mudel on joonisel 3.6. Elemendid *Coupled PI Section* modelleerivad madalpinge kaabelliine. Tarbijad on modelleeritud induktiivtakistuse ja aktiivtakistuse jadaihendusega.



Joonis 3.6 PSCAD madalpingevõrgu mudel

Lõputöö kokkuvõte

Jaotusvõrgus esinevad tüüpilised rikked mõjutavad oluliselt tarbijate pingekvaliteeti. Pinget, mida eeldatakse olevat siinuseline ning kolmes faasis sümmeetriline, rikke korral enamikel juhtudel ei eksisteeri. Rikked põhjustavad pingetaseme muutusi, pingelohkusi, liigpingeid, pingete asümmeetriat ning toitekatkestusi.

Üldiselt on olemas kahte tüüpi rikkeid: lühised ja katkemised. Lühised jagunevad kolmefaasilises süsteemis omakorda kolme-, kahe- ja ühefaasilisteks ning kahefaasilisteks maalühisteks.

Kolmefaasilise lühise korral langeb pinge kõigis lühistatud faasides nulliks ning seega kolmefaasiline lühis põhjustab lühisekoha taga olevatel tarbijatel täieliku toitekatkestuse. Lühise alghetkel võivad esineda kuni 2,6 kordsed transientliigpinged. Kõrvalharul tekkiv kolmefaasiline lühis põhjustab tarbijatel pingelohu. Kolmefaasiline lühis on sümmeetriline sõltumata sellest, kas lühisekoht on maaga seotud või mitte ning ühesugune nii madalpingevõrgus kui ka keskpingevõrgus.

Kahefaasilisel lühisel puudub ühenduspunkt maaga ning seega on kahefaasilise lühise olemus madalpingevõrgus ja keskpingevõrgus ühesugune. Kahefaasilise lühise korral on pinge lühistatud faasides võrdne ning pool terve faasi pingest. Seega põhjustab kesk- või madalpingevõrgus esinev kahefaasiline lühis lühisfaasides pingelohu sügavusega 50% ning kolmefaasilises süsteemis pingete asümmeetria. Faasipingete transformeerumine madalpingevõrku, keskpingevõrgus toimuva kahefaasilise lühise korral, sõltub jaotustrafode lülitusgrupist. Yyn lülitusgrupiga jaotustrafode korral transformeeruvad pinged madalpingevõrku samas vahekorras nagu nad esinevad trafo primaarpoolel- 100%, 50% ja 50%. Kahes faasis on seega pingelohk sügavusega 50% ning esineb pingete asümmeetria. Dyn jaotustrafode korral transformeeruvad madalpingevõrku keskpingevõrgu liinipinged ning seega esinevad madalpingepoolel pinged vahekorras 87%, 87% ja 0%. Ühte faasi seega pinget ei transformeerita ning sellesse faasi ühendatud ühefaasilistel tarbijatel on toitekatkestus. Kolmefaasilises süsteemis on suur pingete asümmeetria.

Keskpingevõrgus esineva kahefaasilise maalühise põhjustab terves faasis kuni 1,5 kordset liigpinget ja kuni 1,7 kordsed transientliigpinget. Lühistatud faasides langeb pinge nulliks. Madalpingevõrgku transformeeruvad pinged analoogselt kahefaasilise lühisega. Yyn lülitusgrupiga jaotustrafode korral esinevad madalpingevõrgus pinged vahekorras 100%, 50% ja 50% ning Dyn jaotustrafode korral 87%, 87% ja 0%. Madalpingevõrgus võivad esineda kuni 2,6 kordsed transientliigpinged. Kahefaasiline maalühis madalpingevõrgus

põhjustab terves faasis pingetõusu maa suhtes kuni 1,5 korda. Lühistatud faasides langeb pinge maa suhtes nulliks. PEN juhi suhtes jääb terve faasi pinge muutumatuks, lühistatud faasides langeb pinge 50% ning PEN juhi pingetõuse 50%-ni faasipingest. Kahefaasilisel lühisel PEN juhiga langeb lühistatud faasides pingetõus nulliks ning lühistatud faasidesse ühendatud ühefaasilistel tarbijatel esineb toitekatkestus. Terve faasi pingetõus võib esineda kuni 1,5 kordne liigpinge.

Ühefaasilise maalühise korral madalpingevõrgus tõusevad tervetes faasides pinged maa suhtes kuni $\sqrt{3}$ korda. Lühistatud faasis langeb pingetõus maa suhtes nulliks. PEN juhi pingetõus saab võrdseks lühisfaasi pingega ning seega kolmefaasiline süsteem jääb peaaegu sümmeetriliseks. PEN juhi suhtes faasipinged peaaegu ei muutu. Ühefaasilisel lühisel PEN juhiga langeb pingetõus lühistatud faasis nulliks ning lühisfaasi ühendatud ühefaasilistel tarbijatel esineb toitekatkestus. Tervetes faasides võib esineda kuni $\sqrt{3}$ kordne liigpinge.

Ühefaasilise maauhenduse korral keskpingses võrgus langeb pingetõus lühisfaasis nulliks. Tervetes faasides võib esineda kuni $\sqrt{3}$ kordne liigpinge ja kuni 2,6 kordne transientliigpinge. Lühisekoha üleminekutakistuse suurenemisel väheneb tervetes faasides liigpinge ning lühisfaasi pingetõus on suurem. Ühefaasilise maauhenduse korral keskpingses võrgus esineb neutraali pingenihe, mille tõttu jäävad liinipinged keskpingses võrgus muutumatuks ning madalpingevõrku transformeeritakse kõikide faaside pinged. Seetõttu ühefaasilist maauhendust isoleeritud neutraaliga keskpingses võrgus madalpingetarbijad peaaegu ei tunnetagi. Tarbija juures võivad esineda kuni 2,6 kordsed transientliigpinged.

Teist tüüpi rikked on juhtmete katkemised, mis põhjustavad tarbijatel toitekatkestusi ja ebanormaalseid pingetõuseid.

Ühe faasi katkemine madalpingevõrgus põhjustab katkenud faasi ühendatud ühefaasilistel tarbijatel toitekatkestuse ning kolmefaasilises süsteemis pingetõuse asümmeetriat. Faasijuhtme katkemine keskpingses võrgus põhjustab katkenud faasis pingetõuse languse 50%-ni ning pingetõuse asümmeetriat. Tervetes faasides jääb pingetõus muutumatuks. Faasijuhtme katkemisel keskpingses võrgus transformeeruvad pinged madalpingevõrku sõltuvalt jaotustrafolülitusgrupist. Dyn lülitusgrupiga jaotustrafode puhul transformeeruvad madalpingevõrku pinged vahetult 100%, 50% ja 50%. Yyn lülitusgrupiga jaotustrafode puhul esinevad pinged madalpingevõrgus vahetult 87%, 87% ja 0%. Kahe- ja kolme faasi katkemine keskpingses võrgus põhjustab madalpingetarbijatel täieliku toitekatkestuse, kuna jaotustrafolülitusgrupis primaarmähises vooluringi ei teki.

Rikete liigid mõjuvad tarbijate võrgupingele erinevalt. Samamoodi avaldavad erinevat mõju rikked eri asukohtades. Kõrvalfiidritel asuvad rikked mõjutavad tarbijate pingeid vähem, kui rikked samal fiidril. Rikete liike omavahel võrreldes, on tarbijale kõige ebamugavam kolmefaasiline lühis, kuna kolmefaasiline lühis põhjustab tarbijatel toitekatkestuse. Maalühised ja lühised PEN juhiga põhjustavad aga isolatsioonile ohtlikke, kuni 1,7 kordseid liigpingeid ja kuni 2,6 kordseid transientliigpingeid, mis põhjustavad isolatsiooni vananemist ja ülelööke. Kõige vähem mõjutab tarbija pinget ühefaasiline lühis keskpingevõrgus, kuna sel juhul tarbija seda peaaegu ei tunnetagi. Aga mitte ainult liigpinged, vaid ka pingete asümmeetria ja pingelohud on tarbija seadmetele ohtlikud, põhjustades seadmete kuumenemist, lülitusseadmete väljalülitamist, seadmete seiskumist jne. Seega on väga oluline teada, kuidas erinevad rikked tarbijate pingekvaliteeti mõjutavad ning võtta kasutusele abinõud nende mõjude leevendamiseks.

Kirjandus

- [1] Meldorf, M., Tammoja H., Treufeldt, Ü., Kilter J., Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007, 546 lk.
- [2] Tiigimägi, E., Elektrivõrgud, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1997, 127 lk.
- [3] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S., Electric Power Quality, Springer, 2011, 179 lk.
- [4] Bollen, Math H.J., Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, New York, 2000, 543 lk.
- [5] Short, T.A., Distribution Reliability and Power Quality, Boca Raton, 2006, 268 lk.
- [6] Elektrilevi OÜ normdokument, Rikete arvestus ja kliendikesksete elektrivarustuskindluse indeksite arvutamise põhimõtted.
- [7] Eesti Standard EVS-EN 50160:2010, Avalike elektrivõrkude pingetunnussuured, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2011, 38 lk.
- [8] Dugan C.R., McGranaghan F.M., Beaty W.H., Electrical Power Systems Quality, New York, 1996, 265 lk.
- [9] IEC Standard IEC 60038:2009, IEC standardpinged, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2011, 11 lk.
- [10] Schlabbach, J., Blume, D., Stephanblome, T., Voltage Quality in Electrical Power Systems, London, 2001, 241 lk.
- [11] Tleis, Nasser D., Power Systems Modelling and Fault Analysis: theory and practice, Amsterdam, 2008, 625 lk.
- [12] Roeper, R., Short-circuit currents in three-phase systems, Berlin, 1985, 167 lk.
- [13] Treufeldt, Ü., Lühised elektrisüsteemides, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2002, 158 lk.
- [14] Grainger J.J., Stevenson D.W., Power System Analysis, New York, 1994, 787 lk.
- [15] Draca Keila Cables, Tootekataloog, [WWW],

<http://www.draka.ee/index.php?page=69&>.

[16] Manitoba HVDC Research Centre, PSCAD User's Guide, [WWW],
https://hvdc.ca/uploads/ck/files/reference_material/PSCAD_User_Guide_v4_3_1.pdf.

[17] Tele-Fonika Kable, Cables and wires catalogue, [WWW],
http://www.tfkable.com/sites/default/files/katalogi/tfk_export_2008.pdf.