

Raitiotien tehokapasiteetin tarkastelu

Kimmo Ketola

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2019

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

KETOLA, KIMMO:
Raitiotien tehokapasiteetin tarkastelu

Opinnäytetyö 72 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Toukokuu 2019

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Tampereen raitiotien toisen vaiheen syöttöasemien tehokapasiteettia ja sen riittävyyttä normaalissa ajotilanteessa sekä vikatilanteissa. Työ tehtiin NRC Group Finlandille ja se pyrkii tarjoamaan simuloitua dataa niin tehojen, virtojen ja jännitteenalennemien osalta.

Uuden raitiotien rakentaminen on merkittävä hanke, sillä vastaavaa ei ole Suomessa tehty Helsingin raitiotien rakentamisen jälkeen. Tampereen raitiotietä rakentaa Raitiotieallianssi, joka koostuu palveluntuottaja- ja tilaajaosapuolista. Palveluntuottajaosapuolina allianssissa ovat NRC Group Finland Oy, Pöyry Finland Oy ja YIT Suomi Oy. Tilaajaosapuolina ovat Tampereen kaupunki ja raitiotietä varten perustettu Tampereen Raitiotie Oy.

Työssä tarkasteltiin Tampereen raitiotien toisen vaiheen syöttöasemien tehokapasiteettia. Tarkastelu suoritettiin Matlab ja Simulink ohjelmistoilla, joiden avulla laskettiin raitiovaunua vastustavat voimat ja tätä kautta vaunun liikuttamiseen vaadittu teho. Matlabilla tuotettiin kuvaajat muun muassa virrasta, tehosta ja jännitteenalennemasta ajojohdolla. Kuvaajia pyrittiin tarkastelemaan myös eri ajotilanteiden osalta, kuten normaalissa ajotilanteessa ja yhden aseman vikaantuessa. Tuloksia verrattiin raitiotien ensimmäisessä osassa tilattuun raporttiin sekä standardin asettamiin vaatimuksiin ajojohtimen jännitteen osalta.

Tarkastelun perusteella todettiin, että reitti ei tule merkittävässä määrin aiheuttamaan ongelmia raitiotieliikenteelle. Toisen vaiheen reitti on korkeusasemien muutosten osalta hieman ensimmäisen vaiheen reittiä vähemmän kuormittavampi. Korkeusaseman muutokset yhdessä kiihdytysten kanssa vaikuttavat vaunun ottamaan tehoon eniten, mutta maaston ollessa verrattain tasaista, ei ongelmia tämän osalta pitäisi olla.

Asiasanat: raitiotie, jännitteenalennema, simulaatio

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

KETOLA, KIMMO:
Tramway network power analysis

Bachelor's thesis 72 pages, appendices 1 pages
May 2019

The purpose of this thesis was to examine the power demand in the tramway network of Tampere in normal operation and in fault situations. This thesis was made for NRC Group Finland and it aims to provide simulated data about current shapes, voltage drop and power demand in the tramway network substations in the second phase of building the tramway.

Building a new tramway is not a minor task by any means. Last time a new tramway was built in Finland was in the beginning of 20th century, when Helsinki had its tramway built. The Tramway Alliance formed by the city of Tampere, YIT Construction Services, NRC Group Finland Oy and Pöyry Finland Oy are in charge of designing and building the tramway infrastructure.

Analyzation was done by using two simulation softwares, Matlab and Simulink. The initial simulation was done by using Simulink to solve the power tram needed to move itself and to overcome the forces opposing its movement. After the power of the tram was known, Matlab was used to calculate and provide graphs of the currents in the substations and voltage drop across the catenary. Results were then compared to the report the Tramway Alliance had ordered during the first phase of building the tramway and to the Finnish national standard SFS-EN 50163.

Based on the results, the route in the second phase of the tramway should not cause any major problems to the tramway network. The route of the second phase has less changes in elevation than route in the phase one. The change in elevation combined with acceleration when departing the tram stops is what causes currents to increase and voltage to decrease. Therefore, less the elevation changes, less the current increases.

Key words: tramway, voltage drop, simulation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEORIA	7
2.1	Yleistä tietoa raitiotiestä	7
2.1.1	Reitti	8
2.1.2	Jännitetaso	10
2.1.3	Raitiovaunu	11
2.2	Ajoneuvokäytön mitoitus	13
2.2.1	Vierintävastus	13
2.2.2	Ilmanvastus	14
2.2.3	Gravitaatiovastus	15
2.2.4	Kokonaisvastus ja teho	15
2.3	Syöttöasemat	16
2.3.1	Muuntaja	16
2.3.2	Tasasuuntaaja	19
2.4	Ratajohtojärjestelmä	22
2.4.1	Ratajohto	23
2.4.2	Paluukiskot	25
2.4.3	Järjestelmän resistanssi	26
3	SIMULOINTI	29
3.1	Toteutus	29
3.1.1	Ensimmäinen osa	31
3.1.2	Toinen osa	35
4	TULOSTEN TARKASTELU	38
4.1	Pyynikki - Lentävänniemi	38
4.1.1	Vikatilanne	42
4.2	Lentävänniemi - Pyynikki	50
4.2.1	Vikatilanne	54
4.3	Yhteenveto	62
5	POHDINTA	70
	LÄHTEET	71
	LIITTEET	72
	Liite 1. Muuntajan tekniset tiedot (NRC Group Finland)	72

LYHENTEET JA TERMIT

F_r	Vierintävastus
m	Massa
g	Gravitaatiokiihtyvyys
f_r	Vierintävastuskerroin
F_w	Ilmanvastus
ρ	Ilman tiheys
A_f	Vaunun poikki-pinta-ala
C_d	Ilmanvastuskerroin
V_w	Ilman vastainen nopeus
F_g	Gravitaatiovoima
F	Kokonaisvastus
P	Teho
V	Voltti
I	Virta
A	Ampeeri
kV	Kilovoltti
kVA	Kilovolttiampeeri

1 JOHDANTO

Uuden raitiotien rakentaminen on merkittävä ja haastava hanke, sillä vastaava ei ole tehty Suomessa Helsingin raitiotien rakentamisen jälkeen. Tämän työn tarkoituksena on tutkia Tampereen raitiotien toisen vaiheen tehokapasiteetin riittävyyttä normaalissa ajossa sekä tilanteissa, joissa yksi syöttöasema putoaa pois verkosta. Opinnäytetyö pyrkii tarjoamaan simuloitua dataa raitiovaunun virrasta ja tehosta sekä jännitteenalenemasta ajojohtimessa. Saatuja tuloksia vertaillaan raitiotien ensimmäisessä osassa Institut für Bahntechnik GmbH:lta tilattuun raporttiin sekä standardin asettamiin vaatimuksiin jännitteenaleneman osalta.

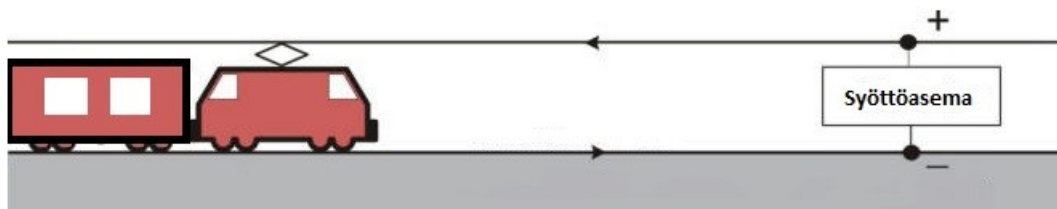
Tampereen raitiotietä rakentaa Raitiotieallianssi, jossa osallisina ovat palveluntuottajaosapuolina NRC Finland Oy, Pöyry Finland Oy sekä YIT Suomi Oy ja palveluntilaajina Tampereen kaupunki ja Tampereen Raitiotie Oy. Tämä työ on tehty NRC Finland Oy:lle, joka on vastuussa muun muassa raitiotien sähköistä.

Tampereen raitiotie rakennetaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäinen osa toteutetaan vuosina 2017-2021 ja se pitää sisällään työt Pyynikintorilta Hervantaan sekä Tampereen yliopistolliselle sairaalalle, lisäksi Hervantaan rakennetaan varikko raitiovaunuille. Toinen osa sisältää osuuden Pyynikintorilta Lentävänniemeen. Tampereen kaupunginvaltuuston on määrä päättää toisen osan toteuttamisesta viimeistään syksyllä 2020. Toisen osan suunnittelu on käynnissä ja tavoitteena on rakentaa rata vuosina 2021-2024.

2 TEORIA

2.1 Yleistä tietoa raitiotiestä

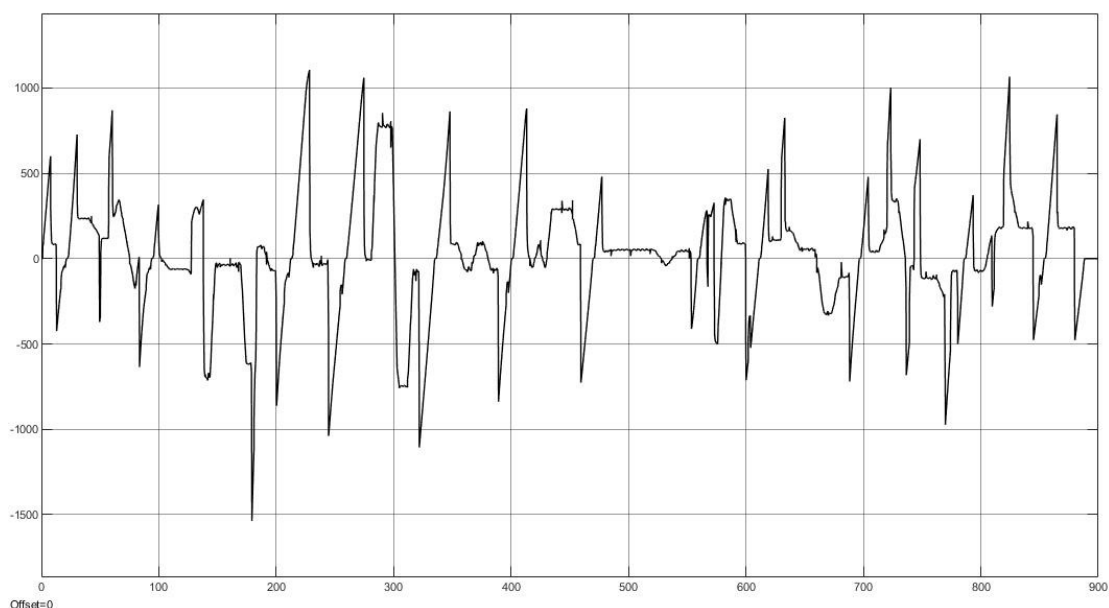
Energian siirtoon kiskoilla kulkevalle kalustolle on pari eri tapaa. Yleisin tapa on käyttää kuparista ajojohdinta, joka sijoitetaan vaunun yläpuolelle ja josta vaunu ottaa tarvitsemansa energian virroittimien avulla. Paluujohtimena käytetään raitteita, joilla vaunu kulkee. Tämä tapa on tuttu junista sekä raitiovaunuista. Etuna yläpuolelle sijoitetussa ajojohtimessa on se, että se on korkealla ilmassa ja täten sen koskettaminen tahattomasti on vaikeaa. Tällainen malli on esitetty kuviossa 1.



KUVIO 1. Sähköjärjestelmä

Toinen tapa energian siirtoon on käyttää virtakiskoa, joka sijoitetaan raiteiden väliin. Tämä on tyypillinen tapa metroissa, sillä rata on kokonaan erossa muusta liikenteestä ja jalankulkijoista, jolloin sähköiskun vaaraa ei ole. Suuri etu virtakiskon käytössä on se, että sen poikkipinta-ala voi olla huomattavasti ajojohdinta suurempi, kun sitä ei tarvitse ripustaa ilmaan. Suuri poikkipinta-ala mahdollistaa suuremman virran siirtämisen ilman merkittävää jännitteenalenemaa virtakiskossa.

Raitiovaunun verkosta ottama virta on erittäin epätasaista. Tämä johtuu siitä, että vaunu kiihdyttää usein ja kiihdyttämiseen tarvitaan merkittävästi enemmän virtaa kuin tasaisen nopeuden ylläpitämiseen. Korkeusaseman muutokset yhdessä kiihdytysten ja jarrutusten kanssa ovat omiaan aiheuttamaan suuria virtapiikkejä. Tyypillinen raitiovaunun virran kuvaaja on esitetty kuviossa 2.

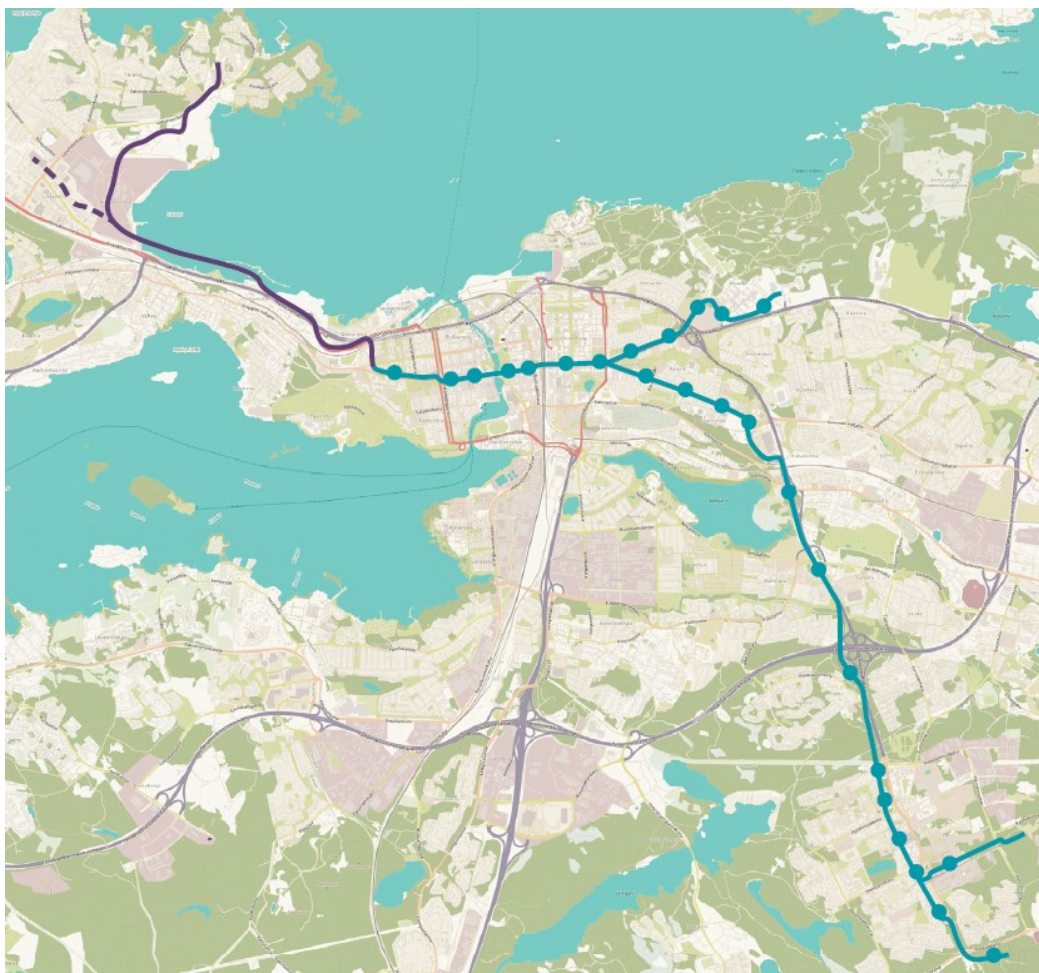


KUVIO 2. Raitiovaunun virta

Kuviossa 2 vaaka-akselilla on aika sekunteina ja pystyakselilla virta ampeereina. Kuvioista voidaan huomata, että virta vaihtelee todella paljon. Suurimmat positiiviset piikit ovat yli 1000 A ja suurin negatiivinen piikki on n. -1500 A. Kaikki virtapiikit sijoittuvat kohtiin, joissa vaunu kiihdyttää tai jarruttaa. Virtapiikkien amplitudi kasvaa merkittävästi, jos kiihdytys tai jarrutus osuu kohtaan, jossa on ylä- tai alamäki. Kuvioista voidaan myös havaita, että virta on suhteellisen pieni vaunun ajaessa tasaista nopeutta. Tällainen kohta on hyvin nähtävissä kuviossa noin 470 s ja 520 s välillä.

2.1.1 Reitti

Tampereen raitiotien toisen vaiheen reitti sijoittuu Pyynikin ja Lentävänniemen väliin ja sille tulee pituutta n. 7 km. Lisäksi radasta lähtee pistoraide kohti Lielah-tea Enqvistinkatua pitkin. Haaran pituus on alle kilometrin, eikä sitä ole otettu huomioon simuloinnissa. Kuviossa 3 on esitetty reittikartta.



KUVIO 3. Reittikartta (Tampereen raitiotie, 2019)

Kuviossa 3 on näkyvissä sekä ensimmäisen, että toisen vaiheen reitit. Ensimmäisen vaiheen reitti on kuvassa turkoosilla ja toisen vaiheen reitti violetilla. Kuvioista nähdään myös aiemmin mainittu pistoraide, joka esiintyy kuviossa katkoviivalla. Toisen vaiheen reitillä tulee olemaan 12 pysäkkiä ja pysäkkien väli vaihtelee 500 m ja 1000 m välillä.

Vaikka raitiovaunun huippunopeus on 80 km/h, ei sitä saavuteta ensimmäisen tai toisen vaiheen reiteillä. Ensimmäisen vaiheen reitin liikennöinnin maksiminopeus 70km/h ja toisen vaiheen 50km/h. Toisen vaiheen reitin läpiajamiseen kuluu aikaa noin 15 minuuttia ja keskinopeus kyseisellä pätkällä on 28 km/h. Keskinopeuden laskennassa ei ole otettu huomioon muun liikenteen tai liikennevalojen vaikutusta raitiovaunun kulkuun. Lisäksi pysähdykset pysäkeillä ovat olleet vain hetkellisiä. Tästä syystä reitin läpi ajamiseen arvioitu aika ja keskinopeus ovat optimistisia arvioita.

2.1.2 Jännitetaso

Raiteilla kulkevalle kalustolla on historian saatossa ollut useita jännitetasoja, mutta nykyään jännitetasoja on standardin mukaan seitsemän. Jännitetasot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Jännitetasot (Östlund, S. 2014.)

	Jännitetaso			Taajuus (Hz)
	Minimi (V)	Nimellinen (V)	Maksimi (V)	
DC	400	600	720	
	500	750	900	
	1000	1500	1800	
	2000	3000	3600	
AC	4750	6250	6900	50 tai 60
	12000	15000	17250	16 2/3
	19000	25000	27500	50 tai 60

Taulukossa on esitetty tasa- ja vaihtojännitteet niin raitiotie- kuin rautatieliikenteellekin. Taulukossa on korostettu Tampereen raitiotien käyttämä jännitetaso. Taulukosta nähdään, että nimellisen jännitteen ollessa 750 V saa jännite pudota jopa 500 V asti. Jännitteen pysyvä maksimi arvo on 900 V ja tämä voidaan saavuttaa tilanteissa, joissa vaunu jarruttaa. Hetkellisesti jännite saa nousta 1000 V asti. (SFS-EN 50163, 2005, 7.)

Taulukossa olevat vaihtojännitteen arvot koskevat lähes poikkeuksetta rautatieliikennettä. Rautateillä käytetään suurta vaihtojännitettä siksi, että junat ovat massoiltaan ja tehoiltaan huomattavasti raitiovaunuja suurempia. Jos rautateillä käytettäisiin vastaavaa jännitettä kuin raitiotiellä, olisivat virrat todella suuria, jolloin myös johtimien poikkipinta-alaa tulisi kasvattaa kohtuuttomasti. Lisäksi junat tyypillisesti kulkevat pidempiä matkoja kuin raitiovaunut, jolloin jännite ajojohtimessa pääsee laskemaan ja sitä on nostettava muuntajien avulla.

Matalalla tasajännitteellä on etunsa ja haittansa verrattuna vaihtojännitteeseen. Syyt tasasähköjärjestelmän käyttämiseen vaihtosähköjärjestelmän sijaan liittyvät tyypillisesti kustannuksiin, häviöiden minimoimiseen sekä lakeihin ja säädöksiin. Tasasähköjärjestelmät ovat helpompia suunnitella ja toteuttaa, sillä minkäänlaisia kompensointijärjestelmiä ei tarvita. Hetkellinen teho saadaan

myös laskettua suoraan virran ja jännitteen tulosta. Haittoja ovat mm. suurempi kuormitus katkaisijoille, sillä virta ei vaihtelee kuten vaihtosähköjärjestelmässä ja täten katkaisija joutuu poikkeuksetta katkaisemaan suuren virran. Vaihtosähköjärjestelmässä katkaisijan avaamisesta syntyvä valokaari sammuu itsestään, kun virran sinikäyrä on nollakohdassa. Toinen haitta on se, että tasasähköjärjestelmässä pientä jännitettä käytettäessä tehon siirtäminen pitkillä matkoilla on hankalaa ilman, että johtimessa syntyy suuria jännitteenalennuksia. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että vaihtosähköjärjestelmissä voidaan käyttää muuntajaa nostamaan pudonnutta jännitettä. Muuntaja ei kuitenkaan toimi tasasähköjärjestelmissä.

2.1.3 Raitiovaunu

Raitiovaunun Tampereelle valmistaa Suomalainen Transtech Oy ja heidän tuotantotila sijaitsee Kajaanin Otanmäessä. Transtech peittosi kilpailutuksessa mm. ulkomaiset Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles, PESA Bydgoszcz SA sekä Stadler Rail Valencia. Valintaperusteena Tampereen kaupungin mukaan oli kokonaistaloudellinen edullisuus. Päätökseen vaikutti mm. vaunujen ja kunnossapitopalvelun laatu sekä hankinnan hinta. (Airo, T. 2016.)

Raitiovaunun väristä järjestettiin äänestys Tampereen ratikan nettisivuilla, jossa yleisö sai äänestää mieleistään väriä kolmesta vaihtoehdosta. Vaihtoehdot olivat tummansininen, vaaleansininen ja tiilenpunainen. Tiilenpunainen voitti äänestyksen selkeästi ja se saikin 59% kaikista äänistä. Kuvassa 1 esitetty kuva raitiovaunusta.



KUVA 1. Raitiovaunu (Tampereenratikka.fi, 2019)

Raitiovaunussa on 8 vetävää akselia ja jokaisella akselilla on oma 70 kW moottori. Kokonaisteho on siis 560 kW. Käyttövoimansa vaunu saa sen yläpuolella sijaitsevasta ajojohtimesta, jonka nimellisjännite on 750 VDC. Raitiovaunussa on myös akusto, jonka avulla raitiovaunu voi liikkua n. 200 m matkan ilman ajojohdinta. Akustoa voidaan käyttää esimerkiksi huoltohallissa liikuttaessa, jossa ei ole lainkaan ajojohdinta. (Tampereen ratikka.)

Raitiovaunu toimii siten, että ajojohtimessa oleva jännite muutetaan vaihtosuuntaajan avulla vaihtojännitteeksi, josta sähkömoottorit saavat käyttövoimansa. Syöttöasemille sijoitettavista tasasuuntaajista poiketen vaihtosuuntaajan komponentit ovat ohjattavia, jolloin mahdollistetaan energian syöttö takaisin ajojohtimeen. Energiaa syötetään takaisin jarrutustilanteissa, jolloin vaunun sähkömoottorit toimivat generaattoreina. Jarruttaminen nostaa ajojohtimen jännitettä, jos samalla linjan pätkällä ei ole toista raitiovaunua, joka voisi käyttää energian kiihdyttämiseen tai nopeuden ylläpitämiseen. Muussa tapauksessa ylimääräinen energia kulutetaan vaunuun sijoitetuissa jarruvastuksissa lämpöenergiaksi.

Raitiovaunun maksiminopeus on 80 km/h, mutta tätä ei päästä hyödyntämään Tampereella, sillä liikennöinnin suurin sallittu nopeus on 70 km/h, joka saavutetaan Hervannan valtavyöllä. Toisessa vaiheessa liikennöinnin suurin sallittu nopeus on 50 km/h ja se saavutetaan Santalahden ja Hiedanrannan välisellä osuudella.

2.2 Ajoneuvokäytön mitoitus

Simulaation toiminnan kannalta on tärkeää määrittää vaunuun kohdistuvat mekaaniset voimat, jotka vastustavat sen liikettä. Jotta vaunun teho saadaan määritettyä, tulee voimien olla tiedossa. Kaikki laskenta on suoritettu Simulink mallissa, jossa arvojen muuttaminen on helppoa. Lisäksi simulaation visuaalinen käyttöliittymä helpottaa asioiden ymmärtämistä sekä sitä, miten suureet toisiinsa vaikuttavat.

Vaunun liikettä vastustavia voimia on kolme ja ne ovat vierintävastus, ilmanvastus ja gravitaativastus. Lisäksi todellisuudessa tulisi ottaa huomioon vaunuun vaikuttava vastus radan kaarre kohdissa. Tätä voimaa kutsutaan kurvivastukseksi, mutta työn tilaajan kanssa sovittiin, ettei sen huomioonottaminen ole välttämätöntä.

2.2.1 Vierintävastus

Vierintävastus syntyy ajoneuvon pyörien vierinnästä ajoradan pinnalla. Vierintävastuksen suuruuteen vaikuttaa mm. ajoradan ja pyörien kunto, pyörien laakerien kitka sekä alustan jäykkyys. Laskennallisesti vierintävastus otetaan huomioon vierintävastuskertoimella, joka kiskoilla kulkevalla kalustolle on 0,001-0,002. Taulukossa 2 on listattu tyypillisiä vierintävastuskertoimia. (Hietalahti 2011a, 6.)

TAULUKKO 2. Vierintävastuskertoimia (Hietalahti 2011a, 6.)

Tyyppi	Vierintävastuskerroin
Kumipyörä asfaltilla	0,013
Kumipyörä soratiellä	0,02
Öljysoratie	0,025
Päällystämätön tie	0,05
Junapyörä kiskoilla	0,001-0,002

Vierintävastuksen, eli sen synnyttämän voiman suuruus F_r voidaan laskea yhtälön 1 avulla.

$$F_r = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

Yhtälössä m on ajoneuvon massa, g on maan gravitaatiokiihtyvyys, f_r on vierintävastuskerroin ja $\cos(\alpha)$ on alustan kulma vaakatasoon nähden.

2.2.2 Ilmanvastus

Ilmanvastuksen aiheuttama liikettä vastustava voima F_w riippuu suuresti ajoneuvon muotoilusta ja ajonopeudesta. Ilmanvastuksen suuruus riippuu nopeudesta toisessa potenssissa. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä kovempaa ajoneuvo kulkee, sitä suurempi on ilmanvastus. Hitailla nopeuksilla, kuten työkoneiden kohdalla ilmanvastus jätetään huomioimatta. (Hietalahti 2011a, 6-7.)

Ilmanvastuksen liikettä vastustava voima voidaan laskea yhtälön 2 avulla.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot (V + V_w)^2 \quad (2)$$

Yhtälössä ρ on ilman tiheys, A_f on ajoneuvon etuosan pinta-ala, C_d on ilmanvastuskerroin, ja V_w on ilman vastainen nopeus, eli toisin sanoen tuulen nopeus vaunua vastaan. Ilmanvastuskertoimella pyritään määrittämään ajoneuvon muotoilua. Esimerkiksi urheiluauton ilmanvastuskerroin poikkeaa merkittävästi kuorma-auton ilmanvastuskertoimesta. Taulukossa 3 on listattu eri ajoneuvojen ilmanvastuskertoimia.

TAULUKKO 3. Ilmanvastuskertoimet

Ajoneuvotyyppi	Ilmanvastuskerroin (C_d)
Henkilöauto	0,4-0,55
Kuorma-auto	0,8-1,5
Moottoripyörä	0,6-0,7
Linja-auto	0,6-0,7
Muotoiltu linja-auto	0,3-0,4

Simulaatiossa vaunulle käytettiin ilmanvastuskertoimen arvoa 0,35, joka vastaa muotoiltua linja-autoa. Tähän päädyttiin siksi, että vaunu on poikkileikkaukseltaan

linja-auton kokoinen ja etuosan aerodynamiikan puolesta sen arveltiin vastaavan muotoiltua linja-autoa.

2.2.3 Gravitaatiovastus

Gravitaatiovoiman suuruus ja etumerkki ovat riippuvaisia mäen jyrkkyydestä sekä siitä, kuljetaanko mäkeä ylös vai alas. Ylös kuljettaessa etumerkki on positiivinen ja alaspäin kuljettaessa negatiivinen. Ylämäkeen kuljettaessa moottoritehoa tarvitaan enemmän, sillä vaunun massaa pyritään siirtämään vaakatason lisäksi horisontaalisesti. Alamäkeen kuljettaessa moottoritehon tarve vähenee merkittävästi, sillä korkeuden muutos vapauttaa varastoitunutta potentiaalienergiaa. (Hietalahti 2011a, 8.)

Yhtälössä 3 on esitetty gravitaatiovoiman laskenta.

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

Yhtälössä m_v on ajoneuvon massa, joka tässä tapauksessa on n. 70 t. $\sin(\alpha)$ on nousukulma vaakatasoon nähden ja g on maan gravitaatiokiihtyvyys, eli 9,81 m/s².

2.2.4 Kokonaisvastus ja teho

Kokonaisvastuksella saadaan mallinnettua sitä, kuinka suuren voiman vaunu tarvitsee liikkuakseen. Jos vaunua liikuttava voima on yhtä suuri kokonaisvastuksen kanssa, vaunun nopeus ei muutu. Vaunua liikuttavan voiman ollessa pienempi tai suurempi, on vaunulla joko kiihtyvyyttä tai hidastuvuutta. Vaunun kokonaisvastus saadaan laskettua yhtälöllä 4. (Hietalahti 2011a, 8.)

$$F = F_r + F_w + F_g \quad (4)$$

Yhtälössä F_r on vierintävastus, F_w on ilmanvastus, ja F_g on gravitaatiovastus. Kokonaisvastus on siis osavastusten summa. Vaunun teho saadaan laskettua yksinkertaisesti kertomalla kokonaisvastus nopeudella. Yhtälössä 5 on esitetty tehon laskenta.

$$P = F \cdot v \quad (5)$$

Yhtälössä F on kokonaisvastus ja v on nopeus metreinä sekunnissa tietyllä ajan hetkellä. Simulaatiossa nopeus otettiin suoraan simulaatioon syötetystä nopeustaulukosta.

2.3 Syöttöasemat

Raitiotien sähkönsyöttöasemat poikkeavat sähköverkon sähköasemista siten, että raitiotien syöttöasemilla on tasasuuntaaja, joka muuttaa vaihtosähkön tasasähköksi raitiovaunua varten. Sähköverkolla ei ole käyttöä tasasähkölle, joten tasasuuntaaja puuttuu sieltä kokonaan.

Tampereen raitiotien ensimmäiseen osaan tulee 10 sähkönsyöttöasemaa ja toisessa vaiheessa asemia on tarkoitus rakentaa 4 lisää. Raitiotielinjan kokonaispituus mukaan lukien toinen vaihe on 23 km, jolloin yksi asema syöttää noin 1,6 km pituista pätkää. Tampereen raitiotien sähkötöidenjohtajan mukaan yksi asema pystyy syöttämään noin 2 km molempiin suuntiin, eli tässä tapauksessa tämän rajan alle jäädään. Syöttökyky riippuu kuitenkin siitä, millainen maasto on ja miten muu liikenne kulkee. Esimerkiksi ylämäet ja liikkeelle lähdöt vaativat suurempia virtoja, jotka taas kuormittavat syöttöasemia enemmän.

Kaikki syöttöasemat on kytketty ajojohtimeen rinnan. Rinnankytkennästä on se hyöty, että jos yksi asema lakkaa syystä tai toisesta toimimasta, muut asemat voivat silti syöttää raitiovaunulle sen tarvitseman energian, kunnes vika on korjattu. Vikatilanteessa jännite ajojohtimessa saattaa kuitenkin pudota merkittävästi vikaantuneen syöttöaseman kohdalla, joka voi aiheuttaa ongelmia raitiovaunulle.

2.3.1 Muuntaja

Jokaisella sähkönsyöttöasemalla on päämuuntaja sekä omakäyttömuuntaja. Päämuuntaja kytkeytyy toisiopuolelta tasasuuntaajan kautta ajojohtimeen ja sen

ensiöpuoli on kytketty paikallisen jakeluverkkoyhtiön keskijänniteverkkoon. Omakäyttömuuntaja on nimensä mukaisesti syöttöaseman omaan käyttöön, eli mm. valot, pistorasiat ja ilmastointi hoidetaan omakäyttömuuntajalla.

Päämuuntaja on kuivamuuntaja, joka tarkoittaa sitä, että käämit ovat eristetty valuhartsilla, joka suojaa käämejä pölyltä ja korroosiolta. Tyypillisesti esimerkiksi jakelumuuntajat ovat öljyjäähdytteisiä ja öljyeristeisiä, jolloin muuntajan kuoren sisällä on suuri määrä öljyä. Muuntajaöljy on kuitenkin ympäristölle erittäin haitallista ja siitä syntyy myös palovaara. Tulipalon sattuessa muuntajaöljystä syntyvät kaasut ovat haitallisia. Kuvassa 2. on esitetty kuvat kuiva- ja öljymuuntajasta.

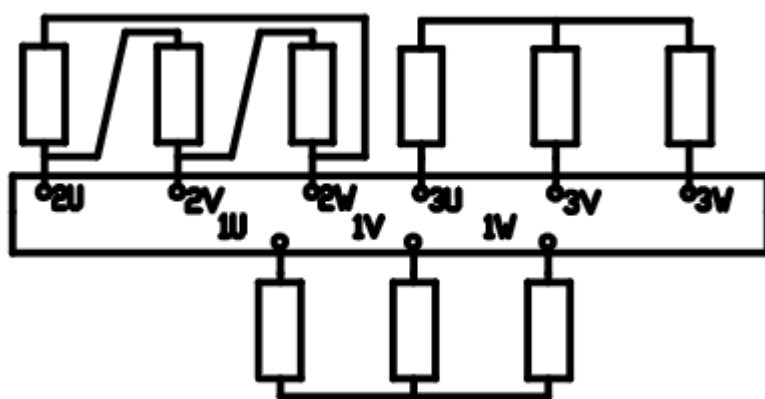


KUVA 2. Kuivamuuntaja ja öljymuuntaja

Kuivamuuntajaan on päädytty siksi, että kuivamuuntajan tilavaatimukset ovat merkittävästi väljemmät. Muuntajan alle ei tarvitse sijoittaa ylivuotoallasta öljyvuodon takia, eikä tilan tarvitse olla palosuojattu. Usein kuivamuuntajat ovat myös itsestään sammuvia, joka on merkittävä etu paloturvallisuuden näkökulmasta. Lisäksi yksi syöttöasemista sijoitetaan maan alle, jossa tulipalon sammuttaminen ja öljyvuodon siivoaminen olisi erittäin hankalaa.

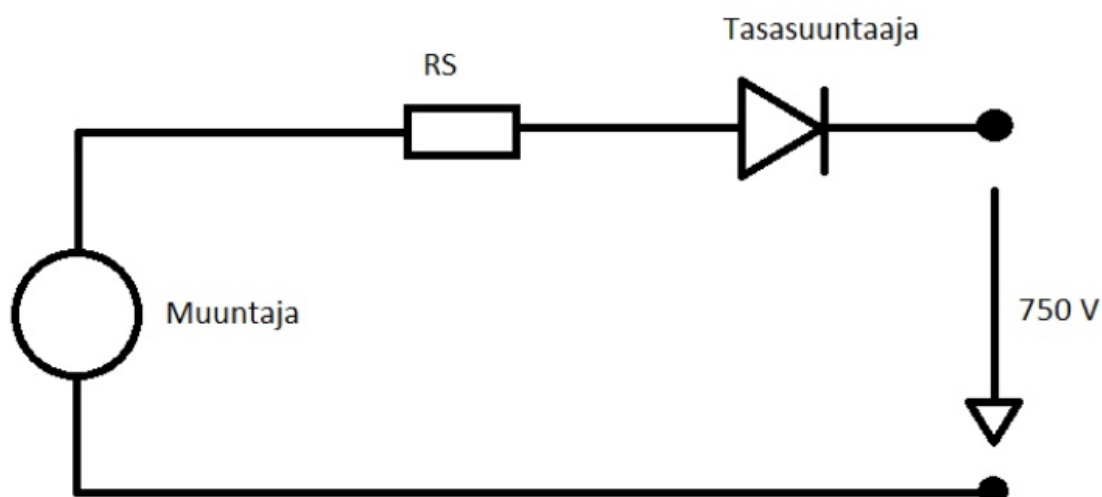
Vaikka kuivamuuntaja selkeästi sopii paremmin tämän projektin käyttöön, on kuivamuuntajilla myös huonot puolensa. Tyypillisesti kuivamuuntaja, verrattuna vastaavan tehoiseen öljymuuntajaan on kalliimpi. Lisäksi muuntajatilan ilmanvaihdosta tulee huolehtia, jotta saavutetaan riittävä jäähdytyskyky.

Raitiotien päämuuntajat poikkeavat tyypillisistä jakelumuuntajista myös siten, että päämuuntajat ovat kolmikäämisiä. Tämä tarkoittaa sitä, että muuntajan toisiopuolella on kahdet käämitykset. Toinen käämeistä on kytketty kolmioon ja toinen tähteen. Muuntaja on siis kuusi vaiheinen, sillä toisiopuolen molemmista käämeistä lähtee kolme vaihetta. Kaikkien syöttöasemien päämuuntajat ovat tehoiltaan ja jännitetasoiltaan identtisiä. Muuntajien ensiöjännite on 20 kV ja toisiojännite 586 V molemmissa käämeissä. Lisäksi ensiöpuolen jännitettä voi säätää 10% suuremmaksi tai pienemmäksi 2,5% askelilla. Nimellistehoiltaan muuntajat ovat 1600 kVA. (Liite 1.)



KUVIO 4. Päämuuntajan kytkentäkaavio

Kuviossa 4. ensiökäämi on ala- ja toisiokäämit yläpuolella. Kuvioista voidaan todeta, että toinen toisiokäämeistä on kolmiossa ja toinen tähdessä. Syy kahden toisiokäämin käyttöön on se, että sillä saadaan luotua 30° vaihe-erokulma järjestelmien välille. (Hietalahti, L. 2011b, 71). Kuviossa 5 on esitetty yksivaihemalli sähkönsyöttöaseman periaatteesta.



KUVIO 5. Yksivaiheinen esitys

Kuviossa vasemmalla on kuvattu syöttöaseman muuntaja sekä muuntajan oikosulkuresistanssi R_S . Tasasuuntaajaa on kuviossa kuvattu diodilla ja ulostulojännite on kuviossa oikealla. Järjestelmän ulostulon nimellisjännite on 750 V nimellisellä kuormalla.

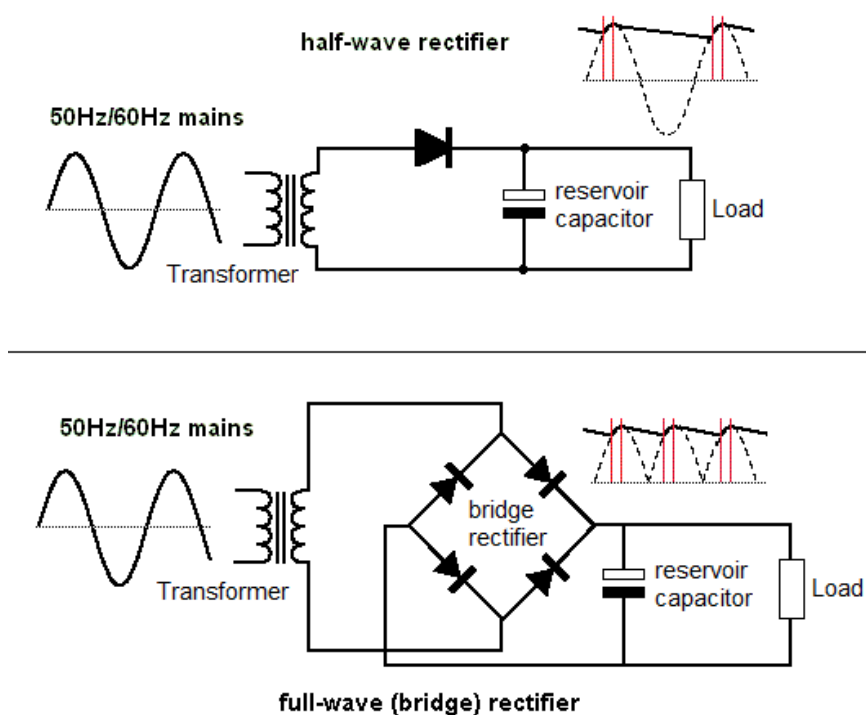
Kolmikäämisen muuntajan käyttö yhdessä 12-pulssisen tasasuuntaajan kanssa vähentää merkittävästi verkon yliaaltorasitusta. Vastaavanlainen tulos saavutetaisiin myös käyttämällä kahta muuntajaa, joista toinen on kolmioon ja toinen tähteen kytketty. Käyttämällä kolmikäämimuuntajaa säästetään kuitenkin tilaa sekä kaapelia. Kahta muuntajaa käytettäessä tarvittaisiin myös kahdet etukojeet. Kytkentää käytetään suuri tehoisissa järjestelmissä, kuten laiva- tai raitiotiekäytöissä, joissa verkon yliaaltorasitus muuten olisi kohtuutonta. (Hieta-lahti, L. 2011b, 71.)

2.3.2 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaaja on laite, joka muuttaa vaihtojännitteen tasajännitteeksi diodien, tyristorien, tehotransistorien tai IGBT tehopuolijohteiden avulla. Jos tehoa halutaan syötettävän myös takaisin verkkoon, komponenttien tulee olla ohjattavia. Komponenteista ohjattavia ovat tyristori, transistori sekä IGBT ja ohjaus toteutetaan useimmiten virtaohjauksella. Tampereen raitiotien tasasuuntaajat käyttävät

suuntaamiseen diodeja, jolloin tehon takaisinsyöttö verkkoon ei ole mahdollista. (Kylkisalo, T., Alanen, R. 2007. 49.)

Tasasuuntaajia on kahdenlaisia: puoliaalto- ja kokoaaltotasasuuntaajia. Lisäksi suuntaajat voidaan tehdä 1- tai 3-vaiheisiksi. Puoliaaltotasasuuntaaja jättää siniaallosta pois kaikki negatiiviset puoliaallot ja päästää läpi positiiviset. Puoliaaltotasasuuntaajan hyötysuhde on kuitenkin huono, sillä siniaallosta puolet jää käyttämättä hyväksi. Kokoaaltotasasuuntaaja kääntää siniaallon negatiiviset puoliaallot positiivisiksi, jolloin koko siniaalto käytetään hyväksi ja hyötysuhde parane merkittävästi. Kuviossa 6 on esitetty periaatekuva puoli- ja kokoaaltotasasuuntauksesta. (Hietalahti, L. 2011b, 38.)

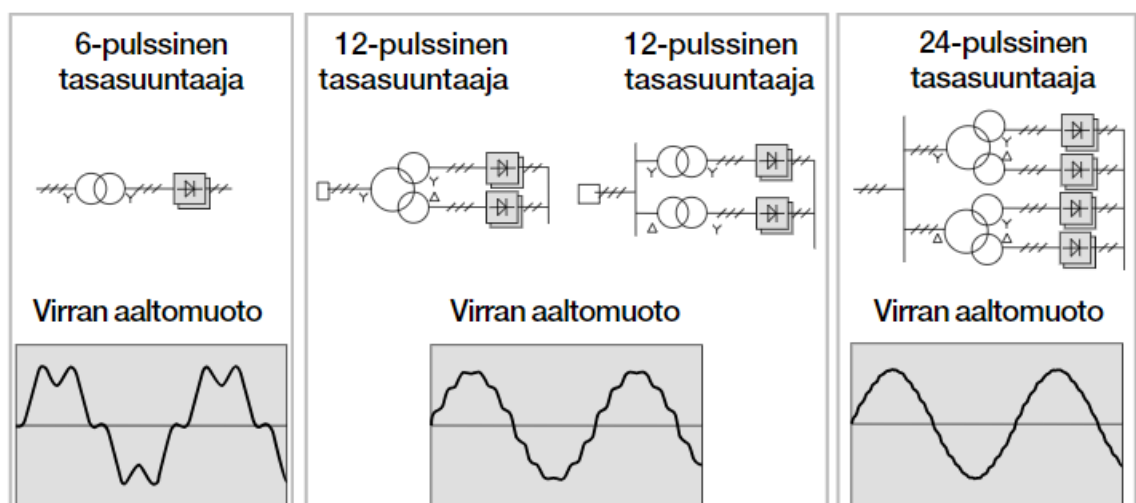


KUVIO 6. Puoli- ja kokoaaltotasasuuntaus (Rectifiers, how do they work.)

Kuviosta 6 nähdään periaatteet puoli- ja kokoaaltotasasuuntauksesta. Vasemmallalla kuviossa on verkosta tuleva vaihtojännite sekä muuntaja, joka muuttaa jännitteen halutulle tasolle. Keskellä kuviota on esitetty puoli- ja kokoaaltotasasuuntaussillat sekä jännitettä tasaava kondensaattori. Kuviossa oikealla on kuorma sekä jännitteen muoto tasasuuntauksen jälkeen. Kuviosta nähdäänkin, että kokoaaltotasasuuntaaja käyttää hyväkseen siniaallon kaikki puoliaallot.

Tasasuuntaaja toimii siten, että kaikki siniaallon negatiiviset puoliaallot käännetään positiivisiksi, jolloin saadaan aikaan sykkivä tasajännite. Sykkivää tasajännitettä tasataan kondensaattorin avulla, jolloin saavutetaan lähes täysin tasainen jännite. Tyypillinen teollisuudessa käytettävä tasasuuntaaja on kolmivaiheinen ja 6-pulssinen. Suuntaajan pulssiluku kertoo, kuinka monta diodia sillassa on ja kuinka monta jännitteen positiivista puolialtoa mahtuu yhteen siniaallon jaksoon. 6-pulssisessa tasasuuntaajassa on siis yhteensä kuusi diodia ja yhteen jaksoon mahtuu kuusi jännitteen positiivisen puoliallon huippua. (Hietalahti, L. 2011b, 45.)

Passiivisten tasasuuntaussiltojen käyttö aiheuttaa verkkoon epäsymmetriaa, eli laitteen ottama virta ei ole täysin sinimuotoista. Tästä aiheutuu sähköverkolle monenlaisia ongelmia, joita ovat muun muassa: Ylimääräiset häviöt ja lämpenemät muuntajissa, huonontunut tehokerroin, resonanssitilanteet ja häiriöt signaali-kaapeleissa sekä mittalaitteissa. Ohjattavilla komponenteilla voidaan vähentää sähköverkon yliaaltorasitusta ja lisäksi järjestelmään voidaan lisätä kuormittavia tekijöitä vähentäviä kompensointilaitteita. Toinen tapa häiriöiden vähentämiseksi on kasvattaa pulssilukua, eli vaihtaa perinteisen 6-pulssisen suuntaajan tilalle 12-pulssinen suuntaaja. Kuviossa 7 on esitetty eri pulssilukuisten suuntaajien rakenteita ja niiden vaikutusta virran aaltomuotoon. (Hietalahti, L. 2011b, 55-56, 71.)



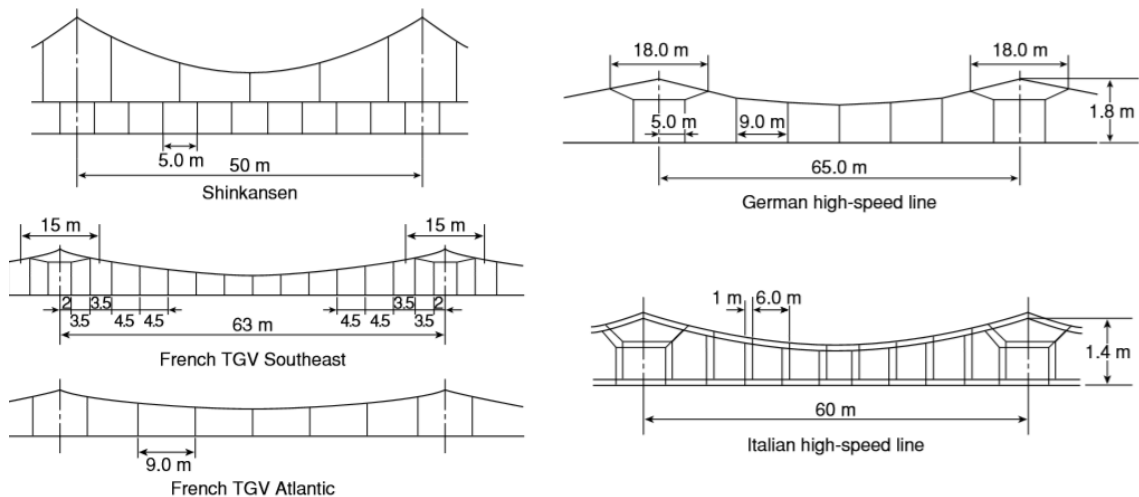
KUVIO 7. Suuntaajien rakenne (ABB Industry Oy)

Kuviossa 7 on esitetty eri tyyppisten suuntaajien aiheuttamat vääristymät verkkovirtaan sekä suuntaajien rakenne. Keskellä kuviota on raitiotiellä käytettävän suuntaajaratkaisun rakenne sekä yhdellä kolmikäämimuuntajalla, että kahdella erillisellä muuntajalla. 12-pulssisen tasasuuntaajan verkkovirta on huomattavasti lähempänä sinikäyrää kuin 6-pulssisen ja jos virran vääristymästä halutaan lähes kokonaan eroon, tulee järjestelmästä tehdä 24-pulssinen.

6-pulssisen tasasuuntaajan sijaan raitiotien syöttöasemilla on käytössä 12-pulssinen tasasuuntaaja. Yksinkertaisuudessaan 12-pulssinen tasasuuntaaja eroaa 6-pulssisesta siten, että 12-pulssinen suuntaaja on rakennettu kahdesta 6-pulssisesta tasasuuntaussillasta, jotka on kytketty rinnan. 12-pulssisen tasasuuntaajan käyttö vaatii kolmikäämisen muuntajan. Muuntajan kaksi toisiokäämiä kytetään suuntaajaan siten, että järjestelmien välille syntyy 30° vaihe-erokulma. Järjestelmä voidaan toteuttaa myös kahdella erillisellä muuntajalla, jolloin muuntajista toisen tulee olla kytkettynä kolmioon ja toisen tähteen. (Hietalahti, L. 2011b, 71.)

2.4 Ratajohtojärjestelmä

Ratajohtojärjestelmä koostuu ajojohtimesta sekä paluuvirtakiskoista. Ratajohtojärjestelmiä on useita erilaisia ja järjestelmät vaihtelevat eri maiden välillä merkittävästi ulkonäöllisesti, vaikka toimintaperiaate pysyykin samana. Lisäksi sisätiloissa, kuten tunneleissa järjestelmä poikkeaa ulos sijoitetusta siten, että ajojohdin voi olla kattoon kiinnitetty kisko. Kuviossa 8 on esitetty muutama erilainen malli eri maiden ratajohtojärjestelmistä.



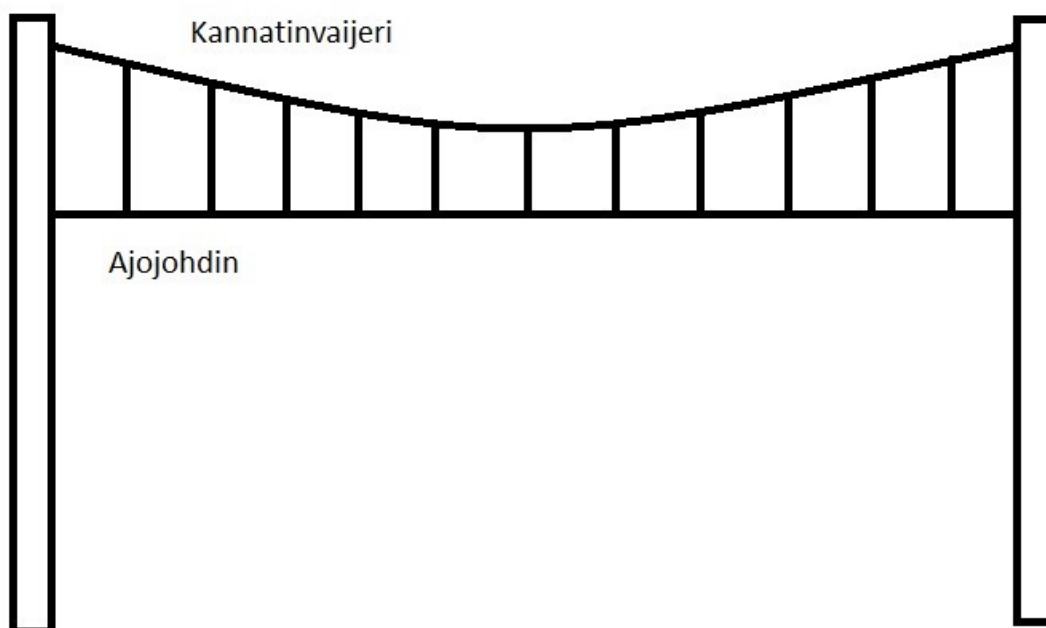
KUVIO 8. Ratajohtojärjestelmiä (Oura, Y., Mochinaga, Y., Nagasawa, H. 1998, 54.)

Vaikka kuviossa 8 esitetyt mallit ovat junien ratajohtojärjestelmistä, ovat periaatteet raitiovaunuissa samankaltaisia. Ainoastaan johtimien poikkipinta-alat sekä johtimien kireydet ja mekaaniset kestävyyskertoimet vaihtelevat.

Ratajohtojärjestelmää syötetään radan varteen sijoitetuista syöttöasemista. Ajojohtimessa oleva jännite on tasajännitettä, joka muutetaan vaihtojännitteestä tasajännitteeksi syöttöasemalla sijoitetun tasasuuntaajan avulla. Ajojohdin kiinnitetään tasasuuntaajan plus napaan ja paluuvirtakiskot suuntaajan miinus napaan. Paluuvirtakiskot ovat samat kiskot, joita raitiovaunu käyttää liikkumiseen. Virtapiiri ajojohtimen ja paluuvirtakiskojen välillä sulkeutuu raitiovaunun kautta.

2.4.1 Ratajohto

Ratajohto on pylväiden väliin kiinnitetty johdinjärjestelmä, josta raitiovaunu saa energiansa raitiovaunussa olevan virroittimen avulla. Ratajohto koostuu itse ajojohtimesta sekä kannatinvaijerista. Kannatinvaijeri on kiinnitetty ratajohtopylväiden väliin siten, että se muodostaa ylöspäin avautuvan paraabelin. Ajojohdin kiinnitetään kannatinvaijeriin yhdistyskaapeleilla niin, että itse ajojohdin on vaakatasossa maanpintaan nähden. Kuviossa 9 on esitetty periaatekuva ratajohdosta.



KUVIO 9. Ratajohto

NRC Group Finlandin sähkötöiden- ja käytönjohtajan mukaan syy sille, miksi ajojohdin kiinnitetään kannatinvaijeriin eikä suoraan ratajohtopylväisiin on yksinkertaisesti se, että tällä tavalla ajojohdin saadaan pysymään vaakatasossa. Vaikka ajojohdin roikkuisi, kuten kannatinvaijeri, raitiovaunun virroitin kyllä mukautuisi sen liikkeisiin, mutta se voisi aiheuttaa ajojohtimelle heiluntaliikettä ja mukaan pahimmassa tilanteessa johtaisi ajojohtimen resonointiin.

Ajojohdin ja kannatinvaijeri ovat molemmat kuparisia hyvän sähkönjohtavuuden varmistamiseksi. Ajojohdin, kannatinvaijeri sekä yhdistyskaapelit osallistuvat virran kuljettamiseen raitiovaunulle, jolloin hyvä sähkönjohtavuus on tärkeää häviöiden ja jännitteenaleneman minimoimiseksi.

Jännitteenaleneman kohtuullisena pitäminen vaatii virran pitämisen pienenä. Yksi tapa on sijoittaa syöttöasemia siten, että jännite asemien välissä ei pääse laskemaan liian alhaiseksi ja että asemat osallistuisivat kuorman syöttämiseen tasavertaisesti. Jos jännite pienenee, mutta teho halutaan pitää vakiona, tulee virtaa tällöin kasvattaa. Virran kasvattaminen taas vaikuttaa suoraan häviöihin yhtälön 6 mukaan. Toinen tapa pienentää jännitteenalenemaa ja häviöitä on kasvattaa ajojohtimen poikkipinta-alaa, joka pienentää ajojohtimen resistanssia ja täten vaikuttaa suoraan häviöihin.

$$P_{\text{häviö}} = I^2 \cdot R_{\text{Ratajohto}} \quad (6)$$

Yhtälössä I on virta ja $R_{\text{Ratajohto}}$ ajojohtimen ja kannatinvaijerin yhteenlaskettu resistanssi. Yhtälöstä huomataankin, että virran kasvu vaikuttaa häviöihin merkittävästi, sillä se on korotettu toiseen potenssiin.

2.4.2 Paluukiskot

Raiteilla, joita vaunu käyttää kulkemiseen on myös toinen tarkoitus; virran kuljettaminen takaisin syöttöasemalle. Kiskot ovat teräksisiä ja ne on yhdistetty syöttöasemien kohdalta suoraan tasasuuntaajan miinus napaan. Teräksen sähkönjohtavuus on merkittävästi huonompi kuin perinteisten johdinmateriaalien, kuten kuparin ja alumiinin. Kiskojen suuri poikkipinta-ala kuitenkin kompensoi huonoa sähkönjohtavuutta ja itseasiassa kiskojen resistanssi kilometriä kohden on pienempi kuin ajojohtimen. Tarkempi resistanssien tarkastelu on suoritettu kappalessa 2.4.3.

Kiskot ovat kokonaan eristettyjä maasta, jolloin virran ainut paluureitti takaisin syöttöasemalla on kiskoja pitkin. Eristämällä kiskot pyritään ehkäisemään haitallisia hajavirtoja, jotka muutoin kulkisivat esimerkiksi metallisia vesijohtoja pitkin. Hajavirrat eivät ole vaarallisia ihmisille, mutta kohdat, joista virta poistuu vesijohdosta ovat alttiita korroosiolle. Ajan saatossa putki syöpyy puhki ja vuodon sattuessa vuoto voi aiheuttaa merkittävää vahinkoa kiinteistöille ja muille rakennelmille. Lisäksi vuodon korjaaminen vaatii vuodon paikantamisen ja pahimmassa tapauksessa vilkasliikenteisen tien auki kaivamisen.

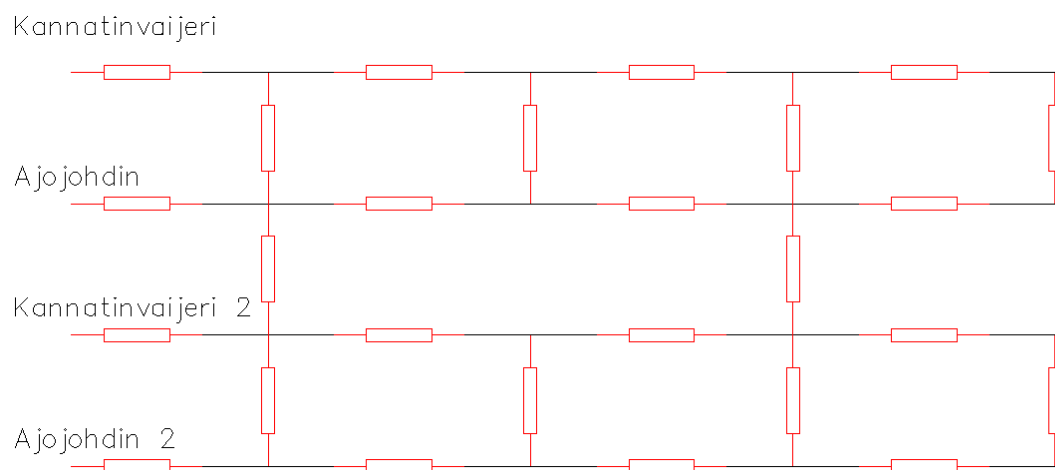
Jännitteen nousua paluuvirtakiskoissa tulee tarkkailla, sillä kiskot ovat paljaat ja alttiina kosketukselle. Jännitteen nousu kiskoissa on pientä kiskojen pienen resistanssin takia. Virtojen kasvaessa myös jännite kiskoissa nousee ja vikatilanteet ovat omiaan nostamaan jännitettä entisestään. Vaaratilanteiden minimoimiseksi kiskojen ja maan välille on kiinnitetty VLD-laitteita (*Voltage Limiting De-*

vice), jotka toimivat ylijännitesuojan tavoin. VLD-laite antaa jännitteen nousta kiskoissa 120 V asti, joka on pienoisyjännitteen maksimi arvo tasajännitteellä. Arvon ylittyessä VLD muuttuu johtavaksi ja yhdistää kiskon maadoitukseen, joka taas pudottaa kiskoissa olevan jännitteen alas. (ABB)

2.4.3 Järjestelmän resistanssi

Simulaation toinen vaihe vaatii tiedot ajojohtimen ja paluuvirtakiskojen resistansseista. Yksittäisen kaapelin ja kiskon resistanssit ovat helposti saatavilla, mutta kokonaisresistanssin laskeminen on hankalaa järjestelmän monimutkaisuuden vuoksi.

Ratajohto koostuu ajojohtimesta ja kannatinvaijerista, jotka on yhdistetty poikittaisyhdistyksillä. Tällöin järjestelmästä muodostuu ikään kuin tikapuumalli, jossa vastuksia on vuorotellen sarjassa ja rinnan. Tämän lisäksi ratajohtoja kulkee kaksi rinnan, yksi palaavalla ja yksi menevälle raitiotieliikenteelle. Ratajohdot on yhdistetty toisiinsa 300m välein, eli tällöin tikapuumalleja on kaksi rinnan, jolloin resistanssien määrittäminen käy erittäin hankalaksi ja aikaa vieväksi prosessiksi. Kuviossa 10 on esitetty havainnollistava malli ratajohtojen resistanssipiiristä.



KUVIO 10. Ratajohtojen resistanssit

Kuviossa 10 on meno- ja tulo-raiteen ratajohdon resistanssimalli. Kannatinvaijerien ja ajojohtimien välissä olevat vastukset ovat poikittaisyhdistyskaapeli-

sistansseja ja molemmat järjestelmät yhdistävät vastukset ovat 300 m välein sijoitettavat yhdistyskaapelit. Todellisuudessa kannatinvaijerin ja ajojohtimen yhdistäviä vastuksia tulisi olla huomattavasti tiheämmin. Lisäksi tarkan vastusarvon määrittäminen näille kaapeleille olisi hankalaa, sillä niiden pituus ei ole vakio. Kuten kuviossa 9 nähdään, ajojohtimen ja kannatinvaijerin välinen etäisyys vaihtelee. Ratajohtopylväiden puolella välissä johtimet ovat lähempänä toisiaan, kuin lähellä pylväitä.

Samanlainen ongelma syntyy myös kiskojen vastusarvoja määritettäessä. Kuvion 10 mukaista mallia voidaan soveltaa myös kiskoihin, sillä kiskot yhdistetään toisiinsa 150 m välein ja raiteet toisiinsa 300 m välein. Tällöin mallista syntyy täsmälleen samanlainen ja ainoastaan vastusarvot poikkeavat toisistaan.

Vastusarvojen määrittämisestä saisi laajuudessaan tehtyä oman opinnäytetyön ja jos arvoja ryhdyttäisiin tässä työssä määrittämään, veisi se huomion pois työn todellisesta tarkoituksesta. Yhdessä työn tilaajan kanssa sovittiin, että niin ajojohtimen kuin kiskojen resistanssitkin lasketaan yksinkertaisesti siten, että ajojohtimen ja kannatinvaijerin oletetaan olevan rinnankytkettyjä ilman poikittaisyhdistyksiä, jolloin laskenta helpottuu merkittävästi. Samalla tavalla lasketaan myös kiskojen resistanssit, eli laskennasta jätetään pois kiskojen ja raiteiden väliset yhdistykset. Lopputuloksena saadaan suurempi resistanssi, kuin jos laskenta olisi tehty kuviossa 10 esitetyn mallin mukaisesti. Suuremmat vastusarvot muuttavat tuloksia siten, että jännitteenalenemat ajojohtimessa ovat suurempia, kuin ne todellisuudessa ovat.

Ajojohtimen sekä kannatinvaijerin ja kiskojen oletettiin olevan rinnankytkettyinä, jolloin resistanssien määrittämiseen voitiin käyttää yhtälöä 7.

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} \quad (7)$$

Rinnankytkettyjen vastusten kokonaisresistanssi on siis yksittäistein resistanssien käänteislukujen summan käänteisluku. Ajojohtimen tapauksessa R_{tot} on siis ajojohtimen ja kannatinvaijerin kokonaisresistanssi ja $R1$ ja $R2$ kuvaavat ajojohtimen

timen ja kannatinvaijerin resistanssia. Vastaavasti kiskojen resistanssin laskennassa R_{tot} on kiskojen kokonaisresistanssi, mutta yksittäisiä vastuksia kuvaavat arvot $R1$ ja $R2$ ovat samat arvot, sillä kiskot ovat identtiset.

Jotta ratajohdon kokonaisresistanssi saadaan laskettua, tulee ensin määrittää ajojohtimen sekä kannatinvaijerin resistanssit. Ajojohdin on poikkipinta-alaltaan 120 mm^2 ja kannatinvaijeri 70 mm^2 , jolloin näiden yhteenlaskettu poikkipinta-ala on 190 mm^2 . Lisäksi tulee tietää materiaalin resistiivisyys ρ , joka kuparille on $0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega/\text{m}$. Näiden tietojen avulla voidaan halutun pituiselle johtimelle laskea resistanssi yhtälöllä 8.

$$R_{tot} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (8)$$

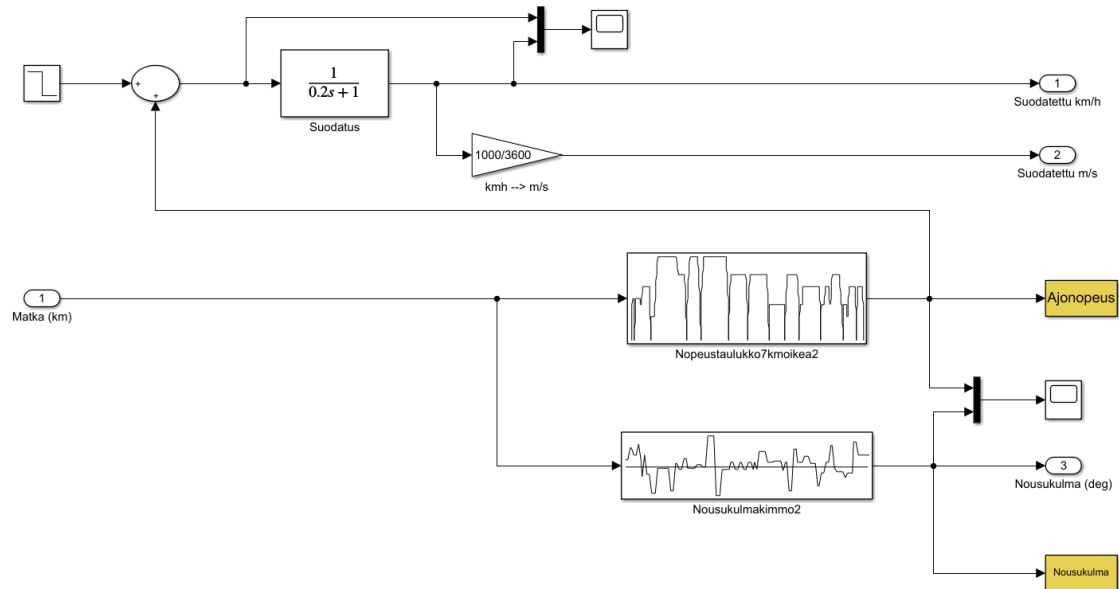
Yhtälössä ρ on kuparin resistiivisyys, l on johtimen pituus ja A on johtimen poikkipinta-ala. Yhtälöllä saadut tulokset on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Resistanssit

Pituus (m)	Resistanssi (Ω)		
	Ajojohdin	Kannatinvaijeri	Ratajohto
10	0,0014	0,0024	0,0009
100	0,014	0,024	0,0088
1000	0,14	0,24	0,0884

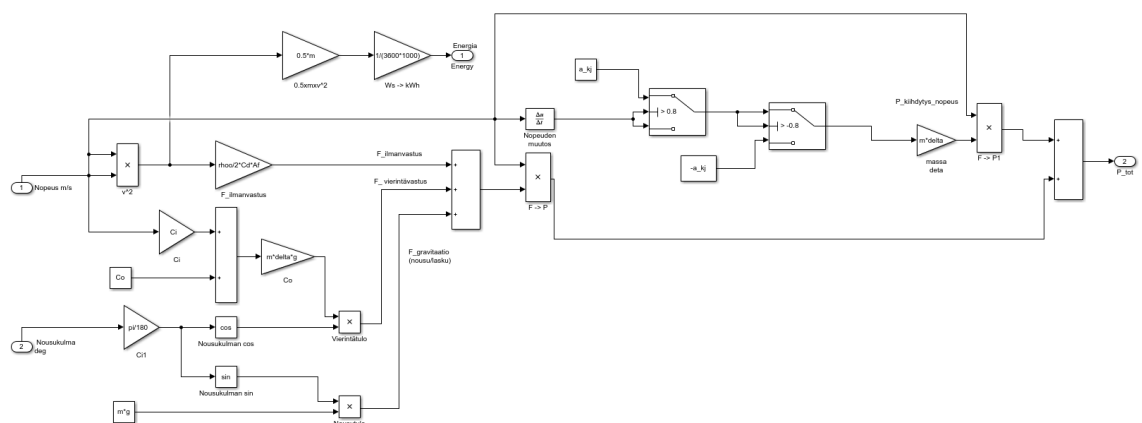
Taulukosta nähdään ajojohtimen, kannatinvaijerin sekä ratajohdon resistanssit eri pituuksilla. Simulaatiossa käytettiin 100 m johtimelle käytettyä arvoa, sillä simuloitava matka jaettiin 100 m pätkiin.

Lisäksi simulaatioon haluttiin syöttää myös kiskojen resistanssit. Kiskojen resistanssien laskenta on ongelmallista, sillä tarkan poikkipinta-alan määrittäminen on hankalaa kiskojen muodon vuoksi. Raitiotien ensimmäiseen vaiheeseen tilatun raportin mukaan yhdelle kiskolle oli käytetty resistanssin arvoa $0,05 \Omega/\text{km}$, jossa on otettu mukaan myös 15% kuluma. Koska kiskoja on kaksi rinnan, saadaan yhdelle kiskoparille resistanssiksi yhtälöllä 7 laskettaessa $0,025 \Omega/\text{km}$. Työssä päädyttiin käyttämään ensimmäisen vaiheen raportin mukaista arvoa, sillä tietoja kiskojen resistansseista on huonosti saatavilla.



KUVIO 12. Ajoprofiili

Kuviossa 12 on simulaatiossa käytetyn ajoprofiili ala-järjestelmän sisältö. Keskeisimmät osat ala-järjestelmässä ovat nopeus- ja nousukulmataulukot, jotka ovat laatikot keskellä kuviota. Näiden avulla määritetään nopeus- ja korkeusprofiili toiselle ala-järjestelmälle, joka annettujen tietojen avulla laskee raitiovaunua vastustavat voimat ja tätä kautta myös vaunun ottaman tehon tietyssä kohdassa linjaa.



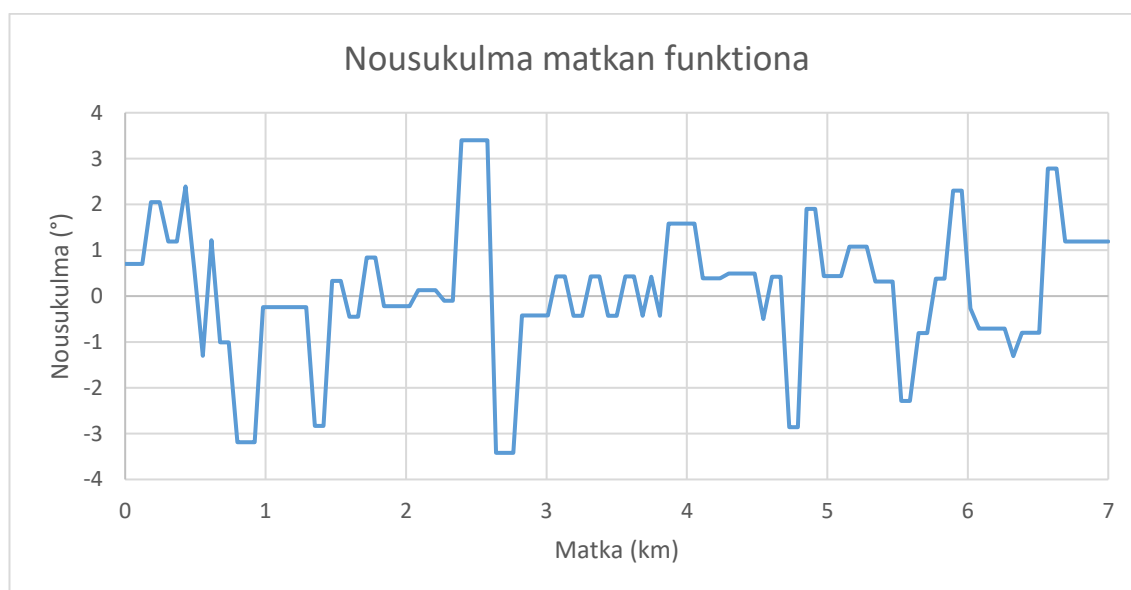
KUVIO 13. Vastustavien voimien laskenta

Kuviossa 13 on esitetty kuviossa 11 nähdyn sinisen ala-järjestelmän sisältö. Vasemmalta syötetään sisään aiemmin muodostetut nopeuden ja nousukulman kuvaajat ja niitä sekä raitiovaunun tunnuslukuja käyttäen ala-järjestelmä muodostaa tehon kuvaajan.

Simulaatio on jaettu kahteen osaan, jossa ensimmäisessä osassa saadaan ulos raitiovaunun teho ja toisessa osassa voidaan tarkastella ajojohtimen jännitettä sekä raitiotieverkon toimintaa vikatilanteissa. Vikatilanteeksi oletetaan tilanne, jossa yksi syöttöasema lakkaa syöttämästä. Vikaa testataan jokaiselle asemalle erikseen, jolloin nähdään, miten syöttöasemat selviävät yhden aseman putoamisesta pois verkosta.

3.1.1 Ensimmäinen osa

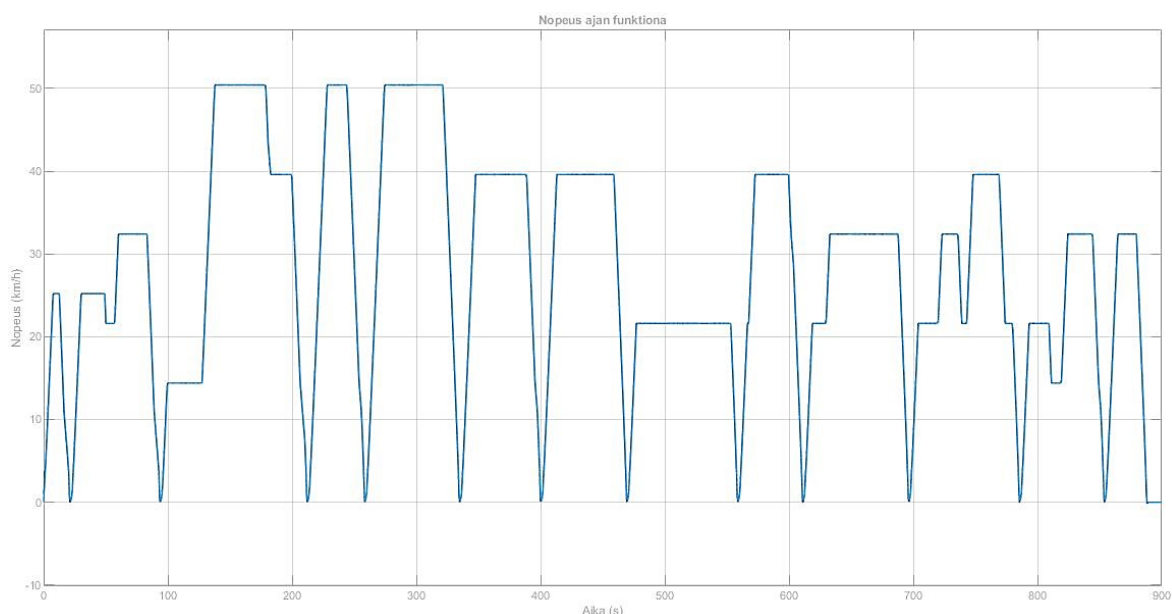
Laskennan kannalta keskeisiä lähtötietoja ovat ajonopeudet sekä korkeusaseman muutokset. Molemmat tiedot saatiin työn tilaajalta DWG-tiedostoina ja kuvista tulkitsemalla saatiin halutut tiedot kirjattua taulukkolaskentaohjelmaan. Simulink mallin ominaisuuksien vuoksi korkeusaseman muutokset kirjattiin 114 osaan, eli 7 km matka jaettiin 114:llä, jolloin pisteiden väliin jää 61,4 m matka. Korkeusaseman muutokset kaupungeissa muuttuvat suhteellisen maltillisesti, jolloin lähes jokainen korkeuden muutos saatiin mukaan simulaatioon. Korkeuden muutos haluttiin syöttää simulaatioon asteina, jolloin DWG-kuvasta tulkittiin ensin muutos prosentteina ja joka sitten muutettiin asteiksi taulukkolaskentaohjelman avulla.



KUVIO 14. Nousukulma matkan funktiona

Kuviossa 14 on esitetty koko matkalle luotu nousukulman kuvaaja. Kuvaajan tiedot syötettiin myös simulaatioon, jotta saadaan simuloitua ylä- ja alamäkien vaikutusta vaunuun. Kuviossa vaaka-akselilla on matka kilometreinä ja pystyakselilla nousukulma asteina. Kuvaajaa tulkitaan siten, että pystyakselin nollan yläpuolella olevat luvut tarkoittavat nousua ja alapuolella laskua. Mitä enemmän nollan ylä- tai alapuolelle mennään, sitä jyrkempi mäki on.

Korkeusaseman muutosten lisäksi ohjelmaan haluttiin syöttää vaunun etenemä kilometreissä sekä hetkellinen nopeus kilometreinä tunnissa. Raitiotien ensimmäisestä osasta poiketen tällä kertaa käytössä ei ollut kumpaakaan, vaan ainoastaan sen hetkiset suunnitellut nopeusrajoitukset. Nopeusrajoitustietojen perusteella rakennettiin taulukkolaskentaohjelmassa malli, joka kiihtyvyyden ja nopeusrajoitusten perusteella laskee sekunnin välein etenemän raitiovaunulle. Lisäksi taulukkoon tuli merkata pysäkkien paikat, joiden keskellä nopeuden tuli olla nolla. Vaunulle käytettiin kiihtyvyyden arvoa 1 m/s^2 . Kyseiseen arvoon päädyttiin siksi, että liikennöinnin ohjearvo raitiovaunulle on $0,8 \text{ m/s}^2$ ja työssä haluttiin käyttää kuormittavampaa arvoa. Toinen syy on se, että taulukon tekeminen ja laskenta helpottuivat merkittävästi, sillä kun kiihtyvyys on 1 m/s^2 , muuttuu nopeus aina 1 m/s . Kuviossa 15 on esitetty nopeuden kuvaaja ajan suhteen.



KUVIO 15. Nopeus ajan funktiona

Kuvaajassa vaaka-akselilla on aika sekunteina ja pystyakselilla nopeus kilometreinä tunnissa. Pysäkit ovat kohdissa, joissa nopeus laskee nollaan. Kuviossa

oleva nopeusprofiili syötettiin myös simulaatioon. Simulaatio laskee nopeuden ja nousukulman perusteella vaunulle sen liikettä vastustavat voimat ja tätä kautta myös tehon. Vastustavien voimien laskentaa on käsitelty tarkemmin kapaleessa 2.2 Ajoneuvonkäytön mitoitus.

Simulaatioon syötettiin myös raitiovaunulle ominaisia tunnuslukuja, joita simulaatio käyttää vastustavien voimien laskentaan. Tunnuslukuja ovat muun muassa maan gravitaatiokiihtyvyys g , vaunun poikkipinta-ala A ja vaunun massa m . Lisäksi ohjelmaan syötettiin vastustavien voimien laskennassa käytettyjä vakioita, kuten vaunun muoto kerroin C_d , ilman tiheys ρ ja vierintävastuskertoimen määrittämisessä käytettävät C_i sekä C_o . Kuviossa 16 on esitetty käyttöliittymä, johon tunnuslukuja syötettiin.

Block Parameters: Ratikka

Subsystem (mask)

Parameters

rho0
1.18

Cd
0.35

Co
0.0008

Ci
0.0000016

m
70000

Alfa
0

g
9.81

v_ilma
0

delta
1

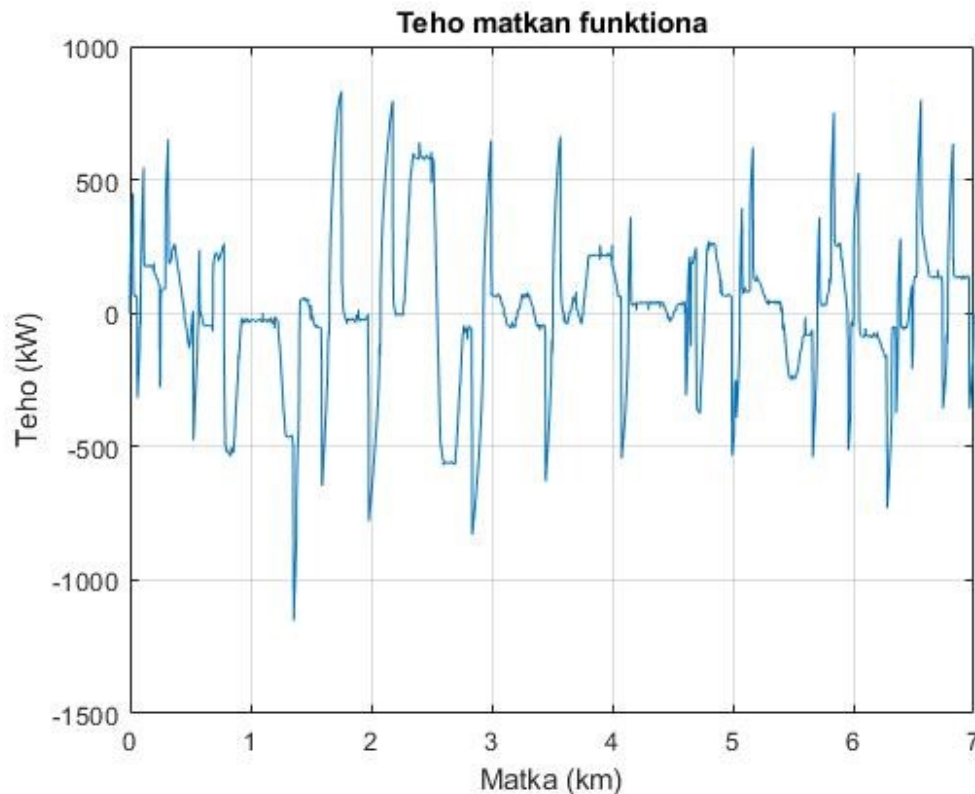
Af_poikkipinta-ala
3.6*2.5

Kiihtyvyyys/jarrutusraja
0.8

OK Cancel Help Apply

KUVIO 16. Vaunun tunnuslukuja

Nopeus- ja korkeusprofiilin sekä tunnuslukujen lisäämisen jälkeen ohjelma laskee vaunun tehon tietyssä kohdassa rataa. Tehon suuruuteen vaikuttaa vaunun kiihdytys sekä jarrutus yhdessä nousukulman kanssa. Kiihdytettäessä ylämäkeen on teho huomattavasti suurempi kuin kiihdytettäessä tasaisella. Vaunun jarruttaessa kääntyy tehon etumerkki negatiiviseksi, jolloin tehoa syötetään takaisin ajojohtimeen. Kuviossa 17 on esitetty tehon kuvaaja.

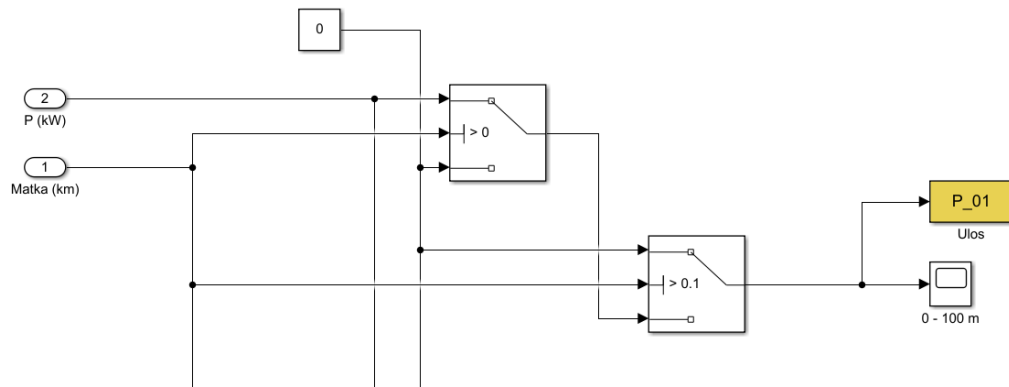


KUVIO 17. Teho matkan funktiona

Kuviosta nähdään tehon vaihtelevan merkittävästi. Tämä johtuu siitä, että vaunu kiihdyttää ja hidastaa usein. Lisäksi nousukulma vaikuttaa tehoon merkittävästi. Kiihdytettäessä ylämäkeen on teho suuri ja jarrutettaessa alamäkeen syötetään tehoa takaisin, jolloin tehon etumerkki on negatiivinen.

3.1.2 Toinen osa

Simuloinnin toista osaa varten jouduttiin tehon kuvaaja jakamaan osiin. Osiin jakamisen syy on se, että tällä tavalla saatiin tietyille osalla rataa laskettua oma kuormaresistanssin arvo. Tehon kuvaaja jaettiin 100m pätkiin simulaatioon sijoitettujen kytkinten avulla. Yhtä 100 m pätkää kohden tarvittiin kaksi kytkintä, jotka vertaavat kuljettua matkaa kytkimiin sijoitettuun raja-arvoon. Kuviossa 18 on esitetty havainnollistava kuva kytkimien toiminnasta.



KUVIO 18. Kytkimet

Kuvion vasemmasta laidasta syötetään sisään kuljettu matka sekä teho. Keskellä kuvaa on kaksi kytkintä ja oikealla muuttujan nimi, johon teho kyseiseltä pätkältä tallennetaan. Järjestelmä toimii siten, että ensimmäinen kytkin tarkastelee, onko kuljettu matka suurempi kuin nolla. Matkan ollessa nollaa suurempi, antaa kytkin toiselle kytkimelle tiedon tehosta. Seuraava kytkin tarkastelee, onko kuljettu matka pienempi kuin 100 m. Jos matka on pienempi kuin 100 m, syöttää kytkin tehoa muuttujaan niin kauan, kunnes kuljettu matka ylittää 100 m. Kytkimillä määritetyn alueen ulkopuolella muuttujalle syötetään tehoksi pelkkää nollaa. Tällaisia kytkinpareja on mallissa 70 kpl, jotta koko 7 km matka saadaan jaettua osiin. Tuloksista saataisiin sitä tarkempia, mitä pienempiin osiin matka jaettaisiin, mutta 100 m matka todettiin riittävän tarkaksi.

Tehon osiin jakamisen jälkeen muuttujat syötettiin Matlab scripttiin, joka sieppasi pätkistä huipputehon. Jos jollain pätkistä teho oli 80 m matkan ajan 10 kW, mutta lopun 20 m matkalla tuli piikki, jonka huippuarvo oli 200 kW, oletettiin koko matkan olevan 200 kW. Tällä tavalla tuloksista saatiin pessimistisempiä ja negatiiviset tehot saatiin suodatettua pois. Saaduista huippuarvoista laskettiin vaunun kuormaresistanssi yhtälöllä 9.

$$R_k = \frac{U_{DC}^2}{P_{Kuorma}} \quad (9)$$

Yhtälössä R_k on vaunun kuormaresistanssi, U_{DC} on ajojohdon jännite, ja P_{Kuorma} on kuorman teho watteina. Yhtälöstä saatua kuormaresistanssin arvoa käytetään

simulaation viimeisessä osassa jännitteenaleneman, virtojen ja tehon lopulliseen simulointiin.

Lopulliset tulokset saatiin aikaiseksi ajamalla läpi ohjelma, joka ottaa huomioon kaikki aiemmin saadut tulokset. Lisäksi ohjelmaa syötettiin arvot muun muassa ajojohtimen ja kiskojen resistansseille, syöttöasemien nimellisjännitteelle ja sijainnille radalla. Ohjelmassa voidaan valita, ajetaanko rata yhdellä vai kahdella vaunulla sekä mikä asema lakkaa syöttämästä. Laskennan lopussa ohjelmasta voidaan tulostaa kuvat jokaisen syöttöaseman virrasta ja tehosta sekä jännitteenalenemasta tietyssä kohdassa ajojohtoa.

4 TULOSTEN TARKASTELU

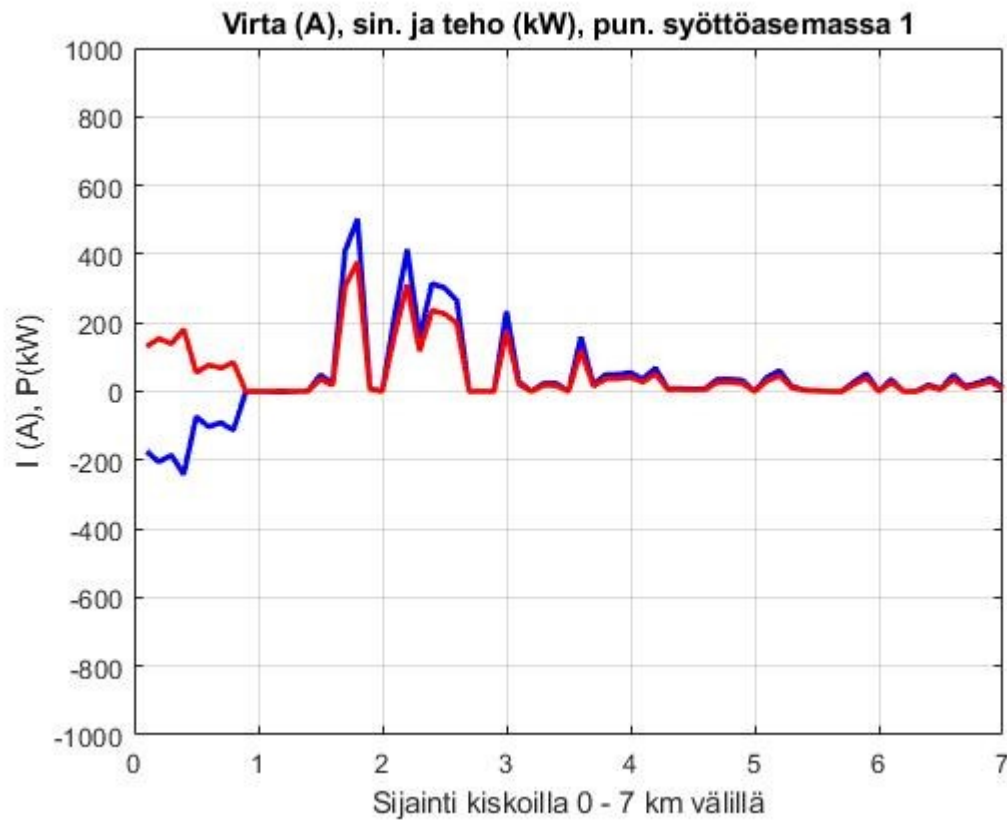
Raitiotien rakentamisen ensimmäisessä osassa tilattiin raportti Institut für Bahntechnik GmbH:lta, joka teki kattavan tarkastelun raitiotien sähköisistä järjestelmistä. Raportista käy ilmi jännitteenalenemat ajojohtimessa sekä asemien virrat ja tehot. Tästä työstä saatuja tuloksia pyritään vertaamaan kyseiseen raporttiin, jotta nähdään ovatko tulokset samankaltaisia. Lisäksi tulosten tarkastelussa otetaan huomioon SFS-EN 50163- standardissa annetut rajat ajojohtimen jännitteen osalta.

Kaikissa kuvioissa virta aseman vasemmalla puolella on negatiivista. Näin ei todellisuudessa ole, vaan se johtuu tavasta, jolla ohjelma laskee asemakohtaiset virrat. Lisäksi kuvia tulkittaessa tulee ottaa huomioon, että asemien numerointi riippuu siitä, mistä suunnasta vaunu on lähtenyt. Esimerkiksi Pyynikiltä Lentävänniemeeseen kuljettaessa asemat ovat järjestyksessä 1,3 km, 3,5 km, 5 km ja 6 km kohdalla. Järjestys on päinvastainen kuljettaessa Lentävänniemestä Pyynikille, jolloin ensimmäinen asema on 1 km, toinen 2 km, kolmas 3,5 km ja viimeinen 5,7 km kohdalla, eli järjestys on käänteinen.

Reittien viimeisten asemien virrat ovat puutteelliset, sillä simulaatio ei näyttänyt virtoja asemille tultaessa, vaan vasta kun kyseiset asemat oli ohitettu. Tästä syystä viimeisten asemien asema kohtaisia virtoja ei tarkasteltu, mutta ne otettiin huomioon vikatilanteissa ja niiden puuttumisen vaikutusta muiden asemien virtoihin voitiin tarkastella.

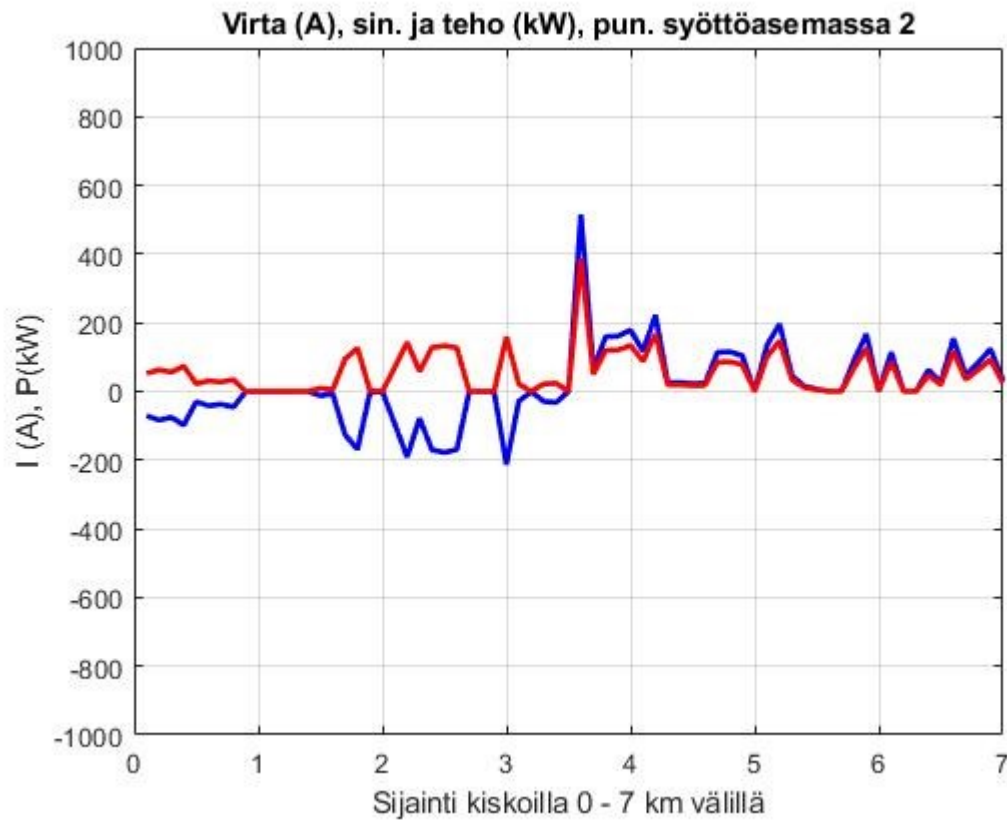
4.1 Pyynikki - Lentävänniemi

Ensimmäiset tulokset simuloitiin välille Pyynikki – Lentävänniemi. Vaunu laitettiin siis kulkemaan Pyynikiltä Lentävänniemeeseen ja tältä väliltä otettiin tulokset virrasta, tehosta ja jännitteenalenemasta normaalissa ajotilanteessa.



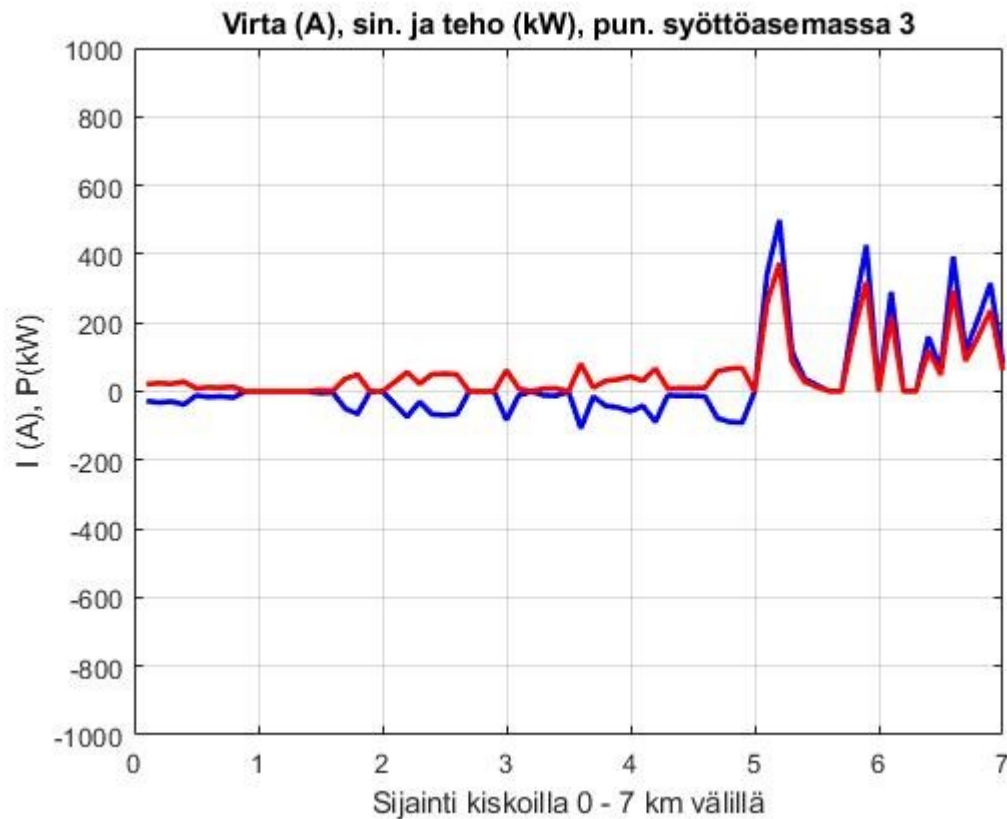
KUVIO 19. Asema 1 Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviossa 19 on esitetty Pyynikiltä katsoen ensimmäisen aseman virta sekä teho. Ensimmäinen asema sijaitsee 1,3 km kohdalla ja tässä kohdassa nähdäänkin selkeä nousu sekä virrassa, että tehossa. Todellisuudessa Pyynikillä sijaitsee myös ensimmäisessä vaiheessa rakennettu syöttöasema, joka myös omalta osaltaan osallistuu tehon syöttöön ja vaikuttaa etenkin tämän aseman virtoihin ja tehoihin.



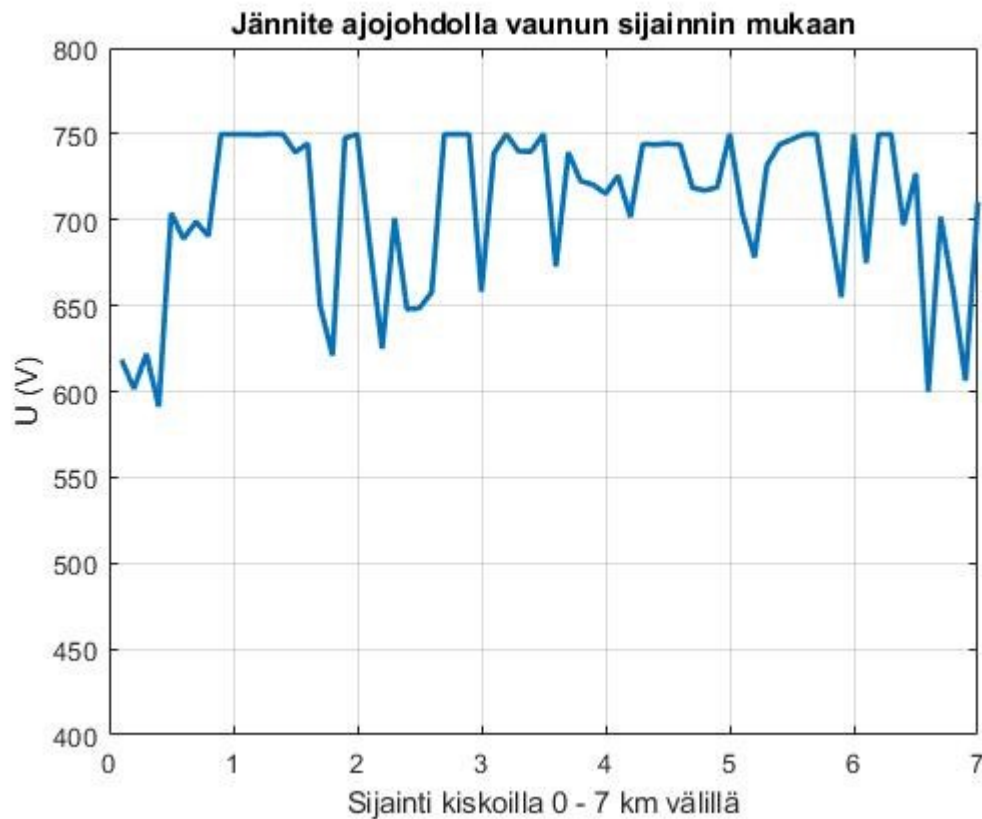
KUVIO 20. Asema 2 Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviossa 20 korostuu laskentatavan aiheuttama virran negatiiviseksi kääntyminen asemalle tullessa. Asema 2 sijaitsee 3,5 km kohdalla, jossa on myös nähtävissä selkeä piikki virrassa ja tehossa. Piikki johtunee siitä, että yksi pysäkeistä sijaitsee aseman kohdalla, jolloin tässä kohdassa vaunu kiihdyttää.



KUVIO 21. Asema 3 Pyynikki – Lentävänniemi

Kolmas asema sijaitsee 5 km kohdalla. Kaikki piikit kuviossa ovat kohdissa, joissa on joko ylämäki tai pysäkki. Ensimmäinen ja suurin piikki selittyy ylämäellä. Kaksi viimeistä asemaa ovat lähellä toisiaan, sillä 5 km kohdalta lähtee pistoraide kohti Lielähtea. Jos viimeinen, eli 6 km kohdalla oleva asema vikaantuu, joutuu asema kolme syöttämään myös linjan päätä. Linjan päähän asemalta kolme on matkaa 2 km, jolloin aseman tulisi siihen pystyä, kuten todettiin kapaleessa 2.3.



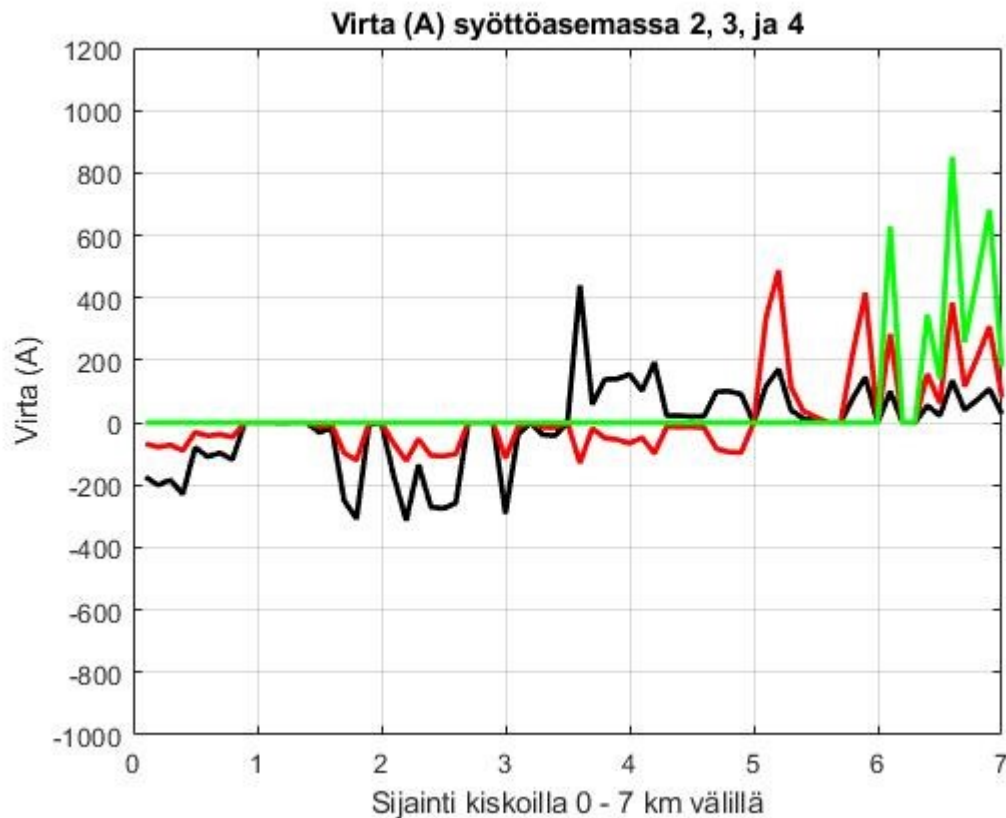
KUVIO 22. Jännite ajojohdossa Pyynikki – Lentävänniemi

Nimellisjännite ajojohdossa on 750 V. Standardin mukaan jännite saa vaihdella siten, että se on pienimmillään 500 V ja suurimmillaan 900 V/1000 V. Kuviosta nähdäänkin, ettei jännite laske lähellekään 500 V, vaan on pienimmillään hie- man alle 600 V. Suurinta jännitettä ei simuloitu, joten jännitteen nousuun ei voida ottaa kantaa. Jännitteen kuvaajia tarkastellessa tulee kuitenkin muistaa, että lasketut resistanssit järjestelmälle ovat merkittävästi suurempia kuin todelli- suudessa, jolloin myös laskettu jännitteenalenema on suurempi.

4.1.1 Vikatilanne

Työssä tarkasteltiin myös raitiotien vikatilanteita. Vikatilanne tarkoittaa sitä, että yksi neljästä asemasta kytkeytyy pois verkosta, jolloin muut asemat joutuvat kom- pensoimaan yhden aseman puuttumista. Kuvioita tulkitaan siten, että virrat ovat järjestyksessä musta, punainen ja vihreä. Esimerkiksi tilanteessa, jossa asema yksi on vikaantunut, on musta kuvaaja aseman kaksi, punainen aseman kolme ja

vihreä aseman neljä virta. Vastaavasti, jos asema kolme on vikaantunut, on musta kuvaaja aseman yksi, punainen aseman kaksi ja vihreä aseman neljä kuvaaja.



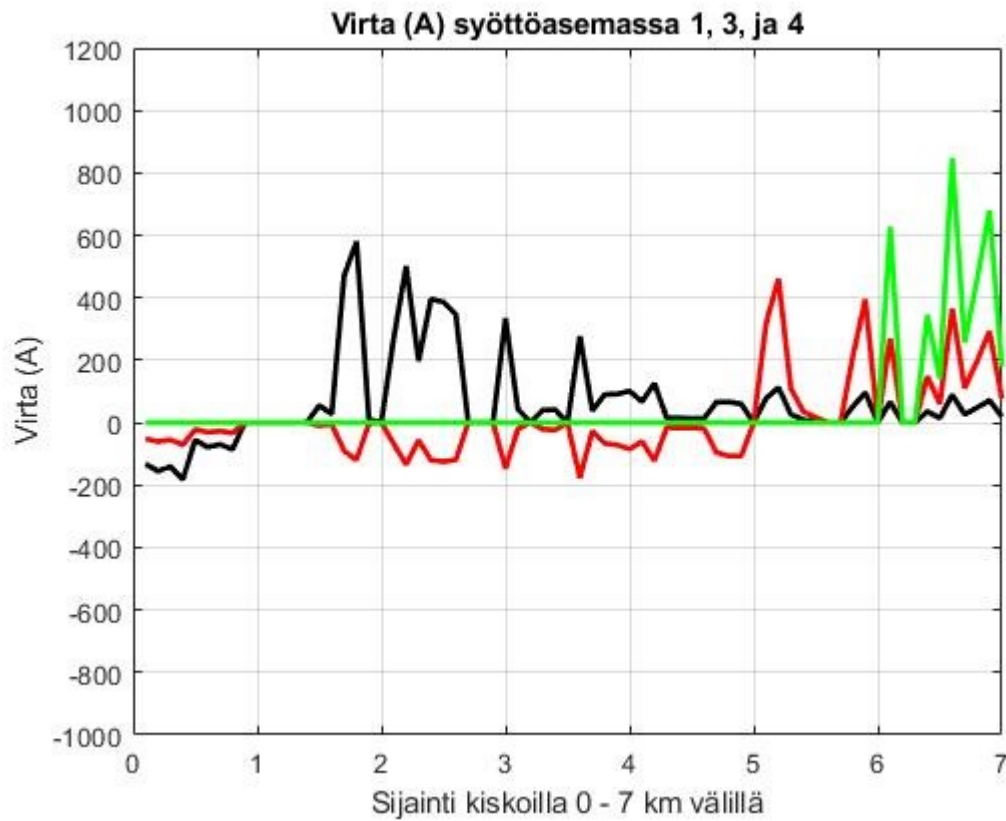
KUVIO 23. Vika asemalla 1, Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviossa 23 on esitetty tilanne, jossa asema yksi on kytketty pois verkosta. Kuvioista voidaan huomata, että aseman kaksi virta on suurempi kuin normaalissa ajotilanteessa ja se myös osallistuu virran syöttämiseen jo aiemmin. Vika ei merkittävästi vaikuta aseman kolme ja neljä virtoihin, sillä ne ovat kauempana vika paikasta. Todellisuudessa myös Pyynikillä ensimmäisessä vaiheessa rakennettu asema osallistuisi tehon syöttöön ja näin ollen pienentäisi aseman kaksi raskautta.



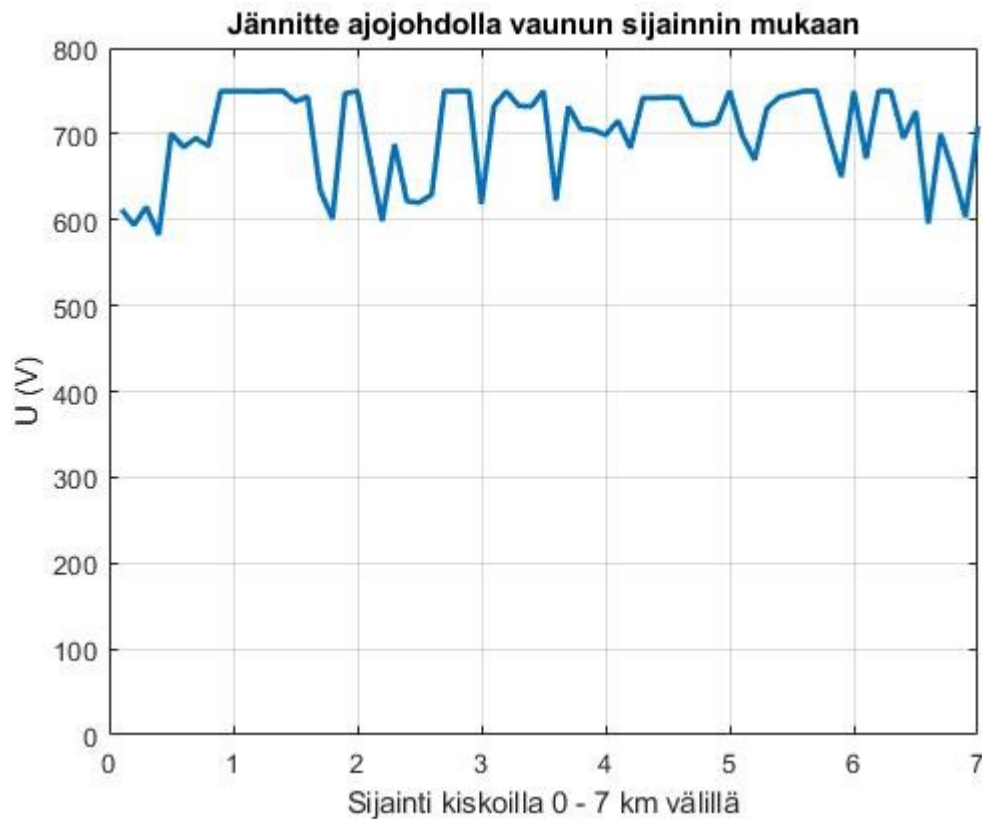
KUVIO 24. Viallinen jännite 1, Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviosta 24 nähdään ajojohtimen jännite. Huomiota herättävät kohdat ovat kaksi merkittävää alenemaa noin 0,3 km ja 1,8 km kohdalla, joissa jännite laskee paljon. Jännite alenee siksi, että asema kaksi joutuu syöttämään tehoa 3.5 km kohdalta rataa, jolloin matka radan alkuun on kohtuuton. Todellisuudessa jännite ei laske näin alas, sillä Pyynikillä sijaitseva asema osallistuisi myös tehon syöttöön.



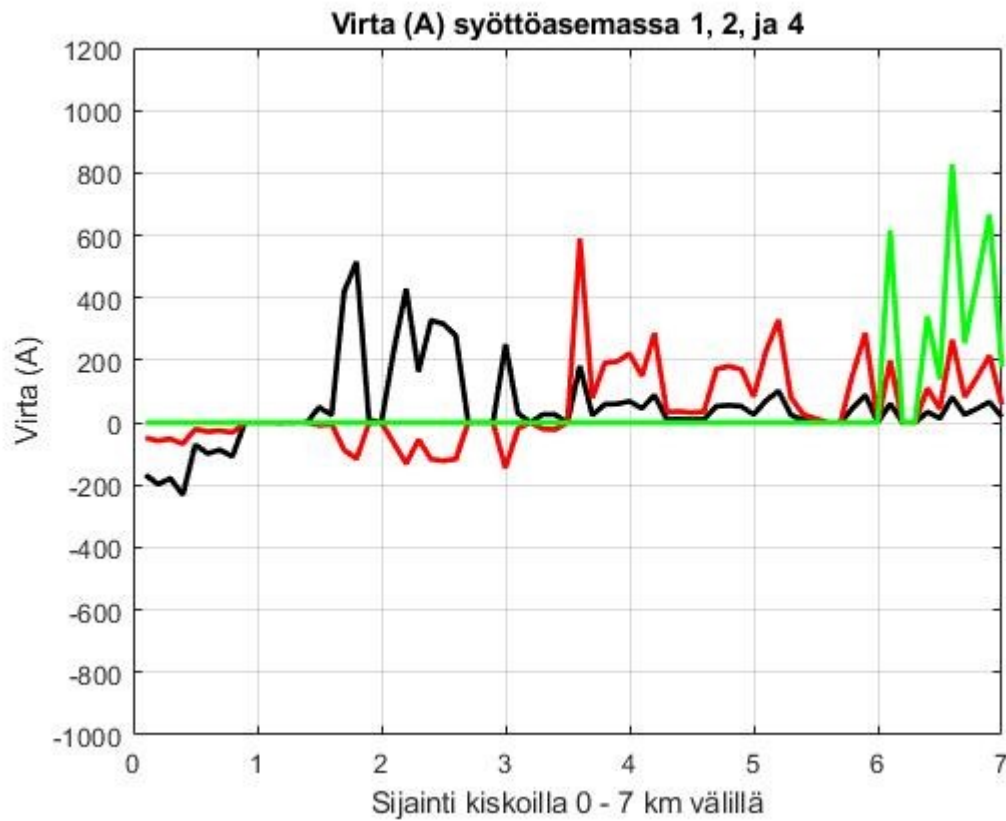
KUVIO 25. Vika asemalla 2, Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviossa 25 on esitetty tilanne, jossa asema kaksi lakkaa syöttämästä, jolloin syöttäviä asemia ovat yksi, kolme ja neljä. Kuviosta voidaankin nähdä, että asemien yksi ja kolme virrat ovat noin 100 A suurempia kuin normaalissa ajotilanteessa. Tilanteessa, jossa asema kaksi lakkaa syöttämästä, ovat lähimmät asemat yksi ja kolme, jolloin molemmat kompensoivat aseman kaksi puuttumista. Aseman neljä virrassa ei nähdä merkittävää muutosta.



KUVIO 26. Viallinen jännite 2, Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviosta 26 huomataan, että siinä ei esiinny samanlaisia piikkejä jännitteenalennuksessa kuin edellisessä vikatilanteessa. Tämä johtuu siitä, että vika on kahden aseman välissä siten, ettei kummankaan aseman tarvitse syöttää tehoa kahta kilometriä pidemmälle. Lisäksi aseman kaksi kohdalla ei ole merkittäviä korkeusaseman tai nopeuden muutoksia Pyynikiltä Lentävänniemeen ajettaessa, vaan reitti on melko tasaista verrattuna muihin asemiin, jolloin virrat pysyvät melko pieninä.



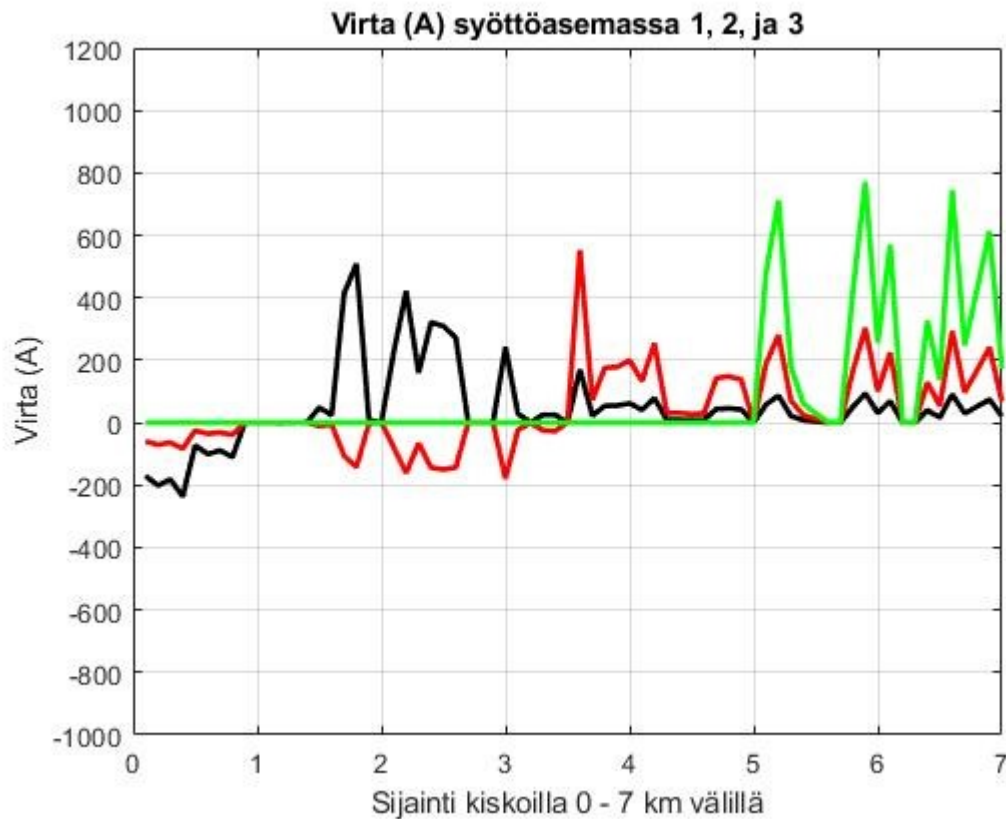
KUVIO 27. Vika asemalla 3, Pyynikki - Lentävänniemi

Tilanteessa, jossa asema kolme kytkeytyy pois verkosta, kompensoivat sen puuttumista asemat kaksi ja neljä. Aseman yksi virrassa ei nähdä merkittävää muutosta verrattuna normaaliin ajotilanteeseen, mutta aseman kaksi virta on huomattavasti suurempi. Aseman neljä virtaa on hankala analysoida, sillä simulaatio ei näytä aseman virtaa ennen sen ohittamista.



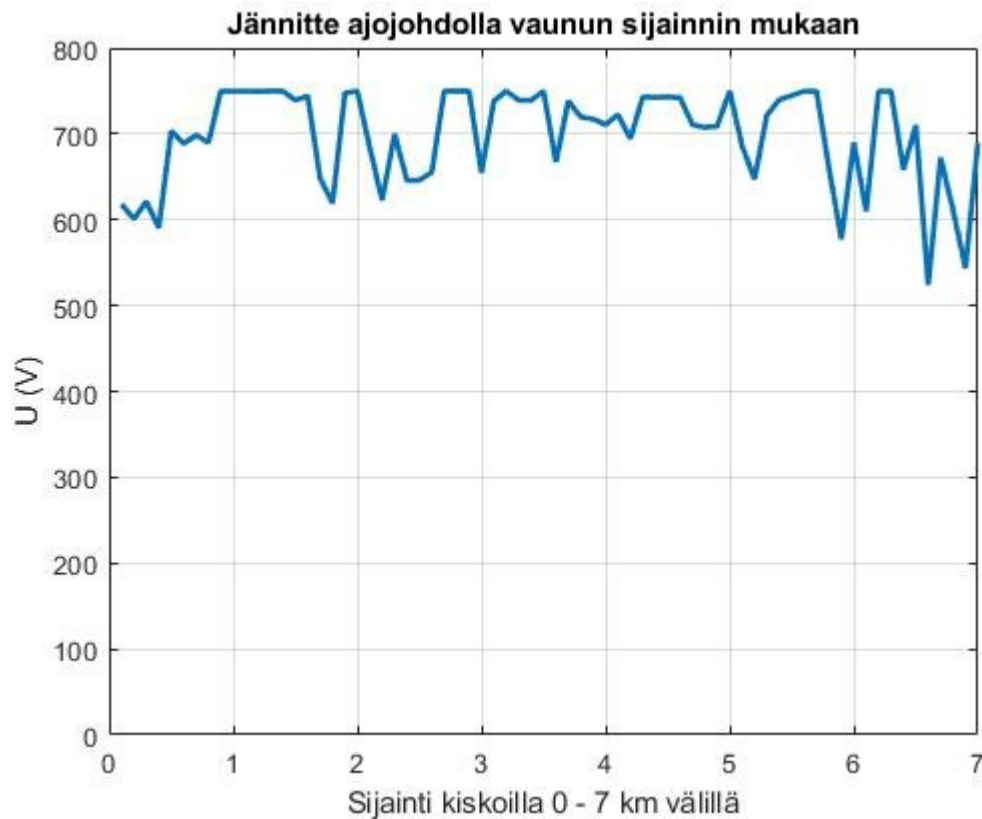
KUVIO 28. Viallinen jännite 3, Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviosta 28 nähdään, ettei aseman kolme puuttuminen merkittävästi vaikuta jännitteenalenemiin. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että asema kaksi ja neljä ovat hyvin lähellä asemaa kolme, jolloin tehonsyöttäminen muilta asemilta onnistuu moitteettomasti. Simulaatiossa ei ole otettu huomioon Lielähteen lähtevää pistoraidetta, joka on aseman kolme kohdalla. Pistoraitteen syöttäminen vaikuttaisi omalta osaltaan jännitteenalenemiin.



KUVIO 29. Vika asemalla 4, Pyynikki - Lentävänniemi

Vika linjan viimeisellä, eli neljännellä asemalla vaikuttaa merkittävästi aseman kolme virtoihin ja ne ovatkin kohonneet yli 200 A. Aseman neljä vikaantuminen ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi linjan alkupään asemiin. Pyynikiltä Lentävänniemeen ajettaessa selkeästi pahin tilanne on neljännen aseman vikaantuminen. Tämä johtuu siitä, että kolmannelta asemalta on kaksi kilometriä linjan päähän ja korkeusasema vaihtelee linjan päässä paljon. Lisäksi linjan lopussa vaunu kiihdyttää ja jarruttaa usein. Kuviota tarkasteltaessa tulee myös ottaa huomioon, ettei Lielahden pistoraidetta simuloitu, jolloin todellisuudessa myös sen syöttäminen jäisi kolmannen aseman vastuulle.

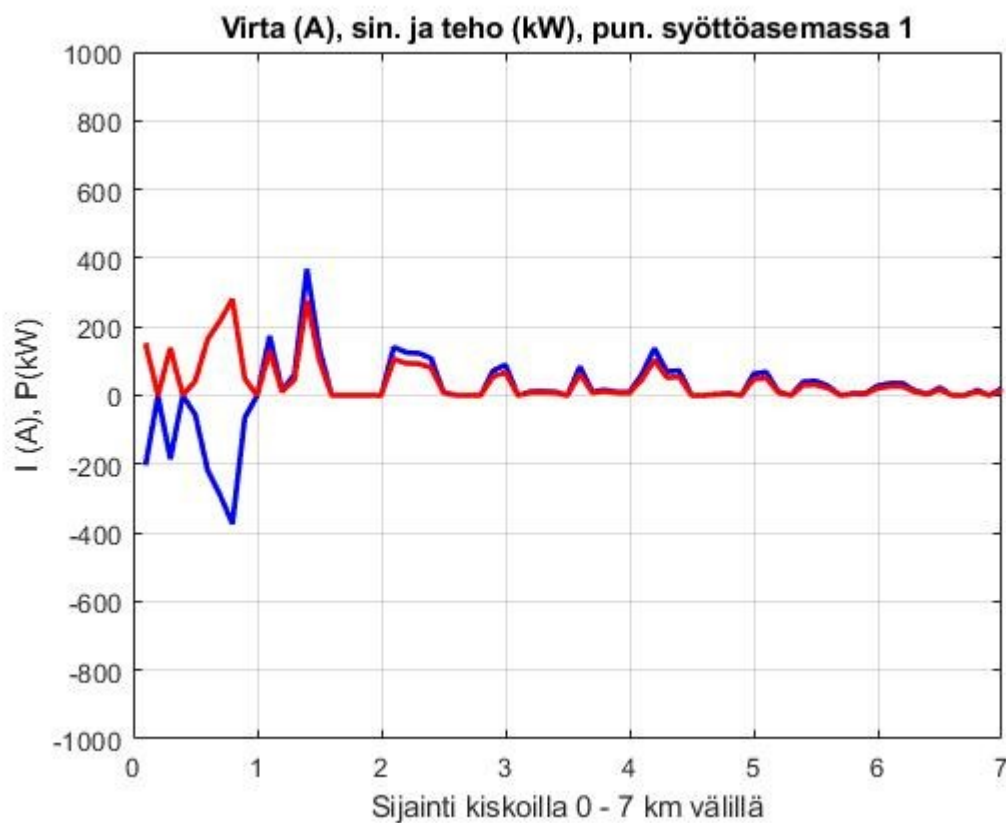


KUVIO 30. Viallinen jännite 4, Pyynikki - Lentävänniemi

Kuviosta 30 huomataan jännitteen alenevan linjan lopussa. Vaikka asemalta kolme onkin verrattain lyhyt matka linjan päähän, ovat virrat suuria ja tästä syystä myös jännitteenalenema on merkittävä.

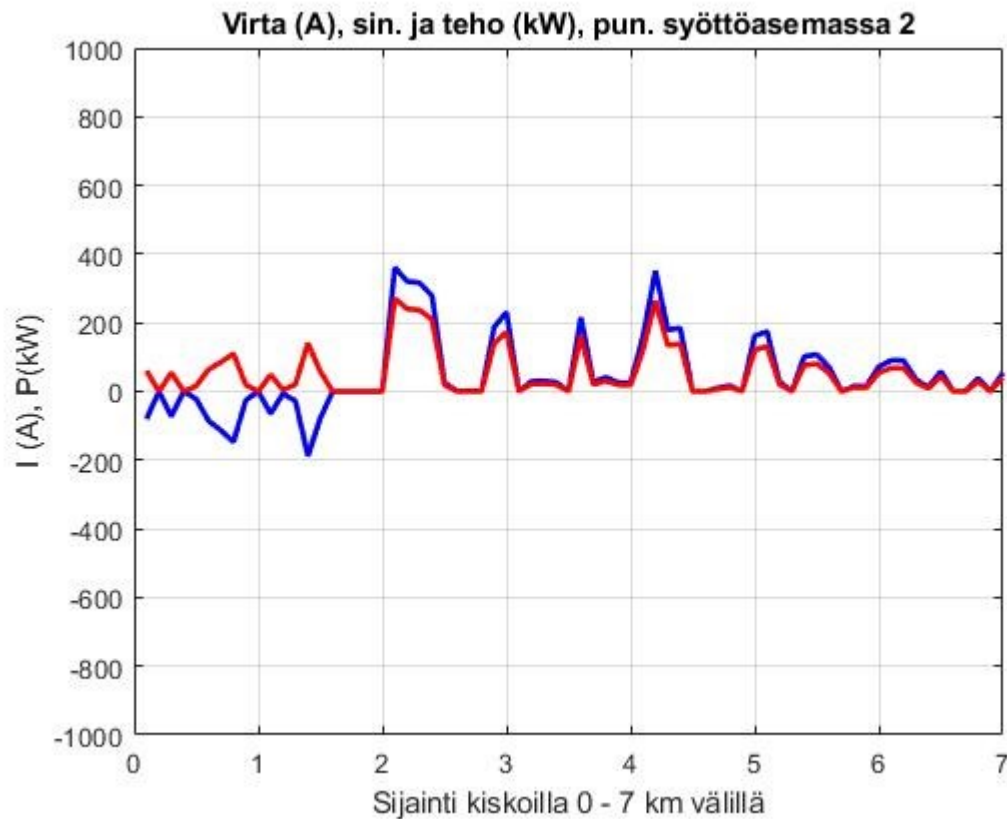
4.2 Lentävänniemi - Pyynikki

Kappaleessa 4.1 tarkasteltiin Pyynikiltä Lentävänniemeen menevän osuuden virtoja ja jännitteenalenemia. Vaikka linja on sama myös Lentävänniemestä Pyynikille ajettaessa, korkeusasemien muutosten etumerkki muuttuu. Toisin sanoen, alamäet Pyynikiltä Lentävänniemeen kuljettaessa ovat Lentävänniemestä lähdettäessä ylämäkiä ja ylämäet alamäkiä. Tästä syystä tarkastelu tulee suorittaa molempiin suuntiin erikseen, sillä tulokset saattavat muuttua merkittävästi.



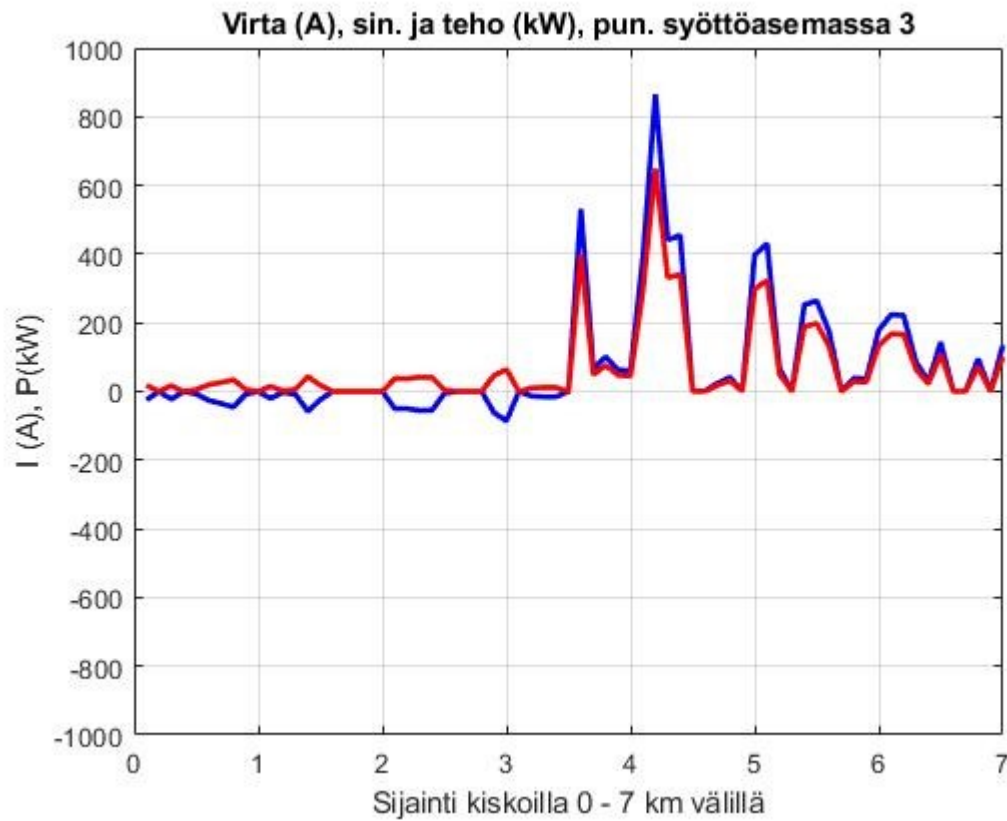
KUVIO 31. Asema 1 Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviossa 31 on esitetty ensimmäisen aseman virta. Suurimmat piikit osuvat 0,8 km ja 1,4 km kohdalle. Molempien piikkien kohdalla on pysäkki sekä ylämäki, jolloin virta näissä kohdissa on suuri.



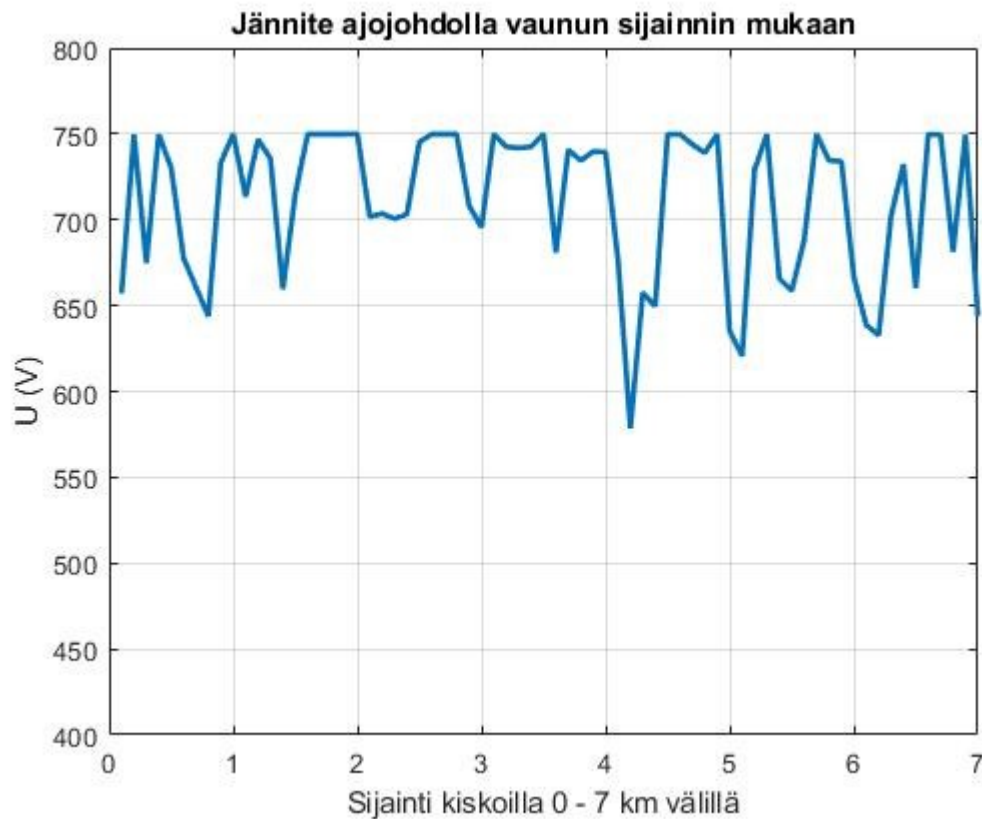
KUVIO 32. Asema 2 Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviosta 32 nähdään, että aseman kaksi virtapiikit ovat melko saman kokoisia. 2 km kohdalla oleva piikki johtuu siellä sijaitsevasta pysäkistä. Ensimmäinen piikki pysyy suurena siksi, että vaunu lähtee pysäkiltä hyvin loivaan alamäkeen, mutta hetken kuluttua vaunu saapuu jyrkkään ylämäkeen, joka pitää virran suurena. Toinen piikki 4,2 km kohdalla ei näytä aseman kaksi kuvaajaa tarkasteltaessa erityisen silmiin pistävältä. Tilanteessa tulee kuitenkin huomioda, että piikki on suhteellisen kaukana syöttöasemasta ja lisäksi 3,5 km kohdalla on toinen asema, joka myös osallistuu virran syöttöön ja täten helpottaa aseman kaksi tilannetta. Piikkiä on tarkasteltu tarkemmin seuraavassa kuvaajassa.



KUVIO 33. Asema 3 Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviosta 33 nähdään jo aiemmin mainittu piikki 4,2 km kohdalla. Piikki on todella suuri ja johtuu siitä, että samassa kohdassa on pysäkki, josta vaunun tulee kiihdyttää 50km/h nopeuteen. Kiihdytys yhdistettynä linjan jyrkimpään mäkeen aiheuttaa merkittävän nousun virrassa ja tehossa. Vastaavaa piikkiä ei nähdä Pyynikiltä Lentävänniemeeseen ajettaessa, sillä silloin kyseessä on alamäki.

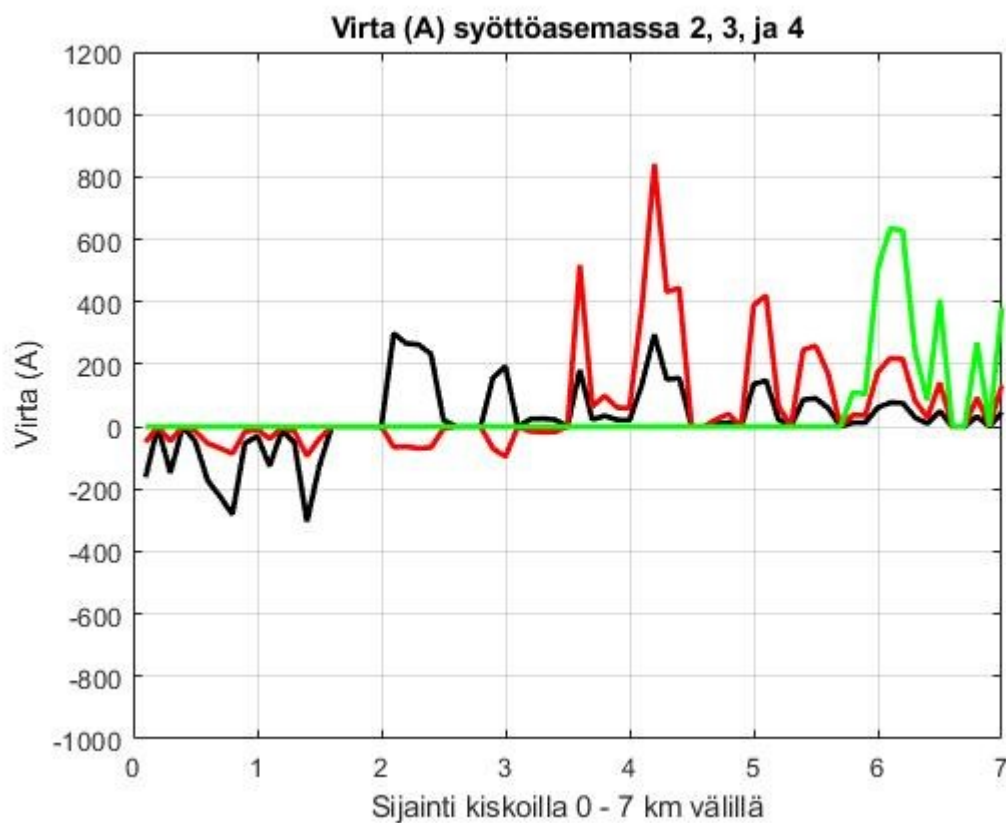


KUVIO 34. Jännite ajojohdossa Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviossa 34 on esitetty ajojohtimen jännite Lentävänniemestä tultaessa. Kuviossa nähdään selkeä piikki 4,2 km kohdalla, jossa on pysäkki ja linjan jyrkin nousu. Jännite kuitenkin pysyy pienimmän sallitun jännitteen yläpuolella, sillä lähellä piikkiä on kaksi syöttöasemaa, joiden ansiosta jännite ei suurenkaan virran takia pääse laskemaan liikaa.

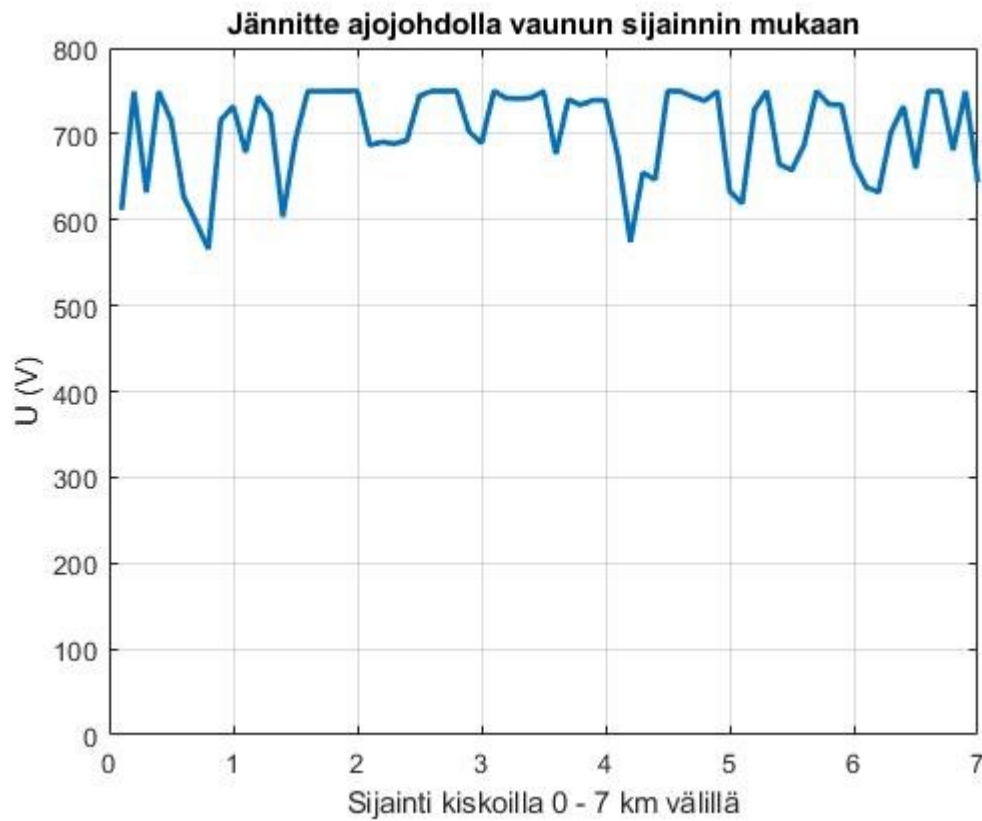
4.2.1 Vikatilanne

Kuten normaali ajotilanne, tulee myös vikatilanteiden tarkastelu suorittaa molempiin suuntiin linjaa kuljettaessa. Tarkastelu on suoritettu samalla tavalla kuin aiempikin vikatilanne, eli asemia sammutetaan järjestyksessä ja katsotaan, miten minkäkin aseman kytkeminen pois verkosta virtoihin ja jännitteenaleniin vaikuttaa.



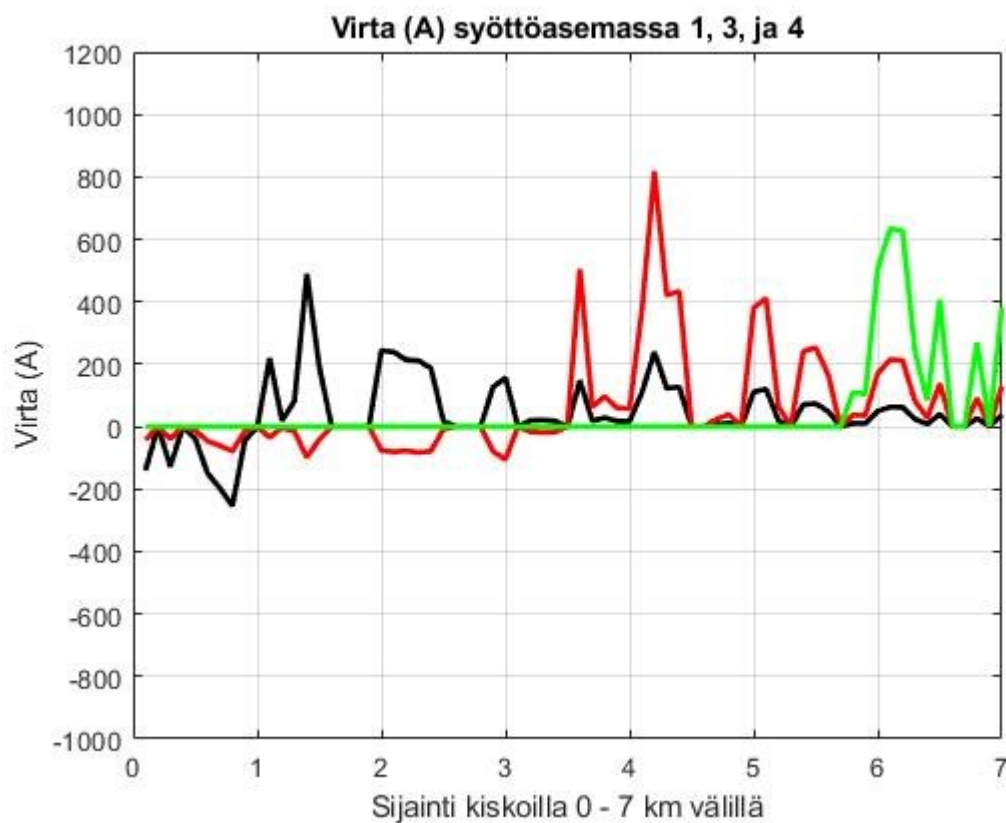
KUVIO 35. Vika asemalla 1, Lentävänniemi - Pyynikki

Kuviossa 35 on esitetty tilanne, jossa asema yksi on vikaantunut. Kuviosta nähdään, että aseman yksi puuttumista kompensoi asemat kaksi ja kolme. Näiden asemien yhteenlasketut virrat aseman yksi kohdalla ovat yhtä suuret ja saman muotoiset kuin aseman yksi virta kuviossa 31.



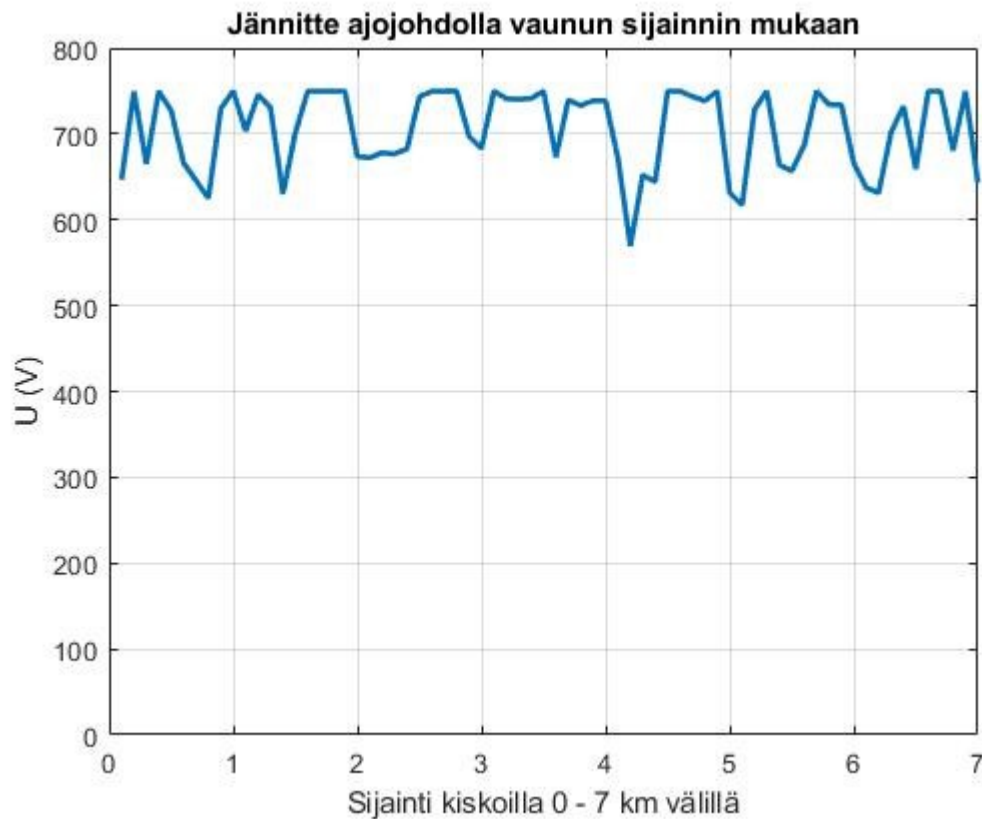
KUVIO 36. Viallinen jännite 1, Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviossa 36 esitetty jännitteen kuvaaja on pysynyt suhteellisen muuttumattomana verrattuna normaaliin ajotilanteeseen. Kuvaajan alussa on piikki puuttuvan aseman alueella, jossa jännite on normaalia tilannetta 100 V alhaisempi. Piikki ei kuitenkaan aiheuta ongelmia ja se pysyy standardin määäämien rajojen sisällä.



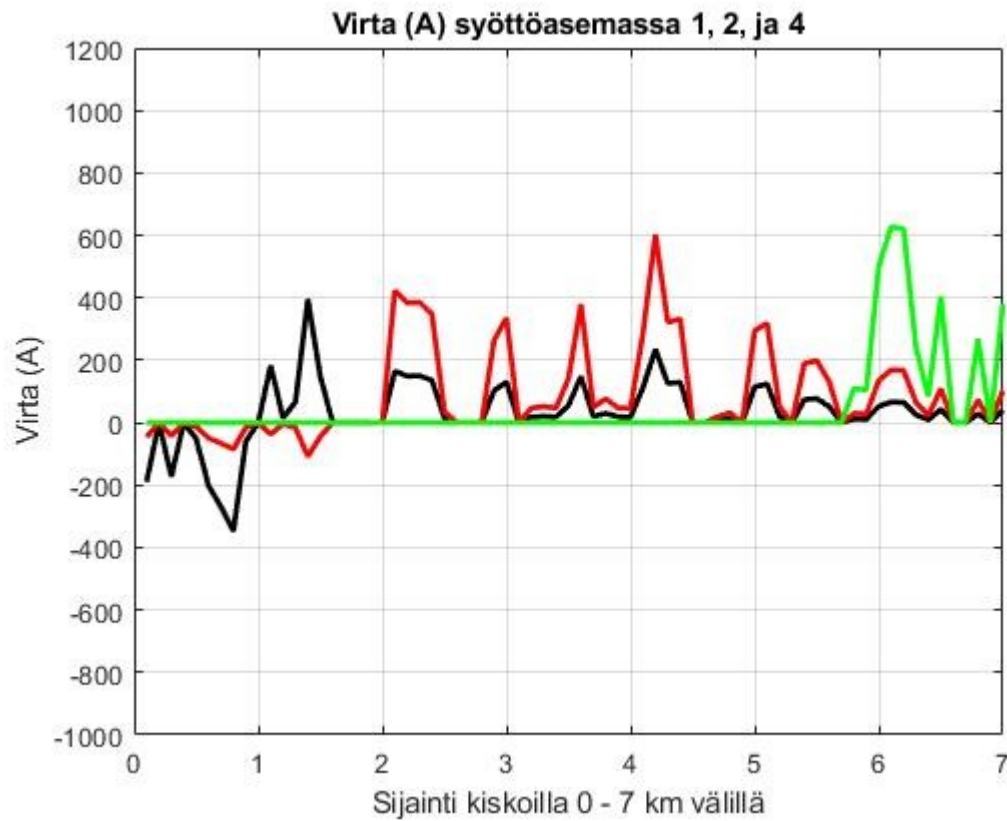
KUVIO 37. Vika asemalla 2, Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviossa 37 on esitetty tilanne, jossa asema kaksi on kytketty pois verkosta. Aseman kaksi puuttuminen näkyy aseman yksi ja kolme virroissa ja etenkin se kuormittaa asemaa yksi, sillä se on lähempänä vikaantunutta asemaa.



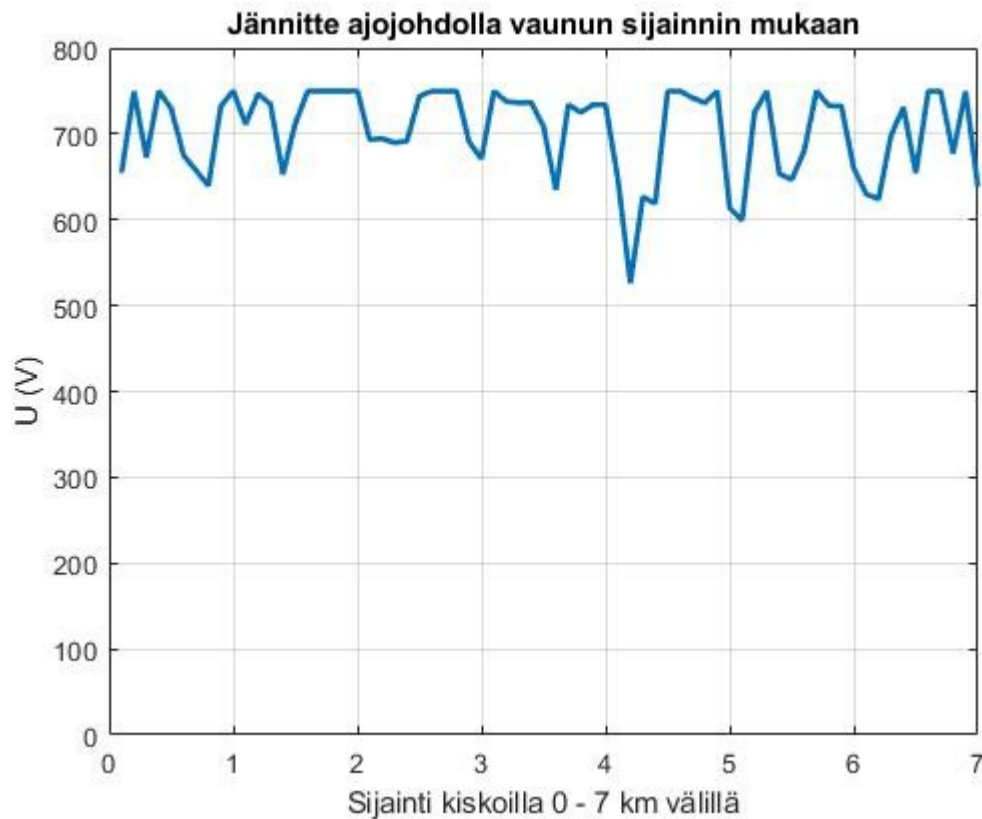
KUVIO 38. Viallinen jännite 2, Lentävänniemi – Pyynikki

Aseman kaksi puuttuminen ei vaikuta juuri lainkaan ajojohdon jännitteeseen ja verrattaessa kuvaajaa normaalin ajotilanteen kuvaajaan, huomataan jännitteen olevan noin 40 V pienempi. Tällä ei ole käytännössä merkitystä raitiovaunun toimintaan lainkaan. Pieni muutos jännitteessä johtuu siitä, että asemat yksi ja kolme ovat hyvin lähellä asemaa kaksi, jolloin jännite ei pääse laskemaan paljoakaan.



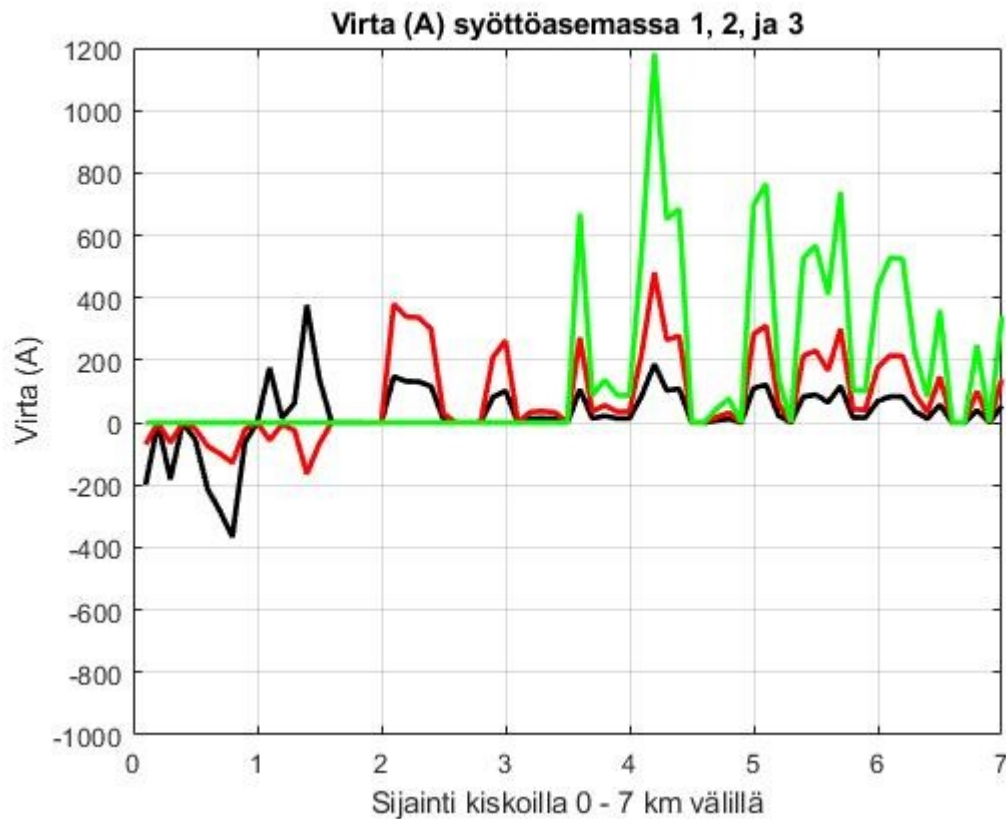
KUVIO 39. Vika asemalla 3, Lentävänniemi – Pyynikki

Aseman kolme puuttuminen näkyy selkeästi aseman kaksi virrassa, jossa virta aseman kolme alueella on noussut noin 100 A. Lisäksi asema yksi syöttää noin 50 A enemmän virtaa puuttuvan aseman alueelle. Todellisuudessa myös asema neljä syöttäisi alueelle virtaa, mutta simulaatiossa olevan vian vuoksi tätä ei pystytä tarkastelemaan.



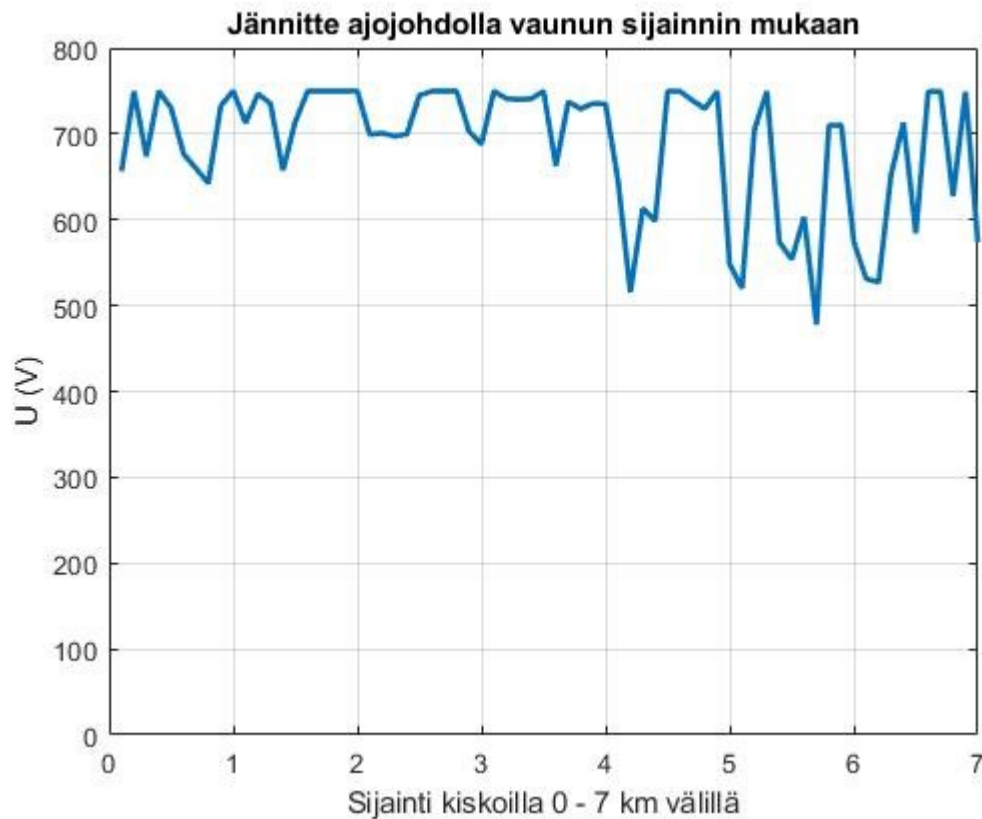
KUVIO 40. Viallinen jännite 3, Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviosta 40 nähdään, että jännite aseman kolme kohdalla ja suuremman piikin kohdalla heti aseman jälkeen, on pudonnut hieman. Normaalissa tilanteessa jännite aseman kohdalla on 670 V ja piikin kohdalla 570 V. Jännite on vian aikana aseman kohdalla 640 V ja piikin kohdalla 530 V. Jännite on siis pudonnut vian aikana 30 V ja 40 V. Tämän mittakaavan alenema ei aiheuta ongelmia raitiovau-
nulle.



KUVIO 41. Vika asemalla 4, Lentävänniemi – Pyynikki

Kuviosta 41 on nähtävissä merkittävä kasvu aseman kolme virroissa. Asemien yksi ja kaksi virrat ovat nousseet noin 100 A ja aseman kolme virta on paikoin lähes 300 A suurempi. Kuviosta voidaan nopeasti todeta, että aseman neljä puuttuminen simulaation perusteella on pahin tilanne kuljettaessa Lentävänniemestä Pyynikille. Vastaavia virtoja ei nähdä myöskään toiseen suuntaan kuljettaessa. Tuloksia tarkastellessa pitää muistaa, että vaikka asema neljä kytkettäisiin pois verkosta, todellisuudessa Pyynikille ensimmäisessä vaiheessa rakennettu asema auttaisi, jolloin virrat asemalla kolme olisivat merkittävästi pienemmät



KUVIO 41. Viallinen jännite 4, Lentävänniemi – Pyynikki

Aseman neljä puuttuessa, ovat jännitteet alentuneet merkittävästi normaalista tilanteesta ajotilanteesta. Normaalissa ajotilanteessa jännite suuren virtapiikin kohdalla on 570 V ja vian aikana 510 V. Suurimmat alenemat nähdään kuitenkin 5 km ja 5,7 km kohdilla. 5 km kohdalla oleva jännite on normaalissa tilanteessa 630 V ja vian aikana jännite on pudonnut 100 V ja on nyt 530 V. Toinen piikki on tarkalleen puuttuvan aseman kohdalla ja samassa paikassa vaunu lähtee myös kiihdyttämään. Aseman toimiessa jännitteenalenemaa ei juuri synny, mutta sen puuttuessa jännite putoaa alle 500 V. Tilanne ei kuitenkaan vastaa todellisuutta, sillä Pyynikillä jo olemassa oleva asema muuttaisi tuloksia merkittävästi.

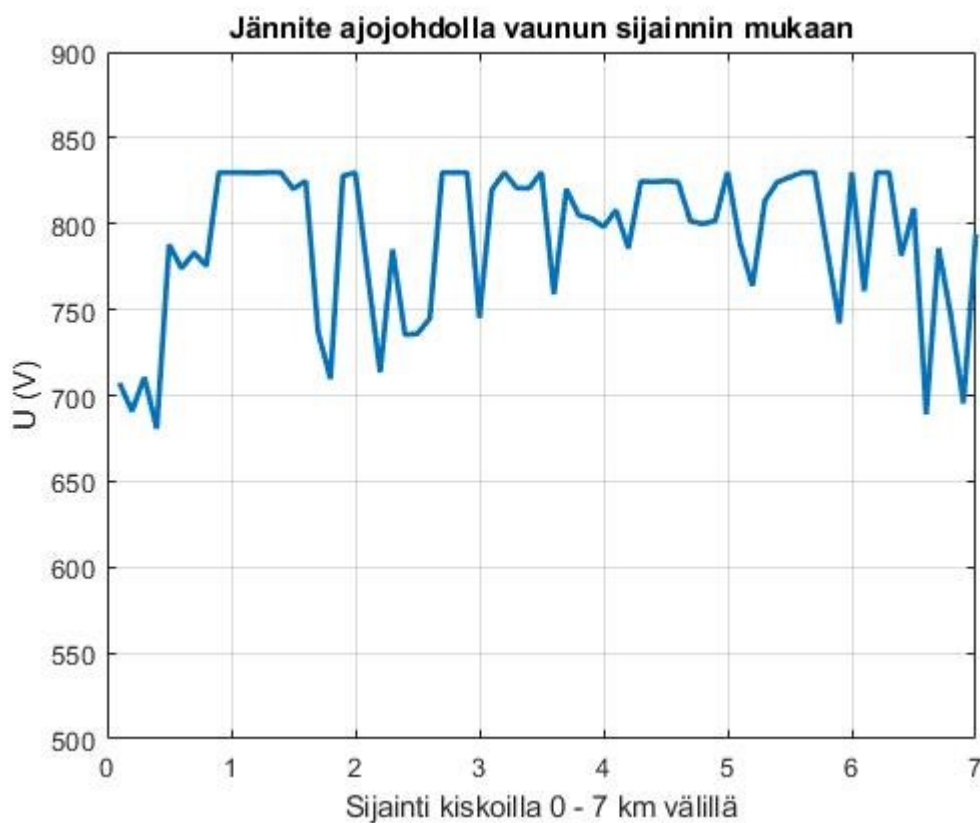
4.3 Yhteenveto

Saatuja tuloksia pyrittiin vertaamaan raitiotien ensimmäisessä vaiheessa tilattuun raporttiin sekä standardin asettamiin vaatimuksiin jännitteenaleneman osalta. Standardin mukaan pienin hetkellinen ja pysyvä jännite ajojohtimessa on 500 V nimellisjännitteen ollessa 750 V. Standardissa on myös annettu raja suurimmalle

jännitteelle, mutta tätä ei työssä tutkittu. Standardin mukaiset rajat jännitteelle on esitetty kappaleessa 2.1.2.

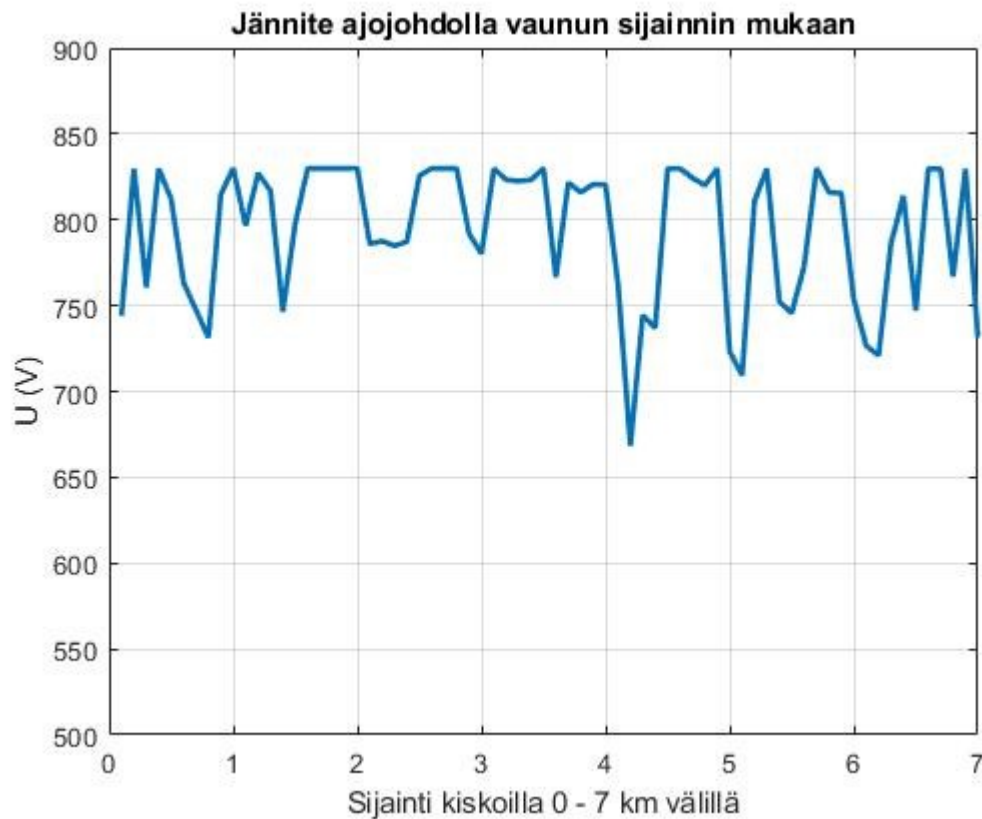
Simuloinnissa jännitteenä käytettiin järjestelmän nimellisjännitettä. Todellisuudessa järjestelmän nimellisjännite saavutetaan nimellisellä kuormalla ja pienemällä kuormituksella jännite on tätä suurempi. Tyhjäkäyntijännitteeksi on NRC Groupin sähkötöidenjohtajan mukaan asetettu 830 V, jolloin simulaatioissa olisi tullut käyttää kyseistä arvoa. Tämä ei kuitenkaan muuta tuloksia radikaalista virtojen osalta, vaan virrat olisivat olleet keskiarvoisesti noin 10 % pienempiä. Johtimissa syntyviin häviöihin pienelläkin virran muutoksella on kuitenkin suuri vaikutus, sillä kuten yhtälöstä 6 voidaan nähdä, kasvavat häviöt virran toisessa potenssissa.

Ajojohdon jännitteeseen tyhjäkäyntijännitteen simulaatiossa käyttäminen vaikuttaa merkittävästi. Aleneman määrä muuttuu noin 10 % pienemmäksi, mutta koska jännite on suurempi, ei se laske yhtä alas. Tällöin ei myöskään ole pelkoa siitä, että alitettaisiin standardin asettama raja jännitteen pienimmälle arvolle. Kuvioissa 42 ja 43 on esitetty jännitteen kuvaajat normaalissa ajotilanteessa ajettaessa linja molempiin suuntiin ja käytettäessä 830 V jännitettä.



KUVIO 42. 830 V, Pyynikki – Lentävänniemi

Kuviosta 42 nähdään jännite ajojohtimessa ajettaessa linja Pyynikiltä Lentävänniemeen. Verrattaessa kuviota tilanteeseen, jossa simulointiin käytettiin 750 V, ei jännite laske lähellekään standardin asettamaa rajaa. Käytettäessä jännitteenä 750 V, oli pienin jännitteen arvo 590 V, kun taas 830 V tapauksessa pienin jännite on noin 680 V.



KUVIO 43. 830 V, Lentävänniemi – Pyyrikki

Kuten kuviossa 42, nähdään sama ilmiö myös kuviossa 43. Jännite on pienimmillään noin 670 V, kun taas 750 V tapauksessa pienin jännite oli noin 580 V.

Tulosten vertailu ensimmäisessä vaiheessa tilattuun raporttiin on ongelmallista, sillä tarkkaa tietoa siitä, miten raitiovaunuliikennettä on simuloitu, ei ole. Raportista käy kuitenkin ilmi, että simuloinnissa on otettu huomioon useampi linjalla kulkeva vaunu todellisten aikataulujen perusteella, jolloin tulosten suora vertailu ei ole järkevää. Raportissa esitetyt tulokset on kuitenkin käyty läpi tässä työssä, jotta nähdään paljonko tulokset eroavat toisistaan. Taulukoissa 5, 6, 7 ja 8 on esitetty taulukoidut tulokset suurimmista virroista ja pienimmistä jännitteistä.

TAULUKKO 5. Virrat, Pyynikki - Lentävänniemi

Suurimmat virrat (A)				
Pyynikki	Asema 1	Asema 2	Asema 3	Asema 4
Normaali tilanne	500	500	500	-
Vika asemalla 1	-	410	430	820
Vika asemalla 2	590	-	430	820
Vika asemalla 3	500	600	-	820
Vika asemalla 4	500	550	790	-

Taulukossa 5 on esitetty suurimmat virrat Pyynikiltä Lentävänniemeen kuljettaessa. Neljännen aseman virta normaalissa tilanteessa on jätetty pois, sillä siitä ei saatu tuotettua luotettavaa kuvaajaa. Taulukosta nähdään hyvin miten tietyn aseman vikaantuminen vaikuttaa muihin asemiin ja paljonko yhden aseman virta eri tilanteissa vaihtelee. Yleisesti voidaankin todeta, että aseman vikaantuminen vaikuttaa eniten vikaantunutta asemaa lähimpänä olevaan ehjään asemaan. Taulukossa on myös korostettu oranssilla värillä suurin virta tietyssä vikatilanteessa.

TAULUKKO 6. Virrat, Lentävänniemi - Pyynikki

Suurimmat virrat (A)				
Lentävänniemi	Asema 1	Asema 2	Asema 3	Asema 4
Normaali tilanne	380	380	870	-
Vika asemalla 1	-	300	850	610
Vika asemalla 2	500	-	810	610
Vika asemalla 3	400	600	-	610
Vika asemalla 4	390	480	1200	-

Taulukosta 6 nähdään suurimmat virrat Lentävänniemen päästä lähdettäessä. Taulukkoa 6 luetaan samalla tavalla kuin taulukkoa 5 ja myös tässä suurimmat virrat on korostettu oranssilla värillä. Hieman yllättävästi suurimmat virrat esiintyivät samassa järjestyksessä molemmissa taulukoissa, vaikka asemien numerointi riippuu siitä, lähdetäänkö liikkeelle Lentävänniemestä vai Pyynikiltä. Toisin sanoen asema yksi Pyynikiltä lähdettäessä on asema neljä, kun lähdetään Lentävänniemestä ja niin edelleen. Asemien tarkempi sijainti on selitetty kappaleessa 4.

Suurin virta koko reitillä nähdään taulukosta 6. Aseman neljä vikaantuessa aseman kolme virta nousee rajusti ja aseman kaksi noin 100 A. Simulaation perusteella kyseinen tilanne voisi olla yksi ongelmakohta, mutta todellisuudessa Pyy-nikillä jo olemassa oleva asema osallistuisi virran syöttämiseen. Pyy-nikillä olevan aseman puuttuminen simulaatiosta vääristää tuloksia, jolloin virta näyttää suuremmalta kuin se todellisuudessa on. Vaikka virta todellisuudessa olisikin pienempi, on kyseinen kohta, jossa suuri virta esiintyy, todella kuormittava. Tämä johtuu siitä, että kyseisessä kohdassa on pysäkki sekä koko linjan jyrkin mäki, johon vaunu joutuu kiihdyttämään.

Pyy-nikiltä Lentävänniemeeseen kuljettaessa suurin virta nähdään asemalla kolme tilanteessa, jossa asema 4 vikaantuu. Tätä voidaan pitää ongelmallisena kohtana, sillä asema kolme syöttää myös linjan loppupäässä olevaa pistoraidetta, jota simulaatiossa ei huomioitu. Lisäksi asema kolme joutuu syöttämään noin 2 km linjan päähän aseman neljä puuttuessa, jolloin myös jännite linjan päässä laskee.

Ensimmäisessä vaiheessa tilatussa raportissa normaalissa käyttötilanteessa suurin virta on ollut 1864 A ja pienin virta on 1156 A. Raportista käy myös ilmi, että suurin virta vian aikana on 2556 A. Laskettaessa sähköteho käyttäen suurinta virtaa ja raitiotien nimellisjännitettä, saadaan tehoksi 1,9 MW. Tämä osaltaan todistaa sen, että raportissa on otettu huomioon useampi linjalla kulkeva vaunu, sillä yhden vaunun teho on noin 560 kW. Verrattaessa raportista saatuja tuloksia tästä työstä saatuihin tuloksiin voidaan havaita niiden olevan aivan eri suuruusluokkaa. Tästä syystä työt eivät ole vertailukelpoisia keskenään, vaan jos halutaan suorittaa todellinen tulosten vertailu, tulisi vastaavanlainen raportti tilata myös raitiotien toisesta vaiheesta. Raportin tulosten perusteella saadaan kuitenkin hyvä kuva siitä, mitä virrat mahdollisesti toisessa vaiheessa olisivat. Lisäksi tämän opinnäytetyön perusteella voidaan nähdä mahdolliset ongelmakohdat linjalla virtojen ja jännitteenalenemien perusteella.

Virtojen lisäksi pienimmät ajojohdossa esiintyneet jännitteet taulukoitiin eri tilanteissa ja näitä verrattiin standardin asettamiin rajoihin. Jännitteet on esitetty taulukoissa 7 ja 8. Molemmissa taulukoissa pienin jännite on korostettu oranssilla

huomiovärillä. Lisäksi taulukosta nähdään paikka linjalla, jossa pienin jännite esiintyy.

TAULUKKO 7. Jännite, Pyynikki - Lentävänniemi

Pienin jännite (V)		
Pyynikki	Jännite ajojohdossa	Paikka linjalla
Normaali tilanne	590	0,4 km
Vika asemalla 1	590	0,4 km
Vika asemalla 2	590	0,4 km
Vika asemalla 3	580	6,6 km
Vika asemalla 4	530	6,6 km

Taulukosta 7 nähdään ajojohtimen jännitteet normaalissa ajotilanteessa sekä viikatilanteissa. Lisäksi taulukossa on esitetty paikka linjalla, jossa kyseinen jännite esiintyy. Taulukossa huomio kiinnittyy normaaliin ajotilanteen jännitteeseen, joka on yhtä suuri kuin asemien yksi ja kaksi vikaantuessa. Tämä johtuu jo aiemmin mainitun Pyynikin olemassa olevan aseman puuttumisesta simulaatiossa. Todellisuudessa jännite normaalissa ajotilanteessa ei todennäköisesti laske näin paljon.

TAULUKKO 8. Jännite, Lentävänniemi - Pyynikki

Pienin jännite (V)		
Lentävänniemi	Jännite ajojohdossa	Paikka linjalla
Normaali tilanne	570	4,2 km
Vika asemalla 1	565	0,8 km
Vika asemalla 2	570	4,2 km
Vika asemalla 3	530	4,2 km
Vika asemalla 4	480	5,7 km

Taulukosta 8 nähdään jännite ajojohdossa ajettaessa linja Lentävänniemestä Pyynikille. 4,2 km kohdalla oleva nousu ja tästä aiheutuva virtapiikki aiheuttaa jännitteen putoamisen kolmessa tilanteessa viidestä. Pienin jännite esiintyy silti aseman neljä kohdalla sen vikaantuessa. Tässäkin tilanteessa tulee ottaa huomioon Pyynikillä olevan aseman puuttuminen ja sen vaikutus jännitteeseen.

Simuloinnin perusteella voidaan todeta, että standardin määräämä raja 500 V pienimmälle sallitulle jännitteelle alittuu vain Lentävänniemestä Pyynikille kuljettaessa ja aseman neljä ollessa kytkeytyneenä irti verkosta. Pyynikillä sijaitseva asema kuitenkin pitää huolen siitä, että jännite tuskin laskisi alle 500 V. Kappaaleen 4.3 alussa mainittiin siitä, että todellisuudessa simulaatiossa olisi tullut käyttää 830 V jännitettä. Lisäksi kuvioista 42 ja 43 nähdään suuremman jännitteen käyttämisen vaikutus jännitteen alenemaan. Todellisuudessa jännite pienimmillään olisi Pyynikiltä lähdettäessä 680 V ja Lentävänniemestä lähdettäessä 670 V. Kumpikaan tuloksista ei ole lähelläkään 500 V rajaa, vaan turvallisesti sen yläpuolella. Asemien vikaantumisenkaan ei pitäisi laskea jännitettä alle rajan. Ensimmäisessä vaiheessa tilatun raportin perusteella pienin jännite heidän simulatation mukaan on 530 V ja todennäköisesti jännite raitiotien toisessa vaiheessa on pahimmillaan samaa luokkaa.

Tulosten perusteella voidaan todeta jännitteen ajojohdossa pysyvän sallitun rajan yläpuolella, jolloin toimia tämän muuttamiseksi ei tarvita. Simulaation perusteella virrat eivät aiheuta vaaraa raitiotien syöttöasemien laitteistoille, vaan pysyvät turvallisesti laitevalmistajien antamien arvojen alapuolella. Tilanne muuttuu, kun linjalla kulkee useita vaunuja, mutta virtojen ei uskota nousevan yli laitevalmistajien ohjearvojen. Tuloksissa esiintyneet virtapiikit ovat vain hetkellisiä ja syöttöasemien laitteita voidaan myös ylikuormittaa tarvittaessa, jolloin vaaraa laitteiden hajoamiselle ei uskota syntyvän.

5 POHDINTA

Työn simulaatio-osuus osoittautui oletettua hankalammaksi ja se veikin suurimman osan työhön käytetystä kokonaisajasta. Simulaatiota korjattiin useasti ja silti kaikkia kuvaajia ei saatu toimimaan täysin moitteettomasti. Tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että monet arvot joita työssä käytettiin, jouduttiin oletta-
maan. Tästä syystä tuloksiin tulee suhtautua varauksella ja tuloksia tuleekin pitää vain suuntaa antavina. Työssä ei myöskään otettu huomioon muun liikenteen tai liikennevalojen aiheuttamia pysähdyksiä ja simulaatiot suoritettiin vain yhden ratikan kulkiessa linjan päästä toiseen. Todellisuudessa linjalla kulkee useita vaunuja molempiin suuntiin, jolloin myös asemien virrat ja tehot muuttuvat suuremmiksi. Tuloksista kuitenkin voidaan nähdä linjan ongelmalliset kohdat, joissa virta ja jännitteenalenemat ovat suuria, jolloin ongelmiin ehkä osataan varautua.

Tulosten vertailu ensimmäisessä osassa tilattuun raporttiin oli myös hieman ongelmallista, sillä täyttä tietoa siitä, miten simulaatio on toteutettu ei ole. Tilatusta raportista kuitenkin käy ilmi, että raportissa on otettu huomioon paljon enemmän muuttujia kuin tässä työssä. Työt eivät sinällään ole vertailukelpoisia keskenään, sillä Institut für Bahntechnikillä on ollut käytössään ammattilaisille tarkoitettu kaupallinen sovellus, joka oletettavasti on tarkempi kuin tässä työssä käytetty simulaatiomalli.

Osa kuvaajista jäi puuttumaan, sillä simulaatiota ei saatu toimimaan halutulla tavalla, eikä virheellisten kuvaajien esittämistä nähty tarpeelliseksi. Kaikesta huolimatta, työtä voidaan pitää onnistuneena, sillä normaalista ajotilanteesta sekä vikatilanteesta saatiin tuotettua kuvaajat. Missään vaiheessa tarkoitus ei ollut saada tuloksia, joiden perusteella raitiotietä voitaisiin rakentaa. Ennemminkin tarkoitus oli tarkastella miten virrat, tehot ja jännitteet muuttuvat ja niiden perusteella luoda käsitys, mitkä asiat tuloksiin vaikuttavat ja miten paljon.

LÄHTEET

ABB. N.d. Voltage limiting device. Luettu 2.4.2019. <https://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters/medium-voltage-arresters/railway-and-traction-systems/voltage-limiting-device-hvl>

ABB Industry Oy. Tekninen opas nro 6: Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Luettu 25.3.2019.

Airo, T. 2016. Tällaisia ovat Tampereen valitsemat nopeat raitiovaunut: 300 matkustajaa ja hiljainen ääni. Aamulehti. Luettu 2.4.2019.

DIY-AUDIO-HEAVEN. N.d. Rectifiers, how do they work. Luettu 2.4.2019. <https://diyaudioheaven.wordpress.com/tutorials/power-supplies/rectifiers/>

Hietalahti, L. 2011a. 1. Painos. Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011b. 1. Painos. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Kylkisalo, T., Alanen, R. 2007. Tasajännite taajaman sähkönjakelussa ja mikro-verkoissa. Espoo: VTT.

Oura, Y., Mochinaga, Y., Nagasawa, H. 1998. Railway Electric Power Feeding Systems. East Japan Railway Culture Foundation.

Raitiotieallianssi. N.d. Tampereen raitiotie. Luettu 2.4.2019. <https://raitiotieallianssi.fi/tampereen-raiotie/>

SFS-EN 50163, 2005. Railway applications - Supply voltages of traction systems. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. Luettu 10.4.2019. Vaatii käyttö-oikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/5/292273.html.stx>

Tampereen ratikka. N.d. Mediapankki. Luettu 2.4.2019. <https://www.tampereen-ratikka.fi/mediapankki/>

Östlund, S. 2014. Electric Railway Traction. Tukholma: KTH Royal Institute of Technology.

LIITTEET

Liite 1. Muuntajan tekniset tiedot (NRC Group Finland)



Handled by
Juha R.

Date
5.6.2017

Pages
1 (2)

Tampere Tramway

Ratasähköpäämuuntaja - specification

Technical Specification - Item 10 alt

Characteristic	
Product name	Dry Type CAST-COIL Transformer
Application	Rectifier 12 pulses K<0.2
Country of origin	Spain
Rated power	[kVA] 1600
Primary voltage	[V] 20000
Primary tapings	+10%, +7.5%, +5%, +2.5%, 0%, -2.5%, -5%, -7.5%, -10%
Secondary voltage at no load	[V] 2x588
Primary insulation level	[kV] LI 125 / AC 50 / Um 24
Secondary insulation level	[kV] LI - / AC 8 / Um 1.1
Frequency	[Hz] 50
Number of phases	3
Vector group	Yd11y0
Ambient temperature	°C 50 / 40 / 30
max./monthly/annual average	
Max. average temperature rise (HV/LV)	[K/K] 115 / 115
Environmental, climatic, fire class	E2, C2, F1
Temperature class (HV/LV)	H/H
Altitude (a.s.l.)	[m] < 1000
Location	Indoor
Primary / Secondary terminals position	Up / Down / Up
Corrosion protection level	C2H, zinc coated bolts and nuts
IP00 paint color	RAL 7035
LV terminals in copper	No

Performance values at rated power

Standards	IEC 60076
Impedance HV to LV1+LV2 at 75°C	[%] 8 (±10% Tol.)
No load losses	[W] 4300 (+15% Tol.)
Load losses at 120 °C	[W] 23000 (+15% Tol.)
Sound pressure level LP(A) 1 m	[dB(A)] 65

Preliminary dimensions and weight IP00

Length	[mm] 2160
Width	[mm] 1450
Height	[mm] 2310 without wheels

ABB Oy

Power Systems / Substations
Business identity code:
0643134-6
Domicile: Helsinki

Visiting Address
Stromberg Park,
Strombergin puistotie 4A
FIN-65100 Vaasa
FINLAND

Postal Address
P.O. Box 614
FIN-65101 Vaasa
FINLAND

Telephone
+358 10 22 4000
Telefax
+358 10 22 41297

Internet
www.abb.fi
e-mail:
first name.last name
@fi.abb.com

