



PORAUSLAITTEEN RUMPUKAAPELIN MITOITUS JA SUOJAUS

Mikko Kääntä

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

KÄÄNTÄ, MIKKO:

Porauslaitteen rumpukaapelin mitoitus ja suojaus

Opinnäytetyö 65 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Huhtikuu 2013

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda kaapelin mitoitusohjelma, joka nopeuttaa suunnittelua, tarkentaa mitoitusta ja vähentää kaapelien materiaalikustannuksia. Työ on tehty Sandvik Mining and Construction Oy:lle. Porauslaitteen rumpukaapelin mitoitukseen haluttiin saada työkalu. Suunnittelun nopeutuessa nykyään pyritään käyttämään tietokoneavusteisia työkaluja sen tehostamiseksi. Tarkemmalla mitoituksella halutaan tulevaisuudessa päästä taloudellisempaan kaapelinmitoitukseen.

Kaapelin mitoituksen kannalta keskeisiä asioita ovat kaapelin kuormitettavuus, sähköiset ominaisuudet, jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus, mekaaninen kestoisuus ja paloturvallisuus. Kaapelin mitoituksessa kaapelin kuormitusvirta ei suoraan määritä valittavaa kaapelia. Kaapelin mitoitukseen vaikuttavat korjauskertoimet, joita ovat esimerkiksi ympäristönlämpötila, korkeus merenpinnasta ja asennustapa. Korjauskertoimet joko heikentävät tai lisäävät kaapelin kuormitettavuutta.

Kaapelin koko vaikuttaa kaapelin sähköisiin ominaisuuksiin, kuten kaapelin impedanssiarvoon. Kaapelin kuormitusvirta, sen korjauskertoimet ja jännitteenalenema määrittävät kaapelin johtimien poikkipinta-alan ja pituuden. Nämä asiat huomioimalla voidaan turvallisesti valita oikea kaapeli käyttökohteeseen. Opinnäytetyö aiheen pohjalta on koottu lähdeaineistosta teoriaosuus. Teorian pohjalta on suunniteltu rumpukaapelin mitoituksen Excel-taulukkolaskentaohjelma.

Asiasanat: rumpukaapeli, porauslaite, mitoitusohjelma

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

KÄÄNTÄ, MIKKO:
Defining the Trailing Cable for the Drill Rig

Bachelor's thesis 65 pages, appendices 5 pages
April 2013

The aim of this Bachelor's thesis was to create a cable measuring program, which speeds up planning, defines measuring and reduces cable material costs. The thesis is done for Sandvik Mining and Construction Oy. There was need for a tool measuring a trailing cable for a drill rig. Nowadays, we have to use computer based tools to make planning more efficient. With more accurate measuring, we want to get more economical cable measuring.

The key terms of cable measuring are the load of the cable, electrical characteristics, the voltage drop, short circuit withstand, mechanical withstand and fire safety. At cable measuring load current doesn't directly specify the selectable cable. Correction factors affect measuring situation, which can be, for example, ambient temperature, the height above sea level, and the method of installation. Correction factors either make the maximum cable load bigger or smaller.

Cable size affects the electrical characteristics of the cable, such as the cable impedance value. The load current of the cable, its correction factors and the voltage drop determine the cross section of cable and length. By taking these things into account you can safely choose the right cable to use. The basis of the source material theory has been compiled based on the thesis topic. The Excel spreadsheet program for measuring the trailing cable has been designed based on thesis topic.

Key words: trailing cable, drill rig, measuring program

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	SANDVIK.....	8
2.1	Sandvik Mining.....	9
2.1.1	Poralaite.....	9
2.1.2	Poraussykli.....	10
3	RUMPUKAAPELIN MITOITUS.....	11
3.1	Yleistä.....	11
3.1.1	Buflex-M.....	12
3.1.2	Lineax H07RN-F.....	13
3.2	Sandvik kaapeli vaatimukset.....	14
3.3	Kuormitettavuus.....	14
3.3.1	Loistehon kompensointi.....	20
3.3.2	Sähkömoottorin käyttötavat.....	23
3.3.3	Ekvivalenttinen teho.....	25
3.3.4	Lämpenemä.....	26
3.4	Kaapelin sähköiset ominaisuudet.....	27
3.5	Jännitteenalenema.....	30
3.6	Oikosulkukestoisuus.....	31
3.7	Mekaaninen kestoisuus.....	31
3.8	Paloturvallisuus.....	32
4	RUMPUKAAPELIN SUOJAUS.....	33
4.1	Yleistä.....	33
4.2	Oikosulkusuojaus.....	33
4.2.1	Suojalaitteet.....	35
4.3	Oikosulkulaskenta.....	37
4.3.1	Symmetrinen kolmivaiheinen oikosulku.....	38
4.3.2	Kaksivaiheinen oikosulku.....	39
4.3.3	Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella.....	39
4.3.4	Yksivaiheinen oikosulku.....	41
4.4	Ylikuormitussuojaus.....	41
4.5	Kosketusjännitesuojaus.....	42
5	MITOITUSOHJELMAN RAKENNE.....	43
5.1	Syötettävät parametrit.....	43
5.2	Laskentakaavat.....	44
5.3	Ohjelma.....	45
5.4	Tarkistukset.....	48

5.5	Kaapelien valinnat	50
5.6	Rummulle mahtuvan kaapelin laskenta	51
5.7	Ilmavälien laskenta	52
6	MITTAUSSUUNNITELMA	56
7	POHDINTA.....	58
	LÄHTEET.....	59
	LIITTEET	61
	Liite 1. Mining jumbo DD530-S60C porausalue.	61
	Liite 2. Puomin ajan käyttö.	62
	Liite 3. Buflex-M.....	63
	Liite 4. H07RN-F Lineax	64

LYHENTEET JA TERMIT

A	pinta-ala, m^2
C	kapasitanssi, F
f	taajuus, Hz
I	virran tehollisarvo, A
j	imaginaariyksikkö
L	induktanssi, H
P	pätöteho, W
Q	loisteho, VAR
R	resistanssi, Ω
S	näennäisteho, VA
U	jännitteen tehollisarvo, V
X	reaktanssi, Ω
Z	impedanssi, Ω
ρ	resistiivisyys, Ωm
φ	vaihe-ero
η	hyötysuhde
ω	kulmanopeus

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee kallioporaus koneen syöttökaapelin mitoitus ja suojausta. Työ tehdään Sandvik Mining and Construction Oy:lle. Kaapelin mitoitus ja suojaus käsitellään osa-alueittain ja työssä esitetyn teorian pohjalta on rakennettu Excel-pohjainen mitoitusohjelma. Ohjelma mitoittaa annettujen tietojen pohjalta syöttökaapelin määritetyille porauslaitteelle. Ohjelmaan syötettävät muuttujat vaikuttavat rumpukaapelin valintaan. Ohjelman parametrejä ovat: jännite, taajuus, teho, tehokerroin, hyötysuhde, kelatyyppe, ympäristön lämpötila ja haluttu kaapelin pituus. Ohjelma laskee valitulle kaapelille sähköisiä arvoja kaapelin pituuden mukaisesti.

Mitoitusohjelman avulla pyritään entistä tarkempaan mitoitukseen, joka todennetaan tulevaisuudessa suoritettavilla mittauksilla. Työssä on esitetty myös mittaussuunnitelma. Ohjelma on rakenteeltaan tehty selkeäksi ja helppokäyttöiseksi. Uuden materiaalin tuonti ohjelmaan on pyritty tekemään mahdollisimman vaivattomaksi. Ohjelman helpon käytettävyyden tarkoitus on nopeuttaa työntekoa. Aiempaa nopeammalla ja tarkemmalla mitoituksella päästään säästöihin työajan ja materiaalikulujen suhteen.

Työ alkaa Sandvikin esittelyllä ja selostuksella maanalaisista kallioporolaitteista. Rumpukaapeli termi avataan omalla kappaleellaan, jotta lukijalle tulee selkeä käsitys mitä ollaan mitoittamassa. Kaapelille esitetään vaatimuksia millaisia olosuhteita sen pitää kestää. Porolaitteen sähkötehon käyttäytyminen laitteen käytön aikana pyritään avaamaan kokonaisuudessaan. Loistehon kompensointia käydään läpi, millä halutaan tarjota eräs ratkaisu laitteen kokonaistehon pienentämiseen käytön aikana. Mitoituksen kannalta keskeisiä asioita ovat kaapelin jännitteenalenema, oikosulkukestoisuus, mekaaninen kestoisuus ja paloturvallisuus. Näitä asioita käsitellään omina lukuinaan.

Rumpukaapelin suojausosiossa käydään läpi oikosulkusuojaus, ylikuormitussuojaus ja kosketusjännitesuojaus. Oikosulkulaskennasta on esitetty yleisimmät kaavat ja ylikuormitus- ja kosketusjännitesuojauksesta on käyty läpi standardien mukaiset suojausehdot. Opinnäytetyön lopussa esitetään mittaussuunnitelma, minkä tarkoituksena on tulevaisuudessa saada tarkkaa tietoa kaapeleiden mitoitusta varten. Mittaustulosten perusteella on tarkoitus laskea tarkempia korjauskertoimia. Tällöin päästään huomattavasti tarkempaan mitoitukseen.

2 SANDVIK

Sandvik on kansainvälinen teollisuuskonserni, jonka pitkälle kehitetyt tuotteet ovat markkinajohtajia omilla erikoisaloillaan. Vuonna 2011 yritys työllisti 50 000 henkilöä ja sillä oli toimintaa yli 130 maassa. Liikevaihto oli vuonna 2011 lähes 94 miljardia Ruotsin kruunua. (Sandvik Mining and Construction Oy 2013.)



KUVA 1. Global Sandvik (Sandvik Mining and Construction Oy 2013)

Sandvikin liiketoiminta jakautuu viiteen päätoimialueeseen, jotka ovat: Sandvik Mining, Sandvik Machining Solutions, Sandvik Materials Technology, Sandvik Construction ja Sandvik Venture. (Sandvik Mining and Construction Oy 2013.)

Sandvikin historia alkaa jo vuodesta 1862, jolloin Göran Fredrik Göransson perusti yrityksen. Vuonna 1901 yhtiö listautui Tukholman pörssiin. Sandvikin laajentumiseen on kuulunut myös yritysostot. Lähempänä nykypäivää vuonna 1997 Sandvik-konserni hankki Tamrockin. Tamrock ja Sandvik Rock Tools muodostivat yhdessä Sandvik Mining and Construction -liiketoiminta-alueen. Vuoden 2012 alussa Sandvik Mining ja Sandvik Construction jaettiin omiksi liiketoiminta alueiksi. Yhtiö täytti 150 vuotta 2012. (Sandvik Mining and Construction Oy 2013.)

2.1 Sandvik Mining

Sandvik Mining on maailmanlaajuisesti johtava toimittaja laitteiden, työkalujen, palvelujen ja teknisten ratkaisujen osalta kaivosteollisuudessa. Tarjonta kattaa kallioporauksen, kallioleikkauksen, kivimurskauksen, lastauksen ja kuljetuksen ja materiaalien käsittelyn. (Sandvik Mining and Construction Oy 2013.)

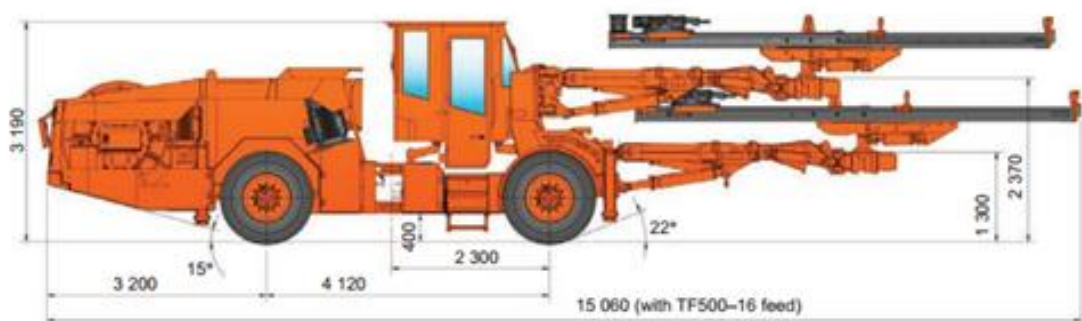
Vuonna 2011 Sandvik Miningin liikevaihto oli 32,2 miljardia ruotsin kruunua. Työntekijöitä vuonna 2011 oli noin 13 200. Sandvik Mining toimii yli 130 maassa. (Sandvik Mining and Construction Oy 2013.)

Sandvik Underground Mining keskittyy maanalaisiin poralaitteisiin. Underground Miningin kallioporat jakautuvat viiteen tuoteperheeseen: mining jumbos, production drill rigs, rock support drill rigs, secondary breaking drill rigs ja tunneling jumbos. (Sandvik Mining and Construction Oy 2013.)

2.1.1 Poralaite

DD530-S60C on esimerkki maanalaisesta kallioporakoneesta. Se on kolmipuominen mining jumbo eli laitteessa on 3 porakonetta. Koneessa on 170 kW dieselmoottori ja kolme 75 kW:n sähkömoottoria poraukseen. Laitteella pystytään poraamaan 12-75 m² tunnelia. Liitteessä 1 on kuvattu DD530-S60C:llä porattavan tunnelin pinta-ala. Laite painaa 33000kg. Porausreikien koko on 43-64mm. Kuvassa 2 on esitetty laitteen mitat. (Underground drill rigs 2013.)

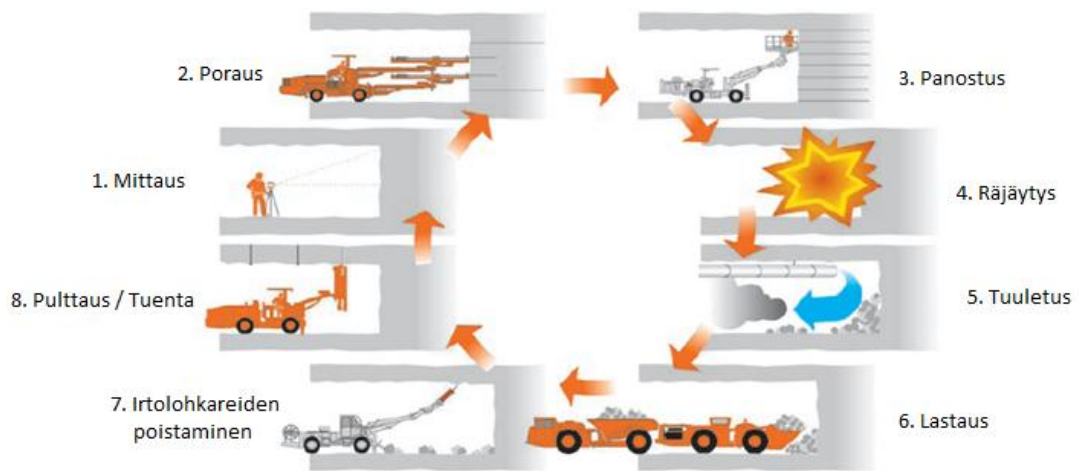
Main dimensions, Sandvik DD530-S60C



KUVA 2. Poralaite (Underground drill rigs 2013)

2.1.2 Poraussykli

Maanalaisilla porauslaitteilla rakennetaan esimerkiksi tunneleita. Tunnelia tehtäessä toimitaan vaiheittain. Seuraavassa kuvassa 3 on kuvattuna tunnelin rakentamissykli. Ensimmäinen vaihe on mittaus, jonka jälkeen tapahtuu poraus. Porauksen jälkeen tapahtuu panostus ja räjäytys. Räjäytyksen jälkeen tunneli tuuletetaan ja tämän jälkeen kiviaines lastataan ja kuljetetaan muualle. Irtolohkareiden poistaminen, joka tunnetaan myös termillä rusnaus, tapahtuu seitsemäntenä vaiheena. Viimeinen vaihe on tunnelin tuenta. (Heiniö 1999, 214.)



KUVA 3. Poraus- ja räjäytyssykli (Heiniö 1999, 214)

Tunnelin poraaminen toimii myös tietyllä porauslaitteen syklillä. Aluksi tapahtuu laitteen paikoitus. Tällöin porauspuomi, jossa syöttölaite sijaitsee, siirretään ohjaamosta oikealle paikalleen. Sen jälkeen syöttölaite siirretään kiveen. Poraus alkaa kollaroinnilla, mikä tarkoittaa rauhallista porauksen alkuvaihetta. Seuraavaksi siirrytään ramppivaiheeseen, jossa porausteho kasvatetaan porauksen täysteholle. Täystehovaihe kestää syklin vaiheista pisimpään. Täystehovaiheen jälkeen poraus viimeistellään huuhtelemalla porattu reikä vedellä tai ilmalla. Tämän jälkeen pora vedetään irti ja poraus sykli on ohi. Liitteessä 2 on kuvattuna porauslaitteen puomin ajankäyttö. Porausvaihe kestää n. $\frac{3}{4}$ poraus sykliin kuuluvasta ajasta ja porauksen täystehovaihe kestää n. puolet syklistä.

(Tutkimusraportti 07067.)

3 RUMPUKAAPELIN MITOITUS

3.1 Yleistä

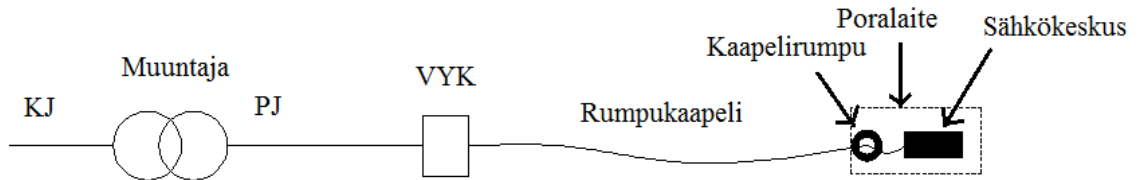
Rumpukaapeli on nimitys kaapelille, joka kierretään kelalle. Rumpukaapelia käytetään monissa teollisuuden sovelluksissa syöttökaapelina. Porauslaitteiden lisäksi rumpukaapeleita käytetään esimerkiksi satamien konttinostureissa. Rumpukaapelilta vaaditaan kestävyyttä mekaanista rasitusta vastaan. Se joutuu kestämaan taivutusta, hankausta, ja kemiallisesti ja termisesti vaativia olosuhteita. Rumpukaapelin mekaaniset ominaisuudet täytyy olla suunniteltu vastaamaan käyttötarkoitusta. Rumpukaapelia liikutellaan jatkuvasti, suoristetaan ja kelataan rummulle. Tämä aiheuttaa kaapelille suurta mekaanista rasitusta, jos kaapelia verrataan esimerkiksi kiinteistöjen asennuskaapeleihin. Kuvassa 4 on esitetty poralaitteen takaosasta näkyvä rumpukaapeli.



KUVA 4. Rumpukaapeli (DT series 2013)

Kaapelin valinta perustuu kaapelissa johdettavaan mitoitusvirtaan. Valintaa tehtäessä taloudellisuus on toinen määrittävä tekijä. Mitoitusta tehtäessä kaapelin eliniän aikana syntyvien kustannusten nykyarvo pitää olla mahdollisimman pieni. Kustannuksiin lasketaan mukaan hankinta- ja asennuskustannukset, sekä kunnossapito- ja häviökustannukset. Kaapeleiden mitoitukseen vaikuttaa myös jännitteen alenema, lämpenemä, kuormitettavuus, oikosulkukestoisuus ja riittävä mekaaninen ja kemiallinen kestoisuus. (TTT-käsikirja 2000. Sähköjohtojen mitoittaminen, 1.)

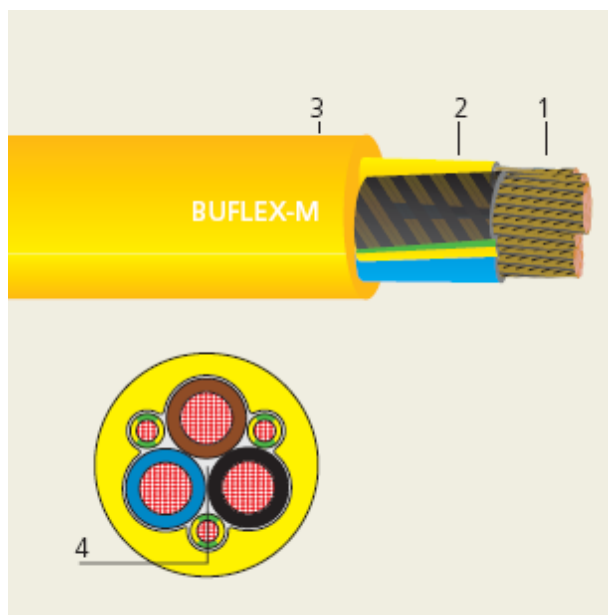
Kuvassa 5 on havainnollistettu rumpukaapeli. Keskijännitepuolelta tulee syöttö muuntajalle, jonka pienjännitepuolelta lähtee syöttökaapeli vika- ja ylivirtakeskukselle. Rumpukaapeli kiinnitetään vika- ja ylivirtakeskukseen ja toimii näin laitteen syöttökaapelina. Porauslaitteessa kaapelirummulta lähtee syöttö laitteen sähkökeskukseen.



KUVA 5. Poralaitteen syöttö

3.1.1 Buflex-M

Buflex-M on pienjännitevoimakaapeli, joka on suunniteltu syöttökaapeliksi kaikenlaisille liikkuville laitteille ja ajoneuvoille. Tässä kaapelissa maadoitusjohdin on jaettu kolmeen johtimeen. Ratkaisulla on saatu kaapelin halkaisijaa pienennettyä. Kaapelin jännitetaso on 0,6/1 kV A.C. Kaapelin johtimen maksimilämpötila on 90 °C ja minimi lämpötilä käytössä on -30 °C. (Flexible power and control cables, 17.)



KUVA 6. Buflex-m

Kuvassa 6 numerolla 1 on kuvattu johtimet, 2 on XLPE (ristiinsilloitettu polyeteeni) tai TPR (Thermo Plastic Rubber) eriste, 3 on PUR (polyuretaani) suojus ja 4 on PVC (polyvinol chloride) täyte. Liitteessä 3 on kaapelin tarkemmat tiedot. (Flexible power and control cables, 17.)

3.1.2 Lineax H07RN-F

Lineax H07RN-F (450/750V) on kumikaapeli, jota voidaan käyttää kaivostoiminnassa. Kaapelin tuotelehti on esitetty liitteestä 4. Kaapeli on ominaisuuksiltaan taipuisaa ja kestää sääolosuhteita hyvin. Sen maksimitoimintalämpötila on +85 °C ja minimi -35 °C. Kaapeli on standardien IEC 60332-1 ja EN 50265-2-1 mukainen. (H07RN-F Lineax.)



KUVA 7. Lineax H07RN-F

Kuvassa 7 numero 1 osoittaa johtimen paljasta kupari pintaa. Numero kaksi on erikoisvalmisteista ristiin linkittyä elastomeeria. Numero kolme on ulkoinen suoja, joka on PCP:tä tai vastaava elastomeeri. (H07RN-F Lineax.)

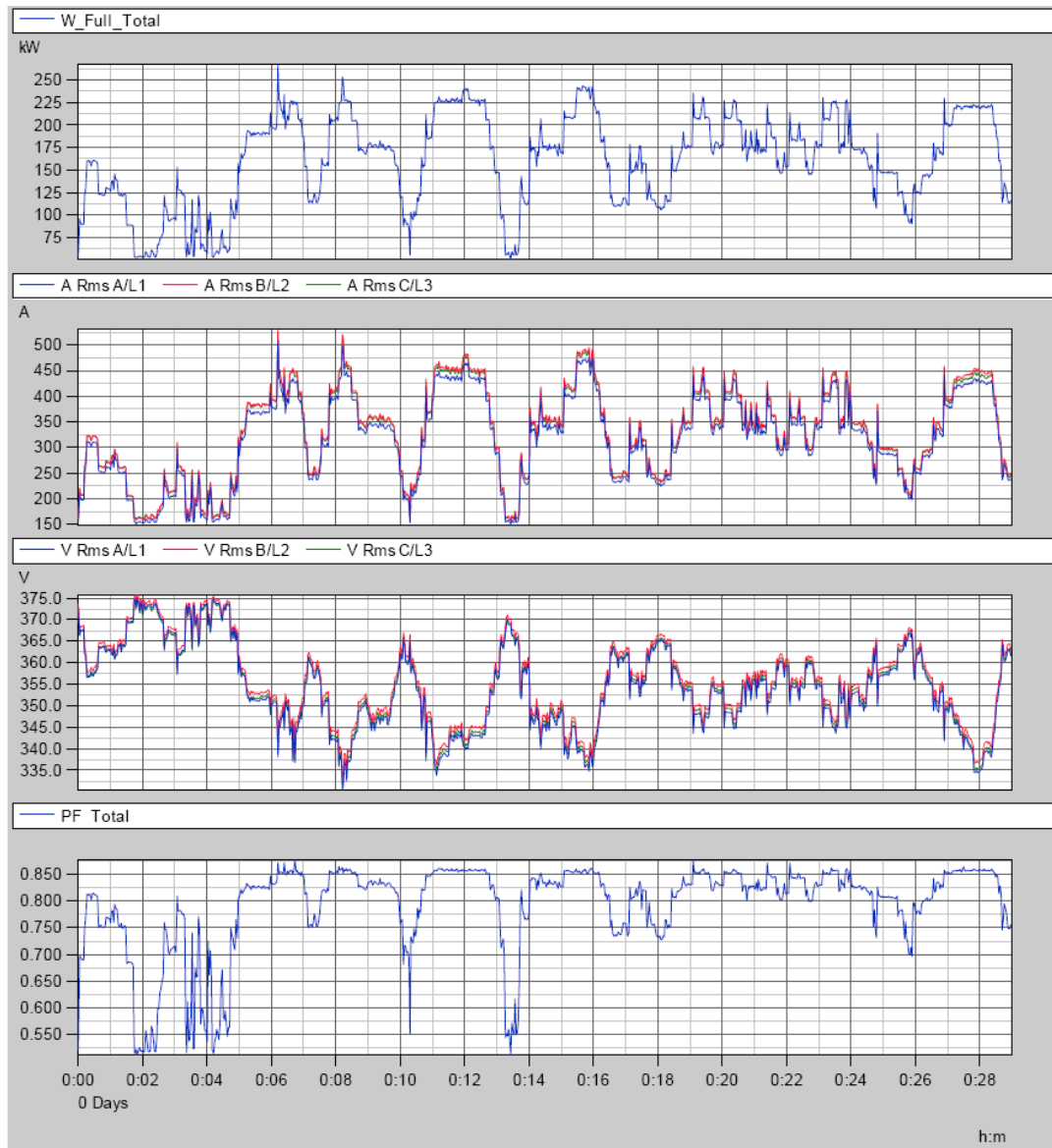
3.2 Sandvik kaapeli vaatimukset

Rumpukaapeli valitaan käyttökohteen perusteella. Kaapelien pitää olla halogeenittomia ja niistä ei saa palaessa muodostua myrkyllisiä kaasuja. Kaapelin pitää täyttää palonkestävyys vaatimukset. Kolmivaiheiseen vaihtojännitteeseen tulevan kaapelin jännitetaso pitää olla $U_0/U = 600/1000$ V. Lämpötila-alue joustavaan asennukseen tulevan kaapelin johdinmateriaalille on $-25...+90$ °C. Eristeiden pitää kestää oikosulussa 250 °C johdinlämpötila. Vetolujuus rumpukaapelilla pitää olla 20 N/Cu-mm². (Sandvik cable requirements.)

3.3 Kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttaa useita tekijöitä, kuten johdinmateriaali, johtimen poikkipinta-ala, eristemateriaali, ympäristön lämpötila ja asennustapa. Kelalla olevan kaapelin kuormitettavuus on selvästi pienempi kuin suorana maassa olevalla kaapelilla. Tiukasti ja väljästi kelatulla kaapelilla on eroa kuormitettavuudessa erilaisen jäähtymiskyvyn vuoksi. Edellä mainitut asiat vaikuttavat kaapelin lämpenemään, joka suurelta osin määrittää kaapelin valintaa.

Kuormituksessa on tärkeä asia huomioida, että kaivosporakoneen virta vaihtelee kuormitustilanteesta riippuen. Kuormitus vaihtelee sähkömoottoreiden kuormituksen summana. Porauksen sähkömoottoreita porauslaitteissa on puomien määrästä riippuen 1-3. Pelkästään yhdeltä moottorilta mitattu kuormitus on kuvaajana huomattavasti selkeämpi, kuin monelta moottorilta mitattu laitteen yhteiskuormitus. Yhdeltä moottorilta mitatusta kuormituksen kuvaajasta pystyy selkeästi seuraamaan porauksen eri vaiheita. Kuvio 1 osoittaa kuinka laitteen kaikkien sähkömoottoreiden synnyttämä kokonaiskuormitus vaihtelee. Kuvio 1 on Sandvikin myllypuron tehtaalla tehdystä porausalustan tehomittauksesta. Kuvassa on neljä kuvaajaa, joista ylin kuvaa tehon vaihtelua (kW) , toiseksi ylin virran vaihtelua (A), seuraava jännitteen vaihtelua (V) ja alin kuvaa tehokerrointa. Kuormitus vaihtelee sähkömoottoreiden kuormituksen summana.



KUVIO 1. Tehon, virran, jännitteen ja tehokertoimen kuvaajat porauksesta (Porausalustan tehot)

Porauslaite ottaa näennäistehoa, mikä muodostuu 3-vaihejärjestelmässä vaiheiden tehojen summasta. Kolmivaihejärjestelmä on symmetrinen, jos lähdejännitteet ovat yhtäsuuret ja lähteiden välillä on sama vaihekulmaero. Symmetrisen 3-vaiheisen kuormituksen näennäisteho saadaan laskettua seuraavalla kaavalla.

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (1)$$

missä:

S = näennäisteho

U = pääjännite

I = vaihevirta

Näennäisteho muodostuu pätöteho- ja loisteho-osista, siksi se voidaan laskea myös seuraavalla kaavalla:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

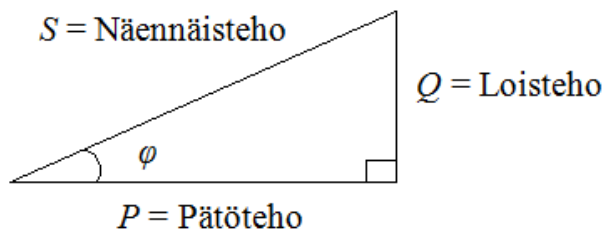
missä:

S = näennäisteho

P = pätöteho

Q = loisteho

Näennäisteho muodostaa pätö- ja loistehon kanssa tehokolmion (kuvio 2). Näennäisteho on kolmion hypotenuusa, pätöteho on vaaka-akselin kateetti ja loisteho on pystyakselin kateetti. Kolmion kulma φ on jännitteen ja virran vaihe-ero. Kuten seuraavasta kuviosta 2 nähdään, kuorman ollessa pelkkää pätötehoa on kulma φ nolla. Tällöin kuorma on puhtaasti resistiivinen, jolloin virta ja jännite ovat samanvaiheiset eli niiden vaihe-ero on nolla. Vaihe-eroa aiheuttaa siis loistehokuorma.



KUVIO 2. Tehokolmio

Pätöteho ja loisteho saadaan laskettua jännitteen, virran ja vaihekulman avulla. Kaavoissa on 3 ja 4 on kertoimena $\sqrt{3}$, koska kyse on tehojen laskennasta 3-vaihejärjestelmässä.

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

missä:

S = näennäisteho

P = pätöteho

Q = loisteho

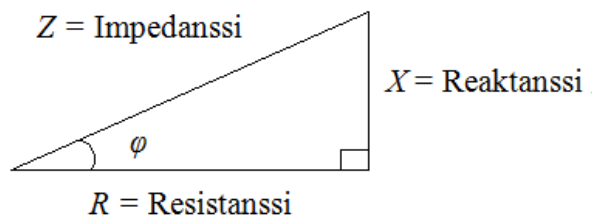
U = pääjännite

I = vaihevirta

$\cos \varphi = \frac{P}{S}$ = tehokerroin

$\sin \varphi = \frac{Q}{S}$

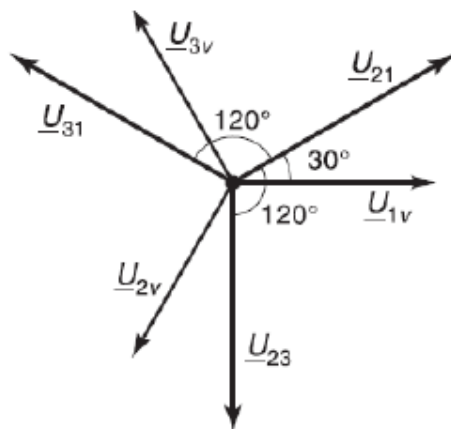
Tehokolmiosta voidaan johtaa luontevasti impedanssikolmio (kuvio 3), mikä selkeyttää ymmärrystä tehosta. Kolmiossa impedanssi osa on hypotenuusa ja se koostuu reaali- ja imaginaari-osista. Impedanssin reaali-osa on R eli resistanssi, jonka kuluttama teho on puhdasta pätötehoa. Impedanssin imaginaari osa X on reaktanssi. (Hietalahti & Tarkka 2006, 55)



KUVIO 3. Impedanssikolmio

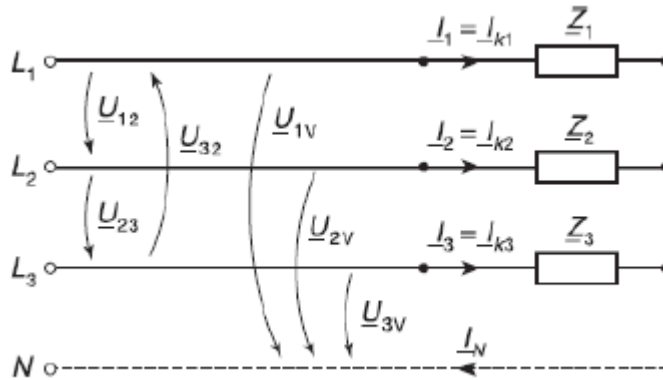
Reaktanssi aiheuttaa kuormassa loistehon tarvetta, jonka siirtämistä johtimissa pyritään välttämään, koska loisteho ei ole työtä tekevää tehoa, kuten pätöteho. Loisteho voi olla kapasitiivista tai induktiivista. Teollisuuden sovelluksissa kuten tässä työssä sähkömoottoreissa syntyvä magneettikenttä aiheuttaa induktiivista kuormaa ja se aiheuttaa induktiivisen loistehon tarvetta. Loistehoa pystytään kuitenkin kompensoimaan. Tällöin verkosta ei siirry turhaan kaapeleita kuormittavaa loistehoa laitteelle. Induktiivista loiskuormaa kompensoidaan esimerkiksi kondensaattoriparistoilla, mitkä kannattaa sijoittaa mahdollisimman lähelle kuormaa.

Symmetrisessä 3-vaiheisessa järjestelmässä vaihe- ja pääjännitteillä on kulmaero. Kuviossa 4 on kuvattu 3-vaiheisen symmetrisen tähtikytkennän jännitteet. Symmetrisessä järjestelmässä pääjännitteiden välillä on 120° ero, kuten myös vaihejännitteiden. Pää- ja vaihejännitteen välinen ero on 30° astetta. Pääjännitteiden itseisarvot ovat yhtä suuret, kuten myös vaihejännitteiden ja vaihevirtojen itseisarvot. Impedanssit kaikissa kolmessa vaihepiirissä ovat yhtä suuret eli symmetriset.



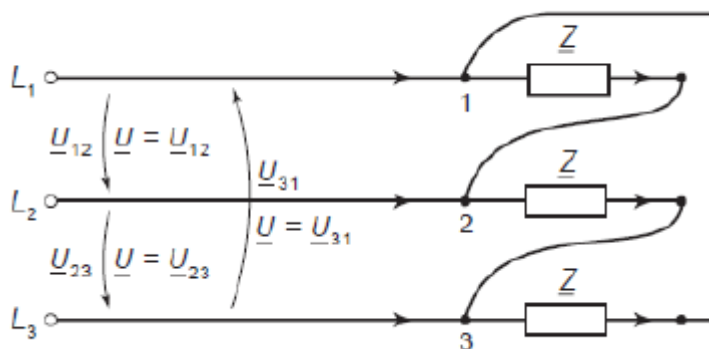
KUVIO 4. Pää- ja vaihejännitteet osoitinmuodossa (Hietalahti & Tarkka 2006, 254)

Tähtikytkennässä on erikseen vaihe- ja pääjännitteet. Vaiheen syöttämä virta on sama virta, joka kulkee vaiheen impedanssin läpi. Virtojen suunnat 3-vaihejärjestelmässä merkitään vaihejohtimessa lähteestä kuormaan päin ja nollajohtimessa kuormasta lähteeseen päin (Hietalahti & Tarkka 2006, 256). Tähtikytkentä, joka tunnetaan myös nimellä Y-kytkentä, on esitetty kuviossa 5.



KUVIO 5. Tähtikytkentä (Hietalahti & Tarkka 2006, 255)

Kolmiokytkentä (kuvio 6) ei sisällä yhteistä nollapistettä. Impedanssi kolmiokytkennässä on vaiheiden välissä, joten kolmiokytkennässä kuorman jännite on pääjännite. Kolmiokytkennässä vaiheen syöttämä virta ja impedanssin läpi kulkeva virta ovat eri suuria. Kolmiokytkentä, joka tunnetaan myös nimellä D-kytkentä, on esitetty alapuolella. (Hietalahti & Tarkka 2006, 256.)



KUVIO 6. Kolmiokytkentä (Hietalahti & Tarkka 2006, 257)

Kuorman tehosta johdettava verkosta otettava virta on yksittäinen tärkein asia kaapelin mitoituksessa. Virta, jonka mukaan kaapeli mitoitetaan, on kuormituksen ekvivalenttinen virta.

3.3.1 Loistehon kompensointi

Porauslaitteen kuormituksen osalta loisteho aiheuttaa verkosta otettavaan virtaan loiskomponentin. Kompensoimalla paikallisesti porauslaitteella loistehoa on mahdollista pienentää verkosta otettavan loistehon määrää. Kun verkosta otettavan loistehon määrä pienenee, tällöin se vaikuttaa kokonaistehoon ja tällöin verkosta otettava virran määrä pienenee. Kuten kaapelin mitoituksesta tiedetään, kaapeli mitoitetetaan kuorman ottaman virran mukaan.

Loisteho voi olla kapasitiivista tai induktiivista. Kun kuormassa on kapasitanssia, eli energiaa varaavia komponentteja esimerkiksi kondensaattoreita, kulutetaan kapasitiivista loistehoa, jossa jännite on virtaa jäljessä. Kun kuormassa on induktanssia, eli virran muutosta vastustavia komponentteja esim. keloja, kulutetaan induktiivista loistehoa, jossa jännite on virtaa edellä. Induktiivinen loisteho ajatellaan usein laitteiston kuluttamaksi loistehoksi ja kapasitiivinen tuotetuksi loistehoksi. Kompensointi toteutetaan pyrkimällä saamaan induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi yhtä suuriksi. Kompensointikondensaattoreilla joita kutsutaan rakenteestaan johtuen yleisesti kompensointiparistoiksi, voidaan toteuttaa kompensointi asentamalla ne kuorman kanssa sarjaan tai rinnan. (Pulkinen 2012, 2-5.)

Yhtälössä 5 on esitetty rinnakkaisresonanssin ehto, joka pätee myös sarjaresonanssissa. Rinnakkais- eli virtaresonanssissa induktiivinen ja kapasitiivinen virta kumoavat toisensa. Sarja- eli jänniteresonanssissa induktiivinen ja kapasitiivinen jännite kumoavat toisensa. (Aura & Tonteri 1986, 192, 200.)

$$X_L = X_C \text{ eli } \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (5)$$

missä:

X_L = induktiivinen reaktanssi

X_C = kapasitiivinen reaktanssi

Resonanssin huomioiminen on yliaaltopitoisessa verkossa erittäin tärkeää, koska resonanssitilanteessa yliaaltovirta voi kasvaa jopa 20-kertaiseksi. Verkon induktanssi ja kompensointilaitteiston kapasitanssi muodostavat aina resonanssipiirin jollakin taajuudella ja tämän takia kompensointilaitteiston viritystaajuutena pitää käyttää taajuutta, joka on alempi kuin minkään verkossa esiintyvän yliaallon moninkerran taajuus. Kompensointilaitteisto viritetään yleensä 189 Hz:n taajuudelle. Kompensointilaitteiston resonanssitaajuus voidaan selvittää kaavan 6 avulla. (Pulkinen 2012, 9.)

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \cdot f_1 \quad (6)$$

missä:

f_r = resonanssitaajuus

S_k = verkon oikosulkuteho

Q_c = kondensaattorin tuottama loisteho

f_1 = verkon taajuus

Sähköverkkoon liitetään erilaisia kuormituksia ja osa niistä tarvitsee myös loistehoa. Tällaista kuormaa aiheuttaa mm. sähkömoottorit. Sähkömoottoreiden loistehon tarpeen saa selville moottorin kilpiarvoissa ilmoitetusta tehokertoimesta $\cos \varphi$. Kompensoinnilla on erillaisia toteutustapoja. Sähkömoottorille suositellaan yksittäiskompensointia. Moottorikohtainen kompensointi voidaan toteuttaa kondensaattoriyksiköllä varustetulla turvakytkimellä. Suurin säästö kaapelin mitoituksessa on tällöin pitkillä syöttöjohdoilla. Taulukossa 1 on esitetty eri kuormituksille tyypillisiä tehokertoimia. (TTT-käsikirja 2000. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus, 4.)

TAULUKKO 1. Tyypillisiä kuormitusten tehokertoimia (TTT-käsikirja 2000. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus, 4)

Kuorma	$\cos \varphi$ tehokerroin (W / VA)	$\tan \varphi$ loistehon tarve (Var / W)
Moottorit	0,7 ... 0,85	1,0 ... 0,62
Loisteputkivalaisimet		
kompensoimattomat	0,5	2
kompensoidut	0,9	0,5
Tyristorikäytöt	0,4 ... 0,75	2,3 ... 0,9
Resisttiivinen kuorma	1	0

Kompensointitarve voidaan laskea yhtälöstä 7 (TTT-käsikirja 2000. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus, 1).

$$Q = \frac{P}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (7)$$

missä:

Q = loistehon tarve

P = kuormituksen pätöteho

η = kuormituksen hyötysuhde

φ_1 = tehokulma ennen kompensointia

φ_2 = haluttu tehokulma kompensoinnin jälkeen

Taulukko 2 on esimerkki moottorikohtaisesta kompensoinnin valintataulukosta.

TAULUKKO 2. 400 V moottoreiden kompensoinnin valintataulukko (TTT-käsikirja 2000. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus, 3)

Tahtikierrosluku: 3000 r / min					
Teho / kW	Kondensaattorin loisteho / kVAr	Ennen kompensointia		Kompensoinnin jälkeen	
		$\cos\varphi_1$	I_N / A	$\cos\varphi_2$	I_N / A
5,5	2,5	0,88	10,5	0,99	9,4
7,5	2,5	0,9	13,8	0,98	12,7
11,0	5,5	0,88	20	0,99	18
15,0	6,7	0,89	27	0,99	24
18,5	6,7	0,89	33	0,98	30
22,0	10	0,85	41	0,98	36
30,0	12,5	0,88	53	0,99	47
37,0	15	0,89	64	0,99	58
45,0	20	0,89	78	0,99	70
55,0	20	0,89	95	0,98	86
75,0	30	0,9	126	0,99	114
90,0	35	0,9	151	0,99	137
110,0	40	0,9	184	0,99	167

3.3.2 Sähkömoottorin käyttötavat

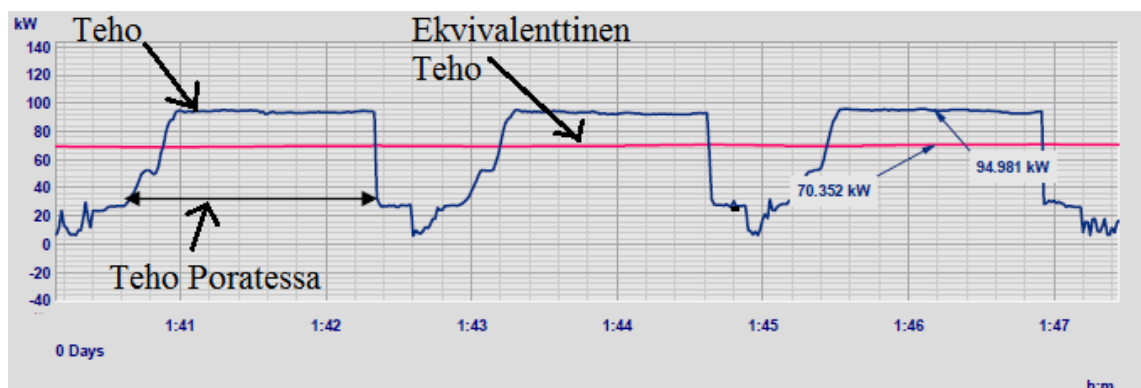
Sähkömoottoreilla on erilaisia käyttötapoja S1-S10. Käyttö määrittää suurilta osin millainen ekvivalenttisesti tehosta tulee. S1 on käyttötavoista yksinkertaisin. Se on jatkuva käyttö eli moottori toimii vakiokuormituksella niin pitkään, että loppulämpötila saavutetaan. S2 on lyhytaikainen käyttö eli moottori toimii vakiokuormituksella määrätyn ajan. Ajan on oltava kuitenkin niin lyhyt, ettei loppulämpötilaa saavuteta. Tämän jälkeen moottori on niin pitkään tauolla, että kone saavuttaa ympäröivän ilman tai muun jäähdytysaineen lämpötilan. Tälle käyttötavalle suositellaan aikoja 10, 30, 60 ja 90 minuuttia. Kyseisen käyttötavan leimaus on esimerkiksi S2 10 min. Seuraava käyttötapa on S3 jaksollinen ajoittaiskäyttö, se muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja. Jokaiseen jaksoon kuuluu toiminta-aika vakiokuormituksella ja seisonta aika. Jakson aikana loppulämpötilaa ei saavuteta. Käynnistykset eivät vaikuta paljoa lämpenemiseen. (TTT-käsikirja 2000. Moottorit ja generaattorit, 11.)

Jaksollinen käynnistyskäyttö eli S4 muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu käynnistysaika, toiminta-aika vakiokuormituksella sekä seisonta-aika. Tässäkään käyttötavassa loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Moottorin pysähtyminen tapahtuu luonnollisella tavalla hidastaen tai mekaanisella jarrulla jarruttaen. Jaksollinen käynnistys- ja jarrutuskäyttö eli S5 käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja joihin kuuluu käynnistysaika, toiminta-aika vakiokuormituksella, jarrutusaika sekä seisonta-aika. Jarrutuksena käytetään sähköistä jarrutusta. Tässäkään käyttötavassa loppulämpötilaa ei saavuteta käytön aikana. Pysähtymätön ajoittaiskäyttö eli käyttötapa S6 muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu toiminta-aika vakiokuormituksella sekä tyhjäkäyntiaika. Loppulämpötilaa ei saavuteta jaksonaikana. (TTT-käsikirja 2000. Moottorit ja generaattorit, 11.)

Keskeytymätön käynnistys- ja jarrutuskäyttö eli käyttötapa S7 muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joihin kuuluu käynnistysaika, toiminta-aika vakiokuormituksella sekä jarrutusaika. Jarrutus tapahtuu sähköisesti. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Pysähtymätön määräjaksollinen käyttö eli S8 käyttö muodostuu sarjasta samanlaisia jaksoja joihin kuuluu toiminta-aika vakiokuormituksella määrättyllä nopeudella, jota seuraa toiminta-aika toisella nopeudella ja toisella vakiokuormituksella. Pyörimisnopeuksia voi olla useita jakson aikana. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. (TTT-käsikirja 2000. Moottorit ja generaattorit, 12.)

Käyttö vaihtelevalla kuormalla ja nopeudella eli S9 käyttö muodostuu sallitulla käyttöalueella tapahtuvista kuorman ja nopeuden vaihteluista, jotka yleensä eivät ole jaksollisia. Tämä käyttötapa sisältää usein tapahtuvia ylikuormituksia, jotka voivat merkittävästi ylittää nimelliskuormaa. (TTT-käsikirja 2000. Moottorit ja generaattorit, 12.)

Käyttötapa jolla poralaitteiden moottorit toimivat on S9, laskennallisesti se on hankalin malli. Sähkömoottorien käyttö poralaitteessa S9 käytettävällä aiheuttaa kuitenkin sen ylikuormituksista huolimatta, että laitteen nimellisvirta ja kuormituksen ekvivalenttinen virta ovat hyvin lähellä toisiaan. Rumpukaapelin mitoitus voidaan tehdä siksi laitteen nimellisen virran kautta. Kuvio 7 esittää porauslaitteen yhden sähkömoottorin ottamaa tehoa S9 käytössä ja siitä laskennan mitoittamaa ekvivalenttista tehoa. Viimeinen käyttö on S10, joka on käyttö vaihtelevalla vakiokuormalla. (TTT-käsikirja 2000. Moottorit ja generaattorit, 12.)



KUVIO 7. Yhden moottorin tehon kuvaaja (Electric power measurement, 3)

3.3.3 Ekvivalenttinen teho

Kaapelin mitoituksessa on tärkeää käyttää virran ekvivalenttista arvoa. Seuraavaksi on esitetty ekvivalenttisen tehon kaava. Kaava 8, on yleinen kaava jolla, voidaan laskea ekvivalenttinen arvo mille tahansa suurelle.

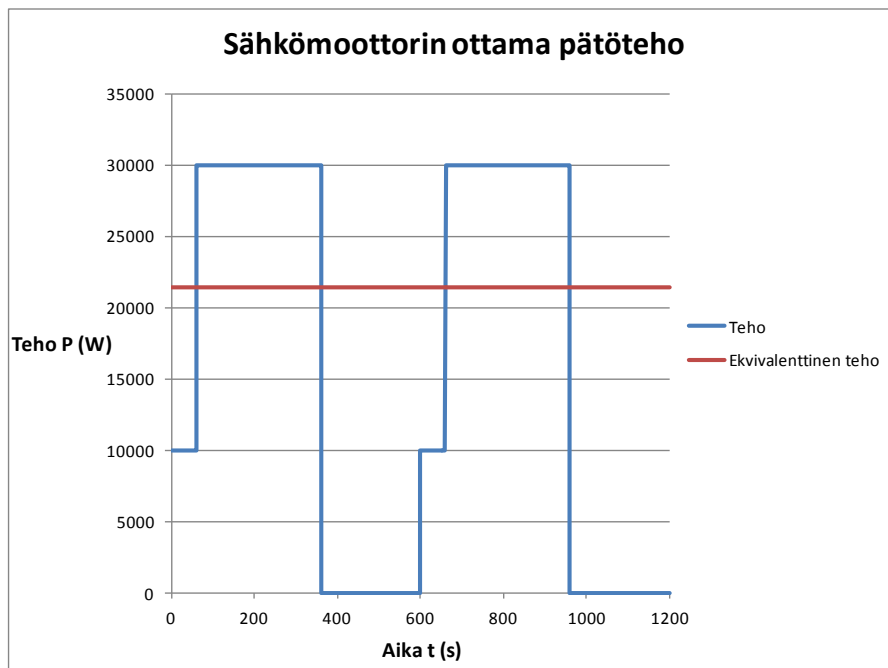
$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} \quad (8)$$

Otetaan esimerkki ekvivalenttisen tehon laskennasta. Moottori toimii tietyllä jaksollisuudella, jakson aika on 10 minuuttia. Se ottaa ensiksi minuutin verkosta 10 kW tehoa sitten 5 minuuttia 30 kW tehoa ja tämän jälkeen moottori on sammutettuna 4 minuutin ajan.

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{600} \int_0^{60} (10 \text{ kW})^2 + \int_{60}^{360} (30 \text{ kW})^2 + \int_{360}^{600} (0 \text{ kW})^2} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 60 + 30^2 \cdot 300}{600}}$$

$$= 21,4476 \text{ kW}$$

Samaan kaavaan sijoittamalla virran arvot saadaan laskettua ekvivalenttinen virta. Kuviossa 8 on esitetty tehon ja ekvivalenttisen tehon kuvaaja.



KUVIO 8. Teho ja laskettu ekvivalenttinen teho

3.3.4 Lämpenemä

Lämpenemään vaikuttavia tekijöitä on useita. Kaapeli pitää mitoittaa sen tilanteen mukaan, kun olosuhteet ovat huonoimmat. Rumpukaapelin mitoituksessa se tarkoittaa tilannetta, kun kaapeli on koko pituudeltaan kelattu rummulle, koska silloin lämpenemä on suurin. Johtimille sallittua suurinta lämpötilaa ei pidä ylittää normaalikäytön kuormituksella, kun kaapeli on kelattu rummulle kokonaan. Tämä pitää huomioida mitoituksessa. (Tiainen 2012, 43.)

Kuormitettavuuteen vaikuttaa olennaisesti kuormituksen kesto. Lyhyen aikaa voidaan kaapelia kuormittaa suurella virralla, jos kaapeli pääsee sen jälkeen jäähtymään. Päinvastoin kaapelia voidaan kuormittaa pitkiäkin aikoja pienellä kuormalla. Ympäristön lämpötila vaikuttaa olennaisesta kaapelin lämpötilaan. Taulukossa 3 on standardin SFS-EN 60204-1 mukaiset PVC-eristeisten johtimien kuormitettavuuden korjauskertoimet ympäristönlämpötilassa +40 °C. Kaapeleiden valmistajat antavat kumieristeisten kaapeleiden korjauskertoimet. (SFS-EN 60204-1 2006, 184.)

TAULUKKO 3. PVC:n korjauskertoimet (SFS-EN 60204-1 2006, 184)

Ympäristön lämpötila °C	Korjauskertoimet
30	1,15
35	1,08
40	1,00
45	0,91
50	0,82
55	0,71
60	0,58

HUOM. Korjauskertoimet ovat peräisin standardista IEC 60364-5-52. PVC:n suurin lämpötila normaaleissa olosuhteissa on +70 °C.

Rummulle vapaaseen ilmaan asennettujen kaapelien kuormitettavuutta alennetaan taulukon 4 mukaisilla arvoilla.

TAULUKKO 4. Rummulle kelattujen kaapelien muuntokertoimet (SFS-EN 60204-1 2006, 130)

Kaapelirummun tyyppi	Kaapelikierrosten lukumäärä				
	Ei rajoitusta	1	2	3	4
Sylinterimäinen, tuuletettu	-	0,85	0,65	0,45	0,35
Säteittäinen, tuuletettu	0,85	-	-	-	-
Säteittäinen, tuulettamaton	0,75	-	-	-	-

HUOM. 1 Säteilteisessä rummussa kaapeli on spiraalimaisesti lähekkäin asennettujen laippojen välissä. Rumpu on tuulettamaton, jos laipat ovat yhtenäiset ja tuuletettu, jos laipat ovat aukolliset.

HUOM. 2 Sylinterimäisessä tuulettetussa rummussa kaapelikerrokset ovat etäällä sijaitsevien laippojen välissä ja rummussa sekä laipoissa on tuuletusaukkoja.

HUOM. 3 Suositellaan, että muuntokertoimien käytöstä keskustellaan kaapelin ja rummun valmistajan kanssa. Tämä saattaa johtaa muiden kertoimien käyttöön.

3.4 Kaapelin sähköiset ominaisuudet

Kaapelin impedanssiarvot resistiivisyys metriä kohti ja reaktiivisuus metriä kohti saadaan yleensä kaapelivalmistajalta tai kaapelin jälleenmyyjältä. Arvot ovat myös laskettavissa. Kaapelin reaktanssikomponentin arvon laskeminen edellyttää kuitenkin, että tiedetään edes nimellisinduktanssi. Reaktanssi voidaan laskea induktanssiarvon kautta, koska kapasitanssi arvon vaikutus reaktanssiin on häviävän pieni. Induktanssiarvon kanssa on hyvä ottaa huomioon, että laskettaessa reaktanssi, taajuus vaikuttaa lopputulokseen. Tämä on syytä huomioida, jos saadaan kaapelin valmistajalta kaapelitietoja, koska Suomessa oleva 50 Hz taajuus ei ole kaikkialla käytössä. Esimerkiksi Pohjois-Amerikassa on käytössä 60 Hz taajuus sähköverkossa.

Kaapeliarvoissa on tärkeää ottaa huomioon suojajohtimen tyyppi, jos kaapelin johtimien poikkipinta-ala ilmoitetaan esimerkiksi muodossa $3 \times 25 + 3 \times 6 \text{ mm}^2$. Tällöin on tärkeää selvittää tämän vaikutus suojajohtimen arvoihin. Jaetun suojajohtimen induktanssiarvo kannattaa selvittää kaapelin valmistajalta.

Otetaan esimerkkinä 1000m pituinen kaapeli, jotta laskettuja tuloksia voidaan verrata kaapelivalmistajan ilmoittamiin Ω/km tuloksiin. Valittu kaapeli on $3 \times 25 + 3 \times 6 \text{ mm}^2$, jonka johdin on kuparia ja johtimen poikkipinta-ala 25 mm^2 . Kuparin resistiivisyys 20°C lämpötilassa on $0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$ (Aura & Tonteri 1986, 50). Johtimen induktanssi arvo on $0,24 \text{ mH/km}$, joka on saatu kaapelin valmistajalta. Kaapeli asennetaan 60 Hz sähköverkkoon. Lasketaan ensiksi kaapelille induktiivinen reaktanssi arvo kaavalla 9.

$$X_L = j\omega L \quad (9)$$

missä:

j = imaginaariyksikkö

ω = kulmataajuus

L = induktanssi

Sijoitetaan kaavaan esimerkin luvut. Laskennassa ei käytetä imaginaariyksikköä.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 0,24 \cdot 10^{-3} \frac{\text{H}}{\text{km}} = 0,09 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Johtimen resistanssi saadaan kaavalla 10 (Aura & Tonteri 1986, 49).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (10)$$

missä:

R = johtimen resistanssi

ρ = johtimen aineen resistiivisyys

l = johtimen pituus

A = johtimen poikkipinta-ala

Sijoitetaan kaavaan 10 esimerkin luvut.

$$R = 0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{0,000025 \text{ m}^2} = 0,71 \Omega$$

Lämpötila vaikuttaa osaltaan johtimen resistanssiin. Kun lämpötila otetaan huomioon, käytetään laskenta kaavaa 11 (Aura & Tonteri 1986, 55).

$$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (11)$$

missä:

R_1 = johtimen resistanssi lämpötilassa T_1

R_2 = johtimen resistanssi lämpötilassa T_2

α = resistiivisyyden lämpötilakerroin

$\Delta T = T_2 - T_1$ = lämpötilan muutos

Jatketaan edellä mainittua esimerkkiä lämpötilan muuttuessa esimerkiksi 50 °C lämpötilaan. Tällöin lämpötilan muutos on 30 °C. Kuparin resistiivisyyden lämpötilakerroin on $3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$ (Aura & Tonteri 1986, 50). Sillä käytetäänkö lämpötilakertoimen yksikössä Kelvinejä vai Celcius asteita ei ole merkitystä. Lämpötilan muutos on yhtä suuri Celsiusasteissa ja Kelvineissä. Muutoksen aiheuttama johtimen resistanssin uusi arvo lasketaan kaavalla 11.

$$R_2 = 0,71 \Omega \cdot (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \cdot 30K) = 0,79 \Omega$$

Kaapelin vaihejohtimen impedanssi 20 °C lämpötilassa on:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,71^2 + 0,09^2} = 0,72 \Omega$$

Kaapeli valmistajan ilmoittamat arvot ovat:

Reaktanssi: 0,09 Ω /km

Resistanssi 20°C lämpötilassa: 0,78 Ω /km

Impedanssi: 0,79 Ω /km

Tuloksista nähdään, että kaapelinvalmistajan ilmoittamat arvot ovat yläkanttiin verrattaessa niitä laskennallisiin arvoihin. Kyseiselle esimerkin kaapelille kaapelivalmistajalta selvitetty suojajohtimien induktanssi on 0,46 mH/km, joten arvo on vaihejohtimeen nähden noin kaksinkertainen. Tästä laskettu reaktanssi arvo 60 Hz taajuudella 1000 metrin pituiselle kaapelille on 0,173 Ω /km.

Suojajohdin on jaettu kolmeen ja se on ilmoitettu muodossa $3 \times 6 \text{ mm}^2$. Tällöin sen kokonaisresistanssi arvo pitää laskea 18 mm^2 poikkipinta-alalle.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m} \cdot \frac{1000 \text{m}}{0,000018 \text{m}^2} = 0,99 \Omega$$

Suojajohtimen kokonaisimpedanssi saadaan pythagoraan lauseella.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,99^2 + 0,173^2} = 1,01 \Omega$$

Tuloksesta nähdään, että suojajohtimen kokonaisimpedanssi on suurempi kuin vaihejohtimen kokonaisimpedanssi.

3.5 Jännitteenalenema

Jännitteenalenema syntyy virran kulkiessa johtimessa, jolloin se synnyttää tehohäviötä johdon impedanssissa. Tällöin johdon loppupään jännite on pienempi kuin syöttävä jännite. Jännitteenalenema kaapelille, kolmivaiheisella vaihtojännitteellä, voidaan laskea kaavalla 12 ja suhteellinen jännitteen alenema saadaan kaavalla 13. (Tiainen 2010, 111.)

$$\Delta U = I \cdot s \cdot \sqrt{3} (r \cos \varphi + x \sin \varphi) \quad (12)$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 \% \quad (13)$$

missä:

ΔU = jännitteenalenema

I = kuormitusvirta (A)

s = johdonpituus (m)

r = ominaisresistanssi (Ω/m)

x = ominaisreaktanssi (Ω/m)

U_n = nimellisjännite

φ = jännitteen ja virran välinen vaihekulma

Δu = suhteellinen jännitteenalenema

3.6 Oikosulkukestoisuus

Terminen oikosulkukestoisuus määräytyy kaapelin eristyksen lämmönkestävyyden ja johtimen lämpenemisen perusteella. Johtimille on kokemusperäisesti määritelty suurimmat sallitut oikosulkulämpötilat, jotta eristys ei lämmön vuoksi pehmenisi liikaa tai heikkenisi sähköisesti tai mekaanisesti useidenkaan oikosulkujen vaikutuksesta. Oikosulussa johtimen lämpötilaan vaikuttaa monta muuttujaa, kuten johdinaine, poikkipinta, lämmön diffuusio eristykseen, oikosulkuvirran ekvivalenttinen tehollisarvo ja oikosulun kestoaika. Kaapelien valmistajat ilmoittavat usein kaapelin suurimman sallitun 1 sekunnin oikosulkukestoisuuden. Tällä tarkoitetaan virtaa, joka nostaa kaapelin lämpötilan 1 sekunnin aikana kaapelin suurimmasta sallitusta normaalikäytön lämpötilasta suurimpaan sallittuun loppulämpötilaan oikosulussa eli oikosulkulämpötilaan. (Voimakaapelien valinta ja asennus 1978, 34-35.)

Dynaaminen oikosulkurasitus on suurimmillaan suurten voima-asemien ja kantaverkon läheisyydessä. Kaapelit ja varusteet ovat siis kovan mekaanisen rasituksen alaisina oikosulkuhetkellä. Tämä koskee erityisesti suurvirtajärjestelmiä. Sysäysoikosulkuvirta on oikosulkuhetkellä noin 2,5 kertaa alkuoikosulkuvirta.

(ABB ttt-käsikirja 19. sähköjohtojen mitoittaminen, 4.)

3.7 Mekaaninen kestoisuus

Kaapelin mekaaniseen kestoisuuteen vaikuttaa kaapelin käyttötapa. Se voi aiheuttaa kulumista, hankauksesta ja viilloista johtuen. Kaapeleita voidaan testata erilaisilla testeillä kuten hankaustesti, vetolujuustesti ja viillonkestotesti. Taivutusten määrän kesto voidaan testata ja kaapelia voidaan vetää rullien läpi ja testata sen kestoisuutta. Kaapelien välisistä eroista tiedetään ainakin omakohtaisen kokemuksen perusteella Sandvikilla, että PUR kaapelin ominaisuudet, kuten viillonkestävyys ja vetolujuus, ovat parempia kuin kumikaapelilla. (Niemi, T. Haastattelu 27.3.2013.)

3.8 Paloturvallisuus

Kaapeleiden palosuojaus jakaa kaapelit kahteen ryhmään. Paloturvalliset kaapelit jaetaan palonkestäviin kaapeleihin ja kaapeleihin, jotka ovat sammuvat itsestään. Itsestään sammuvat kaapelit jaetaan yksittäisenä itsestään sammuviin ja nippuna itsestään sammuviin. Yksittäisenä itsestään sammuvan kaapelin tulee täyttää IEC 60332-1- standardin mukainen yksittäisen kaapelin polttokoe. Nippuna itsestään sammuvaksi luokitellun kaapelin täytyy olla läpäissyt IEC 60332-3 – standardin nippupolttokoe. (Virtanen 2012, 25.)

Kaapelin eriste- ja vaippamateriaaleista syntyy pääasiassa kaapelien palokuorma. On melko epätavallista, että johdin materiaali palaisi, mutta sekin on mahdollista hyvin korkeassa lämpötilassa. Alumiinin palaminen on periaatteessa mahdollista ja sillä onkin kuparia paljon alempi sulamispiste. Alumiinin sulamispiste on noin 660 °C, kun kuparilla se on noin 1080 °C. Palokuorma kaapeleilla muodostuu siis pääasiassa eriste- ja vaippamateriaaleista, jotka ovat pääsääntöisesti muovi- tai kumiperäisiä. Kun halutaan, ettei palaessa synny myrkyllisiä kaasuja on syytä valita halogeeniton kaapeli. Halogeeni nimi tarkoittaa suolanmuodostajaa ja palaessaan halogeenikaapeli muodostaa mm. suolahappoa ilmankosteuden vaikutuksesta. (Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta 2012, 43.)

Kaapelipalolle voi olla monia syitä kuten kaapelin kohdistuva liian suuri ylikuormitus, joka oikeanlaisella kaapelin mitoituksella ja suojauksella estetään. Kaapelissa voi myös olla eristysvika, mikä voi johtua kaapelin eristysmateriaalin vanhentumisesta, valmistusvirheestä kaapelissa, mekaanisesta vauriosta, kemikaalien aiheuttamasta vauriosta, säteilystä (auringon UV-säteily) tai korroosiosta. Liian korkeat käyttö- ja ympäristölämpötilat voivat aiheuttaa kaapelin eristysvian, mutta nämä huomioimalla oikein mitoitusvaiheessa ei ongelmaa pitäisi syntyä. Kaapelin huonot liitokset voivat olla myös syynä kaapelipaloon. Liitosongelmia syntyy varsinkin liikuteltavissa kaapeleissa. (Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta 2012, 44-45.)

Kaapelipalojen ennalta ehkäisyn kannalta tärkeintä on, hyvin suunnitellut suojalaitteet eristysvikojen ja ylikuormituksen takia. Vian automaattinen poiskytkentä pitää toimia ennen kuin viasta aiheutuu vaaraa. (Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta 2012, 46.)

4 RUMPUKAAPELIN SUOJAUS

4.1 Yleistä

Maanalaisen porauslaitteen vika- ja ylivirtasuojaus on tärkeää tarkastella huolellisesti kaapelin mitoituksen yhteydessä. Oikosulku-, ylikuormitus- ja kosketusjännitesuojaukset ovat suojauksen kannalta erittäin oleellisia asioita.

Porauslaitteen maadoitus tapahtuu syöttökaapelin suojajohtimen kautta sen liitäntäpisteeseen. Syöttökaapelin pituus voi olla jopa 150-200 metriä.

4.2 Oikosulkusuojaus

Oikosulku on pieni-impedanssinen vika eri potentiaalissa olevien jännitteisten osien välillä. Oikosulkuvirta on huomattavasti ylikuormitusvirtaa suurempi ja tämän takia suojalaitteen täytyy toimia erittäin nopeasti. Oikosulkusuojan täytyy olla aina syötönpäässä, kun joissakin tapauksissa ylikuormitussuoja voi olla kuorman päässä. Oikosulkusuojan nimellisarvo voi olla suurempi kuin johdon kuormitettavuus. Oikosulkusuojalla on varustettava kaikki virtapiirit. Käyttöönottotarkastuksissa ei ole mittaavaa vaatimusta oikosulkusuojauksen toimivuudelle, joten oikosulkusuojan toimivuus tulee tarkastaa suunnitteluvaiheessa. Suojalaitteen katkaisukyky ei saa olla pienempi kuin suojalaitteen asennuspaikalla esiintyvä suurin oikosulkuvirta, paitsi jos suojalaitteen syöttöpuolella on toinen suojalaite jonka katkaisukyky riittää. (Tiainen 2010, 65.)

Virtapiirin missä tahansa kohdassa sijaitsevat oikosulkuvirrat on katkaistava viimeistään silloin, kun johtimet saavuttavat suurimman sallitun rajalämpötilan. Kaavalla 14 voidaan laskea aika t , jonka kuluessa johtimen lämpötila nousee sallittuun rajalämpötilaan, enintään 5 s kestävässä oikosulussa. Kaavassa 14 käytettävät kertoimen k arvot löytyvät taulukosta 5. Ennen oikosulkua johtimen oletetaan olevan suurimmassa sallitussa käyttölämpötilassa. (SFS 600 2007, 166.)

$$\sqrt{t} = k \cdot \frac{S}{I} \quad (14)$$

missä:

t = kesto aika sekunteina

S = johtimen poikkipinta (mm²)

I = tehollinen oikosulkuvirta (A) tehollisarvona (r.m.s)

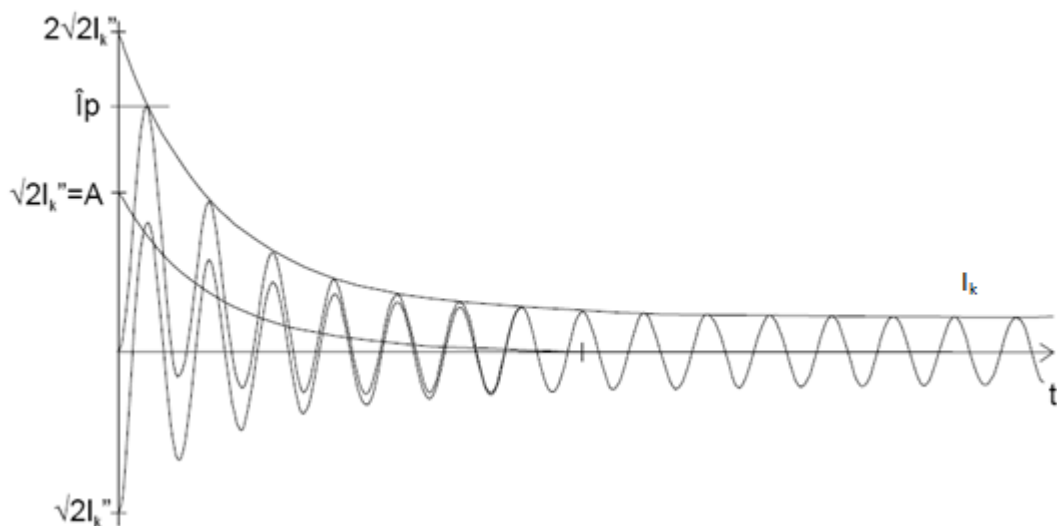
k = kerroin, joka ottaa huomioon johdinmateriaalin resistiivisyyden, lämpötilakertoimen ja lämmönvarauskyvyn sekä sopivat alku- ja loppulämpötilat. Vaihejohtimien kertoimen k arvot normaalisti käytetyille eristemateriaaleille on annettu seuraavassa taulukossa.

TAULUKKO 5. Kertoimen k arvot vaihejohtimille (SFS 600 2007, 166)

	PVC ≤ 300mm ²	PVC > 300mm ²	EPR/PEX	Kumi 60 °C	Mineraali	
					PVC:llä päällystetty	Paljas
Alkulämpötila °C	70	70	90	60	70	105
Loppulämpötila °C	160	140	250	200	160	250
Johtimen materiaali						
Kupari	115	103	143	141	115	135/115 ^a
Alumiini	76	68	94	93	-	-
Tinalla juotetut kuparijohtimien liitokset	115	-	-	-	-	-
^a Tätä arvoa käytetään koskettavissa oleville paljaille kaapeleille HUOM. 1 Muut kertoimen k arvot ovat harkittavana erityisesti seuraaviin tapauksiin: -pienet johtimet (erityisesti alle 10mm ² johtimen poikkipinnoilla) -oikosulun kesto aika ylittää 5 s -paljaat johtimet HUOM. 2 Oikosulkusuojalaitteen mitoitusvirta voi olla suurempi kuin johdon kuormitettavuus. HUOM. 3 Yllä olevat arvot perustuvat standardiin IEC 60724.						

Kuviosta 9 selviää oikosulkuvirran käyrämuoto. ABB:n TTT-käsikirjassa on selkeästi kuvailtu oikosulkuvirran komponentit ja niiden vaikutus.

Oikosulkuvirrassa on vaimeneva tasavirtakomponentti (A), jonka suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä ja vaimenemisnopeus piirin R / X -suhteesta, ja vaihtovirtakomponentti, jossa voi myös olla vaimeneva osa. Alkuoikosulkuvirta I''_k on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. Se vastaa generaattoreiden reaktansseja vian syntyhetkellä. Vian aikana reaktanssit kasvavat ja virta vaimenee jatkuvuustilan arvoon I_k . Oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo, kun otetaan huomioon myös tasavirtakomponentti, on ns. sysäysoikosulkuvirtaa i_p . Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla I_{th} on sama virtateitä lämmittävä vaikutus, kuin oikosulkuvirralla. Useissa yhteyksissä käytettyä muutostilan oikosulkuvirtaa I'_k IEC-standardit eivät käytä. Katkaisuvirta I_b on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo katkaisijan aloittaessa katkaisun. (TTT-käsikirja 2000. Oikosulkusuojaus, 1.)



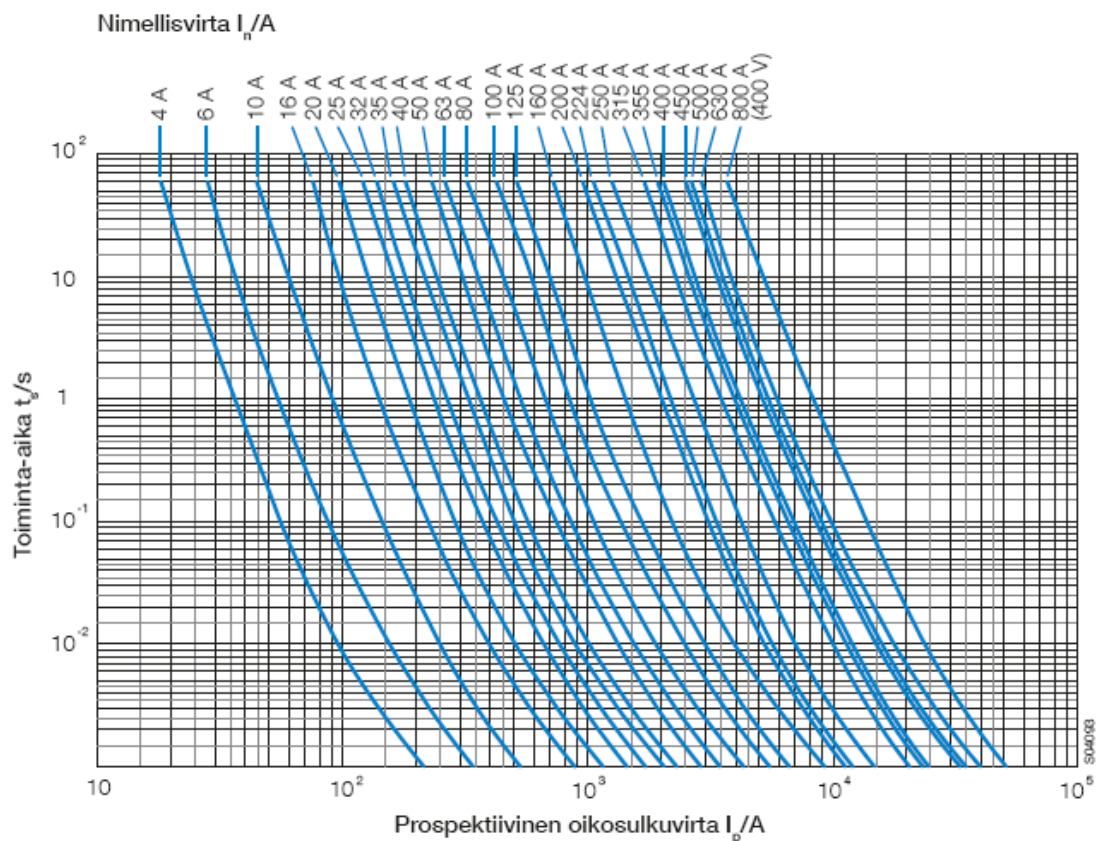
KUVIO 9. Oikosulkuvirran käyrämuoto (TTT-käsikirja 2000. Oikosulkusuojaus, 1)

4.2.1 Suojalaitteet

Oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi sulakkeellisella suojauksella. Sulakkeilla on erilaisia katkaisualueita ja käyttöluokkia, näitä kuvataan sulakkeiden kirjaintunnuksilla. Kirjaintunnuksen ensimmäinen kirjain kuvaa katkaisualuetta. Ensimmäinen kirjain on joko g tai a. Kun sulakkeen katkaisukyky käsittää koko virta-alueen käytetään merkintää g, jos taas sulakkeen katkaisukyky käsittää tietyn osa-alueen käytetään merkintää a. Toinen kirjain tarkoittaa sulakkeen käyttöluokkaa. Johdon

suojaukseen tarkoitettu sulake merkitään toisella kirjaimella G, esimerkiksi gG tarkoittaa yleiskäyttöön tarkoitettua sulaketta, jonka katkaisukyky käsittää koko virta-alueen. Toinen kirjain voi olla myös M, joka merkitsee moottorin suojaukseen tarkoitettua sulaketta. Yleinen moottoreille käytetty sulake on aM-sulake, joka on moottoripiirin suojasulake, jonka katkaisukyky käsittää virran tietyn osa-alueen. Sulakkeita on kahvasulakkeita, sekä tulppasulakkeita. Tulppasulakkeiden käyttöä oikosulkusuojana rajoittaa niiden katkaisukyky. Kahvasulakkeilla katkaisukyky on vahvuus, niiden katkaisukyky on vähintään 50 kA. 500 V tulppasulakkeilla katkaisukyky on standardin mukaisesti 20 kA. (Tianen 2010, 70.)

Kuvio 10 on esimerkki kahvasulakkeen virta-aikakäyrästä. Kun on määritetty oikosulkuvirran suuruus laskemalla, valitaan suojalaite alla olevalta esimerkikikäyrältä. Asteikko on logaritminen, jotta käyrästä olisi mahdollisimman helppo tulkita.



KUVIO 10. aM kahvasulake virta-aikakäyrä (ABB HRC-fuse links gG and aM, 22)

4.3 Oikosulkulaskenta

Oikosulkulaskennassa on erityisen tärkeää mitoituksessa selvittää pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta, koska syötön nopea poiskytkentä on tapahduttava sen vaikutuksesta määrättyssä ajassa pienjänniteverkoissa. Pienin oikosulkuvirta esiintyy suojalaitteesta kaukaisimmassa päässä. Suurimman oikosulkuvirran selvittäminen on myös tärkeää, koska sillä varmistetaan, että suojalaite pystyy katkaisemaan oikosulkuvirran. Suurin oikosulkuvirta esiintyy välittömästi suojalaitteen jälkeen. (Tiainen 2010, 75.)

Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla 15 (Peijariniemi 2007, 13).

$$I_{k1v} = \frac{3 U_v}{\sqrt{(2 R_m + R_{m0} + 3L(R_v + R_0))^2 + (2 X_m + X_{m0} + L(2X_v + X_{v0} + 3X_0))^2}} \quad (15)$$

missä:

U_v = Verkon vaihejännite

R_m = muuntajan oikosulkuresistanssi (Ω)

X_m = muuntajan oikosulkureaktanssi (Ω)

R_{m0} = muuntajan nolaresistanssi (Ω)

X_{m0} = muuntajan nolareaktanssi (Ω)

R_v = vaihejohtimen resistanssi (Ω/km)

X_v = vaihejohtimen myötäreaktanssi (Ω/km)

X_{v0} = vaihejohtimen nolareaktanssi (Ω/km)

R_0 = nolajohtimen resistanssi (Ω/km)

X_0 = nolajohtimen vaihereaktanssi (Ω/km)

L = johdon pituus (km)

Eri oikosulkutyypin tarkassa laskennassa tulee esille totutun myötäkomponenttiverkon impedanssin lisäksi vastakomponenttiverkon impedanssi ja nollakomponenttiverkon impedanssi. Kaukana generaattoreista myötä- ja vastakomponenttiverkon impedanssit ovat käytännössä yhtä suuret. Tämän takia laskettaessa oikosulkuvirtoja poralaitteille käytetään kaavoja, joiden oletuksena on laitteen suuri etäisyys generaattoreille.

4.3.1 Symmetrinen kolmivaiheinen oikosulku

Seuraavaksi esitettyjen oikosulkulaskentakaavojen termit on selitetty seuraavassa listassa.

Z_k = oikosulkuimpedanssi

R_k = oikosulkuresistanssi

X_k = oikosulkureaktanssi

$\underline{Z}_{(1)}$ = myötäkomponenttiverkon impedanssi

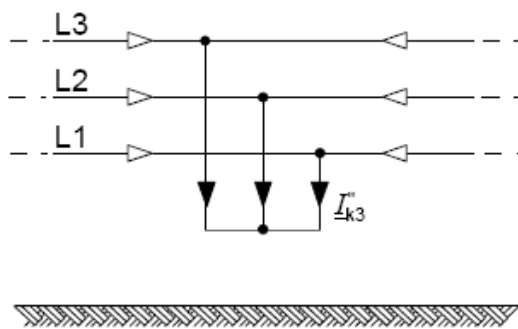
$\underline{Z}_{(2)}$ = vastakomponenttiverkon impedanssi

$\underline{Z}_{(0)}$ = nollakomponenttiverkon impedanssi

U_n = nimellisjännite

c = jännitekerroin

Kuvio 11 havainnollistaa symmetristä 3-vaiheista oikosulkutilannetta.



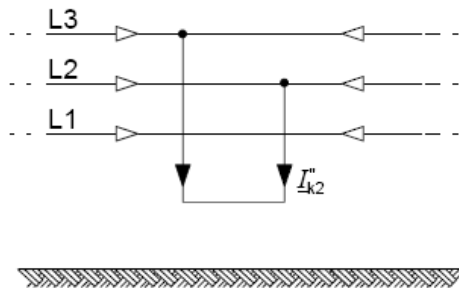
KUVIO 11. Symmetrinen kolmivaiheinen oikosulku (IEC 60909-0 2001, 39)

Kaava 12 on symmetrisen 3-vaiheisen oikosulkuvirran laskentakaava. (IEC 60909-0 2001, 83.)

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (12)$$

4.3.2 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheinen oikosulku on oikosulku kahden vaiheen välillä. Kuvio 12 havainnollistaa kaksivaiheista oikosulku.



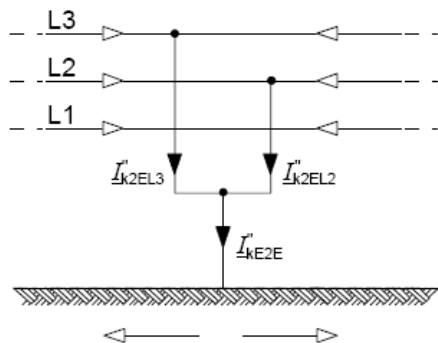
KUVIO 12. Kaksivaiheinen oikosulku (IEC 60909-0 2001, 39)

Oikosulkuvirran alkuvaiheessa vastaverkon impedanssi on suunnilleen yhtä iso kuin myötäverkon impedanssi, riippumatta siitä onko oikosulku lähellä generaattoreita vai ei. Jos oikosulkuvirta on jo tasoittuneessa jatkuvassa tilassa ja lähellä generaattoreita $Z_{(1)}$ ja $Z_{(2)}$ impedanssit eivät ole yhtä suuria. Kaavasta 13 on kaksivaiheisen oikosulun laskenta kaava. (IEC 60909-0 2001, 95.)

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|Z_{(2)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k'' \quad (13)$$

4.3.3 Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella

Alla on esitetty havainnollistava kuva kaksivaiheisesta oikosulusta maakosketuksella.



KUVIO 13. Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella (IEC 60909-0 2001, 39)

Seuraavaksi on esitetty esimerkkikuvan kaksivaiheisen oikosulun maakosketuksella vaiheen kaksi oikosulkuvirran osan laskentakaava.

$$I_{k2EL2}'' = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a} \underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (14)$$

Seuraavaksi on esitetty esimerkkikuvan kaksivaiheisen oikosulun maakosketuksella vaiheen kolme oikosulkuvirran osan laskentakaava.

$$I_{k2EL2}'' = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - \underline{a}^2 \underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (15)$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta maakosketuksella lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$I_{kE2E}'' = - \frac{\sqrt{3} c U_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (16)$$

Kaukana generaattoreista $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, laskenta kaavat muuttuvat seuraaviin muotoihin.

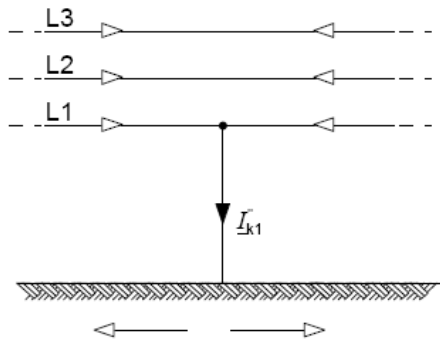
$$I_{k2EL2}'' = cU_n \frac{\left| \frac{\underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(1)}} - \underline{a} \right|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} \quad (17)$$

$$I_{k2EL3}'' = cU_n \frac{\left| \frac{\underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(1)}} - \underline{a}^2 \right|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} \quad (18)$$

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (19)$$

4.3.4 Yksivaiheinen oikosulku

Alla on esitetty havainnollistava kuva yksivaiheisesta oikosulusta.



KUVIO 14. Yksivaiheinen oikosulku (IEC 60909-0 2001, 39)

Yksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan seuraavalla kaavalla 20. Kaukana generaattoreista, laskenta kaava muuttuu seuraavaan muotoon 21. (IEC 60909-0 2001, 101.)

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (20)$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2Z_{(1)} + Z_{(0)}|} \quad (21)$$

4.4 Ylikuormitussuojaus

Johdinta ylikuormitukselta suojaavan laitteen on täytettävä tietyt ehdot. Käytännössä suojalaitteen mitoitusvirran tulee olla suurempi kuin virran, joka on arvioitu kulkevan johtimessa. Johtimen kuormitettavuuden tulee olla suurempi kuin suojalaitteen mitoitusvirran. Virran jolla suojalaite toimii tavanomaisessa ajassa, tulee olla pienempi kuin 1,45 kertaa johdon suurin sallittu kuormitusvirta, niissä olosuhteissa missä johto on. Kaapelin oikea suojaaminen edellyttää, että kaapelia ylikuormitukselta suojaavan laitteen toimintaominaisuudet täyttävät kaksi seuraavaa ehtoa. (SFS-EN 60204-1 2006, 190.)

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (22)$$

$$I_2 < 1,45 \cdot I_z \quad (23)$$

missä:

I_b = virtapiirin mitoitusvirta

I_n = suojalaitteen mitoitusvirta

I_z = on johtimen jatkuva kuormitettavuus

I_2 = virta, joka varmistaa suojalaitteen toimimisen suojalaitteelle määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa (valmistajalta)

4.5 Kosketusjännitesuojaus

Kosketusjännitesuojaukseen on tietyt ehdot mitkä määrittellään jännitteen ja ajan suhteen. Varsinkin maanalaisten porauslaitteiden kohdalla kosketusjännitteen tarkastelu on tärkeää, koska kone on maadoitettu rumpukaapelin liittymispisteeseen. Tällä tarkoitetaan pistettä joka voi olla esimerkiksi 100 metrin päässä laitteesta ja tuon pisteen luona on suojaus, joka katkaisee vikavirran. Poralaitteen maahan on käytännössä kelluva, koska laite ei ole suoraan maadoitettu siltä kohtaa missä se on. Käytännössä kosketusjännitesuojaus toimii seuraavalla tavalla. Kun vaihejohtimeen tulee eristysvika, suojajohdin toimii paluujohtimena ja syntyy yksivaiheinen oikosulku. Syöttävän sähköverkon on silloin kyettävä tuottamaan tarpeeksi suuri oikosulkuvirta, että taulukon 6 mukaiset ehdot täyttyvät. (SFS-EN 60204-1 2006, 170.)

TAULUKKO 6. Poiskytkentäehdot (SFS-EN 60204-1 2006, 170)

$U_0^a)$ V	Poiskytkentäaika s
120	0,8
230	0,4
277	0,4
400	0,2
> 400	0,1

^{a)} U_0 on vaihtojännitteen nimellisarvo (r.m.s.) maahan.
 HUOM. 1 Jännitteisiin, jotka ovat standardissa IEC 60038 ilmoitettujen toleranssien sisällä, sovelletaan sopivan nimellijännitteen poiskytkentäaika.
 HUOM. 2 Välissä olevilla jännitteillä sovelletaan seuraavaksi suuremman jännitteen mukaista arvoa.

5 MITOITUSOHJELMAN RAKENNE

Ohjelman mitoittaa rumpukaapelin porauslaitteelle. Ohjelma koostuu sijoitusarvoista ja laskennasta. Se on pyritty tekemään käytettävyydeltään mahdollisimman helpoksi käyttäjälle.

5.1 Syötettävät parametrit

Ohjelmaan syötetään seuraavat parametrit

1. Koneen antoteho eli akseliteho. Merkitään ohjelmassa suureen tunnuksella P_{mek} .
2. Hyötysuhde joka merkitään tunnuksella η , sen arvo on väliltä 0 ... 1.
3. Tehokerroin jonka tunnus on $\cos \varphi$.
4. Pääjännite joka ohjelmassa määritellään suureen tunnuksella U_n .
5. Taajuus.
6. Ympäristön lämpötila.
7. Rumputyyppi.
8. Haluttu kaapelin pituus.

5.2 Laskentakaavat

Ohjelman laskenta lähtee liikkeelle sähköisen tehon P_s laskennasta, joka on siis ottoteho. Lasketaan kaavalla 24 (Hietalahti 2011, 130).

$$P_s = \frac{P_{mek}}{\eta} \quad (24)$$

missä:

P_s = sähköinen teho

P_{mek} = mekaaninen teho

η = hyötysuhde

Tämän jälkeen ohjelma laskee koneen ottaman nimellisvirran I_n . Nimellisvirta tarkoittaa siis yhden vaiheen ottamaa virtaa. Lasketaan kaavalla 25 (Hietalahti 2011, 126).

$$I_n = \frac{P_s}{U_n \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}} \quad (25)$$

missä:

I_n = nimellinen virta

U_n = pääjännite

P_s = sähköinen teho

Ohjelma laskee myös koneen ottaman näennäistehon ja loistehon. Näennäisteho saadaan kaavalla 1. Loisteho lasketaan kaavalla 4, kaavaan tarvittavan $\sin \varphi$ arvon ohjelma laskee syötetystä $\cos \varphi$ arvosta.

Kolmivaiheisen vaihtojännitteen jännitteen aleneman ohjelma laskee kaavalla 12. Kaavassa käytetään plus-merkkiä induktiivisella kuormalla ja miinusmerkkiä kapasitiivisella kuormalla. Ohjelmassa kuorma oletetaan induktiiviseksi, koska koneen kuluttama teho muodostuu pääasiassa sähkömoottoreiden tehojen summasta eli käytetään plus-merkkiä. Suhteellinen jännitteen alenema saadaan kaavalla 13.

5.3 Ohjelma

Ohjelma lähtee liikkeelle parametrien syötöstä. Ohjelmaan voi syöttää koko mekaanisen tehon kerrallaan keskitettyihin parametreihin tai sen voi syöttää tehosarake kohtaisesti (kuvio 15).

Sijoitusarvot		
Powerpack		
Määrä	1- s / kpl	3
Nimellisteho	Pmek (kW)	45
Hyötysuhde	η	0,90
Tehokerroin	cos fii	0,90
Moottorin ottama teho	Ps (kW)	150
Moottorin ottama virta	I (kA)	0,14
Näennäisteho	S (kVA)	167
Loisteho	Q (kVAR)	73
OPTIO		
Vesipumppu		
Nimellisteho	Pmek (kW)	5
Hyötysuhde	η	0,95
Tehokerroin	cos fii	0,95
Moottorin ottama teho	Ps (kW)	5
Moottorin ottama virta	I (kA)	0,005
Näennäisteho	S (kVA)	6
Loisteho	Q (kVAR)	2
OPTIO		
Kompressori		
Nimellisteho	Pmek (kW)	10
Hyötysuhde	η	0,90
Tehokerroin	cos fii	0,90
Moottorin ottama teho	Ps (kW)	11
Moottorin ottama virta	I (kA)	0,01
Näennäisteho	S (kVA)	12
Loisteho	Q (kVAR)	5
OPTIO		
Moottori		
Nimellisteho	Pmek (kW)	30
Hyötysuhde	η	0,90
Tehokerroin	cos fii	0,84
Moottorin ottama teho	Ps (kW)	33
Moottorin ottama virta	I (kA)	0,03
Näennäisteho	S (kVA)	40
Loisteho	Q (kVAR)	22
OPTIO		
Moottori		
Nimellisteho	Pmek (kW)	20
Hyötysuhde	η	0,90
Tehokerroin	cos fii	0,90
Moottorin ottama teho	Ps (kW)	22
Moottorin ottama virta	I (kA)	0,02
Näennäisteho	S (kVA)	25
Loisteho	Q (kVAR)	11
OPTIO		
OPTIO		
OPTIO		
Muu teho		
Nimellisteho	Pmek (kW)	3
Hyötysuhde	η	0,9
Tehokerroin	cos fii	0,9
Sähköinen teho	Ps (kW)	3
virta	I (kA)	0,00
Näennäisteho	S (kVA)	4
Loisteho	Q (kVAR)	2
OPTIO		

KUVIO 15. Tarkka tehonsyöttö

Tarkalla tehonsyötöllä ohjelma laskee sarakekohtaiset tehoarvot. Ohjelmasta voi myös valita laitteen nimen alasvetovalikosta ja ohjelma antaa laitteelle tehon ja rumputyyppin.

Sijoitusarvot		
Laitteen tyyppi		DT820-SC / 180kW / TCR 5E
Laitteen teho	P (kW)	180
Laitteen rumputyyppi		TCR 5E

KUVIO 16. Laitteen tyyppi

Seuraavaksi on kaksi tapaa toimia, jos on valinnut tehot sarakekohtaisesti, täytetään hyötysuhde ja tehokerroin tiedot myös sarakekohtaisesti. Jos on syöttänyt koko tehon tai valinnut laitteen ja saanut sitä kautta tehon, syötetään tehokerroin ja hyötysuhde keskitettyihin parametreihin (kuvio17). Pääjännite ja taajuus syötetään aina keskitettyihin parametreihin. Käyttämällä mitä tehojen syöttökeinoa tahansa ohjelma laskee keskitettyihin parametreihin laitteen ottaman kokonaistehon, -virran, -näennäistehon, -loistehon ja tehokertoimen (kuvio 19).

Keskitetyt parametrit		
Nimellisteho	Pmek (kW)	
Tehokerroin	cos fii	
Hyötysuhde	η	
Pääjännite	Un (V)	690
Taajuus	f (Hz)	50
Sähköinen teho	Ps (kW)	225,3
Laitteen ottama virta	I (A)	211,4
Kokonais näennäisteho	S (kVA)	252,6
kokonais loisteho	Q (kVAR)	114,4
Tehokerroin	cos fii	0,9
Rumputyyppi		TCR 5
haluttu kaapelin pituus	m	150
Ympäristönlämpötila	°C	50
Korjauskerroin		0,9
PUR kaapelia mahtuu rummulle	m	293,6
RUBBER kaapelia mahtuu rummulle	m	234,5
PUR kaapelin ilmavälien % osuus rummulla		29,1
Rubber kaapelien ilmavälien % osuus rummulla		29,0

KUVIO 17. Keskitetyt parametrit

Tehoarvoissa ja virrassa on käytetty soluissa väriskaalausta (kuvio 18). Esimerkiksi tehokertoimessa väriskaalaus on toteutettu numeerisilla arvoilla 0,5 – 1 . Arvo 0,5 on punainen ja arvo 1 on valkoinen.

KUVIO. 18 Väriskaalaus

Sähköinen teho	P_s (kW)	225,3
Laitteen ottama virta	I (A)	211,4
Kokonais näennäisteho	S (kVA)	252,6
kokonais loisteho	Q (kVAR)	114,4
Tehokerroin	cos fii	0,9

KUVIO 19. Teho arvot

Tämän jälkeen valitaan alavetovalikosta porauslaitteelle kaapelirumputyyppi, haluttu kaapelin pituus ja korjauskertoimeen vaikuttava ympäristönlämpötila. Tämän jälkeen ohjelma ilmoittaa seuraavat arvot (kuvio 20).

Korjauskerroin		0,9
PUR kaapelia mahtuu rummulle	m	293,6
RUBBER kaapelia mahtuu rummulle	m	234,5
PUR kaapelin ilmavälien % osuus rummulla		29,1
Rubber kaapelien ilmavälien % osuus rummulla		29,0

KUVIO 20. Laskenta-arvoja

5.4 Tarkistukset

Osio tarkistukset ovat osa laskentaa, mutta se on osio joka tekee kaapelin mitoituksen kannalta tärkeimmän työn. Tarkistusosio sisältää kolme ohjelmakiertoa. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjelma yrittää mitoitusta maksimissaan kolme kertaa. Ensiksi ohjelma yrittää mitoitusta kaapelilla, jonka kuormitettavuus on suurempi kuin nimellisvirta, mutta kuormitettavuus on kuitenkin lähimpänä nimellisvirtaa kaikista kaapeleista. Ohjelmaa voisi toistaa loputtomiin, mutta jo se, että kaapelin mitoitus onnistuu vasta kolmannella ohjelma kierrolla tarkoittaa, että kaapelin ylimitoituksen riski kasvaa selkeästi.

Tarkistuslaskenta on pyritty tekemään mahdollisimman yksinkertaiseksi ja selkeäksi ehdoiltaan. Koko tarkistusosio sisältää 12 solua. Tarkistuksen voi vielä luokitella kolmeen 4 solun osaan. Seuraavaksi on selitetty solujen sisältö.

1. Kaapelin 1 kuormitettavuus

Soluun haetaan kaapeli, jonka kuormitettavuus on suurempi kuin koneen laskettu nimellisvirta. Kaapeli on kuormitettavuudeltaan lähimpänä nimellisvirtaa.

2. Korjattu kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuutta kerrotaan korjauskertoimilla.

3. Testi 1

Testataan onko korjattu kaapelin kuormitettavuus suurempi kuin porauslaitteen ottama nimellinen virta. Solu saa testin myötä arvon TRUE tai FALSE.

4. Kaapeli

Jos edellisen solun arvo on TRUE, tähän soluun tulee kaapelin nimi esim. 3x50 + 3x10.

5. Kaapelin 2 kuormitettavuus

Jos testin 1 arvo on false alkaa uusi mitoituskierros ja tähän soluun haetaan edellistä haettua kaapelia seuraavaksi suurempi kaapelin kuormitettavuusarvo.

6. Korjattu kuormitettavuus

Jos testin 1 arvo on false edelliseen soluun haettua kaapelin kuormitettavuutta kerrotaan korjauskertoimilla.

7. Testi 2

Jos testin 1 arvo on false, testataan onko edellisen solun korjattu kaapelin kuormitettavuus suurempi kuin porauslaitteen ottama nimellinen virta. Solu saa testin myötä arvon TRUE tai FALSE.

8. Kaapeli 2

Jos edellisen solun arvo on TRUE, tähän soluun tulee mitoitettun kaapelin 2 nimi.

9. Kaapelin 3 kuormitettavuus

Jos testin 2 arvo on false alkaa uusi mitoituskierrös ja tähän soluun haetaan edellistä haettua kaapelia seuraavaksi suurempi kaapelin kuormitettavuusarvo.

10. Korjattu kuormitettavuus

Jos testin 2 arvo on false edelliseen soluun haettua kaapelin kuormitettavuutta kerrotaan korjauskertoimilla.

11. Testi 3

Jos testin 2 arvo on false, testataan onko edellisen solun korjattu kaapelin kuormitettavuus suurempi kuin porauslaitteen ottama nimellinen virta. Solu saa testin myötä arvon TRUE tai FALSE.

12. Kaapeli 3

Jos edellisen solun arvo on TRUE, tähän soluun tulee mitoitettun kaapelin 3 nimi.

5.5 Kaapelien valinnat

Ohjelma ilmoittaa erikseen kaapelien valinnat PUR kaapeleille ja RUBBER kaapeleille. Valittuaan kaapelin ohjelma tuo nimen lisäksi tuloksiin kaapelin resistanssi- ja induktanssiarvon. Ohjelma ei kuitenkaan esitä induktanssiarvoa, vaan käyttää laskennassa apuna syötettyä taajuusparametria ja esittää reaktanssiarvon kaapelille. Tämän jälkeen ohjelma laskee kaapelin resistanssi- ja reaktanssiarvoista kaapelin kokonaisresistanssi- ja kokonaisreaktanssiarvot, sekä kaapelin kokonaisimpedanssin. Sen jälkeen vuorossa on kaapelin jännitehäviöiden laskenta. Kaapelille on määritelty 3% jännitteenalenemäraja, joten ohjelma laskee kyseisellä jännitteenalenemalla kaapelin maksimipituuden. Ohjelma laskee myös suojajohtimen arvot. Suojajohtimen arvot on tärkeää määrittää silloin kun johdin on jaettu, kuten esimerkin PUR kaapelilla. Teoriaosuuden kaapelin sähköiset ominaisuudet osiossa on kerrottu, että jaetun suojajohtimen reaktanssi arvo on noin kaksi kertaa vaihejohtimen reaktanssiarvo. Suojajohtimen resistanssiarvo myös eroaa vaihejohtimesta, koska sen kokonaispoikkipinta-ala eroaa vaihejohtimen kokonaispoikkipinta-alasta. Suojajohtimen arvoja voidaan myöhemmin hyödyntää oikosulkulaskennassa, missä niitä käytetään kaapelin nollaimpedanssiarvoina.

PUR		
Kaapeli		3x95 + 3x16
vaihejohtimen resistanssi	R (ohm/km)	0,21
vaihejohtimen reaktanssi	X (ohm/km)	0,07
vaihejohtimen kokonaisresistanssi	R / Ω	0,04
vaihejohtimen kokonaisreaktanssi	X / Ω	0,01
vaihejohtimen kokonaisimpedanssi	Z / Ω	0,04
Kaapelin jännitehäviö	U (V)	16,00
	%	2,32
Kaapelin pituus 3% jännitehäviöllä	m	258,71
suojajohtimen reaktanssi	X (ohm/km)	0,15
suojajohtimen resistanssi	X (ohm/km)	0,35
suojajohtimen kokonaisreaktanssi	X0 / Ω	0,03
suojajohtimen kokonaisresistanssi	R0 / Ω	0,07
suojajohtimen kokonaisimpedanssi	Z0 / Ω	0,08

KUVIO 21. Mitoitettu kaapeli

Ohjelmaan on tehty myös mahdollisuus valita itse alusvetovalikosta kaapeli. Aikaisemmin esiteltyjen ominaisuuksien lisäksi omavalintaiselle kaapelille esitetään erikseen kaksi lisätietoa. Nämä ovat, paljonko kaapelia mahtuu rummulle ja kaapelin korjattu kuormitusvirta. Korjatulla kuormitusvirralla voi tehdä itse vertailuja laitteen nimelliseen virtaan.

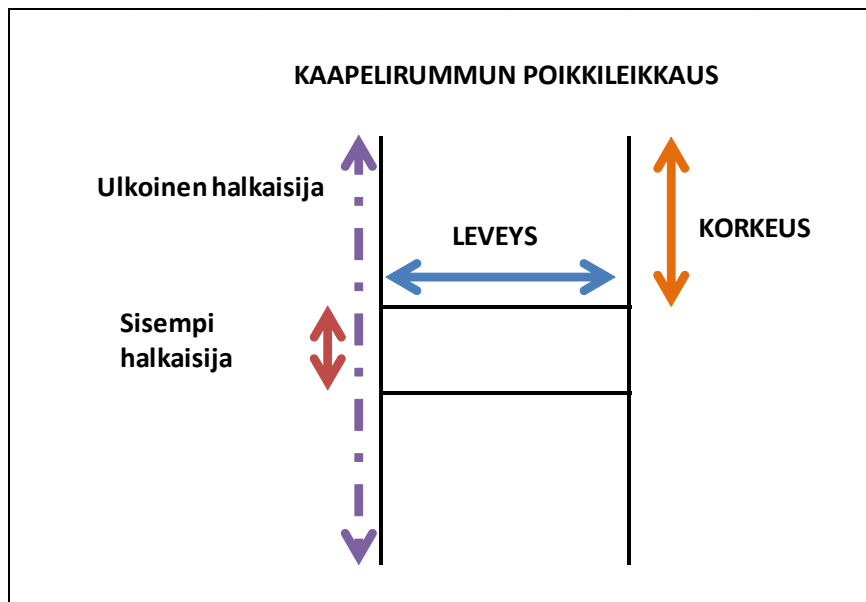
Kaapeli		3x95 + 3x16
vaihejohtimen resistanssi	R (ohm/km)	0,21
vaihejohtimen reaktanssi	X (ohm/km)	0,07
vaihejohtimen kokonaisresistanssi	R / Ω	0,042
vaihejohtimen kokonaisreaktanssi	X / Ω	0,014
vaihejohtimen kokonaisimpedanssi	Z / Ω	0,04
Kaapelin jännitehäviö	U (V)	16,00
	%	2,32
Kaapelin pituus 3% jännitehäviöllä	m	258,71
Kaapelia mahtuu rummulle	m	293,60
Kaapelin korjattu kuormitusvirta	I (A)	240,75
suojaohjtimen reaktanssi	X (ohm/km)	0,15
suojaohjtimen resistanssi	R (ohm/km)	0,35
suojaohjtimen kokonaisreaktanssi	X_0 / Ω	0,03
suojaohjtimen kokonaisresistanssi	R_0 / Ω	0,07
suojaohjtimen kokonaisimpedanssi	Z_0 / Ω	0,08

KUVIO 22. Omavalintainen kaapeli

5.6 Rummulle mahtuvan kaapelin laskenta

Ohjelmassa on osa, joka laskee rummulle mahtuvan kaapelin pituuden. Rumputyyppin valinta ohjelmassa on yksi valintaparametri. Kaapeli on ohjelman valitsema. Kaapelista ohjelma tarvitsee tiedon sen halkaisijasta pystyäkseen laskemaan rummulle mahtuvan kaapelin pituuden. Tämä tieto tulee automaattisesti pituuden laskentaan ohjelman valittua kaapelin.

Ohjelma saa parametreista tiedon rumputyyppistä kahdella tapaa. Ensimmäinen on valita kaapelirumputyyppi vetolistasta tai valita laite ja tällöin rummun valinta on automaattinen. Kaapelirumputyyppin perusteella ohjelma hakee sen mittatiedot kaapelirumputaulukosta, jotka ovat kaapelirummun leveys, ulkoinen halkaisija ja sisempi halkaisija. Ohjelma käyttää leveydestä tunnusta WIDTH, ulkoisesta halkaisijasta tunnusta OD ja sisemmästä halkaisijasta tunnusta ID.



KUVIO 23. Kaapelirummun mittoja havainnollistava kuva

Laskennan vaiheet menevät niin, että ohjelma laskee aluksi yllä olevasta kuvasta korkeuden. Tämän jälkeen ohjelma laskee korkeuteen mahtuvien kokonaisten kaapelihalkaisijoiden määrän. Seuraavaksi ohjelma laskee kaapelirummun leveyteen mahtuvien kokonaisten kaapelihalkaisijoiden määrän. Ohjelma laskee jokaiselle kaapeli kerrokselle ympyrän pituuden ja kertoo tätä yhden kierroksen pituutta vierekkäin mahtuvien kaapelin halkaisijoiden määrällä. Sitten ohjelma summaa kaikkien kaapelikerroksien pituudet yhteen.

5.7 Ilmavälien laskenta

Rummulla lämpenemään vaikuttavat ilmavälit. Mitä tiheämpään kaapeli on kelattu rummulle, sitä kautta ilmavälejä on vähemmän ja lämpenemä suurempi. Kaapelin johdinmateriaalin ja eristemateriaalien määrä rummulla kokonaisuudessaan vaikuttaa lämpenemään. Lämpenemän noustessa kuormitettavuus laskee. Mitä suurempi kaapeli on poikkipinta-alaltaan, sitä suuremmat ilmavälit kelalle jää. Ilmavälimäärän nousu ei ole kuitenkaan täysin suoraan verrannollinen kaapelin poikkipinta-alaan, koska yksi muuttuja on kaapelirummun koko. Seuraavalla laskennalla selkeytetään ilmavälien muutosta suhteessa kaapelien poikkipinta-alan kokoon. Laskenta ei ota huomioon kaapelin painaumista ja lomittain menemistä. Laskenta olettaa kaapelin olevan puolattu kaapelirummulle siististi, kaapelin menettämättä painaumasta johtuen muotoaan eli painaumasta kasaan.

Valitaan aluksi kaapelirumpu esimerkiksi mitoilla:

kaapelirummun sisempi halkaisija = 1000 mm

kaapelirummun ulkoinen halkaisija = 2000 mm

leveys = 500 mm

Valitaan kaapeli Buflex-m 3x25+3x6, jonka halkaisija on 24mm.

Ilmavälien prosentuaalinen osuus saadaan helpoiten laskettua rummun poikkileikkauksesta. Ajatellaan kaapelirummun poikkileikkaus nelikulmiona, jossa kaikki kulmat ovat 90°. Lasketaan aluksi nelikulmion korkeus (kuvio 22), mikä saadaan kaavalla 26.

$$\text{korkeus} = \frac{\text{ulkoinen halkaisija} - \text{sisempi halkaisija}}{2} \quad (26)$$

Sijoitetaan kaavaan 26 esimerkin luvut.

$$\text{korkeus} = \frac{2000\text{mm} - 1000\text{mm}}{2} = 500\text{mm}$$

Lasketaan seuraavaksi montako kaapelia mahtuu vierekkäin. Se saadaan laskettua, kun jaetaan kaapelirummun leveys kaapelin halkaisijalla ($500\text{mm} / 24\text{mm} = 20,83$).

Tulos täytyy muuttaa edelliseen pienempään kokonaislukuun, koska vain kokonaiset mahtuvat kaapelit lasketaan. Tulos on siis 20. Lasketaan seuraavaksi montako kaapelia mahtuu päällekkäin ja tässä myös pyöristetään tulos edelliseksi kokonaisluvuksi. Jaetaan siis nyt korkeus kaapelin halkaisijalla, mikä on myös 20, koska korkeudeksi saatiin aiemmin 500mm. Lasketaan nyt nelikulmioon mahtuvat kaapelin poikkileikkauspinta-alat kertomalla vierekkäin mahtuvat kaapelit päällekkäin mahtuvilla, mistä tulee tulokseksi 400. Lasketaan seuraavaksi kaapelin halkaisijasta, kaapelin poikkileikkauspinta-ala kaavalla 27.

$$A_{kpp} = \pi \cdot r^2 \quad (27)$$

missä:

A_{kpp} = kaapelin poikkileikkauspinta-ala

r = kaapelin säde

Kaapelin halkaisija on 24mm, joten sen säde on 12mm. Sijoitetaan arvot kaavaan 27.

$$A_{kpp} = \pi \cdot 12^2 = 452,389\text{mm}^2$$

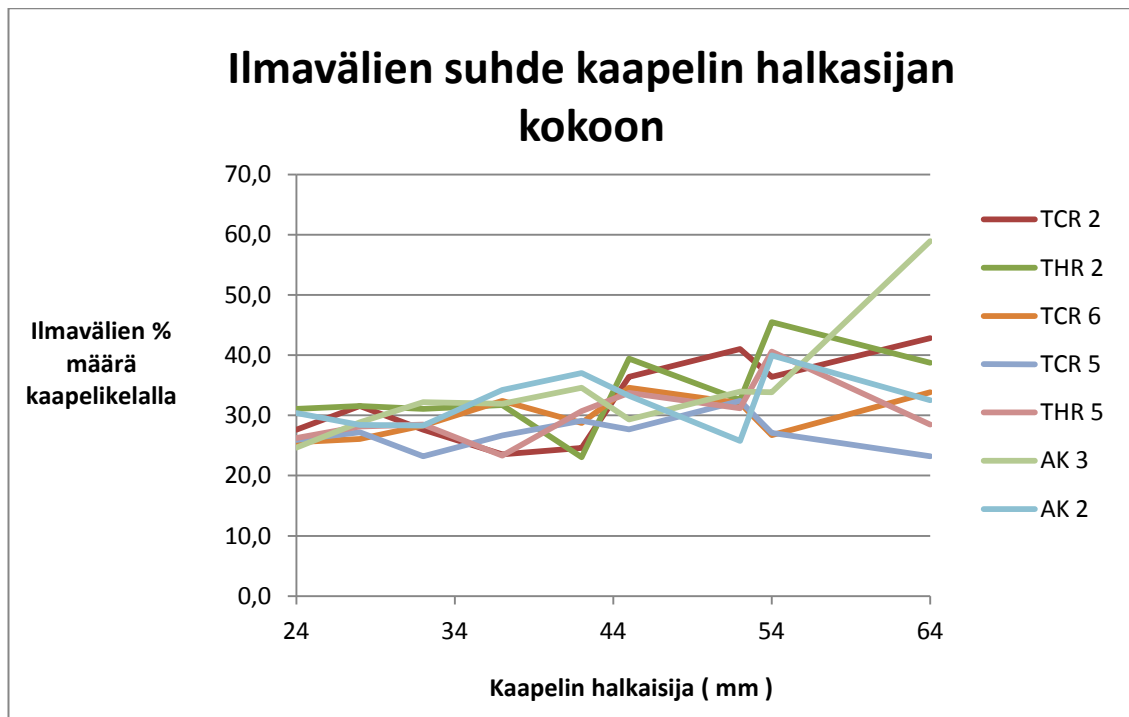
Lasketaan seuraavaksi pinta-ala, jonka kaapelit vievät neliöstä. Kaapelien poikkileikkauksia mahtui nelikulmioon 400 ja pinta-ala yhdellä poikkileikkauksella on edellä laskettu. Nämä kertomalla tulokseksi saadaan 180956mm^2 . Nelikulmion pinta-ala on leveys kertaa korkeus, josta tulee 250000mm^2 . Ilmavälien osuus saadaan kun nelikulmion pinta-alasta poistetaan kaapelien viemä pinta-ala. Tästä tulee tulokseksi 69044mm^2 . Ilmavälien % osuus saadaan laskettua seuraavalla kaavalla.

$$\text{Ilmavälien \% osuus} = \frac{\text{Ilmavälien pinta-ala}}{\text{Nelikulmion pinta-ala}} \cdot 100\% \quad (28)$$

Lasketaan esimerkkisijoitus.

$$\text{Ilmavälien \% osuus} = \frac{69044\text{mm}^2}{250000\text{mm}^2} \cdot 100\% = 27,62 \%$$

Seuraavaksi on kuvaaja, johon on laskettu eri kaapelirummuille kaapelinkoon vaikutus ilmavälien määrään. Taulukon laskenta on toteutettu edellä selitetyllä tavalla.



KUVIO 24. Kaapelikoon vaikutus ilmavälien % määrään kaapelikelalla

Kuviosta 24 havaitaan, että pienemmillä kaapeleilla ilmavälien määrä prosentuaalisesti on melko sama riippumatta kaapelirummun koosta. Suuremmilla kaapeleilla vaihtelu on melko isoa ja ilmanmäärän ennustettavuus kaapelirummulla heikkenee selkeästi. Seuraavaksi on esitetty vielä taulukko kaapeleista ja kaapelirummuista mitä laskennassa käytettiin.

TAULUKKO 7. Rumputyyppien ja kaapelityyppien mitat

Drum type	OD mm	ID mm	WIDTH mm	Cable type (mm ²)	Diameter (mm)
TCR 2	1200	600	300	3x25 + 3x6	24
THR 2	1200	600	210	3x35 + 3x6	28
TCR 6	1895	1020	400	3x50 + 3x10	32
TCR 5	1695	920	454	3x70 + 3x16	37
THR 5	1495	680	265	3x95 + 3x16	42
AK 3	2120	650	245	3x120 + 3x25	45
AK 2	1700	600	208	3x150 + 3x25	52
				3x185 + 3x35	54
				3x240 + 3x50	64

6 MITTAUSSUUNNITELMA

Työtä on tarkoitus myöhemmin tarkentaa mittauksilla. Mittausten tavoite olisi selvittää rumpukaapeliin kuormitettavuutta eri lämpötiloissa. Mittauksissa olisi tarkoitus kuormittaa syöttökaapelia mahdollisimman paljon. Kaapelin lämpenemä selvitetään kaapeliin asennettavilla lämpötila-antureilla. Lämpötilan lisäksi mitattavia suureita olisivat virta ja jännite.

Mikäli on vain mahdollista tehdään mittaus jokaiselle kaapelikoolle, tarkimman tuloksen saavuttamiseksi. Toisena suunnitelmana on, että mitataan kolmella eri kaapelikoolla. Kaapeli koot voisivat olla esimerkiksi PUR kaapeleista 3x25+3x6, 3x95+3x16, 3x185+3x35 eli saataisiin myöhempää tuloksien analysoimista varten parhaat lähtökohdat muillekin kaapeleille, koska mittaus on suoritettu pienellä, keskikokoisella ja suurella kaapelilla.

Kaivosympäristöjen lämpötila voi vaihdella suuresti. Lämpötila kaivoksessa on kuitenkin kaapelin kuormitettavuuden kannalta olennainen suure. Standardeissakin ulkoinen lämpötila on yksi korjauskerroin. Asennustapa on toinen olennainen korjauskerroin. Rumpukaapelin mitoituksen yhteydessä kyse on kaapelikerroksista rummussa, joiden määrän kasvaminen vaikuttaa kuormitettavuuteen heikentävästi. Kuitenkin kaapelinvalmistajien määrittelemät korjauskertoimet laskevat kuormitettavuutta todella paljon.

Mittauksilla pyritään nyt siihen, että tulevaisuudessa riittää tieto kaivoksen lämpötilasta ja tällä tiedolla pystytään korjaamaan kaapelin kuormitettavuus oikeanlaiseksi. Käytännössä testikaivoksen lämpötilan ollessa vakio pystytään mittaukset suorittamaan n. 20°C lämpötilassa. Tulokset halutaan myös 30°C ja 40°C lämpötiloille. Mittauksissa määritellään aluksi kaapeleille eri lämpötiloissa loppulämpötila. Valitaan loppulämpötilaksi esimerkiksi 80°C. Mittaukset tehdään 20°C ympäristön lämpötilassa ja tällöin 20°C alkulämpötilasta lämpenemä 80°C asteeseen on 60 astetta. Samalla tavalla lämpenemä 30°C asteesta 80°C asteeseen on 50 astetta ja lämpenemä 40°C asteesta 80°C asteeseen on 40 astetta. Mittaamalla testikaivoksessa 20°C lämpötilassa 50 asteen lämpenemää pyrittäisiin mallintamaan tilanne jossa oltaisiin 30°C lämpötilassa. Mittaamalla 40 asteen lämpenemää pyrittäisiin mallintamaan tilanne jossa oltaisiin 40°C lämpötilassa.

Mittauksessa kaapelia olisi rummun ulkopuolella vain minimi määrä. Kaapelin pinnalle sijoitettaisiin lämpötila mitta-antureita. Yksi mitta-anturi sijoitettaisiin kuparin pinnalle tekemällä kaapeliin viilto. Kuparin pinnalle sijoitettava anturi tulisi mahdollisimman lähelle kaapelin päätä, joka yhdistyy kaapelikelasta poralaitteeseen. Myöhemmin kaapeli saadaan näin vielä käyttöön leikkaamalla vain pieni-osa kaapelista pois. Viiltokohdan lähelle tulisi seuraava anturi kaapelin pintaan, jotta päästään tarkastelemaan kuparipinnan ja kaapelin pinnan lämpötilaeroa. Yksi lämpötila-anturi sijoitettaisiin kaapelirummun keskelle metalliin. Kaksi lämpötila anturia sijoitettaisiin vielä kaapelin pintaan eri etäisyyksille kaapeli rummun keskustasta.

7 POHDINTA

Kaapelien mitoituksen ensisijainen tarkoitus on turvallisuus. Seuraava näkökulma, mikä on syytä huomioida, on taloudellisuus. Vaikka tehdään asiat turvallisen mitoituksen mukaan ja noudatetaan standardien määrittämiä, on ylityminen huono ratkaisu. Teollisuudessa yritysten tarkoitus on kuitenkin olla tuottavia. Tuottavuus koostuu tällaisista pienistä ratkaisuista kuten kaapelin koko. Suuremmissa kaapeli kokoluokissa ylityksen välttäminen korostuu kaapeleiden hinnan noustessa.

Tulevaisuudessa näkisin yhtenä mahdollisuutena pienentää kaapelikokoja loistehon kompensoinnilla. Tämä vaatii tietysti sitä, että loistehonkompensointilaitteisto on mahdollista sijoittaa poralaitteeseen. Kompensointilaitteiston hinta pitää myös saada sille tasolle, että sen hinta suhteessa kaapelin koon pienenemisestä saatavaan hyötyyn on kannattava sijoitus.

Työn tarkoitus oli luoda helppokäyttöinen työkalu porauslaitteen rumpukaapelin mitoitukseen, joka nopeuttaa suunnittelua ja tekee siitä tarkempaa. Ohjelma on helppokäyttöinen selkeytensä ja Exel-pohjansa takia. Ohjelma on jäsenneily pieniin paloihin, niin ohjelman ulkoisen selkeyden takia, kuin ohjelman laskennan osalta. Pieniin paloihin jäsenneily laskenta helpottaa suuresti myöhempiä lisäyksiä ja muokkauksia ohjelmaan. Uusien kaapelitietojen tuonti ohjelmaan tapahtuu lisäämällä tiedot kaapelitietosivulle. Tiedot ovat tämän jälkeen ohjelman käytettävissä. Vastaavalla tavalla onnistuu uusien laitteiden tai uusien rumputyypin tietojen tuonti ohjelmaan. Ohjelman käyttö nopeuttaa suunnittelua ja helpottaa eri vaihtoehtojen vertailua. Tarkkuus laskentaan tulee siitä, että ohjelma laskee aina siihen laitetuilla laskentakaavoilla. Mitoituksen tarkkuutta pystytään tulevaisuudessa vielä parantamaan toteuttamalla suunnitellut mittaukset, joiden pohjalta päästään luomaan tarkempia korjauskertoimia.

LÄHTEET

- ABB. HRC-fuse links gG and aM. Tuote-esite. Luettu 10.4.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fddbb4fd0d0b8dd5c125773400136595/\\$file/1SCC317001C0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/fddbb4fd0d0b8dd5c125773400136595/$file/1SCC317001C0201.pdf)
- ABB. 2000. TTT-käsikirja.
- Aura, L. & Tonteri, A. 1986. Sähkömiehen käsikirja 1. Teoreettinen sähkötekniikka. Porvoo: WSOY
- Cavotec. Flexible power and control cables. Tuote-esite. Luettu 18.3.2013.
http://www.cavotec.com/en/mining-tunnelling_3/
- CIC. H07RN-F Lineax. Tuote-esite. Luettu 18.3.2013.
http://www.cic-cables.com/cariboost_files/H07RNF_Lineax.pdf
- Heiniö, M. 1999. Rock excavation handbook.
- Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- Hietalahti, L & Tarkka, P. 2006. Piirianalyysi 2. Helsinki: Edita Publishing Oy
- IEC 60909-0. 2001. Short circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents.
- Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus ry. 1978. Voimakaapeli valinta ja asennus. Insinööritieto Oy.
- Niemi, T. Engineering Manager, Electrics, Underground Drills. Haastattelu 27.3.2013. Haastattelija Kääntä, M. Tampere.
- Osara, J. Sandvik cable requirements. Raportti.
- Peijariniemi, V. 2007. Haja-asutus- ja maaseutualueiden pienjänniteverkon rakentamisen ja saneeramisen yhdenmukaistaminen. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Pulkkinen, J. 2012. Teollisuusvalaistuksen kompensointi ja yliaaltosuodatus. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Sandvik. DT series. Tuote-esite. Luettu 13.4.2013.
[http://www.miningandconstruction.sandvik.com/Sandvik/0120/Internet/Global/S003713.nsf/AllDocs/Products*5CDrill*rigs*and*rock*drills*5CUnderground*drill*rigs*5CTunneling*jumbos*2ADT11/\\$File/DT_lowres_7-2010.pdf](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/Sandvik/0120/Internet/Global/S003713.nsf/AllDocs/Products*5CDrill*rigs*and*rock*drills*5CUnderground*drill*rigs*5CTunneling*jumbos*2ADT11/$File/DT_lowres_7-2010.pdf)
- Sandvik. Electric power measurement. Tutkimusraportti.

Sandvik Mining and Construction Oy. Luettu 15.1.2013.

<http://www.miningandconstruction.sandvik.com/fi>

Sandvik. Porausalustan tehot. Raportti.

Sandvik. Tutkimusraportti 07067.

Sandvik. Underground drill rigs. Luettu 15.1.2013.

<http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/1181/Internet/FI02071.nsf/LUSL/SLFrameForm16E9116E47F486F55C2257861006533F0?OpenDocument>

SFS-EN 60204-1. 2006. Safety of machinery: Electrical equipment of machines. Part 1: General requirements.

SFS-käsikirja 600. 2007. Pienjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto ry.

Sähkötarkatusyhdistys SÄTY RY. 2002. Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta. Luettu 6.2.2012.

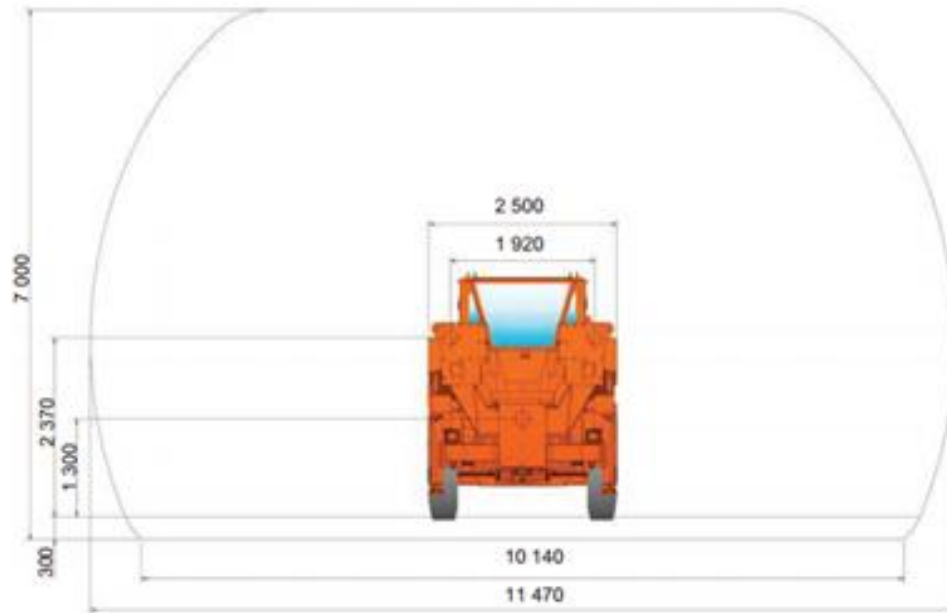
http://www.tukes.fi/tiedostot/sahko_ja_hissit/sahkopeto/s%C3%A4hkiset%20paloris kit%20ja%20niiden%20hallinta.pdf

Tiainen, E. 2010. Johdon mitoitus- ja suojaus. Espoo: Sähköinfo Oy.

Virtanen, E. 2012. Asennuskaapelit. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

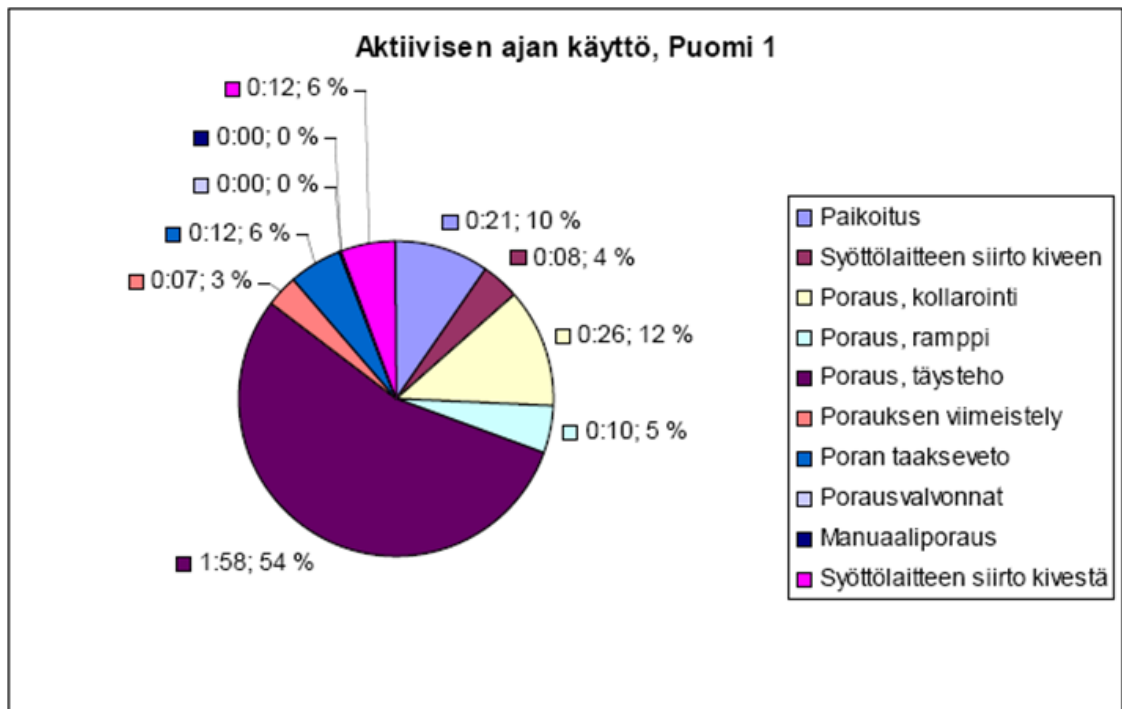
LIITTEET

Liite 1. Mining jumbo DD530-S60C porausalue.

Coverage area

(Underground drill rigs)

Liite 2. Puomin ajan käyttö.

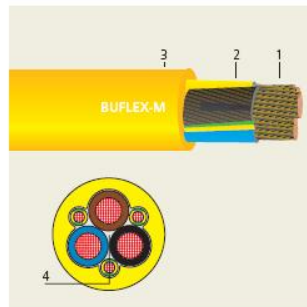


(Tutkimusraportti 07067)

Liite 3. Buflex-M

Buflex-M; low voltage power cable

LOW VOLTAGE


Construction & Characteristics
BUFLEX-M

- 1 Conductor
- 2 XLPE or TPR insulation
- 3 PUR outer sheath
- 4 PVC filler



Thanks to its high resistance to abrasion Buflex-M is used in many mining and tunneling applications.

Applications

Buflex-M cables are designed for power supply connections to all types of mobile equipment and vehicles used in quarrying, open-cast mining and other large scale civil engineering operations. The unique Buflex® cables diameter is achieved by splitting the earth conductor and laying it in the angles formed by the assembly of the three phase conductors. This original design results in a smaller diameter than a four cable conductors cable i.e. a cable 3 x 120 mm² + 3 x 25 mm² (earth conductors) has the same diameter as a 4 x 95 mm² cable.

Rating and test voltages

Rated voltage U_0/U 0,6/1 kV A.C.
 Max voltage U_m 1,2 kV A.C.
 Test voltage 3,5 kV A.C.

Temperature ratings

+ 90°C Maximum conductor temperature
 - 30°C Minimum ambient temperature during work

Dimensional data

Nominal cross section n x mm ²	Max. overall diam. mm	Net weight kg/km	Max. Contin. Safe Reeling Tension N
3x 25+3 G6	24,0	1200	1500
3x 35+3 G6	28,0	1600	2100
3x 50+3 G10	32,0	2100	3000
3x 70+3 G16	37,0	3000	4200
3x 95+3 G16	42,0	3900	5700
3x 120+3 G25	45,0	5000	7200
3x 150 + 3 G25	52,0	6000	9000
3x 185 + 3 G35	57,5	7600	11100
3x 240+ 3 G50	67,0	10200	14400

Note: Maximum tensile strength 20 N/mm² x copper cross-section.

INDUSTRIELS SOUPLES	FLEXIBLE INDUSTRIAL
H07RN-F LINEAX®	

CABLES RONDS NEOPRENE HD 22.4 / NF C 32-102-4 Température maxi au conducteur : 60°C	450/750 V	NEOPRENE ROUND CABLES HD 22.4 / NF C 32-102-4 Maximum conductor temperature : 60°C
--	-----------	---

<p>1- Ame Cuivre nu Souple classe 5 IEC 228</p> <p>2- Isolation Elastomère spécial réticulé</p> <p>3- Gaine extérieure PCP ou élastomère équivalent Couleur : noir</p>		<p>1- Conductor Bare copper Flexible - Class 5 IEC 228</p> <p>2- Insulation Special cross-linked elastomer</p> <p>3- Outer sheath PCP or equivalent elastomer colour : black</p>
---	--	---

- **Repérage des conducteurs**
 - 2 à 5 conducteurs : HD 308 S2
 - Par numéros à partir de 6 conducteurs avec conducteur vert/jaune

- **Marquage de la gaine**

USE <HAR> H07RN-F Lineax n G s

- **Rayon de courbure**

- statique : 3 x Diamètre extérieur
- dynamique : 6 x Diamètre extérieur
- dynamique T° < -25°C : 12 x Ø. extérieur

- **Core identification**

- From 2 to 5 cores : HD 308 S2
- Printed numbers from 6 cores with earth core

- **Sheath marking**

USE <HAR> H07RN-F Lineax n G s.

- **Bending radius**

- static : 3 x Outer diameter
- dynamic : 6 x Outer diameter
- dynamic T° < -25°C : 12 x Outer diameter

 -35 ; +85 °C	 Bon Good	 Bon Good	 Flexible	 Oil Resistant	 FLAME RETARDANT IEC 60332-1 EN 50265-2-1 NF C 32-070 Cat.C2	
---	--	--	---	---	---	---

Ce câble est particulièrement prévu pour l'alimentation de puissance ou de commande d'engins mobiles.

L'emploi jusqu'à 0,6/1 kV est admis dans le cas d'installations fixes protégées et pour l'alimentation de moteurs.

This cable is particularly designed for the power or control supply of mobile installations or apparatus.

It can be used at a voltage of 0,6/1 kV in fixed protected links as well as to supply to motors in lifting plant.



INDUSTRIELS SOUPLES	FLEXIBLE INDUSTRIAL
H07RN-F LINEAX®	

CABLES RONDS NEOPRENE HD 22.4 / NF C 32-102-4 Température maxi au conducteur : 60°C	450/750 V	NEOPRENE ROUND CABLES HD 22.4 / NF C 32-102-4 Maximum conductor temperature : 60°C
--	-----------	---

H07RN-F	Diamètre extérieur <i>Outer diameter</i> (mm)		Intensité admissible ⁽¹⁾ <i>Permissible current rating⁽¹⁾</i> (A)	Poids de cuivre <i>Copper Index</i> (kg/km)	Masse <i>Weight</i> Approx. (kg/km)
	mini.	maxi.			
3 G 1.0	8.6	11.5	19	29	111
3 G 1.5	9.6	12.5	24	43	157
3 G 2.5	11.5	14.5	33	72	217
3 G 4	13.0	16.0	45	115	298
3 G 6	14.5	20.0	58	173	407
3 G 10	20.0	25.5	80	288	716
3 G 16	22.5	29.5	107	461	1008
3 G 25	26.5	34.0	142	720	1451
3 G 35	29.5	38.0	175	1008	1901
3 G 50	34.5	44.0	212	1440	2580
3 G 70	39.0	49.5	270	2016	3386
3 G 95	44.0	54.0	327	2736	4483
3 G 120	47.5	59.0	379	3456	5182
3 G 150	52.5	66.5	435	4320	6485
3 G 185	58.0	71.5	496	5328	7862
3 G 240	65.5	81.0	584	6912	10224
4 G 1.0	9.6	12.5	17	38	146
4 G 1.5	10.5	13.5	22	58	192
4 G 2.5	12.5	15.5	30	96	269
4 G 4	14.5	18.0	40	154	373
4 G 6	16.5	22.0	52	230	514
4 G 10	21.5	28.0	71	384	898
4 G 16	24.5	32.0	96	614	1253
4 G 25	29.5	37.5	127	960	1846
4 G 35	33.0	42.0	157	1344	2393
4 G 50	38.0	48.5	190	1920	3284
4 G 70	43.0	54.5	242	2688	4331
4 G 95	49.0	60.5	293	3648	5712
4 G 120	53.0	65.5	339	4608	6828
4 G 150	58.5	74.0	390	5760	8319
4 G 185	64.5	79.0	444	7104	10062
4 G 240	73.0	90.0	522	9216	13125

(1) : Température ambiante : 30°C

(1) : Ambient temperature : 30°C



CABLES INDUSTRIELS DE CHAMPAGNE – Z.A.M. Les Crayères – F- 51520 LA VEUVE
 Tél. +33 (0)3 26 68 48 22 – Fax. +33 (0)3 26 68 59 64 – www.cic-cables.com