

Lauri Tuomela

AVOJOHDON DYNAAMISEN KUORMI- TETTAVUUDEN RATKAISUT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Sami Repo
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Lauri Tuomela: Avojohton dynaamisen kuormitettavuuden ratkaisut
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Toukokuu 2022

Sähköjohton kuormitettavuus kertoo, kuinka suuren sähkövirran johto jatkuvasti kestää ilman, että johto lämpenee liikaa ja aiheuttaa vaaraa tai vahinkoa. Tyypillisesti kuormitettavuusraja asetetaan niin, että johdon oletetaan olevan lämpenemisen kannalta huonoissa olosuhteissa, mikä takaa johdon turvallisen käytön kaikissa olosuhteissa. Erityisesti avojohtoja, eli paljaita ilmajohtoja ympäröivät sääolosuhteet voivat muuttua. Esimerkiksi mitoitusolosuhteita suurempi tuulen nopeus ja pienempi ympäristön lämpötila viilentävät avojohtoja merkittävän osan ajasta. Tämä tarkoittaa sitä, että suurimman osan ajasta johtoja voitaisiin kuormittaa turvallisesti yli normaalien mitoitusrajojen. Mikäli avojohton reaaliaikainen dynaaminen kuormitettavuus (engl. Dynamic Line Rating, DLR) halutaan laskea, on johdolla vaikuttavat reaaliaikaiset olosuhteet tunnettava.

Tämä työ on kirjallisuusselvitys, jossa perehdytään avojohton dynaamisen kuormitettavuuden teoriaan, luonteeseen ja siihen, millaisia menetelmiä ja teknologioita sen toteuttamiseksi on kehitetty. Aineistona on käytetty pääasiassa tieteellisiä artikkeleita ja konferenssijulkaisuja, minkä lisäksi erityisesti IEEE:n standardi 738 on oleellinen työssä käytetty ja käsitelty aineisto. Esimerkiksi työssä esitelty kuormitettavuuslaskenta perustuu tähän standardiin. Tieteellisissä artikkeleissa ja muissa aineistoissa käsitellään pitkälti avojohton kuormitettavuutta, dynaamista kuormitettavuutta sekä erilaisia dynaamisen kuormitettavuuden menetelmiä ja teknologioita. Työn aiheesta on kirjoitettu tähän mennessä hyvin vähän suomen kielellä. Kiinnostus DLR-teknologioita kohtaan on kasvanut maailmalla merkittävästi viime vuosien ja vuosikymmenen aikana.

Avojohtoon osuva tuuli ja etenkin matalat tuulen nopeudet viilentävät johtoa voimakkaasti ja kasvattavat johdon kuormitettavuutta. Tuuliolosuhteita on kuitenkin vaikea ennustaa, minkä lisäksi ne voivat muuttua äkillisesti ja olla erilaiset ympäri sähkölinjaa. Siksi on tärkeä seurata sääolosuhteita riittävän laajalta alueelta tai löytää se kohta linjalta, jonka lämpeneminen aiheuttaa todennäköisimmin rikkomuksia. Kattavien säämittausten sijasta kuormitettavuuslaskennan lähtötietoina voidaan hyödyntää linjaparametreja. Asentamalla linjaan sensoreita, voidaan esimerkiksi johdon lämpötila, jännitys, riippuma tai ilmapäli mitata. Jännitys, riippuma ja ilmapäli voidaan muuntaa vastaamaan johdon lämpötilaa, jonka avulla pystytään arvioimaan sääolosuhteiden vaikutusta ja siten laskemaan kuormitettavuus IEEE:n yhtälöillä. Suurin osa kaupallisista teknologioista perustuu jonkin linjaparametrin mittaamiseen. Usein DLR-ratkaisut mittaavat linjaparametrien lisäksi myös muita oleellisia lähtötietoja, kuten auringon säteilyn ja sähkövirran.

Yleensä dynaamisella kuormitettavuudella voidaan kasvattaa olemassa olevan sähköverkon siirtokapasiteettia vähintään 5–20 %. Koska tuulen nopeuden kasvu johtaa sekä kuormitettavuuden kasvuun että tulisähkön suurempaan generoimiseen, voidaan DLR:llä integroida enemmän tuulivoimaa verkkoon, jos verkossa on ruuhkia. Tyypillisesti DLR-ratkaisuilla lisäkapasiteetti saadaan perinteisiä menetelmiä nopeammin ja halvemmin. Muuttuvat sääolosuhteet kuitenkin haastavat lisäkapasiteetin käytettävyyttä, minkä vuoksi käytännöllisen ratkaisun on sisällettävä riittävän luotettava kuormitettavuutta ennustava toteutus.

Avainsanat: Dynaaminen kuormitettavuus, DLR, terminen kuormitettavuus, avojohton sensorit, avojohton lämpötasapainoyhtälö

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AVOJOHDON KUORMITETTAVUUS	3
2.1 Staattinen kuormitettavuus	5
2.2 Dynaaminen kuormitettavuus	6
2.2.1 Terminen mallinnus	7
2.2.2 Sääolosuhteet ja niiden vaikutus	13
3. DYNAAMISEN KUORMITETTAVUUDEN RATKAISUT	16
3.1 Epäsuorat menetelmät	17
3.2 Suorat menetelmät	18
3.3 Kehitettyjä teknologioita	21
3.4 Menetelmien vertailua	25
4. KÄYTÄNNÖN NÄKÖKOHTIA	28
4.1 Tavoitteet ja mahdollisuudet	28
4.2 Keskeisiä haasteita	29
5. YHTEENVETO	31
LÄHTEET	34

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AAAC	All Aluminium Alloy Conductor, alumiiniseosjohdin
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced, teräsvahvistettu alumiinijohdin
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques, kansainvälinen sähkövoimajärjestelmiin keskittyvä järjestö
DLR	Dynamic Line Rating, dynaaminen kuormitettavuus
DTLR	Dynamic Thermal Line Rating, dynaaminen termien kuormitettavuus
HTLS	High Temperature Low Sag, korkean lämpötilan kestävä johdin
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
LiDAR	Light Detecting and Ranging, valotutka
NWP	Numerical Weather Prediction, numeerinen sääennustus
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, käytönohjaus- ja valvontajärjestelmä
SLR	Static Line Rating, staattinen kuormitettavuus
α	auringon absorboituvuus
ΔT_c	johtimen lämpötilan muutos yhdessä aikavälissä
Δt	transienttilaskennassa käytetty aikaväli
ε	johtimen emissiivisyys
θ	auringonsäteiden tehokas tulokulma
ρ_f	ilman tiheys
ϕ	tuulen suunnan ja johdon akselin välinen kulma
A'	johtimen projektiopinta-ala
cos	kosinifunktio
D_0	johtimen halkaisija
$\frac{d}{dt}$	aikaderivaatta
I	sähkövirta (kuormitettavuus)
I_f	sähkövirta askelmuutoksen jälkeen
I_i	sähkövirta ennen askelmuutosta
K_{angle}	tuulen suuntakerroin
k_f	ilman lämmönjohtavuus
mC_p	johtimen kokonaislämpökapasiteetti
N_{Re}	Reynoldsin luku
P_c	konvektioviilennys
P_i	Auringon koronalämmitys
P_j	Joulen lämmitys
P_m	mageettinen lämmitys
P_r	säteilyjäähdytys
P_s	aurinkolämmitys
P_w	haihdutusjäähdytys
Q_{se}	korjattu auringon ja taivaan säteilyn lämpövoimakkuus
q_c	konvektiosta johtuva lämpöhäviö
q_{c1}	pakotetusta konvektiosta johtuva lämpöhäviö (heikko tuuli)
q_{c2}	pakotetusta konvektiosta johtuva lämpöhäviö (kova tuuli)
q_{cn}	luonnollisesta konvektiosta johtuva lämpöhäviö
q_r	säteilystä johtuva lämpöhäviö
q_s	auringon säteilyn lämpölisäys

$R(T)$	johtimen resistanssi lämpötilassa T
\sin	sinifunktio
T_a	ympäristön lämpötila
T_c	johtimen lämpötila
T_f	johtimen loppulämpötila askelmuutoksen jälkeen
T_i	johtimen alkulämpötila juuri ennen askelmuutosta
T_s	johtimen pintalämpötila

1. JOHDANTO

Sähkönsiirto johdon ensiarvoinen tehtävä on siirtää sähköenergiaa turvallisesti vahingoittamatta ihmisiä, ympäristöä tai järjestelmää. Siksi sähkölinjoja suunniteltaessa ja käyttäessä on tärkeää kiinnittää huomiota johtojen jatkuvaan kuormitettavuuteen (engl. ampacity, ampere capacity) eli siihen, kuinka suuren sähkövirran johto kestää jatkuvasti lämpenemättä yli turvallisuusrajojen. Johdon kuormitettavuuteen vaikuttavat ensinnäkin johdon fyysiset ja sähkötekniset ominaisuudet, kuten johdinmateriaali, poikkipinta-ala ja johtoa ympäröivä eriste. Mutta näiden lisäksi johdon sijainnilla ja ympäristön olosuhteilla on keskeinen vaikutus. Esimerkiksi jos ilmajohtoon kohdistuu tuuli, johto viilenee, minkä vuoksi johdon kuormitettavuus kasvaa. Muita kuormitettavuutta lisääviä tekijöitä ovat muun muassa kylmä ilma ja pilvinen sää. Sääolosuhteiden viilentävät vaikutukset korostuvat juuri avojohdoilla, joiden eristeenä on ympäröivä ilma.

Ilmastonmuutos ja siitä syntynyt tarve rajoittaa ilmakehään päästettäviä CO₂-päästöjä ovat vauhdittaneet uusiutuvan energiantuotannon kehitystä ja kasvua. Sekä sääriippuvaisen energiantuotannon kasvu että jatkuvasti lisääntyvä energiantarve haastavat niin sähkönsiirtoverkkoja kuin koko sähköenergiajärjestelmää. Esimerkiksi tuulivoimaa rakennetaan tuulisille alueille ja usein kauas suurista kulutuskeskuksista, jolloin pitää joko rakentaa uutta sähköverkkoa tai vahvistaa nykyistä. Koska sähköverkkoprojektien toteuttaminen vie yleensä enemmän aikaa kuin tuulivoimapuistojen rakentaminen, syntyy tilanteita, joissa uusiutuvan energian tuotantoa pitää rajoittaa riittämättömän siirtokapasiteetin takia [1, s. 80–81]. Lisäksi uuden siirtoverkon rakentaminen on kallista ja voi sisältää useita haasteita liittyen reitin valintaan, maanomistukseen ja visuaaliseen vaikutukseen [2, s. 33, 315]. Muun muassa nämä seikat lisäävät motivaatiota löytää ja harkita muita ratkaisuja.

Perinteisesti avojohdojen kuormitettavuuden yläraja määritellään epäsuotuisissa sääolosuhteissa, eli tuulen oletetaan olevan heikko, ilman lämpötilan korkea ja auringonpaisteen voimakas [1, s. 81][3]. Koska oikeat johtoa ympäröivät sääolosuhteet ovat suurimman osan ajasta suopeammat, on johdon todellinen kuormitettavuus myös suurimman osan ajasta määritettyä ylärajaa korkeampi. *Dynaamisen kuormitettavuuden* ideana on määrittää siirtojohtojen kuormitettavuus dynaamisesti vaihtelevien ympäristöolosuhteiden perusteella [4, s. 600]. Esimerkiksi Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid kertoo

25.6.2020 julkaisemassaan verkkojulkaisussaan [5], että se on alkanut selvittää eri dynaamisen kuormitettavuuden tekniikoita. Julkaisun mukaan mittalaitteilla voitaisiin selvittää johdon reaaliaikainen kuormitettavuus, mikä lisäisi verkon hyödynnettävissä olevaa siirtokykyä. Fingridin suunnittelupäällikkö Antti Harjula kertoo, että DLR-järjestelmillä (engl. Dynamic Line Rating) arvioidaan termisen siirtokyvyn kasvavan keskimäärin yli 10 %. Erityisesti DLR-ratkaisut yhdistettynä tuulivoiman tuotantoon herättävät mielenkiintoa, koska tuulella on oleellinen merkitys dynaamiseen kuormitettavuuteen [3, s. 23].

Perehdyn tässä työssä avojohdon dynaamisen kuormitettavuuden teoriaan, ja tarkastelen sen pohjalta erilaisia DLR-menetelmiä ja -teknologioita. Rajaan työni ulkopuolelle eri ratkaisujen integroimisen SCADA-järjestelmään (engl. Supervisory Control and Data Acquisition), ratkaisujen tietoliikenne- ja ohjelmistototeutukset sekä teknologioiden syvällisemmän taloudellisen vertailun. Tavoitteena työssä on paneutua avojohdon dynaamisen kuormitettavuuden lainalaisuuksiin ja selvittää millaisia menetelmiä on kehitetty, mitä haasteita niihin liittyy ja millaisissa tapauksissa niitä kannattaa hyödyntää.

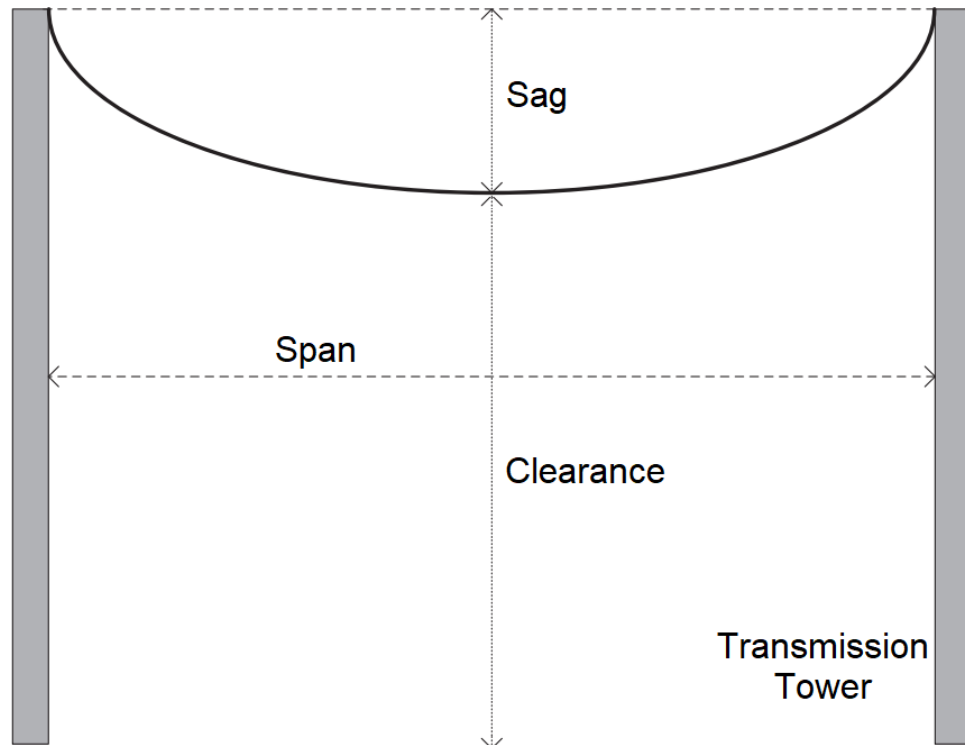
Luvussa 2 käydään läpi avojohdon kuormitettavuutta ja paneudutaan syvällisemmin dynaamiseen kuormitettavuuteen, sen mallinnukseen sekä vaikuttaviin säämuuttujiin. Luvussa 3 käsitellään eri DLR-menetelmät, esitellään joitakin kehitettyjä DLR-teknologioita ja vertaillaan menetelmiä keskenään. Luvussa 4 kerrotaan, mitä käytännön haasteita DLR-tekniikkaan liittyy ja mitkä ovat sen vahvuudet ja mahdollisuudet. Luvussa 5 on työn yhteenveto.

2. AVOJOHDON KUORMITETTAVUUS

Ilmajohdot ovat näkyvin osa sähkönsiirtoa. Suurjännitteiset ilmajohdot ovat yleensä avojohtoja, jolloin niitä ympäröi eristeenä toimiva ilma. Käytettyjä suurjännitteisiä ilmajohdota on useita erilaisia, ja ne poikkeavat ominaisuuksiltaan, kuten johtavuudeltaan, painoltaan, materiaaliltaan ja maksimilämpötilaltaan. Esimerkiksi yleisin siirtolinjalla käytetty ilmajohdot on teräsvahvistettu alumiinijohdin ACSR (engl. Aluminium Conductor Steel Reinforced), jonka etuja ovat erinomainen mekaaninen lujuus ja hyvä johtavuus. [6]

Suurjännitteisten avojohtojen tarkoitus on siirtää sähköenergiaa voimalaitoksilta lähemmäs kulutuskeskuksia. Suomessa käytetyt jännitetasot sähkönsiirrossa ovat 110 kV, 220 kV ja 400 kV [7], mutta siirtojännite voi olla myös yli 500 kV [6]. Suuria jännitteitä käytetään, jotta suuria tehoja voitaisiin siirtää pitkiä matkoja mahdollisimman pienillä häviöillä, jotka kasvavat sähkövirran neliössä.

Kun sähköjohdolla siirretään tehoa, johdossa kulkeva sähkövirta ja sitä vastustava impedanssi lämmittävät johtoa, jolloin johdon keskimääräinen lämpötila nousee. Lämpötilan kasvu aiheuttaa johdossa lämpölaajenemista, eli johdon pituus kasvaa ja sitä kautta myös sen *riippuma* (engl. sag). Riippumalla tarkoitetaan suurinta etäisyyttä *jänneväl* (engl. span) pylväshuippujen ja johdon alimman pisteen välillä, mitä on havainnollistettu kuvassa 1. Johdon lämpötilan lisäksi myös ympäröivät olosuhteet, kuten ilman lämpötila ja tuuli, vaikuttavat riippuman suuruuteen. Riippuman kasvaminen pienentää ilmaväliä (engl. clearance), mikä voi johtaa linjan vaurioitumiseen ja turvaetäisyydemääräysten rikkoutumiseen. [8, s. 1–3][9, s. 1716] Siksi ilmaväli on olennainen avojohtojen termistä kuormitettavuutta rajoittava tekijä [4, s. 605][10, s. 475].



Kuva 1. Riippuma, ilmaväli ja jänneväli ilmajohtoverkossa. Perustuu lähteeseen [8, s. 3].

Johdon lämpötila vaikuttaa siis suoraan johdon riippumaan ja ilmaväliin, minkä vuoksi johdon lämpötilaa tulee rajoittaa. Koska johdon lämpötilalla ja ilmavälillä on yhteys, voidaan johdon terminen kuormitettavuus määrittellä johdon suurimmalla sallitulla lämpötilalla, joka takaa johdon turvallisen käytön. [1, s. 81][4, s. 600][11, s. 18][12, s. 921] Johdon liiallinen lämpeneminen aiheuttaa pitkällä aikavälillä johdon ennenaikaista vanhenevista [6], minkä vuoksi lämpötilaa kannattaa myös rajoittaa. Mikäli johto altistetaan jatkuvasti korkeille lämpötiloille, sen vetolujuus voi heiketä (engl. annealing) [2, s. 376]. Kuormitettavuusraja voi perustua myös tähän prosessiin, jolloin yhteys johdon suurimpaan sallittuun lämpötilaan on suora [1, s. 81]. Tyypillisesti ilmajohdon suurin sallittu käyttölämpötila on 75–125 °C [6][11, s. 19].

Termistä kuormitettavuutta ei suoraan saada johdolta, vaan se täytyy laskea. Laskennan perustana ovat ympäristön olosuhteet ja johtimen ominaisuudet. Esimerkiksi rannikkoalueilla voidaan käyttää korroosion ehkäisemiseksi vahvemmin voideltuja johtimia, kuten alumiiniseosjohtimia (AAAC). Voiteluaineen vuoksi johdin varaa enemmän lämpöä, mikä hidastaa sen viilentymistä. [13] Ympäristötekijät, kuten tuuli, auringon säteily ja ilman lämpötila, voidaan joko mitata tai ne voidaan olettaa. Kun johdon suurin sallittu riippuma ja kuormitettavuuteen vaikuttavat parametrit tunnetaan, voidaan avojohdon lämpötila ja kuormitettavuus määrittää esimerkiksi IEEE:n (engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardin 738 [14] tai CIGRE:n (ransk. Conseil International des Grands

Réseaux Electriques) esitteen TB 601 [15] mukaisesti. [6][11, s. 19][16] Luvussa 2.2.1 käydään tarkemmin läpi johdon termistä tasapainoa ja kuormitettavuuden laskemista IEEE:n standardilla.

Siirtolinjat voidaan jakaa niiden pituuksien perusteella lyhyisiin, keskipitkiin ja pitkiin linjoihin [6]. Eri linjapituuksilla tehonsiirtokapasiteettia usein rajoittavat eri syyt. Esimerkiksi termisten rajojen lisäksi on otettava huomioon siirtolinjan jännite ja stabiilisuus, jotka liittyvät käyttövarmuuteen. Tyypillisesti pitkillä linjoilla johdon kuormitettavuutta rajoittavat stabiilisuus- ja jänniterajat, kun taas lyhyillä linjoilla terminen rajoitus on määräävä. Kun käytetään termistä rajoitusta, voidaan kuormitettavuus määrittää joko staattisesti SLR-menetelmällä (engl. Static Line Rating) tai dynaamisesti DLR- eli DTLR-menetelmällä (engl. Dynamic Thermal Line Rating). [4, s. 600][12, s. 921]

2.1 Staattinen kuormitettavuus

Perinteisesti sähköenergian siirtoa on rajoitettu johdon lämpökapasiteetilla, joka on määritelty staattisella kuormitettavuudella [1, s. 81]. Staattinen kuormitettavuus kertoo suurimman sallitun linjavirran, jolla johdon lämpötilaraja ei ylitä tietyissä sääolosuhteissa. Nämä olosuhteet ovat ennalta kiinnitettyjä ja perusteltuja oletuksia, jotka voidaan määrittää esimerkiksi vuodenajan ja siirtolinjan sijainnin perusteella. Oletetut sääolosuhteet vastaavat epäedullisia, niin sanottuja *worst-case*-olosuhteita, jotka ovat ilmajohdon kuormitettavuuden kannalta huonot, eli tuulen nopeus on pieni, ilman lämpötila korkea ja auringon säteily voimakasta. Esimerkiksi IEEE-standardi 738 [14, s. 51] ja CIGRE:n tekninen esite 299 [3, s. 14–15] suosittelevat oletamaan riippumarajoitteisille avojohdoille seuraavat sääolosuhteet:

- kohtisuora tuulen nopeus 0,6 m/s
- auringon säteily 1000 W/m²
- ilman lämpötila lähellä sijainnin vuotuista enimmäislukemaa.

[11, s. 12][12, s. 921][17, s. 2558] Luvussa 2.2.2 paneudutaan syvällisemmin eri sääparametrien vaikutuksiin kuormitettavuuden näkökulmasta.

SLR-menetelmän sääoletukset tekevät siitä helpon ja turvallisen tavan määrittää johdon kuormitettavuus, minkä vuoksi se on perinteisesti ollut ja edelleen on yleisin tapa mitoittaa avojohtoja [18, s. 5–6]. Haittana sekä heikkoutena menetelmässä on kuitenkin se, että oletetut sääolosuhteet toteutuvat faktisesti hyvin harvoin, eli suurimman osan ajasta johtoa voitaisiin kuormittaa turvallisesti yli mitoitusarvon. SLR-kuormitettavuus vastaa

siis hyvin pienen osan ajasta johdon oikeaa kuormitettavuutta, mikä ei ole toivottava tilanne varsinkaan, jos siirtolinjalla on pullonkauloja tai uusiutuvan energian tuotantoa joudutaan rajoittamaan. [9, s. 1714][11, s. 13][17, s. 2558]

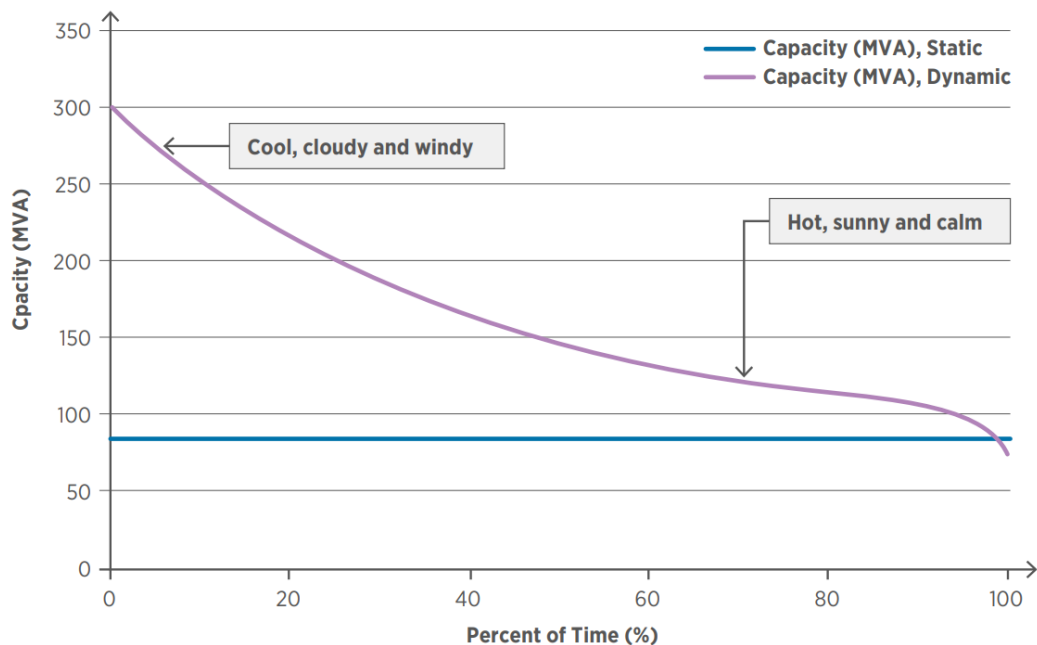
Avojohton kuormitettavuuteen vaikuttaa oleellisesti esimerkiksi tuulen nopeus. Keskimääräiset tuuliolosuhteet kuitenkin vaihtelevat niin yhden vuorokauden sisällä kuin vuodenajankin mukaan. Oheisessa tutkimuksessa [19] tehtiin neljän vuoden ajan tiiviisti tuulimittauksia Pohjanmerellä ja huomattiin, että keskimääräinen tuulen nopeus on suurin talvisin ja pienin kesäisin. Lisäksi kävi ilmi, että syksyllä tuulen nopeus vaihtelee eniten, kun taas keväällä ja kesällä tuulen nopeuden vaihtelu on pienempää. Tutkimuksen perusteella on selvää, ettei yhdellä tai edes muutaman kerran vuodessa vaihtuvalla SLR-arvolla pystytä saavuttamaan sekä todenmukaista että turvallista kuormitettavuutta varsinkaan, jos alueella on selkeät vuodenaajat. Tällöin staattinen kuormitettavuus johtaa vääjäämättä epätehokkaaseen verkon käyttöön, koska turvallisuuden on mentävä edelle.

2.2 Dynaaminen kuormitettavuus

Dynaaminen kuormitettavuus on *smart grid* -sovellus, joka perustuu reaaliaikaiseen arvioon johdon dynaamisesti vaihtelevasta kuormitettavuudesta. Jotta ajantasainen kuormitettavuus olisi mahdollista määrittää, täytyy kuormitettavuuteen vaikuttavat parametrit tuntea reaaliajassa. Vaikuttavia sääparametreja ovat muun muassa ympäristön lämpötila, tuulen nopeus, tuulen suunta, auringon säteily ja sademäärä. Kuormitettavuuden kannalta oleelliset mitattavat linjaparametrit ovat puolestaan kuormitusvirta, ilmaväli, riippuma, jännitys ja johdon lämpötila. Dynaaminen kuormitettavuus voidaan määrittää joko linjaparametrien tai pelkästään sääparametrien perusteella. [1, s. 81][4, s. 600][18, s. 6–7]

Dynaaminen kuormitettavuus perustuu staattisen kuormitettavuuden tapaan johdon suurimpaan sallittuun lämpötilaan, joka nyt kuitenkin määritetään faktisten olosuhteiden perusteella ilman epäedullisia sääoletuksia [9, s. 1716][12, s. 923]. Mutta koska sääolosuhteet vaihtelevat ajan suhteen, määritetty DLR on validi vain rajatun ajan, esimerkiksi seuraavan tunnin [12, s. 921]. Sääolosuhteet vaihtelevat ajan lisäksi myös paikan suhteen, minkä vuoksi pitkä siirtolinja voi kokea samaan aikaan eri sääolosuhteet. Tämä johtaa siihen, että dynaaminen kuormitettavuus vaihtelee linjan jänneväleillä ja koko siirtolinjan kuormitettavuus on määritettävä sen jännevälin mukaan, jolla on pienin dynaaminen kuormitettavuus. [4, s. 602]

Kuvassa 2 on dynaamisen kuormitettavuuden kumulatiivinen arvo, joka on staattisen kuormitettavuuden yläpuolella. Koska staattinen kuormitettavuusraja ei muutu sään tai ajan suhteen, on käytettävissä oleva siirtokapasiteetti ajan suhteen vakio. Dynaaminen kuormitettavuus sen sijaan muuttuu olosuhteiden perusteella ja on myös suurimman osan ajasta staattista arvoa suurempi, koska staattinen raja perustuu epäedullisiin ympäristöolosuhteisiin. Kuvassa dynaamisen ja staattisen käyrän väliin jäävä pinta-ala kuvastaa saatavilla olevaa lisäkapasiteettia, kun staattisen kuormitettavuuden sijasta käytetäänkin dynaamista kuormitettavuutta. Ajan lähestyessä 100:aa prosenttia dynaaminen käyrä leikkaa vaakasuoran staattisen käyrän, mikä kuvastaa sitä, että myös staattiseen kuormitettavuuteen liittyy pieni riski. Riski tarkoittaa tilannetta, jossa faktiset sääolosuhteet ovat huonommat kuin kiinnitetyt worst-case-olosuhteet. Dynaamisella kuormitettavuudella voidaan poistaa tämä riski, koska tieto worst-case-olosuhteiden ylittymisestä on reaaliaikaisen seurannan vuoksi saatavilla. Siten DLR mahdollistaa niin tehokkaan kuin turvallisemman verkon käytön.



Kuva 2. Staattinen ja dynaaminen kuormitettavuus [20, s. 8].

2.2.1 Terminen mallinnus

Avojohtojen terminen kuormitettavuus määritellään usein johdon lämpötilalla, joka perustuu johdon suurimpaan sallittuun riippumaan. Avojohtojen lämpötila on johtimen materiaalin, halkaisijan, pinnan kunnon, sähkövirran ja sääolosuhteiden funktio [14, s. 6]. Tietyn johdon terminen kuormitettavuus ja lämpötila voidaan määrittää termisellä mallinnuksella, kunhan vaikuttavat parametrit tunnetaan. Termisessä mallinnuksessa johdon dy-

naamisesta sähkövirta-lämpötila-käyttäytymisestä muodostetaan niin sanottu *lämpöta-sapainoyhtälö*, jonka ollessa termisessä tasapainotilassa johtimeen tuleva kokonaislämpö on yhtä suuri kuin johtimesta poistuva kokonaislämpö. IEEE:n standardin 738 suositukset, lämpötasapainoyhtälöt ja lämpötermien laskukaavat perustuvat useiden työryhmien suorittamiin tutkimuksiin, joissa on selvitetty avojohdon lämmönsiirtymisen ja lämpötasapainon laskentamenetelmiä [14, s. 5]. Standardin jatkuvan tilan (engl. steady-state) lämpötasapainoyhtälö sisältää neljä termiä, joista kaksi tuovat lämpöä johtimeen ja kaksi vievät sitä pois

$$P_c + P_r = P_s + P_j, \quad (1)$$

jossa P_c on konvektiojäähdytys, P_r säteilyjäähdytys, P_s aurinkolämmitys ja P_j Joulen lämmitys. Kuva 3 havainnollistaa avojohdon lämpökäyttäytymistä ja yhtälöä 1. Yhtälön 1 termit P_c , P_r ja P_s voidaan kuvata lämpöinä, ja termi P_j voidaan esittää Joulen sekä Ohmin lain avulla, jolloin saadaan

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c), \quad (2)$$

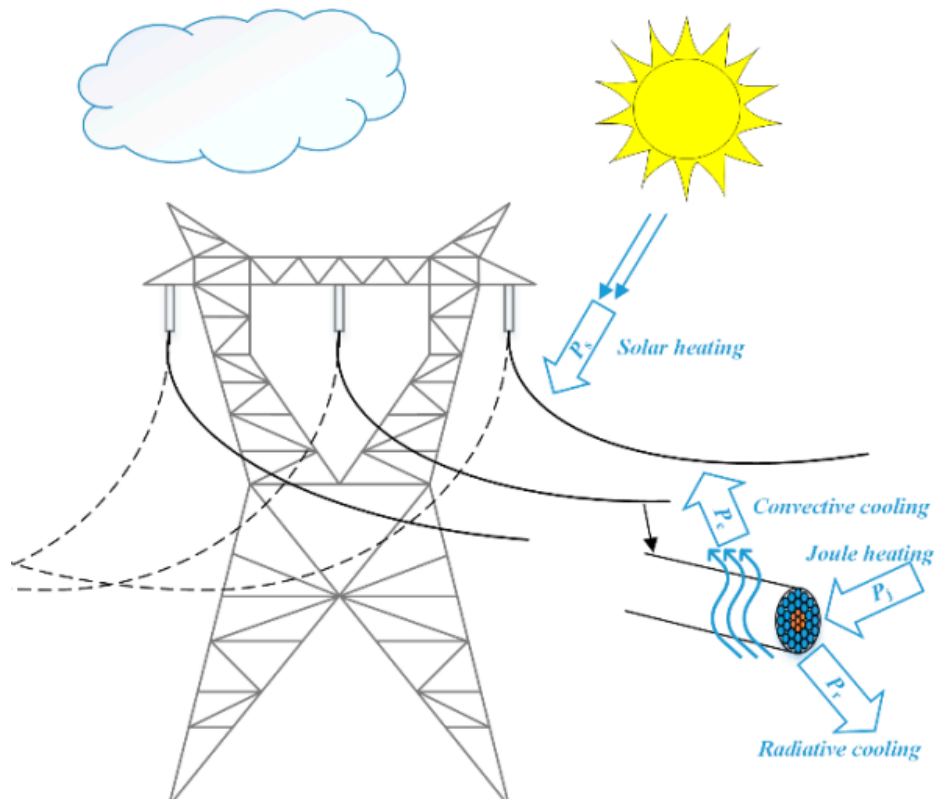
jossa q_c kuvastaa konvektiosta johtuvaa lämpöhäviötä, q_r säteilystä johtuvaa lämpöhäviötä, q_s auringon säteilyn lämpölisäystä, I sähkövirtaa ja $R(T_c)$ vaihtosähköisen johtimen resistanssia johtimen lämpötilassa T_c . Eri johtimien resistansseja eri lämpötiloissa on taulukoitu ja esimerkiksi valmistaja voi tarjota nämä tiedot [14, s. 13].

Termit q_c , q_r , q_s ja $R(T_c)$ ovat kaikki sääolosuhteiden ja johtimen lämpötilan funktioita, joten mittaamalla tarvittavat sääparametrit ja asettamalla johdon lämpötila T_c suurimpaan sallittuun arvoonsa, voidaan suurin sallittu sähkövirta (kuormitettavuus) laskea viemällä yhtälö 2 muotoon [16, s. 324]

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}}. \quad (3)$$

Kaavalla 3 voidaan siis laskea avojohdon jatkuvan tilan kuormitettavuus, kun johdon suurin sallittu lämpötila tunnetaan ja johto on termisessä tasapainotilassa. Jatkuvassa tilassa johdon sähkövirta, lämpötila ja sen kokemat sääolosuhteet oletetaan vakioiksi kaiken aikaa. [4, s. 603][14, s. 2, 6]

Mikäli johdon lämpötila halutaan laskea yhtälöllä 3, saadaan se sähkövirran ja sääparametrien avulla numeerista iterointia käyttämällä [14, s. 7]. Oheisessa artikkelissa [16] vertaillaan numeerisella iteroinnilla saatuja lämpötila-arvoja johdolta mitattuihin arvoihin. Artikkelin tulokset viittaavat siihen, että laskumenetelmä antaa samankaltaisempia tuloksia silloin, kun sähkövirta on pieni, mutta laskutulokset ovat käytäntöön riittävän tarkkoja myös suurilla virroilla.



Kuva 3. Avojohton lämpötasapainoon vaikuttavat termit. Perustuu lähteeseen [21, s. 3].

Koska todellisuudessa sekä avojohton sähkövirta että sääolosuhteet muuttuvat koko ajan, muuttuu myös johdon lämpötila. IEEE:n standardin muutostilan yhtälöllä voidaan huomioida lämpötilan vaihtelu lyhyessä aikavälissä dt

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + I^2 R(T_c), \quad (4)$$

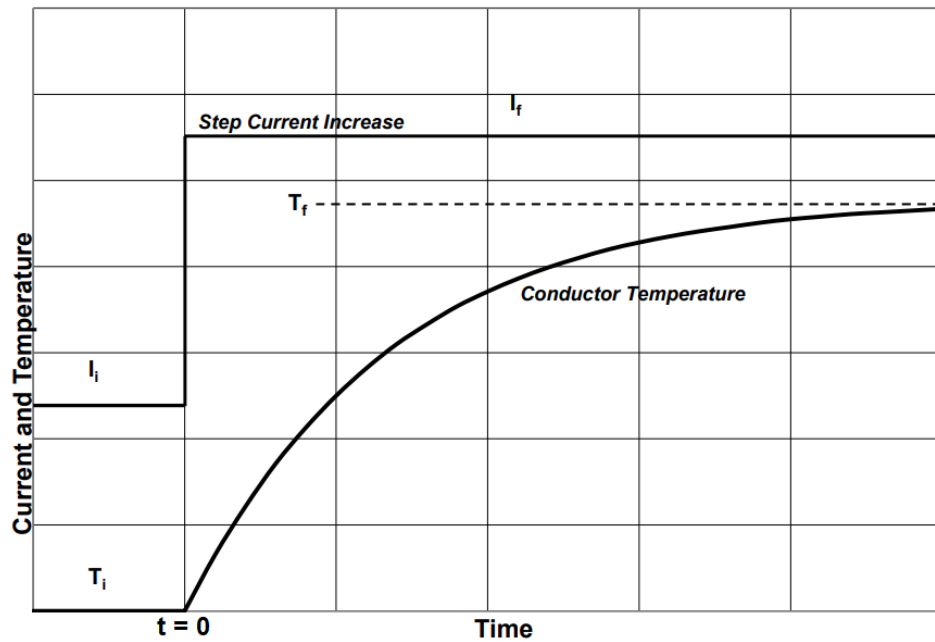
jossa mC_p on johtimen kokonaislämpökapasiteetti, joka kertoo johtimen kyvystä varastoida lämpöä ja muuttaa lämpötilaa. Kun yhtälö 4 viedään muotoon

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [I^2 R(T_c) + q_s - q_c - q_r], \quad (5)$$

saadaan lämpötilan muutos aikayksikössä.

Mikäli linjan sähkövirta muuttuu äkillisesti, puhutaan transientista. Tällöin sähkövirrassa tapahtuu askelmuutos (engl. step change), jossa virran suuruus hyppää yhtäkkiä arvosta I_i arvoon I_f . Virran nopean muutoksen vuoksi myös Joulen lämmitys $I_f^2 R(T_c)$ muuttuu, minkä vuoksi terminen tasapainotila lakkaa olemasta. Askelmuutoksessa ainoastaan sähkövirta muuttuu äkillisesti, ja sääparametrien oletetaan pysyvän vakioina. Muuttuneen Joulen lämmityksen ja syntyneen epätasapainotilan seurauksena johdin alkaa lämmetä tai jäähtyä, minkä vuoksi T_c muuttuu lyhyessä aikavälissä Δt yhtälön 5 mukaisesti. Koska muuttuva johdon lämpötila vaikuttaa myös lämpöhäviöihin q_c ja q_r , lämpötilan

muutos hidastuu vähitellen. Ennen askelmuutosta johdon lämpötila on alkulämpötilassa T_i , ja johdon saavuttaessa jatkuvan tilan se on lopullisessa lämpötilassaan T_f . Lämpötilan muutos on likimäärin eksponentiaalista ja prosessi ilmenee kuvasta 4, jossa askelmuutos tapahtuu ajanhetkellä $t = 0$, jolloin sähkövirta kasvaa äkillisesti. [14, s. 8–9]



Kuva 4. Sähkövirran askelmuutos ajanhetkellä $t = 0$ ja siitä seuraava johdon lämpötilan kasvu. Perustuu lähteeseen [14, s. 8].

Transientitilan kuormitettavuus saadaan laskemalla yhtälöllä 5 johdon lämpötilan muutos eri I_f -arvoilla, minkä jälkeen kuormitettavuudeksi valitaan se I_f -arvo, jolla johto lämpenee suurimpaan sallittuun arvoonsa varatun ajan kuluessa. Muutostilan yhtälöä voidaan käyttää ohimenevissä hätä- ja vikatilanteissa, kuten oikosuluissa, salamaniskuissa tai ylikuormituksissa. Tällöin johdon lämpötila nousee vähitellen ja se voi ylittää suunnitellun käyttölämpötilan. [6][14, s. 8–9]

Johdon lämpötila vaihtelee myös normaalin virran vaihtelun ja sääolosuhteiden vaihteluiden vuoksi. Muutostilan yhtälöä voidaan soveltaa myös näiden vaihteluiden huomiointiin. Kuten transientissa, myös nyt suoritetaan sarja lyhyen aikavälin laskuja, joissa kunkin aikavälin Δt ajan sähkövirran ja sääparametrien oletetaan pysyvän vakioina. Yhden aikavälin lämpötilan muutos ΔT_c saadaan yhtälöllä 5. Jokaisen uuden aikavälin alussa huomioidaan mahdollisesti muuttuneet sähkövirta ja sääolosuhteet. Sarjalla tällaisia laskuja saadaan johdon lämpötila muuttuvien sääolosuhteiden ja sähkövirran suhteen. [14, s. 9–10]

IEEE:n standardi 738 sisältää myös ohjeita ja suosituksia lämpötasapainoyhtälön lämpötermien laskemiseen. Konvektiosta johtuva lämpöhäviö q_c voidaan erotella luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Luonnollinen konvektio tapahtuu tyynessä ilmassa, kun kuumen johdon ympärillä oleva viileä ilma lämpenee ja nousee, jolloin uutta viileää ilmaa virtaa siirtyneen tilalle. Luonnollisen konvektion aiheuttama lämpöhäviö voidaan laskea kaavalla

$$q_{cn} = 3,645\rho_f^{0,5}D_0^{0,75}(T_s - T_a)^{1,25}, \quad [\text{W/m}] \quad (6)$$

jossa ρ_f on ilman tiheys, D_0 johdon halkaisija, T_s johdon pintalämpötila ja T_a ympäröivän ilman lämpötila. Pakotetussa konvektiossa sen sijaan puhallus aiheuttaa viilentävää ilmavirtausta, eli avojohdon tapauksessa siihen osuva tuuli. Pakotetusta konvektiosta johtuva lämpöhäviö voidaan laskea kaavoilla

$$q_{c1} = K_{angle}[1,01 + 1,35N_{Re}^{0,52}]k_f(T_s - T_a), \quad [\text{W/m}] \quad (7)$$

$$q_{c2} = K_{angle}0,754 N_{Re}^{0,6}k_f(T_s - T_a), \quad [\text{W/m}] \quad (8)$$

joissa K_{angle} on tuulen suuntakerroin, N_{Re} Reynoldsin luku ja k_f ilman lämmönjohtavuus. Reynoldsin luku on tuulen nopeuden, ilman tiheyden, johdon halkaisijan ja ilman dynaamisen viskositeetin funktio, ja sillä voidaan erotella laminaarinen ja turbulenttinen ilmavirtaus [14, s. 2]. Yhtälö 7 sopii heikoille tuulen nopeuksille ja yhtälö 8 taas koville. Suosituksena kuitenkin on, että kaikilla tuulen nopeuksilla lasketaan molempien yhtälöiden tuottamat arvot ja käytetään niistä suurempaa. Tuulen suuntakerroin K_{angle} voidaan laskea kaavalla

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\phi) + 0,194 \cos(2\phi) + 0,368 \sin(2\phi), \quad (9)$$

jossa ϕ on tuulen suunnan ja johdon akselin välinen kulma. Pakotetun konvektion viilentämisvaikutus on merkittävästi suurempi kuin luonnollisen konvektion. Heikoilla tuulen nopeuksilla suositellaan laskemaan sekä luonnollinen että pakotettu konvektio ja käyttämään niistä suurempaa arvoa. [14, s. 10–12]

Avoijohdon lämpöhäviö q_r kertoo, kuinka johto säteilee energiaa ympäristöönsä. Säteilävä energia ei tarvitse mitään fyysistä kontaktia (fluidia) siirtyäkseen, toisin kuin konvektiossa. q_r riippuu pitkälti johdon ja ympäristön välisestä lämpötilaerosta, mutta myös johdon emissiivisyydellä on merkitystä. q_r voidaan laskea kaavalla

$$q_r = 17,8D_0\varepsilon \left[\left(\frac{T_s+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a+273}{100} \right)^4 \right], \quad [\text{W/m}] \quad (10)$$

jossa ε on johdon emissiivisyys. q_r on yleensä pieni osa kokonaislämpöhäviöstä, normaalisti se on 25–35 % konvektiohäviöstä q_c , vaikka johdon lämpötila olisikin korkea. [6][12, s. 923][14, s. 12]

Auringon säteilyenergia lämmittää avojohtoa, jolloin johtoon tulee lämpö q_s . Siirtyvä lämpöenergia riippuu auringon sijainnista, aurinkovakiosta, ilmakehän läpi johdolle kulkevan energian määrästä, johdon suunnasta ja johdon absorptiokertoimesta. Kirkkaat ja kiiltävät johdot heijastavat suurimman osan auringon energiasta, kun taas mustat ja kuluneet johdot absorboivat suurimman osan siitä. q_s voidaan laskea kaavalla

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A', \quad [\text{W/m}] \quad (11)$$

jossa α on auringon absorboituvuus, Q_{se} korjattu auringon ja taivaan säteilyn lämpövoimakkuus, θ auringonsäteiden tehokas tulokulma ja A' johdon projektiopinta-ala. q_s on tyypillisesti 10–30 % termistä $I^2 R(T_c)$ [12, s. 923]. [14, s. 12–13]

Jos johtimen sisuksen lämpötila on muutaman asteen suurempi kuin johtimen pintalämpötila, tulee resistanssi $R(T_c)$ laskea johdon keskimääräistä lämpötilaa käyttämällä, eikä johdon pintalämpötilaa käyttämällä. Jos virrantiheys on kuitenkin pienempi kuin 1 A/mm^2 , radiaalinen lämpötilaero on yleensä alle $5 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin lämpötilaero voidaan jättää huomioida. [14, s. 14–15] Tällöin voidaan siis käyttää oletusta $T_c = T_s$. Myöhemmin huomataan, kuinka osa DLR-teknologioista mittaa suoraan johdon pinnan lämpötilaa ja osa käyttää muunnoksen avulla johdon arvioitua keskilämpötilaa. Tuntemalla johdon lämpötila ja sääparametrit, voidaan q_c , q_r , q_s ja $R(T_c)$ laskea. Tällöin yhtälöllä 3 laskettu sähkövirta vastaa linjan kuormitusvirtaa. [14, s. 7] Toisaalta tämä tarkoittaa myös sitä, että tuntemalla kuormitusvirta, johdon lämpötila ja vain osa sääparametreista, voidaan jokin muuttujista q_c , q_r , q_s ja $R(T_c)$ selvittää yhtälöllä 2.

Myös CIGRE on julkaissut suosituksia ja kehittänyt laskentamallin [15] kuvaamaan ilma-johtojen termistä käyttäytymistä. Molempia malleja voidaan käyttää hyvien laskutuloksien saamiseksi, vaikka IEEE on yksinkertaistanut yhtälöään poistamalla kolme termiä. Näiden termien merkitys laskuihin on usein vähäinen, eikä tuloksissa siten ole merkittävää eroa. CIGRE:n huomioimat lisätermit ovat:

- P_m = magneettinen lämmitys
- P_i = Auringon koronalämmitys
- P_w = haihdutusjäähdytys.

Nämä termit jätetään usein huomiotta myös siksi, koska niiden arvioiminen voi olla vaikeaa. Ympäristön olosuhteista riippuen, mallit voivat tuottaa kuormitettavuuslaskuissa

8,5 %:n eron. Esimerkiksi haihdutusjäähdytyksen merkitys kasvaa, kun johtimeen kohdistuu samanaikaisesti sekä vesisade että tuuli. Useimmiten ja tyypillisimmissä sovelluksissa laskujen ero on kuitenkin alle 1 %. [6][22] Oheisessa artikkelissa [23] vertaillaan IEEE:n ja CIGRE:n yhtälöillä laskettuja johdon lämpötila-arvoja keskenään. Lisäksi molempien yhtälöiden antamia arvoja verrataan johdolle asennetun sensorin mittaamiin arvoihin. Vertailusta käy ilmi, että molemmilla yhtälöillä saadaan tarkempia tuloksia, jos käytetään muutostilan yhtälöitä. Koska jatkuvan tilan yhtälöillä ei pystytä mallintamaan lämpötilan siirtymisiä, näkyy johtimen arvioiduissa lämpötiloissa piikkejä, joita ei oikeasti ole olemassa. Joka tapauksessa sekä CIGRE:n että IEEE:n yhtälöt ennemmin yliarvioivat kuin aliarvioivat johdon lämpötilan, mikä siis synnyttää eron tai virheen turvallisemmalle puolelle. Lisäksi artikkelista käy ilmi, että jos käytetään pyranometriä auringon säteilyn mittaamiseen, yhtälöillä saadut lukemat vastaavat paremmin mitattuja arvoja niin jatkuvan kuin muuttuvan tilan tapauksessa.

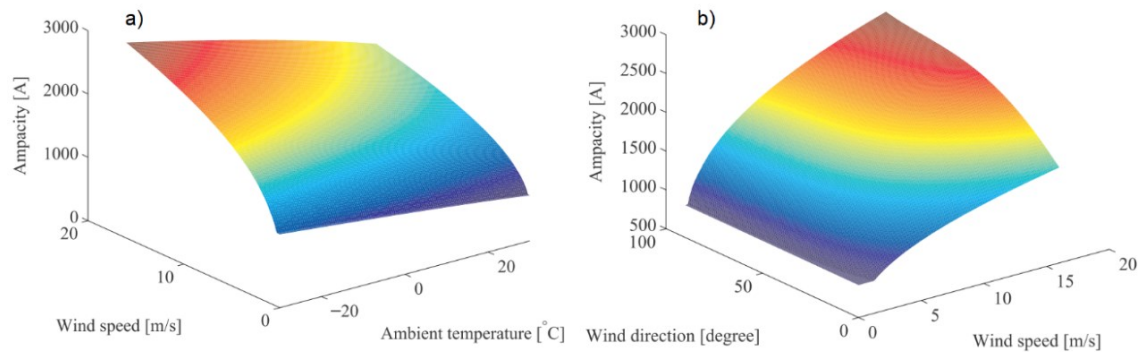
2.2.2 Sääolosuhteet ja niiden vaikutus

Lämpötasapainoyhtälöistä käy ilmi, kuinka ympäristön sääolosuhteet vaikuttavat avojohdon kuormitettavuuteen. Tuulen aiheuttaman konvektioviilennyksen merkitys johdon lämpötilaan on suurin varsinkin, jos johtoa kuormitetaan kevyesti. Tuulitunnelikokeessa [24] ACSR-johdon (175 mm^2) sisuksen lämpötila laski lähes 45 %, kun kohtisuora tuulen nopeus nostettiin arvosta 0 m/s arvoon 1 m/s. Tuulen nopeuden kasvaessa sen suhteellinen viilennysvaikutus kuitenkin pienenee. Kohtisuora tuuli voi maksimoida johdon ympärillä olevan turbulenssin ja sitä kautta lämmönsiirtymisen johdon pinnalla. Sen sijaan johdon suuntainen tuuli vähentää lämmönvaihtoa, minkä vuoksi tuulen suunnalla on myös oleellinen merkitys. [4, s. 602][24][25, s. 746] Matalilla tuulen nopeuksilla, kun tuuli on turbulenti, tuulella ei välttämättä ole pysyvää suuntaa [14, s. 3].

Tuulen lisäksi ympäristön lämpötilalla on keskeinen vaikutus avojohdon kuormitettavuuteen. Ympäristön lämpötila vaikuttaa suoraan esimerkiksi konvektio- ja säteilylämpöhäviöihin, mikä ilmeni edellisessä luvussa. Auringon säteilyn vaikutus johdon kuormitettavuuteen on yleisesti vähäinen, mutta pienillä tuulen nopeuksilla (alle 0,5 m/s) siitä voi tulla merkittävä rajoittava tekijä. Auringon säteily voi muun muassa nostaa johdon lämpötilan reilusti ilman lämpötilan yläpuolelle. Jos sähkölinjaa kuormitetaan raskaasti, ympäristön lämpötilan ja auringon säteilyn merkitykset pienenevät. Jos tuulen nopeus on pieni, niiden merkitykset kuitenkin kasvavat. [4, s. 602–603][9, s. 1717–1718]

Kuva 5 perustuu IEEE:n lämpötasapainoyhtälöön (yhtälö 3), ja siinä linjan jännite on 240 kV. Kuvassa 5a kuormitettavuuden odotusarvo on tuulen nopeuden ja ympäristön lämpötilan funktiona, kun tuulen tulokulma pidetään vakiona 45° :een kulmassa. B-kohdassa

kuormitettavuus on taas tuulen nopeuden ja suunnan funktiona, kun ympäristön lämpötila pidetään vakiona 5 °C. Kuvasta voidaan selvästi todeta, että tuulen nopeudella on suuri merkitys kuormitettavuuteen. Lisäksi a-kohta osoittaa, kuinka kylmä ilma tehostaa konvektioiilennystä. B-kohta puolestaan kertoo, kuinka heikoilla tuulen nopeuksilla tuulen suunnan merkitys on melko vähäinen, mutta suurilla tuulen nopeuksilla sen merkitys kasvaa. Molemmista kohdista voi nähdä, että pienten tuulen nopeuksien merkitys on suuri.

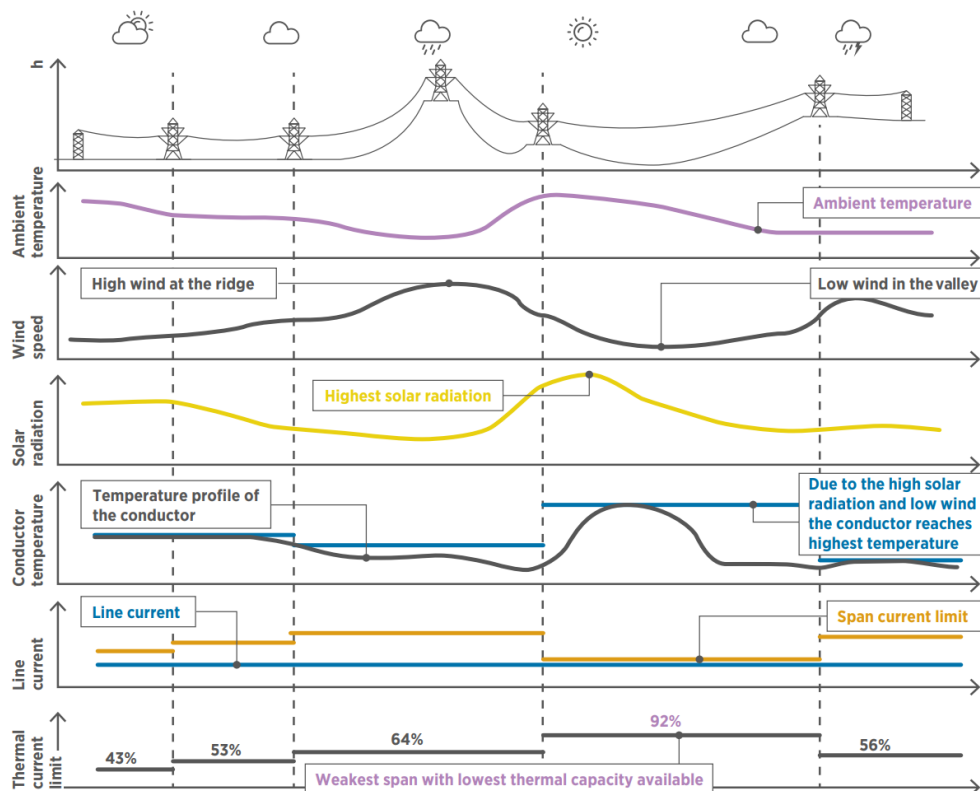


Kuva 5. Avojohton kuormitettavuuden vaihtelu tuulen nopeuden ja a) ympäristön lämpötilan b) suunnan funktiona. Perustuu lähteeseen [4, s. 603].

Vaikka lämpötasapainoyhtälöllä pystytään esittämään selkeä yhteys ympäristöolosuhteiden ja kuormitettavuuden välille, käytännössä laskeminen ei ole niin suoraviivaista ja yksinkertaista. Tuuliolosuhteet voivat esimerkiksi muuttua yhtäkkiä, ja haasteena onkin määrittellä sellaista aikasarjaa, jossa tuulen käyttäytymistä voitaisiin pitää stationäärisenä. Myös siirtolinjan ympäristö voi vaihdella esimerkiksi puiden, rakennusten tai pinnanmuotojen takia. Tämä lisää entisestään tuuliolojen vaihtelua, sillä tuulen nopeus voi paikoittain pienentyä mainittujen esteiden vuoksi. Erityisesti matalat tuulen nopeudet ovat kuormitettavuuden kannalta tärkeitä, mutta juuri ne saattavat muuttaa herkästi suuntaansa ja heikentyä kohdatessaan esteen. Vaikka ympäristö olisikin yhtenäinen ja tuulen nopeus kaikkialla sama, niin itse linja voi muuttaa suuntaansa, eikä konvektioiilennys tällöinkään ole kaikkialla sama. Tuuliolosuhteet voivat muuttua myös korkeussuunnassa, jolloin yksittäinen jänneväli voi kokea eri suuruisen pystysuoran tuulen nopeuden, mikäli riippuma on suuri. Tuulen vaikutuksen määrittäminen koko linjalla ei siis ole kovinkaan yksioikoista. Tuuli pitäisi pystyä mitata monesta paikkaa, oikealta korkeudelta ja riittävällä tarkkuudella, joka saattaa olla haasteellista pienillä tuulen nopeuksilla. Esimerkiksi ilman lämpötila on tässä mielessä paljon suotuisampi parametri, sillä se voidaan mitata tarkasti eikä se muutu yhtä nopeasti tai voimakkaasti kuin tuuli. [9, s. 1717–1718][11, s. 27][19, s. 254][25, s. 747]

IEEE:n lämpötasapainoyhtälö ei huomioi vesisateen vaikutusta avojohdon kuormitettavuuteen. Kuitenkin vesisade jäähdyttää johtoa ja voi laskea sen lämpötilaa merkittävästi. Sateen viilennysvaikutus on sekä impulsiivinen että kestävä, sillä sen alkaessa johdon lämpötila laskee nopeasti ja vaikka sade loppuu, lämpötila pysyy pitkään alkuperäistä arvoa matalampana. Sateen lämpöhäviön mallintaminen vaatii parametreja, kuten suhteellisen ilmankosteuden, sademäärän, tuulen nopeuden ja ilman paineen. Sateen vaikutusta koko linjalla on kuitenkin vaikea arvioida. [6][9, s. 1718][13]

Kuva 6 havainnollistaa ympäristötekijöiden vaikutuksia sähkölinjalla ja osoittaa, miksi DLR-arvon määrittäminen on haastavaa varsinkin silloin, kun sähkölinja on pitkä ja sen ympäristö vaihteleva. Kuvassa 6 siirtolinja kokee samanaikaisesti erilaisia sääolosuhteita, minkä lisäksi myös linjan maasto ja jännevälien pituudet vaihtelevat. Laaksossa sijaitsevan jännevälin johtoon kohdistuu auringonpaiste ja heikko tuuli, minkä vuoksi johdon lämpötila on korkea. Sen sijaan harjun päälle kohoavalla jännevälillä on pilvistä ja sinne kohdistuu kova tuuli, joten johdon lämpötila on pieni. Jännevälin kuormitettavuus riippuu viilentävien sääolosuhteiden lisäksi johdon maksimilämpötilasta, joka perustuu jännevälin suurimpaan sallittuun riippumaan. Koko linjan kuormitettavuus on valittava heikoimman jännevälin mukaan, jotta linjan kuormitusvirta ei ylikuumentaa heikomman jännevälin johtoa.



Kuva 6. DLR-arvon määräytyminen linjaolosuhteiden perusteella [20, s. 13].

3. DYNAAMISEN KUORMITETTAVUUDEN RATKAISUT

Jotta dynaaminen kuormitettavuus voidaan laskea ja DLR-järjestelmää hyödyntää, tulee siirtolinjan reaaliaikaiset ympäristöolosuhteet tuntea. Kun sääparametreja mittaavia laitteita sijoitetaan siirtolinjan varrelle, voidaan niistä saatua dataa käyttää DLR-laskennan perustana [12, s. 923]. Käytännössä linjalle tulee valita sopiva määrä mittaavia laitteita, analysoida dataa ja ennustaa käytettävissä oleva siirtokapasiteetti tietylle aikajaksolle, kuten 5–60 min. Laskettu DLR voidaan lähettää verkko-operaattorille, joka voi tällöin myös itse arvioida sitä ja harkintansa mukaan päättää sen käytöstä. Toinen vaihtoehto on kerätä reaaliaikaista DLR-dataa ja syöttää se automaattisesti hallintajärjestelmään, joka tekee säännöllisin väliajoin tuloksien perusteella operatiivisia päätöksiä. [11, s. 180] Yleensä DLR-teknologiat sisältävät kolme pääkomponenttia: mittalaitteet, viestintälaitteiston ja ohjelmiston. Mittalaitteilla hankitaan laskennan lähtötiedot ja valvotaan linjaa, viestintälaitteistoa käytetään mitatun datan tiedonsiirrossa ja ohjelmisto tulkitsee siirrettyä dataa sekä laskee linjan termisen kapasiteetin. [4, s. 602]

Koko linjan kattavan mittaamisen sijasta DLR-laitteisto voidaan asentaa vain niin sanotuille *kriittisille jänneväleille* (engl. critical spans), joissa dynaaminen kuormitettavuus voi aiheuttaa rikkomuksia [1, s. 81]. Kriittiset jännevälit ylikuumentuvat todennäköisimmin ja niiden paikat voivat myös vaihdella, kun sääolosuhteissa ja ympäristössä tapahtuu muutoksia [26]. Mikäli kriittinen jänneväli vaihtelee usein, on luotettavinta mitata linjaa koko sen matkalta. Kun kriittinen jänneväli on löytynyt, valitaan linjan kuormitettavuus sen mukaan. [11, s. 187–188]

Eri DLR-ratkaisuja ja -laitteita voidaan valita esimerkiksi asennuksen hinnan, helppouden, huoltotarpeen, menetelmän tarkkuuden, käyttörajoitusten, käyttöiän, luotettavuuden tai käyttökelpoisuuden perusteella [4, s. 602]. Kun valitaan sopivaa DLR-teknologiaa, on ensiarvoisen tärkeää käsittää siirtolinjan tilakäyttäytyminen sen muuttuvassa toimintaympäristössä. Johdon lisäksi myös muut rakenteet, kuten eristejärjestelmät on otettava huomioon. Osa DLR-teknologioista, kuten lämpötila-anturit, mittaavat ja valvovat vain yhtä pistettä linjalla, mikä tuottaa informaatiota hyvin pieneltä alueelta. Johdon lämpötilan mittaus ei myöskään kerro mitään johdon fyysisistä muutoksista, vaikka sensoreita asennettaisiin useita. Esimerkiksi jännitystä ja riippumaa mittaavat laitteet sekä antavat tietoa laajemmalla alueella että kertovat johdon fyysisestä tilasta. Laitteiden luontaisten tarkkuuksien lisäksi ratkaisun lopulliseen tarkkuuteen vaikuttaa olennaisesti se, mikä on korrelaation tarkkuus, kun mitattuja suureita yhdistetään johdon lämpötilaan

ja lämpötasapainoyhtälön termeihin. Ratkaisuihin on hyvä myös huomioida, ettei uuden järjestelmän käyttöönotto aiheuta verkkoyhtiön työntekijöille kohtuutonta lisätaakkaa tai häiritse muita toimintoja. [11, s. 183–185, 190]

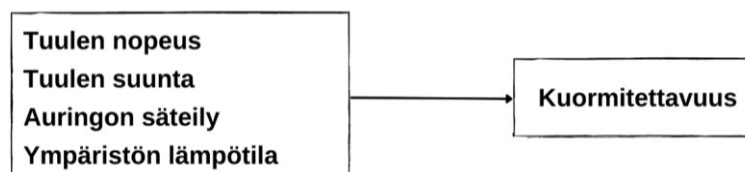
3.1 Epäsuorat menetelmät

Epäsuorissa DLR-menetelmissä arvioidaan sääolosuhteiden vaikutus ja lasketaan niiden perusteella kuormitettavuus. Mittauksia ei oteta suoraan johdosta. Tarvittavat sääparametrit voidaan hankkia reaaliaikaisesti esimerkiksi erilaisilla sensoreilla tai käyttämällä numeerista sääennustusta, eli NWP-mallinnusta (engl. Numerical Weather Prediction). Kun sääolosuhteet ovat tiedossa, pystytään dynaaminen kuormitettavuus laskea lämpötasapainoyhtälöllä. Epäsuorien menetelmien tarkkuus ei riipu linjan kuormituksesta. [4, s. 602–603][18, s. 7] Koska epäsuorissa menetelmissä ei tarvitse tehdä suorita asennuksia johtoon, ovat ne suorita menetelmiä yksinkertaisempia ja vähemmän häiritseviä. Epäsuorat menetelmät ovat kuitenkin haasteellisia ympäristön epä sääennöllisyyksien ja muuttuvien sääolosuhteiden vuoksi. [1, s. 82] Siksi dataa täytyy kerätä riittävän usein ja riittävän laajalta alueelta.

Reaaliaikaisen DLR:n lisäksi myös siirtokapasiteetin ennustaminen on tärkeää, sillä sähköntuotantoa ja -siirtoa pitää suunnitella etukäteen [4, s. 604]. Vaikka sääennustaminen on pohjimmiltaan deterministinen prosessi, käytännön ratkaisuihin on tehtävä yksinkertaistuksia, jotka johtavat likimääräiseen tulokseen. Erityisesti matalia tuulen nopeuksia on vaikea simuloida ja ennustaa, ja niiden kohdalla oleellisempaa onkin esiintymistodennäköisyys. NWP-ennustamisella luodaan matemaattisia ja numeerisia malleja ilmakehästä, mikä voi laskennallisesti olla hyvin raskasta. Ennustuksia voidaan tehdä niin paikallisesti kuin globaalisti, sekä lyhyelle että pitkälle aikavälille. [4, s. 603–604][9, s. 1719, 1721–1722] Jos NWP-mallilla halutaan ennustaa yli kolmen tai neljän vuorokauden päähän, tulee ennustuksia tehdä ilmakehän liikkeiden vuoksi globaalisti, jolloin mallin vaakatasoinen resoluutio voi esimerkiksi olla 15–40 km. Lyhyemmän aikavälin ennustuksissa laskentaresurssit voidaan keskittää pienemmälle alueelle, parantaa datan resoluutiota ja mallintaa fyysisiä prosesseja tarkemmin. Tällöin voidaan saavuttaa muutaman kilometrin tai erikoissovelluksissa jopa tätä tarkempi resoluutio. [9, s. 1719] Tuulen nopeus ja suunta vaihtelevat nopeasti niin ajan kuin paikankin suhteen. Esimerkiksi esteet tai pinnanmuodot voivat aiheuttaa merkittäviä muutoksia tuulen nopeudessa tai suunnassa vain muutaman metrin alueella. Jotta sääennustusmalli pystyisi huomioimaan näitä vaikutuksia, pitäisi sen hilan koon olla metrien kokoluokkaa. Koska nykyisillä korkean resoluution sääennustusmalleilla päästään noin 1 km:n kokoluokkaan, eivät mallit

pysty huomioimaan kaikkia tärkeitä tekijöitä. Kuitenkin kuormitettavuuden kannalta sääparametrien vaikutus yhdistyy linjaosuuksiin ja niiden lähiympäristöön, mikä vähentää hilan kokoon liittyviä vaatimuksia. Lisäksi sääennustusmallien tuloksia voidaan parantaa tilastollisella tai dynaamisella skaalauksella. [9, s. 1720] Ennustamisessa voidaan hyödyntää erilaisia tekniikoita, kuten Fourier-analyysiä, hahmontunnistusta ja neuroverkkoja [4, s. 604].

Sensoripohjaiset epäsuorat DLR-menetelmät perustuvat pitkälti sääasemiin. Sääasemat mittaavat tavallisesti ilman lämpötilaa, tuulen nopeutta ja suuntaa, auringon säteilyä sekä sademäärää. Tyypillisessä sääasemassa on siis lämpömittari, anemometri, pyranometri ja sademittari. Luvussa 2.2.2 todettiin tuulen olevan kuormitettavuuden kannalta kriittinen parametri, joten sen mittaamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tuulta mittaavia anemometrejä on erilaisia, minkä vuoksi niiden tarkkuudet, käyttöiät ja hinnat vaihtelevat paljon. [4, s. 603] Esimerkiksi kuppianemometrit ovat herkkiä mittausvirheille alle 1 m/s tuulen nopeuksilla [1, s. 82], mutta ultraäänianemometrillä saadaan tarkkoja tuuliarvoja myös matalilla tuulen nopeuksilla, jopa nopeuteen 0,1 m/s asti [12, s. 924]. Hyvän tarkkuuden lisäksi ultraäänianemometri voidaan varustaa lämmittimellä, joka estää mitalaitteen jäätyksen. Kuppi- ja propellianemometreissä ilmenee alhaisia sakkausnopeuksia, ellei niiden tarkkuuslaakereita vaihdeta säännöllisesti. Siten kuppi- tai propellianemometrit eivät sovellu hyvin pitkäaikaiseen käyttöön DLR-järjestelmässä. [27, s. 2159] Sääasemia voidaan sijoittaa joko pylväisiin pitkin linjaa tai pelkästään sähköasemille. On kuitenkin tärkeää, että sääasema on mahdollisimman lähellä johdon kokemia olosuhteita, minkä vuoksi pelkästään sähköasemille asennetut sääasemat antavat epätarkempia tuloksia. Hyvä puoli sähköasemille asennetuissa sääasemissa on niiden helppo huoltaminen. [12, s. 923–924] Kun sääparametrit ovat tiedossa, voidaan kuormitettavuus määrittää yhtälöllä 3. Epäsuorien menetelmien DLR-prosessia on havainnollistettu kuvassa 7.



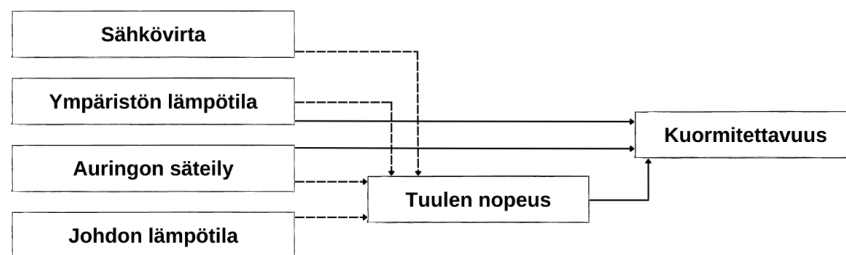
Kuva 7. Säämuuttujiin perustuva DLR-menetelmä. Perustuu lähteeseen [1, s. 81].

3.2 Suorat menetelmät

Suorissa menetelmissä dynaamisen kuormitettavuuden määrittäminen perustuu johdolta suoraan otettaviin mittauksiin. Johdon eri ominaisuuksien valvominen antaa dataa johdon tilasta, jonka perusteella voidaan määrittää laskennassa tarvittavat lähtötiedot.

Suorissa menetelmissä linjalle ja johtoon kiinni asennetaan erilaisia sensoreita, jotka mittaavat linjaominaisuuksia, kuten johdon lämpötilaa, sähkövirtaa, riippumaa, jännitystä tai ilmaväliä. [4, s. 604][28, s. 15]

Luvussa 2.2.2 kerrottiin siitä, kuinka tuulen kokonaisvaltainen mittaaminen voi olla haastavaa. Siksi monet DLR-ratkaisut mittaavat suoraan johdon lämpötilan, jonka avulla voidaan laskea *tehokas tuulen nopeus* (engl. effective wind speed) ja käyttää sitä kuormitettavuuden laskemiseen (kuva 8) [1, s. 81][12, s. 925]. Tehokas tuulen nopeus tarkoittaa sellaista ekvivalenttia kohtisuoraa ($\phi = 90^\circ$) tuulen nopeutta, jonka viilennysvaikutus on sama kuin johtoon osuvan faktisen tuulen nopeuden [9, s. 1718]. Lämpötila voidaan mitata johtoon kiinnitetyillä sensoreilla, jotka mittaavat johdon pintalämpötilan. Koska riippuma on kuitenkin johdon sisuksen keskimääräisen lämpötilan funktio, ei sensoreiden pistemäinen pintalämpötilamittaus ole ideaali vaihtoehto riippumarajoitteisilla linjoilla [18, s. 8][27, s. 2155]. [1, s. 82] Menetelmän tarkkuus kuitenkin paranee, jos linjan kuormitusvirta on suuri. [4, s. 604] Mittaustarkkuuteen vaikuttaa lämpötilasensoreiden oma massa sekä tuulen virtausta häiritsevä kotelo, minkä vuoksi sensorit tulee kalibroida huolellisesti [12, s. 925]. Toinen lähestymistapa määrittää johdon lämpötila on hajautettu mittaus. Siinä lämpötilan jakautumista arvioidaan johtimeen upotettujen valokuitujen avulla. [1, s. 84][4, s. 604] Kun johdon lämpötila tunnetaan, voidaan tehokas tuulen nopeus laskea ja johdon dynaaminen kuormitettavuus määrittää [12, s. 925].



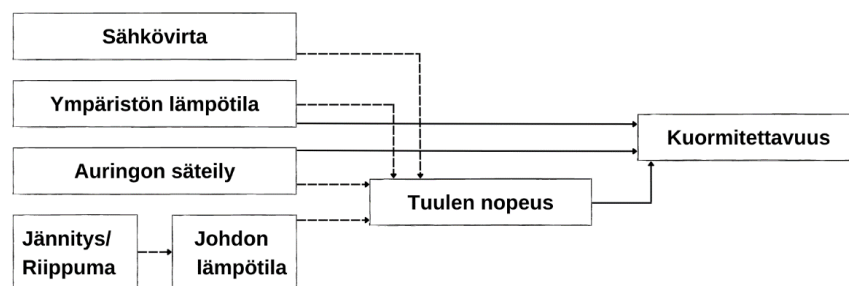
Kuva 8. Kuormitettavuuden laskeminen johdon lämpötilan avulla. Perustuu lähteeseen [1, s. 81].

Johdon jännityksen mittaaminen on toinen lähestymistapa, jota voidaan käyttää suorissa DLR-ratkaisuissa. Jännitys voidaan mitata jännitysantureilla joko paikallisesti tai linjan päätepisteissä [4, s. 604]. Anturi asennetaan linjan kanssa sarjaan niin, että se sijaitsee pylvään ja eristinketjun välissä ja on siten sähköisesti eristetty. Koska jännityksen ja riippuman välillä on suora yhteys, on jännityspenusteinen menetelmä oivallinen vaihtoehto juuri riippumarajoitteisille linjoille. Riippuma voidaan laskea tuntemalla jännitys, jännevälän pituus sekä johdon massa pituusyksikköä kohden. [1, s. 85][29, s. 5–6] Mikäli kaikkien linjan jänneväliden jännitykset ovat samaa suuruusluokkaa, antaa jännityspenusteinen menetelmä tarkempia tuloksia [4, s. 605] ja kuvastaa koko linjan keskimääräistä tilaa [1,

s. 85]. Jos jännevälien jännitykset taas vaihtelevat merkittävästi, kuvastavat tulokset enemmän paikallisia arvoja [12, s. 925]. Toinen mittaustuloksiin oleellisesti vaikuttava parametri on linjan kuorma. Suurilla virrantiheyksillä (yli 1 A/mm²) jännitystä mittaavat laitteet antavat tarkkoja arvoja [30]. Jännitysperusteisen järjestelmän asentaminen ja huoltaminen saattaa edellyttää useita sähkönsiirron katkoja. [4, s. 605]

Riippuma voidaan määrittää useammalla eri tavalla. Eräs tapa määrittää se on mitata johdon värähtelytaajuutta johtoon kiinnitetyllä mittalaitteella. Laitteen kiihtyvyyssanturit mittaavat suurella herkkyydellä jännevälin johdon harmonista värähtelyä, jonka perusteella riippuma voidaan määrittää. [1, s. 86–87][18, s. 9][27, s. 2156–2157] Värähtelytaajuusmittauksilla riippuma voidaan määrittää suoraan, eikä muita parametreja tai kalibrointia tarvita. [4, s. 605] Toinen tapa määrittää riippuma on muodostaa johtoon edestakaisin kulkeva mekaaninen aalto ja mitata sen matka-aika. Aalto muodostetaan iskulla ja se heijastuu viereisestä johdinpidikkeestä takaisin. [4, s. 605][27, s. 2156] Riippuman määrittämiseksi voidaan myös mitata johdon kallistuma ja hyödyntää kuvankäsittelyä. Esimerkiksi pylvääseen asennetulla videokameralla voidaan seurata jännevälin keskivälille ripustetun kohteen liikettä. Prosessoimalla otettuja kuvia, pystytään johdon riippuma laskemaan. Kun riippuma, sähkövirta ja sääparametrit tunnetaan, voidaan kuormitettavuus laskea. [1, s. 86][27, s. 2157] Monien riippumaperusteisten järjestelmien huolenaiheena on se, että tuuli saattaa vaikuttaa mittaustuloksiin [4, s. 605].

Koska jännityksellä tai riippumalla ei voida suoraan laskea dynaamista kuormitettavuutta, täytyy niitä hyödyntäessä tehdä muunnoksia. Yksi vaihtoehto on muuntaa linjaparametrit vastaamaan johdon lämpötilaa, jota voidaan käyttää tehokkaan tuulen nopeuden laskemiseen. Tämä prosessi ilmenee kuvasta 9. Jotta muunnos voidaan tehdä ja johdon lämpötila määrittää, tarvitaan kenttädatan analysointia ja kalibrointia. Tarvittavia lähtötietoja ovat johtimen ominaisuudet ja ympäristöolosuhteet. Muunnoksen jälkeen, kun tuulen vaikutus on laskettu, voidaan kuormitettavuus laskea lämpötasapainoyhtälöllä. [4, s. 605][12, s. 925–926][30, s. 846]

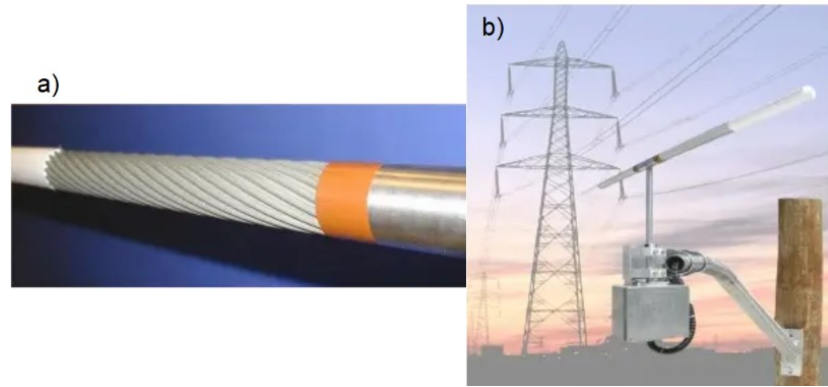


Kuva 9. Kuormitettavuuden laskeminen riippuman ja jännityksen avulla. Perustuu lähteeseen [1, s. 82].

DLR-ratkaisu voi perustua myös ilmavälin mittaamiseen. Tällöin voidaan hyödyntää esimerkiksi ääniaaltoja, mikroaaltoja, laseria tai johdon magneettikenttää [4, s. 605]. Mikäli jännevälin pylvääät ovat samassa tasossa, muodostuu suurin riippuma aina jännevälin keskikohtaan, jolloin se on usein paras paikka mittalaitteen sijoittamiselle. On kuitenkin hyvä huomata, ettei pienin ilmaväli välttämättä sijaitse samassa kohtaa kuin suurin riippuma, jos johdon ympäristö on epätasainen. Esimerkiksi kasvillisuuden tai rakennusten vuoksi pienin ilmaväli voi sijaita muualla. [27, s. 2157] Yksi tapa mitata ilmaväli on asentaa johtoon sensoreita, jotka lähettävät ääniaaltoja maata kohti. Kun aallot heijastuvat ja saapuvat takaisin sensoriin, voidaan ilmaväli laskea aallon matka-ajan perusteella. [18, s. 10][27, s. 2157] Toinen lähestymistapa on mitata johdon magneettikentän suuruutta johdon alapuolelle maahan sijoitetuilla sensoreilla. Sensoria ei siis asenneta tässä menetelmässä johtoon kiinni, minkä vuoksi asennus, huoltaminen ja kalibrointi käyvät helposti. [4, s. 605][27, s. 2158]

3.3 Kehitetyt teknologioita

ThermalRate on DLR-teknologia, joka perustuu siirtolinjan sähköjohdosta tehtyihin jäljennyksiin. *ThermalRate*-sensori koostuu kahdesta metallitangosta, joiden materiaali ja halkaisija vastaavat linjan johdinta. Johdinjäljennys asennetaan linjan lähelle niin, että se vastaa linjajohtojen korkeutta ja on niiden kanssa samansuuntainen. Tankojen ulkomuoto ilmenee kuvasta 10a ja koko sensorin ulkomuoto kuvasta 10b. Toista tankoa lämmitetään vakioteholla syöttämällä sen sisälle virtaa, joka myös mitataan. Toisessa tangossa ei kulje virta, siitä mitataan auringon lämpövaikutus. Tankojen sisällä on termopari (lämpösähköpari, termoelementti), joka mittaa molempien tankojen lämpötilaa. Kun sensori vertailee tankojen lämpötiloja ja sitä, miten sääolosuhteet lämmittävät ja viilentävät johdinjäljennystä, voi se laskea tehokkaan tuulen nopeuden. Tämän jälkeen sensori voi määrittää lämpötasapainoyhtälöllä mittauspisteen dynaamisen kuormitettavuuden. Teknologian etu verrattuna suoriin menetelmiin on se, että sensori kykenee tarkkoihin mitaustuloksiin myös pienillä kuormitusvirroilla. Ja toisin kuin monet anemometrit, *ThermalRate* pystyy määrittämään tuulen nopeuden tarkasti myös matalilla tuulen nopeuksilla. Myöskään muutoksia linjaan ei tarvitse tehdä, eikä asennus vaadi sähkönsiirron keskeytystä. Mutta koska sensori ei mittaa suoraan linjasuureita ja antaa mitaustuloksia vain pieneltä alueelta, ei se pysty luotettavasti määrittämään DLR-arvoa esimerkiksi koko jännevälille. [1, s. 82][4, s. 603][12, s. 925][28, s. 26–28][31, s. 3–4]



Kuva 10. *ThermalRate a) tanko b) sensori. Perustuu lähteeseen [31, s. 4].*

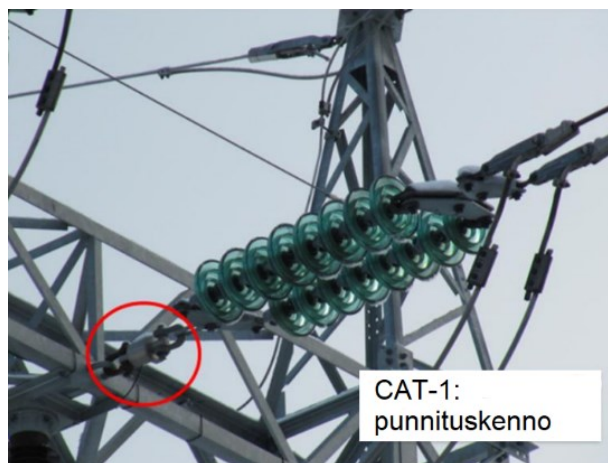
Power Donut 3 on laite, joka mittaa sähkövirtaa, vaihejännitettä, johdon lämpötilaa ja johdon kaltevuuskulmaa. Kuten kuvasta 11 voi nähdä, *Power Donut 3* asennetaan avojohtoon kiinni. Asennus voidaan tehdä jännitteeseen linjaan ilman siirron keskeytyksiä. *Power Donut 3* sisältää ladattavan litiumioniakun ja se saa tarvitsemansa tehon johdon sähkövirran muodostamasta magneettikentästä. Ulkoista teholähdettä ei siis tarvita. *Power Donut 3* pystyy laskemaan johdon lämpötilan tarkkuudella ± 1 °C. [32] DLR-laskenta perustuu IEEE 738 -standardiin ja laskentaprosessi on kuvan 8 kaltainen [28, s. 19]. Ympäristön lämpötila ja auringon säteily saadaan esimerkiksi läheiseltä sääasemalta [1, s. 82–83]. Muun muassa Vattenfall on käyttänyt DLR-järjestelmässään aikaisemman sukupolven *Power Donut 2* -laitteita.



Kuva 11. *Power Donut [32].*

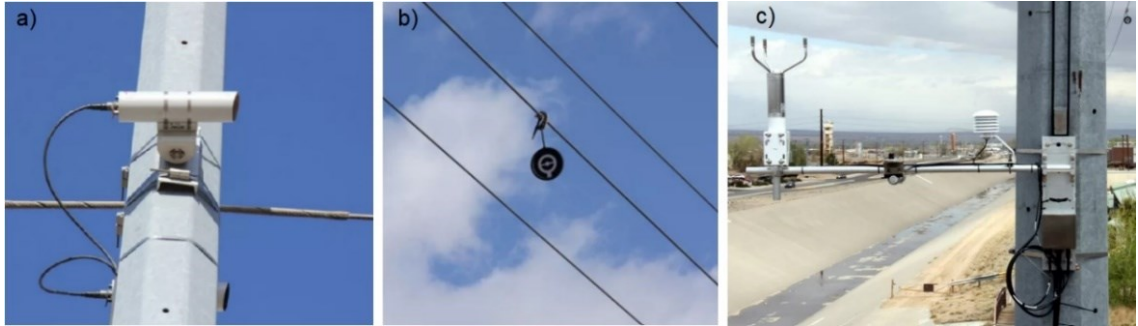
CAT-1 on DLR-järjestelmä, joka mittaa avojohtoon mekaanista jännitystä. Järjestelmä koostuu useasta eri komponentista. Jännitystä mittaavat punnituskennot (kuva 12) asennetaan linjaosuuden päähän eristeen ja umpikujan väliin. Mitatun linjaosuuden jänneväljen pituudet eivät saa vaihdella suuresti [28, s. 22]. Mitattu jännitys muutetaan vastaamaan johdon keskimääräistä lämpötilaa, jonka avulla voidaan laskea johdon kuormitet-

tavuus. Järjestelmä pitää kalibroida, jotta johdon lämpötila voidaan määrittää jännityksestä. [4, s. 605] Muita CAT-1-komponentteja ovat esimerkiksi lämpötilasensori, NRS-sensori (Net Radiation Sensor), antenni, tukiasema ja tietokoneohjelmisto. Niiden avulla voidaan hankkia tarvittavat lähtötiedot, siirtää dataa ja suorittaa DLR-laskenta. Järjestelmän NRS-sensori mukailee linjan johtoa niin, että sen emissiivisyys, absorboituvuus, termien massa ja aikavakio vastaavat johdon arvoja. Lisäksi sensori asennetaan lähelle johtoa ja samansuuntaisesti johdon kanssa, jotta sensorin kokemat sääolosuhteet vastaavat johdon kokemia. CAT-1-järjestelmän ensimmäinen versio esiteltiin vuonna 1991, minkä jälkeen sitä on kehitetty ja järjestelmiä on asennettu yli 500 maailmanlaajuisesti. [33][34]



Kuva 12. CAT-1-järjestelmän punnituskennno. Perustuu lähteeseen [28, s. 21].

Span Sentry on riippumaa mittaava DLR-järjestelmä. Järjestelmän konenäköä hyödyntävä erikoiskamera tarkkailee johtoon ripustettua maalitaulua, jonka avulla se pystyy mittaamaan johdon ilmavälin ± 15 mm:n tarkkuudella. Kamera löytyy kuvasta 13a ja maalitaulu kuvasta 13b. *Span Sentry* sisältää myös virtasensorin ja sääsensoreita, joilla se mittaa sähkövirran voimakkuutta, tuulen nopeutta ja suuntaa, ympäristön lämpötilaa sekä auringon säteilyä. Sääasema löytyy kuvasta 13c. Keräämillään lähtötiedoilla *Span Sentry* pystyy laskemaan niin johdon kuormitettavuuden, lämpötilan kuin jännityksen. Järjestelmä sisältää myös pylvääseen kiinnitettävän ohjausrasian, joka vastaa muun muassa tietoliikenteestä ja datan tallennuksesta. Tarvitsemansa tehon *Span Sentry* saa itsenäisestä aurinkosähköjärjestelmästä. Koko järjestelmän asennus kestää noin 4 tuntia ja se voidaan tehdä jännitteiseen linjaan. Vuonna 1999 julkaistiin teknologian ensimmäinen versio *Sagometer*, minkä jälkeen yli 80 yksikköä on ollut käytössä ympäri Pohjois-Amerikkaa. Alkuperäisen *Sagometer*-järjestelmän tekniikkaa käytetään nykyisessä ja laajemmassa *Span Sentry* -järjestelmässä. [35][36]



Kuva 13. Span Sentry -järjestelmän a) kamera b) maalitaulu c) sääasema. Perustuu lähteeseen [35].

ADR Sense on riippumaa mittaava DLR-sensori, joka asennetaan suoraan linjan johtoon kiinni (kuva 14). Sen kolme kiihtyvyyssanturia mittaavat siirtolinjan matalataajuista värähtelyä, jonka perusteella niin riippuma, kohtisuora tuulen nopeus kuin johtimen keskilämpötila voidaan määrittää. Sensori mittaa myös linjavirran. [37] Riippuma voidaan määrittää ilman kalibrointia, koska riippuman ja johdon perusvärähtelytaajuuden välille voidaan muodostaa suora yhteys. Tyypillisesti sensori pystyy laskemaan riippuman alle 10 cm:n tarkkuudella, mutta vähintään alle 20 cm:n tarkkuudella. [38] Oheisessa artikkelissa [39] on lisätietoa anturista ja esimerkiksi siitä, miten johdon riippuma voidaan selvittää värähtelytaajuuden perusteella tai miten anturia voidaan käyttää myös johdon jäätyksen seurannassa. ADR Sense voidaan asentaa jännitteeseen linjaan esimerkiksi helikopterilla tai tikkailla, ja asennus kestää tyypillisesti alle 30 minuuttia. ADR Sense saa tehonsa linjan magneettikentästä ja sen kerrotaan olevan huoltovapaa. Lisäksi kerrotaan, ettei johdon korkeus, vesisade, lumi, pöly tai kova tuuli vaikuta mittaustarkkuuteen. [37] Toimiakseen anturi tarvitsee vähintään 65 A:n virran, ja virta saa enintään olla 3000 A. [38] Esimerkiksi 132 kV:n linjalla avojohdon (ACSR 280 mm²) kuormitusvirta vuorokauden ajan oli 100–200 A, ja pieneksi kuormitusvirraksi kuvaillaan alle 200 A:n virtaa [23]. ADR Sense tarvitsee toimiakseen linjan liikettä [28, s. 25].



Kuva 14. ADR Sense [37].

TLM on johtoon kiinnitettävä DLR-laite (kuva 15), joka mittaa ilmapäliä, riippumaa, sähkövirtaa ja johdon lämpötilaa. TLM:n LiDAR- (engl. Light Detecting and Ranging) eli valotutkasensori mittaa etäisyyden johdosta maahan ± 10 cm:n tarkkuudella. Oppimisalgoritmin avulla muodostetaan johdolle käyttäytymismalli, jota hyödyntämällä yhdessä ilmapälidatan kanssa voidaan määrittää johdon keskimääräinen lämpötila. Riippuma arvioidaan puolestaan TLM:n kaltevuussensorilla. TLM voidaan asentaa jännitteeseen linjaan esimerkiksi eristesauvalla tai käyttämällä helikopteria. Laite saa tarvitsemansa tehon linjan sähkövirrasta, jonka on kuitenkin vähintään oltava 50 A. Asennuksen jälkeen laitteen etäisyys maahan saa enintään olla 100 m. Linjamittauksia suorittavat TLM-laitteet ovat osa kattavaa ja yhteensopivaa SMARTLINE-järjestelmää, joka sisältää myös DLR-ohjelmiston, ennustusohjelmiston ja johtimen elinikää tarkkailevan moduulin. [40][41]



Kuva 15. TLM-tarkkailulaite [40].

3.4 Menetelmien vertailua

Yksinkertaisimmat ja halvimmat DLR-toteutukset perustuvat epäsuoriin sääperusteisiin menetelmiin. Suoria linjaan tehtäviä asennuksia ei tarvita, minkä lisäksi sekä hankinta- että ylläpitokustannukset ovat suhteellisen pienet. Epäsuorien menetelmien tarkkuus ei myöskään riipu kuormitusvirrasta, minkä vuoksi niitä voidaan pitää ideaaleina kevyesti kuormitetuilla linjoilla. Epäsuoriin menetelmiin voi kuitenkin liittyä paljon epävarmuutta, eivätkä mittalaitteet aina välitä tarkasti huonoimpia linjaolosuhteita. Lisäksi säämittaukset ovat jokseenkin paikallisia, ja etenkin tuuliolosuhteet voivat vaihdella merkittävästi linjan varrella. [4, s. 605][30, s. 848–849]

Johdon lämpötilaa suoraan mittaavat DLR-menetelmät vähentävät anemometriihin liittyvää epävarmuutta, jota ilmenee erityisesti heikoilla tuulen nopeuksilla. Mutta koska johdotoon asennettava lämpötilasensori mittaa johdon paikallista pintalämpötilaa, ei riippumaa saada tarkasti selville, ja mittausdata on validia vain rajatulla alueella. [1, s. 82][12, s. 925] Sen sijaan jännitystä ja riippumaa mittaavat menetelmät ilmaisevat pikemmin sääolosuhteiden vaikutuksen useammalla jänneväliillä [4, s. 605][30, s. 845]. Jännityksen, riippuman tai ilmapälin valvominen tuo myös lisävarmuutta, jos siirtolinja on riippumaraioitteinen. Esimerkiksi operoitaessa lähellä rajoituslukemia, ovat ilmapälinrikkomukset mahdollisia, eivätkä säämittaukset tai pelkkä johdon lämpötilan valvominen tarjoa yhtä luotettavaa tapaa tarkistaa todellista tilannetta linjalla. [30, s. 845]

Vaikka jännitys- ja riippumaperusteiset järjestelmät ovat luonnostaan epäsuoria menetelmiä tarkempia, voivat ne aiheuttaa suuria virheitä, kun linjaa kuormitetaan kevyesti [4, s. 605]. Esimerkiksi jännitysmittareilla saadaan säämittauksiin verrattuna tarkempia kuormitettavuusarvoja, kun virrantiheys on suurempi kuin 1 A/mm^2 . Mutta jos virrantiheys on pienempi kuin $0,5 \text{ A/mm}^2$, saadaan sääperusteisella järjestelmällä todennäköisesti suoria menetelmiä tarkempia arvoja. [30]

Osa DLR-laitteista voi vaatia sähkönsiirron keskeytyksen, jotta asennus pystytään suorittamaan. Tämä voi tulla kysymykseen lähinnä silloin, kun laite joudutaan asentamaan suoraan kiinni johtoon. Kaikki mittalaitteet kuitenkin pystytään asentamaan jännitteiselle linjalle, jolloin keskeytyksen tarve riippuu oikeastaan siitä, miten siirtoyhtiö itse sallii jännitetyöt [28, s. 19]. Jännityspäruusteinen menetelmä vaatii todennäköisimmin siirron keskeytyksen tai keskeytyksiä [4].

Osa menetelmistä mittaa linjaparametrien lisäksi myös kattavasti säädataa. Esimerkiksi jos linja varustetaan sekä tuulen nopeutta ja suuntaa mittaavilla sääasemilla että jännityssensoreilla, voidaan DLR-määrittää tarkasti ja turvallisesti niin suurilla kuin pienilläkin kuormilla. Tällainen hybridi ratkaisu on kuitenkin kallein vaihtoehto. [29, s. 6–8]

Taulukossa 1 on yksinkertaistettu vertailu ja yhteenveto yleisistä DLR-menetelmistä. Sen tarkoituksena on lähinnä ilmaista menetelmien suhteellisia ja suuntaa antavia eroja. Taulukossa on kerrottu menetelmien hyviä ja huonoja puolia, sekä eroteltu työssä läpi käydyt teknologiat. Lisäksi menetelmien tarkkuuksia vertaillaan tuulen ja kuormituksen perusteella. Lähtökohtaisesti kaikki menetelmät antavat hyviä tuloksia silloin, kun tuuli on kohtalaista tai kovaa ja kuormitus on suuri [4, s. 606][29, s. 6]. Todellisuudessa esimerkiksi linjan sijainnilla, rakenteella ja verkkoyhtiön omilla päämäärillä on keskeinen vaikutus siihen, mikä menetelmä ja teknologia osoittautuu sopivimmaksi. Yleisesti on parempi vaihtoehto valita yksi DLR-teknologia sen sijaan, että yhdistelisi useampia teknologioita

keskenään. Monen eri teknologian samanaikainen käyttö voi aiheuttaa yhteensopivuus-ongelmia, minkä lisäksi se vaatii henkilöstöltä useamman eri teknologian hallitsemisen. [28, s. 39] Vaikka DLR-järjestelmien hinnoissa on eroja, eivät kalleimmatkaan vaihtoehdot ole erityisen kalliita, ja investointien takaisinmaksuajan pitäisi olla oikein tehtynä verrattain lyhyt [28, s. 20–27, 39]. Taulukko 1 perustuu työssä jo kerrottuun sisältöön ja taulukossa ilmoitettuihin lähteisiin.

Taulukko 1. DLR-menetelmien vertailua. Perustuu lähteisiin [4, s. 606], [6] ja [29, s. 6–7].

Menetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet	Normaali tuuli	Heikko tuuli	Esim. teknologia
			Pieni kuorma	Suuri kuorma	
Sää-perusteinen	Yksinkertaisimmat ja edullisimmat DLR-ratkaisut	Mittauksen ulottuvuus on yleensä pieni	hyvä	heikko	Sääasema
	Suoria asennuksia linjaan ei tarvita	Tarvitaan yleensä ulkoinen energianlähde	hyvä	hyvä	ThermalRate
Lämpötila-perusteinen	Sensorien avulla voidaan estää tehokkaasti johtimen vetolujuuden heikkeneminen Yleensä omatehoinen	Mittaa johtimen pintalämpötilan Mittaus on pistemäinen muihin suoriin menetelmiin verrattuna Sensorien määrä voi aiheuttaa johdolle lisäpainoa	heikko	hyvä	Power Donut
Jännitys-perusteinen	Mittaus voi kuvastaa koko linjan keskimääräistä tilaa Sensoreita tarvitaan vähän	Sensorien asennus vaatii todennäköisimmin sähkönsiirron keskeytyksen Voi vaatia paljon huoltoa	heikko	suuri	CAT-1
Riippuma-perusteinen	Mittauksen ulottuvuus saattaa olla monta jänneväliä Tuo lisävarmuutta riippumarajoitteisilla linjoilla	Tuuli voi heikentää mitaustuloksia	heikko	suuri	Sagometer ADR Sense
Ilmaväli-perusteinen	Mittauksen ulottuvuus saattaa olla monta jänneväliä Tuo lisävarmuutta riippumarajoitteisilla linjoilla	Tuuli voi heikentää mitaustuloksia Tarkkuus voi heikentyä korkeilla linjoilla	heikko	suuri	TLM
Hybridi	Turvallisin ja ideaalisin DLR-ratkaisu	Kallein vaihtoehto	hyvä	suuri	

4. KÄYTÄNNÖN NÄKÖKOHTIA

DLR:ään liittyvää tutkimusta on tehty pitkään. Murray W. Davis tutki mahdollisuutta käyttää muuttuvaa kuormitettavuutta jo vuosina 1977–1980, minkä jälkeen niin useat tutkijat kuin tutkimusryhmät ovat tutkineet, kokeilleet ja kehittäneet DLR-teknologiaa [9, s. 1715]. DLR-järjestelmät eivät kuitenkaan ole yleistyneet erityisen paljoa sähköverkoissa muun muassa siksi, koska lisäkapasiteetin saatavuus ja tarve eivät useinkaan ole kohdanneet [1, s. 87]. DLR-järjestelmiä kuitenkin testataan ja kehitetään jatkuvasti, ja viime vuosina kiinnostus teknologiaa kohtaan on kasvanut eritoten energiamurroksen vuoksi.

4.1 Tavoitteet ja mahdollisuudet

DLR-teknologialla tavoitellaan ennen kaikkea suurempaa siirtokapasiteettia. Kun johdon dynaaminen kuormitettavuus tunnetaan, voidaan olemassa olevan verkon kapasiteettia kasvattaa. Perinteisempiä ja myös ilmeisempiä vaihtoehtoja kasvattaa siirtokapasiteettia ovat uuden vierekkäisen linjan rakentaminen sekä nykyisen linjan johdon vaihtaminen. Johdon vaihtaminen uuteen voi lisätä merkittävästi johdon suurinta sallittua käyttölämpötilaa, joka voi HTLS-johtimilla (engl. High Temperature Low Sag) olla yli 200 °C [6]. Sekä johdon vaihtaminen että uuden linjan rakentaminen kasvattavat siirtokapasiteettia huomattavasti, esimerkiksi 100 %. Lisäkapasiteetti saadaan myös varmasti. DLR:n vahvuutena on kuitenkin se, että lisäkapasiteetti saadaan pienillä kustannuksilla ja hyvin nopeasti, jos verrataan perinteisiin menetelmiin [42]. [11, s. 129][12, s. 926] Esimerkiksi uusien suurjännitelinjojen rakentaminen on pitkä prosessi ja edellyttää viranomaishyväksyntää. Lisäksi valitukset voivat pidentää rakennusprosessia, joka voi kestää tiheästi asutussa Keski-Euroopassa jopa 5–20 vuotta. [28, s. 36]

Tuulivoiman voimakas kasvu ja uusien voimaloiden rakentaminen ovat lisänneet kiinnostusta DLR:ää kohtaan. Sen lisäksi, että verkkoja joudutaan vahvistamaan lisääntyneen sähköntuotannon vuoksi, on tuulisähkön generoimisella ja dynaamisen kuormitettavuuden kasvulla ilmeinen yhteys. Tuulisuus merkitsee samanaikaisesti sekä kasvavaa DLR:ää että sähköenergian generointia, eli siirtokapasiteetti kasvaa juuri silloin, kun siirrettävän energiankin määrä kasvaa. Siksi tuulivoimaa pystytään integroimaan DLR-ratkaisulla enemmän nykyiseen verkkoon, mikäli verkon kuormitettavuus on rajoittava tekijä. [1, s. 87–89]

Se kuinka paljon lisää kapasiteettia DLR:illä voidaan saavuttaa riippuu olosuhteiden lisäksi siitä, miten tiukkoja staattisen kuormitettavuuden sääoletukset ovat [12, s. 926].

Tyypillinen keskimääräinen siirtokapasiteetin kasvu on vähintään 5–20 %, mutta välin ulkopuolelta löytyy myös paljon esimerkkejä [4, s. 608][11][12, s. 926]. Muun muassa Espanjassa tehdyssä DLR-projektissa [43] vuosina 2015–2018 keskimääräinen siirtokapasiteetti nousi 56 %, minkä ansiosta pystyttiin välttämään 4100 tunnin ajan tuulivoiman rajoittamista ja siten siirtämään 70,9 GWh enemmän uusiutuvaa energiaa.

Verkkoyhtiölle voi syntyä tilanne, jossa kasvava sähkön kysyntä tai tuotanto haastavat siirtolinjan siirtokykyä, mutta siirtokapasiteettia lisäävät verkostoinvestoinnit on tarkoitus tehdä vasta vuosien päästä tai niitä halutaan muista syistä lykätä. Tällöin DLR:n avulla saatava pienempi lisäkapasiteetti voi riittää sopivaksi ajaksi. [9, s. 1727] DLR-laitteet voidaan myös tarvittaessa siirtää toiseen jänneväliin tai kokonaan eri linjaan, jos esimerkiksi sähkönsiirron tarve tai kriittinen jänneväli muuttuvat. Lisäksi pullonkaulojen väheneminen, säästöt ja DLR-laitteiden muu hyödyntäminen ovat muita mainittuja DLR-tekniikan hyötyjä. Laitteiden keräämää dataa voidaan esimerkiksi käyttää verkostosuunnittelussa, huoltojen suunnittelussa tai vikatilanteissa. [9, s. 1727][12, s. 926][28, s. 36–37]

4.2 Keskeisiä haasteita

DLR:n suurimpia haasteita ovat kuormitettavuuden vaihtelevuus ja siihen liittyvä epävarmuus. Jotta sähkönsiirtoa voidaan suunnitella ja siirron rajoitteet sekä pullonkaulat tunnistaa, on linjojen kuormitettavuus tunnettava etukäteen [28, s. 34–35]. Esimerkiksi kuormitettavuuden ennustaminen 48 tunnin päähän voi olla sähkömarkkinoiden kannalta ratkaisevan tärkeää, koska verkon käyttöön liittyviä päätöksiä, kuten kapasiteetin allokointia tehdään 2 päivää etukäteen [9, s. 1724]. Erityisesti matalien tuulen nopeuksien ennustaminen tarkasti yli 1–4 tunnin päähän voi kuitenkin olla haasteellista [12, s. 927]. Mikäli ennustukset osoittautuvat kuormitettavuuden kannalta liian optimistisiksi, tehonsiirtoa ja generointia tulee rajoittaa tai uudelleenohjata [28, s. 35–36].

Koska sääolosuhteet ja ympäristön muodot vaihtelevat siirtolinjalla, vaihtelee myös johdon lämpötila. Siksi on usein haasteellista päättää, kuinka paljon ja mihin DLR-laitteita sijoitetaan. Kaikkien jännevälien valvominen ei useinkaan ole toivottavaa tai edes tarpeellista. Ideaalisinta olisi valvoa vain kriittisiä jännevälejä, mutta kuten todettu, niiden sijainti voi muuttua. [4, s. 606] Oheisessa artikkelissa [44] esitellään riskiperusteinen lähestymistapa niin DLR-sensoreiden määrän kuin paikkojenkin valitsemiseen. Menetelmässä operaattori voi itse valita sallimansa riskitason, jonka perusteella sensoreita lisätään kriittisimpiin sijainteihin, kunnes riskistä tulee riittävän pieni. Artikkelissä sisältyy menetelmää havainnollistavan simulaation.

Jos DLR:llä aiotaan kasvattaa linjan kuormitusta yli totutun SLR-rajan, muut verkkokomponentit, kuten muuntajat tai katkaisijat voivat jäädä alimitoitetuiksi ja siten estää tehon kasvattamisen. Siksi muiden laitteiden mitoitus tulee myös huomioida ja komponentteja voidaan joutua uusimaan. Vaikkei DLR-laitteiston asennus vaatisikaan sähkönsiirron keskeytystä, voi muiden komponenttien päivittäminen vaatia. Lisäksi huolenaiheena on, että kuormituksen kasvattaminen DLR:llä aiheuttaa linjan ennenaikaista vanhenemista. [28, s. 37–38]

5. YHTEENVETO

Perehdyin tässä työssä avojohdon dynaamiseen kuormitettavuuteen ja siihen, millaisia ratkaisuja sen toteuttamiseksi on kehitetty. Yleensä siirtojohdot mitoitetaan epäedullisiin olosuhteisiin, jotta johto ei lämpene liikaa niiden vallitessa. Koska siirtolinjan kokemat sääolosuhteet ovat kuitenkin suurimman osan ajasta epäedullisia mitoitusolosuhteita suopeammat, johtaa staattinen kuormitettavuus vääjäämättä epätehokkaaseen verkon käyttöön. Normaalisti siis merkittävä osa verkon siirtokapasiteetista jää käyttämättä. Dynaaminen kuormitettavuus mahdollistaa johdon reaaliaikaisen kuormitettavuuden laske-
misen, joka voidaan tehdä esimerkiksi IEEE:n standardin 738 tai CIGRE:n teknisen esitteen 601 mukaisesti. Jotta ajantasainen kuormitettavuus voidaan määrittää, pitää linjalla vallitsevat sääolosuhteet tuntea reaaliajassa.

IEEE:n standardin jatkuvan tilan lämpötasapainoyhtälö sisältää neljä termiä, joista kaksi lämmittävät johdinta ja kaksi viilentävät sitä. Lämpöä tuovat termit ovat johtimen resistanssista aiheutuva Joulen lämmitys sekä auringon säteilyn aiheuttama lämmitys. Johdinta viilentävät niin konvektio kuin johtimen energian säteileminen ympäristöön. Konvektioviilennys on yleensä kuormitettavuuden kannalta tärkein termi, mutta sen määrittämiseen liittyy paljon haasteita. Erityisesti matalat tuulen nopeudet viilentävät voimakkaasti johtoa ja lisäävät sen kuormitettavuutta, mutta juuri ne saattavat muuttua äkillisesti, minkä lisäksi niiden mittaamiseen ja ennustamiseen liittyy haasteita. Ympäristön lämpötila on toinen tärkeä suure, koska se vaikuttaa sekä konvektio- että säteilylämpöhäviöön, lämpötila pystytään mittaamaan tarkasti ja se on melko yhtenäinen koko sähkölinjalla. Johdon resistanssin suuruus riippuu johtimen ominaisuuksien lisäksi myös johdon keskimääräisestä lämpötilasta. Suurilla virran tiheyksillä johtimen pinnan ja sisuksen välillä voi olla useiden celsiusasteiden lämpötilaero, joka on huomioitava laskuissa.

DLR-ratkaisut voidaan jakaa epäsuoriin ja suoriin menetelmiin. Epäsuorat menetelmät perustuvat pelkästään säätietoihin, jotka voidaan hankkia niin sääennusteilla kuin sääsensoreilla. Varmin tapa on asentaa riittävästi sääsensoreita siirtolinjan pylväisiin, jotta linjan kokema tuuli pystytään arvioimaan mahdollisimman tarkasti. Suorissa menetelmissä tyypillisesti linjan johtoon asennetaan sensoreita, jotka mittaavat ja valvovat linjaparametreja, kuten johdon lämpötilaa, sähkövirtaa, jännitystä, riippumaa tai ilmaväliä. Mitattuja linjasuureita voidaan käyttää DLR-laskennan lähtötietona. Esimerkiksi jännitys ja riippuma voidaan muuntaa vastaamaan johdon lämpötilaa, jota voidaan käyttää tuulen vaikutuksen laskemiseen, minkä jälkeen kuormitettavuus on mahdollista laskea IEEE:n

standardin lämpötasapainoyhtälöllä. Suorien menetelmien DLR-sensorit mittaavat yleensä useita laskennassa tarvittavia lähtötietoja.

Suorat menetelmät ovat luonnostaan epäsuoria menetelmiä tarkempia, mutta niiden tarkkuus heikkenee pienillä kuormituksilla. Mikäli virrantiheys on pienempi kuin $0,5 \text{ A/mm}^2$, voidaan epäsuorilla menetelmillä saavuttaa parempia tuloksia. Epäsuorien menetelmien tarkkuus ei riipu kuormituksesta, vaan pikemmin tuuliolosuhteista. Suorissa menetelmissä tuulen mittaamisen sijasta sen vaikutus voidaan laskea hyödyntämällä linjaparametreja. Tällöin saadaan kokonaisvaltaisempi kuva keskimääräisistä tuuliolosuhteista. Mikäli linjan kuormitus vaihtelee paljon, saadaan varmin lopputulos yhdistämällä kattava säämonitorointi ja linjaparametrien mittaaminen. Tällainen hybridiratkaisu on kuitenkin kustannuksiltaan suurin.

Kaupalliset DLR-teknologiat ovat tyypillisesti suoriin menetelmiin perustuvia järjestelmiä, ja ne saattavat sisältää sensorien lisäksi myös tietoliikenne- ja ohjelmistoratkaisun. Useiden teknologioiden sensorit saavat tarvitsemansa tehon suoraan linjasta, ja sensori voidaan yleensä asentaa jännitteeseen linjaan. Tyypillisesti säätä ja johdon lämpötilaa mittaavien sensoreiden antamat arvot ovat paikallisia, minkä vuoksi mittausdata on validia vain hyvin rajallisella alueella. Sen sijaan jännitystä, riippumaa ja ilmapäliä mittaavat sensorit vastaavat pikemmin laajemman alueen, kuten jännevälin keskimääräistä tilaa. Lisäksi niillä voidaan luotettavasti tarkistaa, ettei ilmapälikomuksia synny riippumarajoitteisilla linjoilla. Riippuma on ennen kaikkea johdon sisuksen keskimääräisen lämpötilan funktio.

Yleensä DLR:llä voidaan kasvattaa olemassa olevan verkon siirtokapasiteettia vähintään 5–20 %. Lisäksi DLR:n avulla voidaan vähentää siirtoverkon ruuhkia ja integroida enemmän uusiutuvaa energiaa verkkoon. Erityisesti tuulivoiman tuotannon ja DLR:n yhdistäminen sisältää potentiaalia ja herättää kiinnostusta, sillä verkon siirtokyky kasvaa juuri silloin, kun tuulisähköä generoidaan enemmän. Tuulivoiman tuotanto myös lisääntyy nopeasti ilmastotavoitteiden vuoksi, mikä on synnyttänyt tilanteita, joissa tuulivoiman tuotantoa on jouduttu rajoittamaan liityntäverkon riittämättömän siirtokapasiteetin takia. DLR:llä siirtokapasiteettia voidaan kasvattaa sekä nopeammin että halvemmin kuin rakentamalla uusia yhteyksiä tai vahvistamalla linjan johtimia.

DLR-ratkaisujen keskeisimpiä haasteita ovat kuormitettavuuden nopea vaihtelu ja kapasiteetin ennustamiseen liittyvä epävarmuus. Siirtokapasiteetti halutaan usein tietää esimerkiksi 48 tuntia etukäteen. Siksi käytännöllinen DLR-ratkaisu sisältää riittävän luotettavan kapasiteettia ennustavan toteutuksen, jossa voidaan hyödyntää esimerkiksi NWP-

mallinnusta. Myös lyhyen aikavälin NWP-mallien resoluutio on tavallisesti kilometrien koluokkaa, joten tarkkojen ennusteiden saaminen edellyttää räätälöityjä ennustemalleja. Toinen tärkeä ongelma on ratkaista, kuinka paljon ja mihin sensoreita sijoitetaan, jotta DLR voidaan laskea riittävän luotettavasti. Periaatteessa vain kriittisimmän jännevälin valvominen riittää, mutta sen paikka voi vaihdella sääolosuhteiden ja linjan ympäristön muuttuessa. Lisäksi muiden verkkokomponenttien mitoitus on tarkistettava, ja komponentteja voidaan joutua päivittämään ennen DLR-ratkaisun käyttöönottoa.

Tämä työ antaa hyvän kuvan siitä, mitä dynaaminen kuormitettavuus tarkoittaa ja mitä oleellisia seikkoja siihen liittyy. Lisäksi työ esittelee millaisia menetelmiä ja teknologioita DLR:n toteuttamiseksi on kehitetty. Kuitenkin valmis ja toimiva DLR-ratkaisu, sellaisen toteuttaminen ja valitseminen vaativat paljon yksityiskohtaisemman ja analyyttisemmän pohdinnan, joka käsittelee eri ratkaisujen soveltuvuutta ja suorituskykyä tietyille sähkölinjalle. Esimerkiksi riskiperusteinen analyysi sensorien sijoittamisesta ja arviot lisääntyvästä siirtokapasiteetista ovat tarpeen. Sensorivalintojen lisäksi on kiinnitettävä huomiota tietoliikenne- ja ohjelmistototeutuksiin ja esimerkiksi siihen, kuinka luontevasti ja käyttökelpoisesti DLR-järjestelmä pystytään integroimaan SCADA-järjestelmään. Mahdollisimman pitkälle viety automatisointi sujuvoittaa varmasti järjestelmän käyttöä. Hyvät lähtökohdat DLR-toteutukselle antavat lyhyet linjat, joita kuormitetaan kohtuullisesti tai suuresti, ne liittyvät tuulivoiman tuotantopisteisiin ja ovat riippumarajoitteisia.

LÄHTEET

- [1] Fernandez E, Albizu I, Bedialauneta M., Mazon A., Leite P. Review of dynamic line rating systems for wind power integration. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2016;53:80–92.
- [2] Papailiou KO. *Overhead Lines*. 1st ed. 2017. Cham: Springer International Publishing; 2017.
- [3] CIGRE Working Group B2.12. Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings. CIGRÉ; 2006. 1-55 p.
- [4] Karimi S, Musilek P, Knight AM. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2018;91:600–12.
- [5] Määttänen M. Mittaamalla lisää siirtokykyä. *Fingrid-lehti*; 2020. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): <https://www.fingridlehti.fi/mittaamalla-lisaa-siirtokykya/>
- [6] Mohd Zainuddin N, Abd. Rahman MS, Ab. Kadir MZA, Nik Ali NH, Ali Z, Osman M, et al. Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges. *IEEE access*. 2020;8:120053–81.
- [7] Sähköverkon turvallisuus. Elenia. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): <https://www.elenia.fi/vastuullisuus/turvallisuus/sahkoverkon-turvallisuus>
- [8] Mahin AU, Islam SN, Ahmed F, Hossain MF. Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review. *IET generation, transmission & distribution*. 2022;16(1):1–18.
- [9] Michiorri A, Nguyen H-M, Alessandrini S, Bremnes JB, Dierer S, Ferrero E, et al. Forecasting for dynamic line rating. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2015;52:1713–30.
- [10] Mahajan SM, Singareddy UM. A Real-Time Conductor Sag Measurement System Using a Differential GPS. *IEEE transactions on power delivery*. 2012;27(2):475–80.
- [11] Johnson J, Smith C, Young M, Donohoo K, Owen R, Clark E, et al. *Dynamic Line Rating Oncor Electric Delivery Smart Grid Program*. University of North Texas Libraries; 2013. Saatavissa (viitattu 5.3.2022): <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc867255/>
- [12] Douglass D, Chisholm W, Davidson G, Grant I, Lindsey K, Lancaster M, et al. Real-Time Overhead Transmission-Line Monitoring for Dynamic Rating. *IEEE transactions on power delivery*. 2016;31(3):921–7.
- [13] Abdaelbaset A, Farrag ME, Farokhi S. Impact of Rain On Transmission Lines' Ampacity: Scotland as a Case Study. In: 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE; 2018. p. 1–5.
- [14] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE; 2013. 1-72 p.

- [15] CIGRE Working Group B2.43. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. CIGRÉ; 2014.
- [16] Rahim A., Abidin I. Verification of conductor temperature and time to thermal-overload calculations by experiments. In: 2009 3rd International Conference on Energy and Environment (ICEE). IEEE; 2009. p. 324–9.
- [17] Morozovska K, Hilber P. Study of the Monitoring Systems for Dynamic Line Rating. Energy Procedia. 2017;105:2557–62.
- [18] Strompdal J. Dynamic Thermal Rating of Overhead Power Lines. NTNU; 2021. Saatavissa (viitattu 7.3.2022): <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2778709>
- [19] Vincent C, Giebel G, Pinson P, Madsen H. Resolving Nonstationary Spectral Information in Wind Speed Time Series Using the Hilbert–Huang Transform. Journal of applied meteorology and climatology. 2010;49(2):253–67.
- [20] Dhabi A. Innovation landscape brief: Dynamic Line Rating. International Renewable Energy Agency, IRENA; 2020. p. 1–20. Saatavissa (viitattu 8.3.2022): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Dynamic_line_Rating_2020.pdf?la=en&hash=A8129CE4C516895E7749FD495C32C8B818112D7C
- [21] Sarajlić M, Pihler J, Sarajlić N, Štumberger G. Identification of the heat equation parameters for estimation of a bare overhead conductor's temperature by the differential evolution algorithm. Energies (Basel). 2018;11(8):2061–.
- [22] Schmidt N. Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards. IEEE transactions on power delivery. 1999;14(4):1555–9.
- [23] Arroyo A, Castro P, Martinez R, Manana M, Madrazo A, Lecuna R, et al. Comparison between IEEE and CIGRE thermal behaviour standards and measured temperature on a 132-kV overhead power line. Energies (Basel). 2015;8(12):13660–71.
- [24] Fu J, Abbott S, Fox B, Morrow D., Abdelkader S. Wind cooling effect on dynamic overhead line ratings. In: Proceedings of the Universities Power Engineering Conference. 2010.
- [25] Michiorri A, Taylor PC, Jupe SCE, Berry CJ. Investigation into the influence of environmental conditions on power system ratings. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2009;223(7):743–57.
- [26] Cunningham J, Colandairaj J. Methodology for applying real-time ratings to wood pole supported overhead lines. In: 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE; 2009. p. 1–5.
- [27] Black CR, Chisholm WA. Key Considerations for the Selection of Dynamic Thermal Line Rating Systems. IEEE transactions on power delivery. 2015;30(5):2154–62.

- [28] Uski-Joutsenvuo S, Pasonen R. Maximising power line transmission capability by employing dynamic line ratings – technical survey and applicability in Finland. VTT; Research Report R-01604-13; 2013. Saatavissa (viitattu 19.3.2022): <http://sgemfinalreport.fi/files/D5.1.55%20-%20Dynamic%20line%20rating.pdf>
- [29] Dino A, Ketley A. Dynamic Transmission Line Rating. Hydro Tasmania Consulting; Technology Review 208478-CR-001; 2009. Saatavissa (viitattu 23.3.2022): https://nanopdf.com/download/dynamic-transmission-line-rating-technology-review_pdf
- [30] Douglass D., Edris A-A. Field studies of dynamic thermal rating methods for overhead lines. In: 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat No 99CH36333). IEEE; 1999. p. 842–851 vol.2.
- [31] Daconti J, Lawry D. The Thermalrate System: A Solution for Thermal Upgrading of Overhead Transmission Lines. Power Technology Newsletter Issue 95, Shaw Power Technologies; 2004. Saatavissa (viitattu 19.3.2022): <https://www.scribd.com/document/218915589/The-ThermalRate-System>
- [32] Power Donut® Line Monitor. USi. Saatavissa (viitattu 26.3.2022): <http://www.usi-power.com/power-donut-line-monitor/>
- [33] CAT-1™ Dynamic Line Rating System. USi. Saatavissa (viitattu 28.3.2022): <http://www.usi-power.com/cat-1-dynamic-line-rating-system/>
- [34] CAT-1™: Data sheet. USi; 2016. Saatavissa (viitattu 28.3.2022): http://www.usi-power.com/wp-content/uploads/2016/10/160510_CAT-1_system_data_sheet.pdf
- [35] Span Sentry™. EDM International. Saatavissa (viitattu 27.3.2022): <https://www.edmlink.com/products/other-distribution-transmission-tools/span-sentry-dynamic-line-rating>
- [36] Span Sentry: Monitor conductor ampacity to enhance transmission system performance. EDM International; Products. Saatavissa (viitattu 27.3.2022): <https://www.edmlink.com/images/documents-marketing-guides/products/Span-Sentry-product-sheet-Jan2014web.pdf>
- [37] ADR Sense. Ampacimon. Saatavissa (viitattu 28.3.2022): <https://www.ampacimon.com/en/adr-sense>
- [38] ADR Sense: Self-Powered Vibration Sensor with GSM Data Transmission. Ampacimon; Documents. Saatavissa (viitattu 28.3.2022): <https://www.ampacimon.com/assets/3d27b974-b7d7-400a-a690-395515273275/product-sheet-adr-sense.pdf>
- [39] Godard B. A vibration-sag-tension-based icing monitoring of overhead lines. 2019. Saatavissa (viitattu 28.3.2022): https://iwais2019.is/images/Papers/004_paper_A_vibration_based_icing_monitoring_of_overhead_lines.pdf
- [40] The TLM Conductor Monitor. Lindsey Systems. Saatavissa (viitattu 30.3.2022): <https://lindsey-usa.com/sensors/transmission-line-monitor/>
- [41] Smartline®: Transmission Line Rating Platform. Lindsey Systems; Brochure; 2021. <http://lindsey-usa.com/wp-content/uploads/2019/06/11B-002-SMART-LINE-TCF-10-2021.pdf>

- [42] Seppa T. Increasing transmission capacity by real time monitoring. In: 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings (Cat No02CH37309). IEEE; 2002. p. 1208–1211 vol.2.
- [43] Mínguez R, Martínez R, Manana M, Arroyo A, Domingo R, Laso A. Dynamic management in overhead lines: A successful case of reducing restrictions in renewable energy sources integration. *Electric power systems research*. 2019;173:135–42.
- [44] Racz L, Nemeth B, Gocsei G. A risk-based, distributed sensor installation concept for high voltage grid monitoring. *Energy reports*. 2022;8:266–74.