

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

**SÄHKÖVERKKOTIEDONSIIRTOMENETELMÄN KEHITTÄMINEN TAAJUUS-
MUUTTAJAOHJATTUIHIN SÄHKÖKÄYTTÖIHIN**

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 17.08.2005.

Työn tarkastajina ja ohjaajina toimivat professori Jero Ahola ja diplomi-insinööri Jukka Toukonen.

Lappeenrannassa 26.08.2005

Antti Kosonen
Miilukatu 2B 17
53850 Lappeenranta
puh. +358 45 676 9878

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Antti Kosonen

Työn nimi: **Sähköverkkotiedonsiirtomenetelmän kehittäminen taajuusmuuttajaohjattuihin sähkökäyttöihin**

Osasto: Sähkötekniikka

Vuosi: 2005

Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 85 sivua, 52 kuvaa, 5 taulukkoa ja 2 liitettä.

Tarkastajat: Professori Jero Ahola ja DI Jukka Toukonen

Hakusanat: sähköverkkotiedonsiirto, HomePlug, kytkentärajapinta, Ethernet

Sähkömoottorin jatkuva-aikainen kunnonvalvonta vaatii tiedonsiirtoa moottorilta ylemmälle tietojärjestelmätasolle, kuten taajuusmuuttajalle. Uusien kaapeleiden asennus on työlästä ja kallista. Moottorin ja taajuusmuuttajan välillä on kuitenkin aina kaapeli, jota käytetään moottorin tehonsyöttöön. Tätä kaapelia on mahdollista käyttää myös tiedonsiirtokanavana. Tässä diplomityössä käsitellään ja tutkitaan sähköverkkotiedonsiirtomenetelmää, jonka avulla voidaan muodostaa Ethernet-yhteys moottorilta taajuusmuuttajalle tai toisinpäin.

Työssä kehitetään simulointimalli tiedonsiirtokanavan taajuusriippuvan vaimennuksen simuloimiseen. Lisäksi kehitetään kytkentärajapinta, joka mahdollistaa tiedonsiirron kolmi-vaiheisessa taajuusmuuttajan syöttämässä moottorikaapelissa. Työssä suunnitellaan ja toteutetaan tiedonsiirtoa varten pilot-laitteisto, jolla tehdään laboratoriotestit. Laboratoriotesteillä varmistetaan menetelmän soveltuvuus. Laboratoriotestien avulla etsitään myös reunaehdot tiedonsiirron toiminnalle ja tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavia tekijöitä taajuusmuuttajakäytössä. Lisäksi tarkastellaan menetelmän aiheuttamaa viivettä, joka on tärkeä säätösovellusten kannalta. Lopuksi arvioidaan menetelmän soveltuvuus käytännön sovelluksiin.

ABSTRACT

Author: Antti Kosonen

Subject: **Development of a Power Line Communication Method for Inverter Driven Electrical Drives**

Department: Electrical Engineering

Year: 2005

Place: Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. 85 pages, 52 figures, 5 tables and 2 appendices.

Supervisors: Professor Jero Ahola and M.Sc. Jukka Toukonen

Keywords: power line communication, HomePlug, coupling interface, Ethernet

On-line condition monitoring of an electric motor requires data transfer from the motor to an upper data system level, e.g. to the inverter. The installation of new cables is laborious and expensive. However, since there is always a cable between the motor and the inverter for supplying the power for the motor, it is also possible to use this cable as a communication channel. In this master's thesis, a power line communication method for creating an Ethernet connection from the motor to the inverter or vice versa is introduced and studied.

In this thesis, a simulation model for simulating frequency dependent damping of a communication channel is developed. In addition, a coupling interface that makes data transmission possible in the inverter supplied three-phase motor cable is developed. A pilot equipment for data transmission, which is designed and realized in this thesis, is used for the laboratory experiments. The applicability of the method is verified with laboratory experiments. With the laboratory experiments, the boundary terms for the function of data transfer as well as factors affecting the data transfer rate in the inverter drive are also sought for. Furthermore, the delay caused by the method is also discussed since this delay is important from the viewpoint of control applications. The use of the method for practical applications is evaluated at the end of the work.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolla osana ABB:n ja TEKES:n rahoittamaa Kommunikoiva moottori -projektia.

Haluan kiittää työni tarkastajia ja ohjaajia, professori Jero Aholaa ja diplomi-insinööri Jukka Toukosta, arvokkaista neuvoista ja kommentteista diplomityötäni kohtaan. Projekti on ollut erittäin mielenkiintoinen ja antoisa. Työn tuloksista kertovat konferenssijulkaisut, yksi patenttihakemus ja tämä diplomityö. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työkavereita, joiden kanssa olen ollut tekemisissä.

Haluan kiittää lämpimästi vanhempiani, Helena ja Erkki Kososta, korvaamattomasta koko opiskeluajan kestäneestä tuesta ja kannustuksesta. Haluan kiittää myös veljeäni, Jani Kososta, hänen käytännön kokemuksen tuomista asioista, joista on ollut monesti hyötyä opiskelussa ja opiskeluaikaisissa kesätöissä. Kiitän myös sukulaisia ja tuttaviani kiinnostuksesta opiskelujeni edistymisen suhteen. Lisäksi haluan kiittää opiskelukavereitani, joiden kanssa on jaettu opiskeluaikaiset ilot ja murheet.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	3
1 JOHDANTO.....	7
2 SÄHKÖVERKKOTIEDONSIIRTO JA SEN SOVELLUKSET	10
2.1 Sähköverkkotiedonsiirron historia.....	11
2.2 Standardit sähköverkkotiedonsiirrossa	12
2.3 Tiedonsiirto taajuusmuuttajakäytössä.....	13
2.4 Aikaisemmat sovellukset.....	14
3 HOMEPLUG-STANDARDIT.....	15
3.1 HomePlug 1.0	16
3.1.1 HomePlug 1.0:n fyysinen kerros	17
3.1.2 HomePlug 1.0:n MAC-kerros.....	18
4 SIMULOINTIMALLIN KEHITYS TESTIYMPÄRISTÖLLE.....	20
4.1 Testiympäristön kuvaus	20
4.2 Tiedonsiirtokanavan mallintaminen	21
4.3 Kanavamallin muodostus testiympäristölle.....	25
4.4 Simuloidut amplitudi- ja vaihevasteet testiympäristölle.....	30
4.5 Testiympäristön impulssivaste.....	32
4.6 Kanavan Simulink-malli	33
4.7 Kohinan simulointi	36
4.8 Laboratoriomittauksia testiympäristölle	37
4.8.1 Pääjännitteen vaikutus tiedonsiirtokanavan vaimennukseen.....	39
4.8.2 Du/dt-suotimen vaikutus.....	41
4.8.3 Mittaustuloksien vertailua simulointituloksiin	42
5 KYTKENTÄRAJAPINTOJEN SUUNNITTELU.....	45
5.1 Taajuusmuuttajakäyttö tiedonsiirron kannalta.....	45
5.2 Tiedonsiirtolaitteiston kytkeytyminen moottorikaapeliin.....	46
5.3 KytKentärajapinnan suunnittelu	47
5.4 KytKentärajapinnassa huomioitavat asiat	49
5.5 Laboratoriomittauksia kytKentärajapinnoille.....	52
5.6 KytKentärajapinnan simulointimallin hajaparametrien määrittäminen.....	55
6 PILOT-LAITTEISTON SUUNNITTELU	56
6.1 Teholähteen suunnittelu.....	56
6.1.1 Teholähde.....	56
6.1.2 Alkuperäisen teholähteen korvaus akkusyötöllä.....	57
6.2 Suunniteltujen kytKentärajapintojen liittäminen modeemeihin	57
6.3 Testilaitteiston suunnittelu	58
7 TIEDONSIIRTOTESTIT	60
7.1 Testien toteutus.....	60

7.2	Testit	63
7.3	Tiedonsiirtonopeustestien analysointi	65
7.3.1	Du/dt-suotimen vaikutus.....	65
7.3.2	Tiedonsiirron suunnan vaikutus.....	66
7.3.3	Moottorikaapelin pituuden vaikutus	67
7.3.4	Modeemien kytkeytymistavan vaikutus	69
7.3.5	Maadoitustavan vaikutus	70
7.3.6	Lähtösuotimen vaikutus.....	71
7.3.7	Tiedonsiirron viive.....	73
7.3.8	Tiedonsiirto läpi du/dt-suotimen.....	74
7.4	Testilaitteen koetestit	75
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET	77
9	YHTEENVETO	80
	LÄHTEET	82

LIITE	I	Kytkentärajapinnan siirtofunktion johtaminen.
	II	Testilaitteen layout-kuva.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Merkinntät

c	jakautunut kapasitanssi
c_0	valon nopeus tyhjiössä ($3 \cdot 10^8$ m/s)
c_N	N :s kompleksinen kerroin
d	diskreettien viiveiden lukumäärä
g	jakautunut konduktanssi
k	indeksi
l	jakautunut induktanssi
n	indeksi
r	jakautunut resistanssi
\mathbf{x}	diskreetti aikasarja
v_p	etenemisnopeus
\mathbf{A}	taajuudesta riippuva kerroinmatriisi
B	taajuuskaistanleveys
\mathbf{B}	taajuudesta riippuva kerroinmatriisi
C	kanavan tiedonsiirtokapasiteetti
\mathbf{C}	taajuudesta riippuva kerroinmatriisi
C_h	hajakapasitanssi
C_{hf}	kapasitanssi korkeilla taajuuksilla
\mathbf{D}	taajuudesta riippuva kerroinmatriisi
F_N	Nyquistin taajuus
F_s	näytteenottotaajuus
L	pituus
L_h	hajainduktanssi
L_{hf}	induktanssi korkeilla taajuuksilla
L_{lf}	staattorikämmien induktanssi matalilla taajuuksilla
N	indeksi
R	resistanssi
R_h	hajaresistanssi

R_{hf}	resistanssi korkeilla taajuuksilla
R_{lf}	staattorikäämien resistanssi matalilla taajuuksilla
\mathbf{T}_i	i :s siirtomatriisi
U_{DC}	taajuusmuuttajan välipiirin jännite
$U_{\text{L-L,rms}}$	verkon pääjännite
V_{S}	jännitelähteen jännite
\mathbf{X}	diskreetin Fourier-muunnoksen kerroin
\mathbf{Z}_0	ominaisimpedanssi
\mathbf{Z}_1	impedanssivälisuure
\mathbf{Z}_2	impedanssivälisuure
$\mathbf{Z}_{\text{du/dt}}$	du/dt-suotimen tuloimpedanssi
\mathbf{Z}_{in}	tuloimpedanssi
\mathbf{Z}_1	taajuusmuuttajan tuloimpedanssi
\mathbf{Z}_L	kuormaimpedanssi
\mathbf{Z}_M	moottorin tuloimpedanssi
\mathbf{Z}_p	rinnakkaisimpedanssi
$\mathbf{Z}_{p, \text{krp}}$	kytkentärajäpinnan rinnakkaiskomponenttien impedanssi
\mathbf{Z}_s	jännitelähteen sisäinen sarjaimpedanssi
\mathbf{Z}_S	sarjaimpedanssi
$\mathbf{Z}_{S, \text{krp}}$	kytkentärajäpinnan sarjakomponenttien impedanssi
α	vaimennuskerroin
β	etenemiskerroin
γ	etenemisvakio
μ'	reaalinen permeabiliteetti
μ''	kompleksinen permeabiliteetti
θ	vaihe
τ_g	ryhmäviive
τ_N	N :s viive

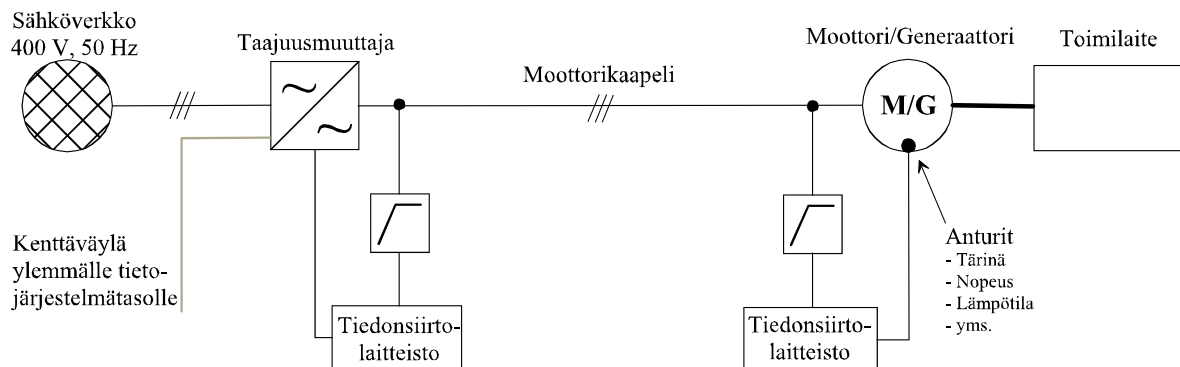
Lyhenteet

AES	Advanced Encryption Standard
AM	Amplitude Modulation
ASK	Amplitude Shift Keying
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIFS	Contention window Interframe Spacing
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTP	Carrier Transmission over Power Lines
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DES	Data Encryption Standard
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
EMC	Electromagnetic Compatibility
FCC	Federal Communication Commission
FEC	Forward Error Control
FFT	Fast Fourier Transform
FSK	Frequency Shift Keying
FTP	File Transfer Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IP	Internet Protocol
LAN	Local Area Network
MAC	Medium Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PHY	Physical Layer
PR	Priority Resolution
PSK	Phase Shift Keying
PTFE	Polytetrafluorieteeni (teflon)
PVC	Polyvinyl Chloride
RCS	Ripple Carrier Signaling

RF	Radio Frequency
RIFS	Response Interframe Spacing
TCP	Transmission Control Protocol
TEM	Transverse Electromagnetic
WLAN	Wireless Local Area Network

1 JOHDANTO

Sähkömoottorin tai generaattorin jatkuva-aikainen kunnonvalvonta vaatii antureiden asennusta moottorille [1]. Antureita tarvitaan myös erilaisissa säätösovelluksissa. Tästä esimerkkeinä ovat sähkökoneen roottorin pyörimisnopeus- ja asentokulmamittaukset. Jotta antureiden mittaustiedosta olisi hyötyä, täytyisi tieto pystyä siirtämään anturilta sitä hyödyntävälle tietojärjestelmälle tai säätäjälle, jossa sitä pystytään käsittelemään ja analysoimaan. Moottorin ja taajuusmuuttajan tai moottorinohjaimen välissä on aina kaapeli tehonsyöttöä varten. Tätä kaapelia on mahdollista hyödyntää myös tiedonsiirtokanavana moottorin kunnonvalvontasovelluksissa ja muissa sovelluksissa. Tällöin vältetään uusien kaapelien asennukselta. Moottorikaapeli on tiedonsiirron kannalta ajateltuna ympäristönä varsin vakio, mutta taajuusmuuttajaohjatussa sähkökäytössä kohinateho on suuri taajuuskaistalla (~100 kHz – 1 MHz). Tämän takia tiedonsiirrolta moottorikaapelissa vaaditaan paljon, jos moottoria ajetaan taajuusmuuttajalla. Toinen mahdollisuus olisi käyttää langattomia tiedonsiirtomenetelmiä, kuten esimerkiksi WLAN:ia (Wireless Local Area Network). Langattomille menetelmille voi kuitenkin muodostua ongelmaksi tehtaiden lattiat, seinät, metallit tai erityisesti liikuteltavat esineet. Nämä aiheuttavat ns. peittoalueita tiedonsiirtoverkkoon, jotka saattavat kyseenalaistaa langattomien menetelmien toimintavarmuuden ja luotettavuuden tehdasympäristössä. Kuvassa 1.1 on esitetty tiedonsiirron mahdollinen toteutus moottorilta tai generaattorilta ylemmälle tietojärjestelmätasolle tehonsyöttökaapelia pitkin.



Kuva 1.1. Tiedonsiirto moottorilta tai generaattorilta ylemmälle tietojärjestelmätasolle, kuten esimerkiksi taajuusmuuttajalle. Taajuusmuuttajalta tieto voidaan edelleen siirtää kenttäväylää pitkin tehtaan tietojärjestelmään.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia sähköverkkotiedonsiirron soveltuvuutta moottorin tai generaattorin ja taajuusmuuttajan tai moottorinohjaimen väliseen tiedonsiirtoon sekä

suunnitella tarvittava pilot-laitteisto tiedonsiirtotestejä varten. Tiedonsiirtokanavana on tarkoitus käyttää moottorin tehonsyöttöön tarkoitettua kolmivaiheista moottorikaapelia. Tiedonsiirtolaitteiden kytkeytyminen moottorikaapeliin vaatii sopivaa kytkentäraajapintaa. Diplomityössä suunnitellaan ja toteutetaan kaksi tiettyä kriteerit täyttävää kytkentäraajapintaa. Tiedonsiirtokanavalle rakennetaan simulointimalli, jolla simuloidaan kanavan jännitevaimennusta taajuustasossa. Mallin avulla voidaan simuloida eri komponenttien vaikutusta tiedonsiirtokanavan kokonaisvaimennukseen ja helpottaa tällä tavoin kytkentäraajapintojen suunnittelua. Tiedonsiirron laboratoriotestejä varten suunnitellaan ja rakennetaan pilot-laitteisto. Laboratoriotestien tarkoituksena on saada tietoa tiedonsiirtomenetelmän soveltuvuudesta esitettyyn sovellukseen. Tämän lisäksi pyritään löytämään eri komponenttien vaikutuksen suuruus saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen ja etsimään menetelmän toimivuuden ja luotettavuuden rajoitukset.

Työssä käydään läpi sähköverkkotiedonsiirron kehitystä ja esitellään yleisimmät tämänhetkiset standardit. Tämän jälkeen esitellään aikaisempia sovelluksia, joita on tehty aiheeseen liittyen. Työssä kuvataan ongelmia, joita esiintyy taajuusmuuttajakäytössä tiedonsiirron kannalta ja lisäksi esitellään tekniikkaa, jota on tarkoitus hyödyntää tiedonsiirrossa. Näiden jälkeen tarkastellaan testiympäristön simulointimallin kehitystyötä sekä kytkentäraajapinnan suunnittelua kyseiseen sovellukseen. Työssä esitellään pilot-laitteiston suunnittelu ja toteutus. Tämän jälkeen esitellään tehdyt tiedonsiirtotestit ja niiden analysoinnit sekä esitellään johtopäätökset eri parametrien vaikutuksesta saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen. Lopuksi esitellään johtopäätökset menetelmän soveltuvuudesta taajuusmuuttajaohjattuun sähkökäyttöön ja esitellään tarvittavia jatkotoimenpiteitä.

Työn rakenne on seuraavanlainen:

Kappaleessa 2 kerrotaan taustoja sähköverkkotiedonsiirrosta yleisesti ja käydään läpi aikaisemmin tunnettuja sovelluksia liittyen tiedonsiirtoon sähkökäytöissä.

Kappaleessa 3 esitellään HomePlug 1.0-sähköverkkotiedonsiirtostandardia ja kerrotaan sen uusimmista versioista.

Kappaleessa 4 kehitetään simulointimalli tiedonsiirtokanavalle, jolla voidaan simuloida signaalin vaimennusta taajuustasossa erilaisissa testiympäristöissä. Simulointimallin toimintaa verifioidaan laboratoriomittausten avulla.

Kappaleessa 5 kehitetään kaksi kytkentärajpintaa, joiden avulla tiedonsiirtolaitteet voidaan liittää kolmivaiheiseen moottorikaapeliin. Toinen kytkentärajpinta soveltuu tiedonsiirtosignaalin kytkemiseen vaiheen ja suojamaan väliin ja toinen vaiheiden väliin.

Kappaleessa 6 esitetään pilot-laitteiston rakentaminen, jonka avulla voidaan tehdä laboratoriotestejä erilaisissa taajuusmuuttaja- ja vakionopeuskäytöissä.

Kappaleessa 7 esitellään tehtyjä tiedonsiirtonopeustestejä ja analysoidaan niiden tuloksia tiedonsiirtomenetelmän sopivuudesta erilaisiin sähkökäyttöihin.

Kappaleessa 8 esitetään johtopäätökset työstä ja tehdään ehdotus jatkotoimenpiteistä.

2 SÄHKÖVERKKOTIEDONSIIRTO JA SEN SOVELLUKSET

Sähköverkkotiedonsiirto perustuu sähkönsyöttöön tarkoitettujen kaapelien hyödyntämiseen signaloinnissa. Tämän ansiosta esimerkiksi sähköverkkomodeemiin ei tarvitse kytkeä muita johtimia kuin verkkopistoke. Nykyisin sähköverkko kattaa lähes 100 prosenttisesti kaikki asuinkiinteistöt. Sähköverkko on haasteellinen ympäristö tiedonsiirron kannalta. Pääasiallisia ongelmia ovat signaalin monitie-eteneminen, häiriökohina sekä verkon aika- ja taajuusriippuva impedanssi [2]. Monitie-eteneminen yhdessä epäsovituksien kanssa aiheuttaa kanavan impulssivasteeseen useita huippuja, koska signaali voi edetä useita eri reittejä pitkien päätepisteeseensä. Impedanssin epäsovitukset aiheuttavat signaalin heijastumisia kuormasta. Monet sähköverkkoon kytketyt laitteet, kuten halogeenilamput, mikroaaltouunit ym. kodinkoneet, aiheuttavat häiriöitä. Pahimpia häiriöiden tuottajia ovat laitteet, jotka aiheuttavat sähköverkkoon impulssimaisia häiriöitä. Tällaisista laitteista hyviä esimerkkejä ovat hakkuriteholähteet, loisteputket, himmentimet, pölynimuri, jne. Sähköverkon impedanssi on aikariippuva, koska laitteita kytketään verkkoon ja siitä pois satunnaisesti. Prosessorien, signaalinkäsittelyn ja algoritmien kehittyminen ovat mahdollistaneet uusien tekniikoiden (modulointimenetelmät, virheenkorjaus yms.) toteuttamisen sulautetuissa järjestelmissä. Näiden ansiosta laajakaistainen tiedonsiirto on nykyisin mahdollista myös tavallisissa talon sisäisissä sähköverkoissa ja pienjännitejakeluverkoissa. Standardin laajakaistaisen sähköverkkotiedonsiirron on mahdollistanut HomePlug-tekniikka [3]. Standardoinnintakia on mielenkiintoista tutkia mahdollisuuksia soveltaa tätä tekniikkaa sähkökäytöissä.

Taajuusmuuttajakäyttö on haasteellisempi ympäristö häiriöiden osalta kuin esimerkiksi tavallinen omakotitalon sähköverkko. Taajuusmuuttajakäytössä (400 V) jännite voi nousta moottorin päässä jopa 1000 V:in jopa 1 μ s:ssa. Taajuusmuuttajakäyttö on kuitenkin yleisesti ottaen parempi tiedonsiirtokanavana kuin tavallinen sähköverkko, koska signaalilla ei ole oikeastaan kuin yksi kulkureitti (moottorikaapeli) lähettimeltä vastaanottimelle. Tavallisessa sähköverkossa signaali voi jakautua moneen suuntaan haaroitusten takia. Tämän lisäksi signaalin on pystyttävä kulkemaan eri vaiheiden välillä, koska esimerkiksi eri huoneiden sähkönsyöttö on voitu toteuttaa eri vaiheista. Yleensä pienjänniteverkossa talon pääkeskusta syötetään kolmivaiheisena. Taajuusmuuttajakäytössä lähetin ja vastaanotin on järkevintä kytkeä aina samoihin vaiheisiin, jolla minimoidaan signaalin vaimentuminen.

2.1 Sähköverkkotiedonsiirron historia

Ideana sähköverkon hyödyntäminen tiedonsiirtoon on lähes kaksi sataa vuotta vanha. Vuonna 1838 Edward Davy esitteli sähkönsyötön kaukomittausmenetelmän akkujen jännitetasojen mittaukseen miehittämättömältä puolelta Lontoo-Liverpool lennätinjärjestelmästä. [4] Sähköverkossa tapahtuvaan tiedonsiirtoon on tehty siitä lähtien useita erilaisia patenteja.

Kantaaaltotaajuuteen ($CTP \cong$ Carrier Transmission over Power Lines) perustuvia datalähe-tyksiä suurjännitelinjaa pitkin aloitettiin jo 1920-luvulla. Tiedonsiirto aloitettiin, koska puhelinyhteyksistä oli pulaa. Huomattavat investoinnit takasivat tekniikan nopean kehittymisen. CTP mahdollisti luotettavan tiedonsiirron suurjänniteverkossa. Suurjänniteverkot yleistyivät nopeasti voimalaitosten ja sähköasemien välillä, koska sähköyhtiöt tarvitsivat pienihäviöistä sähkönsiirtoa ja tietoliikenneyhteyksiä. CTP:ssä käytettiin taajuusaluetta 15 – 500 kHz. Hyvissä olosuhteissa menetelmällä voitiin lähettää dataa lähes 900 km päähän, vaikka lähetysteho oli ainoastaan 10 W. Aluksi menetelmää käytettiin äänisignaalin siirtoon, joka amplitudimoduloitiin ($AM \cong$ Amplitude Modulation) kantaaltoon. [2] Amplitudimodulaatiota käytettiin, koska se pystyttiin toteuttamaan sen aikaisella tekniikalla.

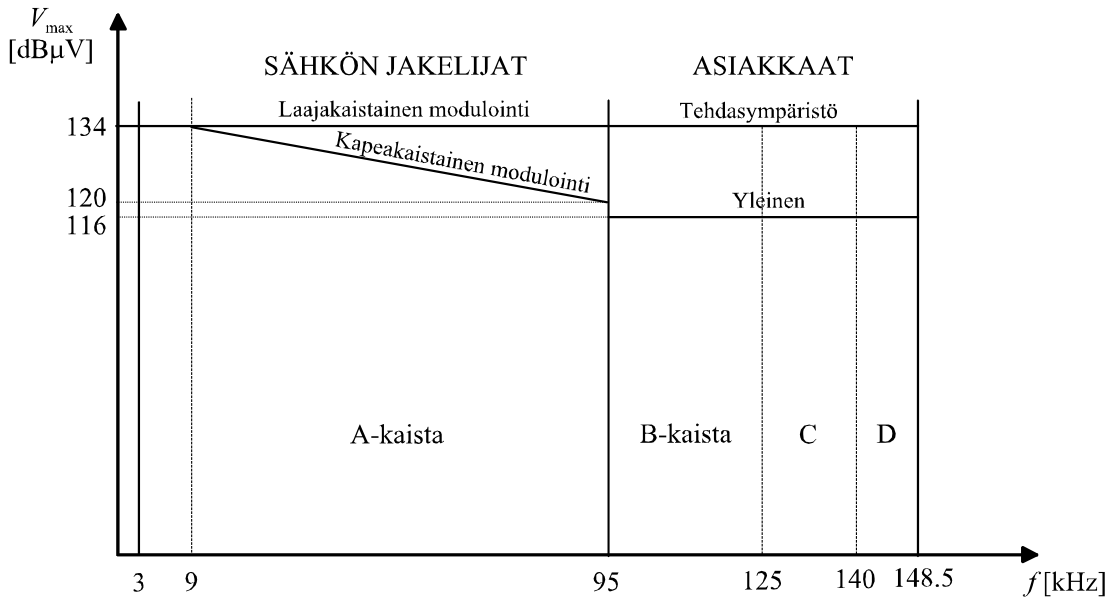
Keski- ja pienjänniteverkkoihin kehittyi vastaavasti myös oma tiedonsiirtomenetelmä RCS (Ripple Carrier Signaling), jota aloitettiin soveltamaan vuodesta 1930 lähtien. RCS:n käyttämä taajuuskaista 125 – 3000 Hz oli huomattavasti alhaisempi kuin CTP:ssä, jonka takia data liikkui vaivattomasti myös jakelumuuntajan läpi. Alhaisen taajuuskaistan ja verkon pienen impedanssin vuoksi tiedonsiirtoon käytettävä lähetysteho täytyi mitoittaa verkon huippukuorman mukaan. Lähetystehot olivat tämän takia suuria, noin 0.1 – 0.5 % verkoon kaikkiaan syötettävästä tehosta, joka käytännössä tarkoitti 10 – 100 kW lähetystehoa. Keski- ja pienjänniteverkot olivat myös huomattavasti ongelmallisempia kuin suurjänniteverkot, koska niissä verkon kuormitus vaihteli suuresti ajasta riippuen. Pienjänniteverkossa oli myös paljon haaroituksia verrattuna suurjännitelinjoihin. Tiedonsiirto tapahtui RCS:ssä aluksi ainoastaan yhteen suuntaan (sähkönjakelija \rightarrow kuluttaja), koska lähetystehontarve oli suuri. RCS:llä saavutettavat tiedonsiirtonopeudet olivat vaatimattomia. Aluksi menetelmää käytettiin yksinkertaisen on/off-informaation siirtoon. Tämän toteutukseen käytettiin digitaalista ASK (Amplitude Shift Keying) modulointimenetelmää yksinkertaisen to-

teutettavuutensa ansiosta. RCS:n tärkeimpinä tehtävinä olivat sähköjaketun tarkkailu, erottimien ja kytkimien ohjaaminen, tariffien muutos ja mittarien lukeminen. [2]

2.2 Standardit sähköverkkotiedonsiirrossa

Euroopassa määriteltiin pienjänniteverkossa tapahtuvalle signaloinnille oma standardi CENELEC EN 50 065-1 vuonna 1991 [6]. Tämä korvasi kaikki aikaisemmat yksittäiset standardit Euroopassa [4]. Standardi sisältää yleiset vaatimukset, taajuuskaistat ja sallitut signaalitasot. Taajuuskaistana käytetään 3 – 148.5 kHz. EN 50 065-1 eroaa oleellisesti toisista standardeista, joita käytetään USA:ssa (FCC \cong Federal Communication Commission) ja Japanissa. Siellä taajuuskaista on sallittu aina 500 kHz:in saakka. Lisäksi näissä maissa on sallittu tiedonsiirto nollajohtimen ja suojamaan välillä. [2] Saksalaisilla on olemassa oma standardi NB30 koskien sähköverkkotiedonsiirtoa pienjännitejakeluverkossa alle 30 MHz taajuuksilla [5]. Nykyisin on myös olemassa HomePlug-teollisuusstandardi, josta kerrotaan kappaleessa 3.

Kuvassa 2.1 on esitetty Euroopan standardin 50 065-1 sallitut taajuuskaistat ja niiden signaalitasot. Taajuuskaista 3 – 148.5 kHz on jaettu viiteen alakaistaan. Taajuuskaistat 3 – 9 kHz ja 9 – 95 kHz (A-kaista) on tarkoitettu ainoastaan sähköjakelijoiden käyttöön, kun taas kaistat 95 – 148.5 kHz (B-, C- ja D-kaistat) yksityiseen käyttöön, eli pääasiassa rakennusten sisäiseen käyttöön. Kuvasta nähdään, että maksimisignaalitaso yleisessä käytössä kaistoilla B, C ja D on 116 dB μ V (= 0.63 V), mutta teollisuusympäristössä 134 dB μ V (= 5 V). Kaistalla A sallittu maksimitaso on 134 dB μ V @ 9 kHz ja 120 dB μ V (= 1 V) @ 95 kHz, mutta laajakaistaista modulointia käytettäessä maksimitaso on 134 dB μ V koko taajuuskaistalla (9 – 95 kHz). [2], [4]



Kuva 2.1. Euroopassa pienjänniteverkossa tapahtuvan signaloinnin standardin CENELEC EN 50 065-1 sallitut taajuuskaistat ja niiden signaalitasot. [4]

2.3 Tiedonsiirto taajuusmuuttajakäytössä

Tiedonsiirtoa tarvitaan moottorin ja taajuusmuuttajan välillä, jos moottoriin on asennettu antureita, joita käytetään moottorin säätöön ja kunnonvalvonnan diagnosointiin [7]. Uusien kaapeleiden asennus jälkiasennustyönä on hankalaa ja kallista. Kuitenkin moottorin ja taajuusmuuttajan välillä on aina kaapeli moottorin tehonsyöttöä varten. Tätä kaapelia on mahdollista käyttää tiedonsiirtokanavana erilaisissa sovelluksissa. [8] Moottorikaapelin käyttäminen tiedonsiirtoon vaatii kuitenkin sopivia tiedonsiirtomenetelmiä, koska kanava on todella häiriöinen. Häiriöt ovat suhteellisen korkeilla taajuuksilla ($\sim 100 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$) verrattuna sähköverkon perustaajuuteen (50 Hz) [4]. Korkeataajuisia häiriöitä tuottavat pääasiassa taajuusmuuttajan tehoasteen transistorien kytkennät.

Sähköverkossa tapahtuvaa tiedonsiirtoa on käytetty onnistuneesti jo pitkään erilaisissa sovelluksissa, kuten esimerkiksi sähkömittarin luennassa (kts. kappale 2.1). Suuria haasteita on kuitenkin ollut tiedonsiirron sovelluksissa sähkömoottorikäytöissä, erityisesti taajuusmuuttajakäytöissä, joista kerrotaan lisää kappaleessa 2.4. Artikkelin [9] mukaan taajuusmuuttajakäyttö on erilainen tiedonsiirto-ominaisuksiltaan kuin tavallinen sähköverkko. Taajuusmuuttajan lähtöjännite sisältää pulssi- tai kanttimaista aaltoa, joka vaihtelee taajuudeltaan ja kestoltaan. Toinen merkittävä tekijä on se, että taajuusmuuttajakäytössä verkkoa syötetään tehotransistorien avulla, kun taas normaalissa verkossa käytetään muuntajaa tai

generaattoria. Tehotransistorit aiheuttavat tiedonsiirtokanavana käytettävässä moottorikaapelissa impedanssitason vaihtelun [9].

Taajuusmuuttajan kytkentätaajuuksien takia on myös moottorin ja taajuusmuuttajan välisessä tiedonsiirrossa käytettävä MHz-luokan taajuuksia, jotta häiriö- ja hyötysignaalit eivät menisi päällekkäin taajuusalueella, jolla häiriötasot ovat suuria. Tämän lisäksi liityntä on tehtävä huolella, jotta se mahdollistaa tiedonsiirron lähetyksen ja vastaanoton kyseisessä sovelluksessa. Jotta tiedonsiirto olisi mahdollista taajuusmuuttajakäytössä, täytyy laitteiden pystyä virheiden käsittelyyn ja korjaukseen sekä adaptoitumaan erilaisiin tiedonsiirtokanaviin. Tämän lisäksi tiedonsiirrossa käytettävien modulaatioiden täytyy olla tehokkaita, jotta impulssimaiset häiriöt eivät vaikuttaisi oleellisesti tiedonsiirron toimintaan. Tällaiset kriteerit täyttävä menetelmä on HomePlug, jota tutkitaan tässä diplomityössä. HomePlug-standardin pohjalta ovat monet valmistajat tehneet sähköverkkomodeemeja. Tässä diplomityössä käytetään testeissä PhonexBroadband-yhtiön valmistamia HomePlug-modeemeja. Modeemit pohjautuvat Intellonin valmistamaan PowerPacket ASIC-piiriin (Application Specific Integrated Circuit), joka toteuttaa HomePlug 1.0-standardin. Tässä työssä modeemeihin suunnitellaan taajuusmuuttajakäyttöön soveltuva kytkentäraja-alue.

2.4 Aikaisemmat sovellukset

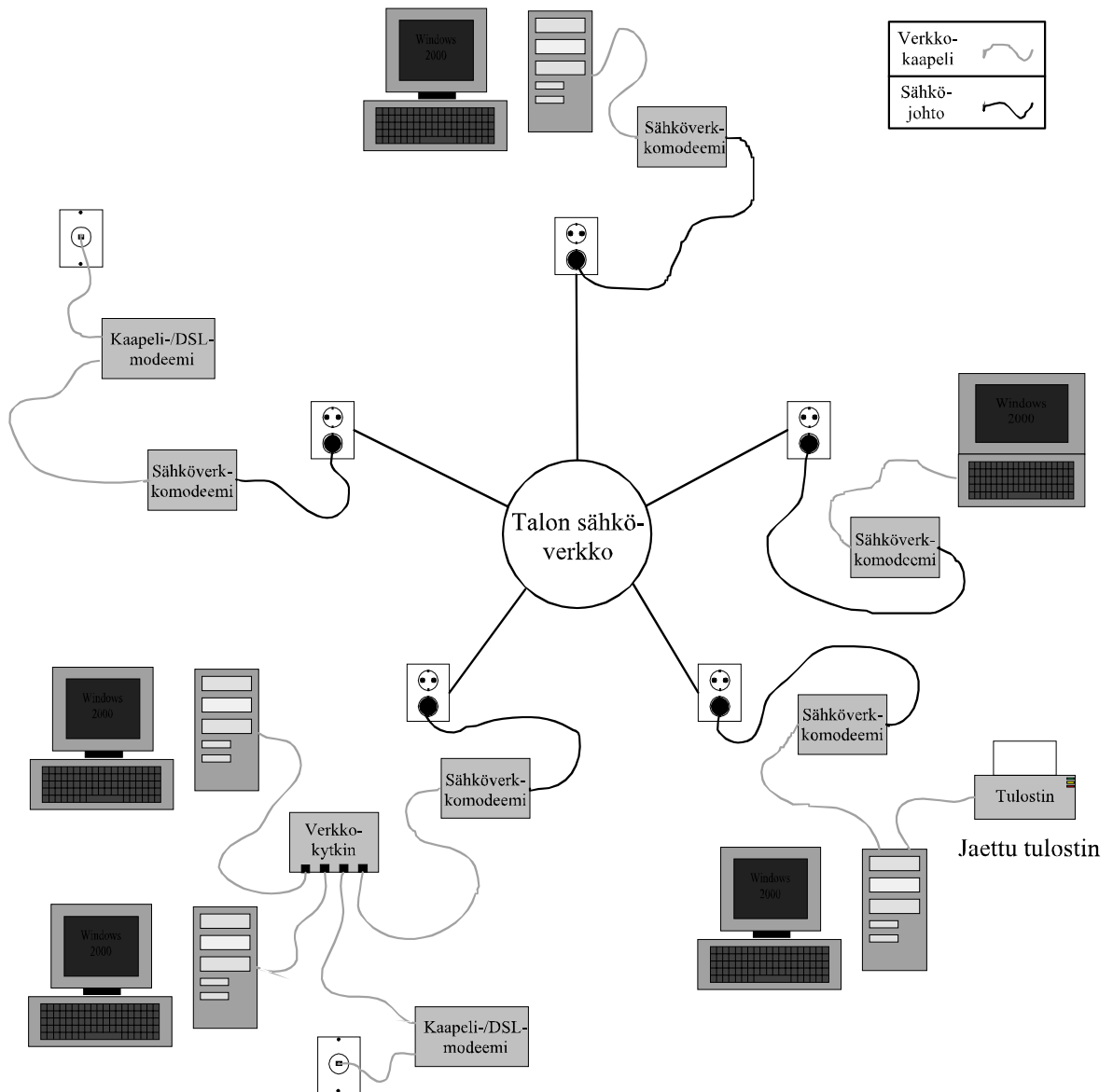
Idea moottorikaapelin hyödyntämisestä tiedonsiirrossa taajuusmuuttajan ja sähkökoneen välillä on käsitelty artikkelissa [9] ja väitöskirjassa [4]. Artikkelissa [9] esitetään ratkaisu, jossa moottorille liitetyiltä antureilta lähetetään dataa taajuusmuuttajalle. Tiedonsiirto toimii tässä tapauksessa ainoastaan yhteen suuntaan. Menetelmässä käytetään digitaalista taajuusmodulaatiota (FSK). Symboleiden ilmaisemiseen käytetään taajuuksia 3.5 MHz ("0") ja 6.5 MHz ("1"). Menetelmällä saavutetaan tiedonsiirtonopeus 9600 b/s. Kytkentäraja-alue on erilainen lähettimellä ja vastaanottimella. Vastaanottimen kytkentäraja-alueen muuttajan toisioon pääsee läpi 70 V peak-to-peak jännitteitä. Tämän takia signaalia täytyy suodattaa 10. kertaluvun Butterworth kaistanpäästösuoittimella ennen kuin signaali demoduloidaan. Testijärjestelyissä käytetään 250 ft (76 m) moottorikaapelia. Väitöskirjassa [4] puolestaan varsinainen tiedonsiirtolaitteiston ja kytkentäraja-alueen toteutus keskittyy suoraan sähkökäyttöön ja CENELEC 50 065-1-standardin mukaisen taajuuskaistan hyödyntämiseen.

3 HOMEPLUG-STANDARDIT

HomePlug Powerline Alliance organisaation perusti 13 alan johtavaa yritystä maaliskuussa 2000. Organisaation tarkoituksena oli kehittää standardi, jolla voitaisiin verkottaa Ethernet-laitteet sähköverkon kautta yhteen ja Internetiin. Ensimmäinen tällainen standardi HomePlug 1.0 julkaistiin kesäkuussa 2001. Organisaatio perustettiin, koska jo monien vuosien ajan useat laitevalmistajat etsivät sopivia menetelmiä sähköverkossa tapahtuvaan tiedonsiirtoon. Silloin ei ollut vielä minkäänlaista teollisuusstandardia, joka olisi taannut eri laitevalmistajien laitteiden yhteensopivuuden. HomePlug 1.0 oli vastaus näihin ongelmiin. HomePlug 1.0-standardin jälkeen on tullut jo kaksi uutta versiota, toinen on vanhan parannettu versio (HomePlug 1.0 with Turbo) ja toinen täysin uusi (HomePlug AV [10]). Uusilla standardeilla on pystytty kasvattamaan tiedonsiirtonopeuksia: HomePlug 1.0 (14 Mb/s), HomePlug 1.0 with Turbo (85 Mb/s) ja HomePlug AV (200 Mb/s). [3] Nopeudet ovat laitteiden fyysisen kerroksen maksiminopeuksia. Käytännössä maksimitiedonsiirtonopeudet ovat noin puolet tuosta nopeudesta. HomePlug:n kaikki standardit ovat toistensa kanssa alaspäin yhteensopivia.

HomePlug-tekniikan tarkoituksena on tarjota laajakaistainen tiedonsiirtoyhteys sähköverkon yli. HomePlug-modeemit kytkettynä samaan galvaanisesti yhteydessä olevaan sähköverkkoon, toteuttavat hajautetun Ethernet-toistimen/-kytkimen kaltaisen funktion. Normaalisti toistimen/kytkimen sisällä oleva väylä, joka kytkee Ethernet-portit toisiinsa, on hajautettu toimimaan HomePlug:n omalla protokollalla sähköverkossa fyysisesti erillään olevien HomePlug-modeemien kesken. HomePlug-standardi kapseloi Ethernet-kehyksen omaan protokollaan ja lähettää sitä eteenpäin. Se ei sinänsä ota kantaa lähetyksen sisältöön. Tämän takia laitteet eivät tarvitse toimiakseen minkäänlaisia ylimääräisiä ohjelmistoja. HomePlug-standardissa yhteys voidaan salata, jolloin ainoastaan salauksen tietävät modeemit voivat keskustella toistensa kanssa. HomePlug 1.0 ja HomePlug 1.0 with Turbo käyttävät molemmat 56-bittistä DES-salausta (Data Encryption Standard) ja HomePlug AV 128-bittistä AES-salausta (Advanced Encryption Standard) [3]. Kotikäytössä HomePlug-tekniikan kilpailijana on tällä hetkellä WLAN. Näitä kahta tekniikkaa on vertailtu keskenään ja niistä on esitetty testituloksia artikkeleissa [11] ja [12]. Artikkelin [11] perusteella HomePlug tarjosi varmemman tiedonsiirtoverkon asuinneliöistä riippumatta verrattuna WLAN:iin. HomePlug-tekniikkaan perustuvilla modeemeilla voidaan toteuttaa erilaisia

verkkoratkaisuja. Kuvassa 3.1 on esitetty toteutettavia verkkoja omakotitalon tai toimiston sähköverkossa. HomePlug-modeemit tunnistavat toisensa verkosta automaattisesti, koska ne toimivat ad-hoc-moodissa ja täten eivät tarvitse muita verkkolaitteita verkon hallintaan. Ne voivat kommunikoida kaikki toistensa kanssa. HomePlug-modeemit voivat toimia keskuksena (hub), jolloin muut modeemit voivat muodostaa yhteyden tämän kautta, eli esimerkiksi Internet-yhteys voidaan jakaa talon sähköverkossa.



Kuva 3.1. HomePlug-sähköverkkomodeemeilla toteutettavat verkkotopologiat.

3.1 HomePlug 1.0

Standardi määrittelee käytettävän tiedonsiirtoprotokollan. Standardi otettiin käyttöön vuonna 2001. Tätä ennen sen toiminta testattiin käytännössä 500 kodissa USA:ssa ja Ka-

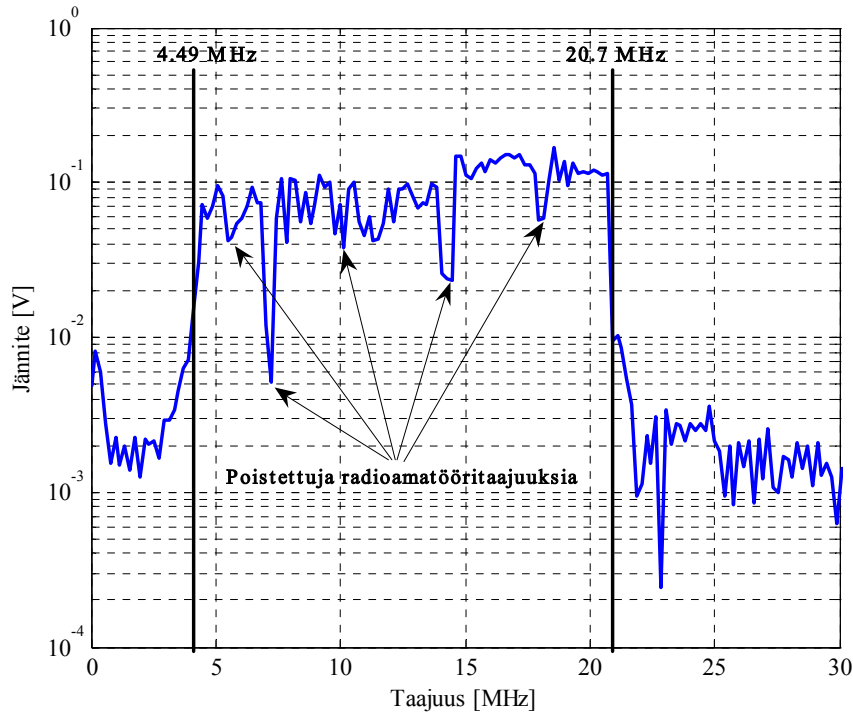
nadassa. Testituloksia on esitetty lähteessä [13]. HomePlug-tekniikassa käytetään OFDM-monikantoaalto tekniikkaa (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) fyysisen kerroksen toteuttamiseen. OFDM:n perusideana on jakaa käytettävä taajuuskaista moneen kaapekaistaiseen ja pienen tiedonsiirtonopeuden omaavaan kantaaltoon. Jokainen yksittäinen kantaalto voidaan moduloida erilaisella modulointimenetelmällä [14]. Tämän tekniikan ansiosta HomePlug-tiedonsiirtolaitteet soveltuvat käytettäväksi ympäristöissä, joissa on impulssimaisia häiriöitä. Impulssimaiset häiriöt eivät estä tiedonsiirtoa, koska symbolin kesto on pitkä suhteessa impulssin keston OFDM-monikantoaalto tekniikan ansiosta. Tällöin häiriön teho jakautuu koko symbolin kestolle. Fyysisen kerroksen maksimitiedonsiirtonopeus on 14 Mb/s. HomePlug 1.0:n MAC-kerroksen (Medium Access Control) tiedonsiirtonopeus rajoittuu noin 57 %:in maksiminopeudesta, joka on noin 8 Mb/s. TCP-protokollan (Transmission Control Protocol) mukainen tiedonsiirtonopeus on käytännössä vielä alhaisempi. TCP-protokollaa käytettäessä tiedonsiirtonopeus rajoittuu noin 6.3 Mb/s artikkelin [11] perusteella.

3.1.1 HomePlug 1.0:n fyysinen kerros

HomePlug 1.0 käyttää PHY-protokollaa (Physical Layer), joka perustuu jo olemassa oleviin menetelmiin. Fyysinen kerros käyttää adaptiivista OFDM-monikantoaalto tekniikkaa. Fyysinen kerros arvioi kanavan ominaisuudet tietyin väliajoin ja adaptoituu poistamalla kantaallot taajuuksilta, jotka ovat epäideaalisia tiedonsiirron kannalta, ja valitsemalla sopivat modulointimenetelmät ja virheenkorjaukset (FEC \cong Forward Error Control) jokaiselle jäljelle jääneelle kantaallolle. Modulointimenetelmiä on kolme, jotka kaikki perustuvat digitaalisen vaihemoduloinnin (PSK \cong Phase Shift Keying) eri variaatioihin: BPSK (Binary PSK), DBPSK (Differential BPSK) ja DQPSK (Differential Quadrature PSK). Virheenkorjauskoodaus perustuu Reed-Solomon/Konvoluutio-koodeihin. Konvoluutioenkooderin pituus on rajoitettu 7:ään ja nopeuksiin $\frac{1}{2}$ tai $\frac{3}{4}$. Reed-Solomon-koodeja käytetään koodausnopeuksilla $\frac{23}{39} - \frac{238}{254}$. Jokainen kombinaatio (modulaatiomenetelmä ja konvoluutiokoodin nopeus) vaatii minimimäärän toimivia kantaaltoja. [14]

HomePlug 1.0:n fyysinen kerros käyttää OFDM-monikantoaalto tekniikkaa taajuuskaistalla 4.49 – 20.7 MHz. Taajuuskaista 0 – 25 MHz on jaettu 128 kantaaltoon, joista 84 kantaaltoa (kantaallot 23 – 106) käytetään tiedonsiirrossa. Tiedonsiirrossa käytettävistä kanto-

aalloista on lisäksi poistettu kahdeksan pysyvästi, koska ne ovat päällekkäin radioamatöörin käyttämien taajuuksien kanssa. Näin ollen tiedonsiirtoon jää käytettäväksi 76 kantoaaltoa. [14] Kuvassa 3.2 on esitetty erään HomePlug-modeemin mitattu lähetyksen taajuusvaste. Kuvasta nähdään selvästi HomePlug-modeemien käyttämä taajuuskaista ja kielletyt taajuudet.

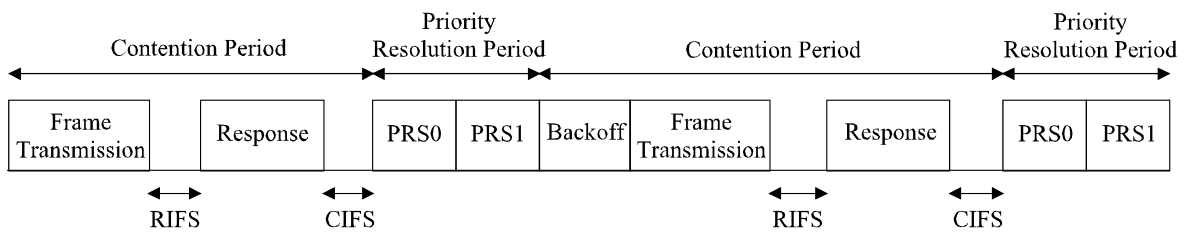


Kuva 3.2. HomePlug-modeemin mitattu taajuusvaste taajuusalueella 0 – 30 MHz, kun oskilloskoopin aika-askel on 1 μ s. Oskilloskoopin näytteenottotaajuus on 200 MHz ja käytettyjen näytteiden määrä 2000. FFT:n laskennassa on käytetty 1024 pistettä.

3.1.2 HomePlug 1.0:n MAC-kerros

HomePlug 1.0:n MAC-kerroksen kanavan varaus perustuu CSMA/CA-protokollaan (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), missä dataa siirretään 46 – 1500 tavun pituisina paketteina, jotka on kapseloitu IEEE 802.3 (Ethernet) kehyksiin [14]. CSMA/CA-protokollassa pyritään törmäysten havaitsemisen sijaan välttämään niiden tapahtumista, koska törmäyksiä ei voida välttämättä havaita suoraan. CSMA/CA käyttää ns. kilpavarausmenetelmää. HomePlug 1.0 laitteet toimivat ad-hoc-moodissa kommunikoidessaan eli ne kommunikoiivat suoraan keskenään, eikä muita verkkolaitteita tarvita, kuten koordinaattoreita.

Kilpavarausmenetelmän takia HomePlug 1.0:n MAC-kerroksessa on määritelty neljä eritasoista prioriteettiluokkaa: CA3 ja CA2 ovat aikaherkälle, korkean prioriteetin liikenteelle ja CA1 ja CA0 alemman prioriteetin liikenteelle. Prioriteettiluokka valitaan asettamalla sopivat signaalit PR0:lle ja PR1:lle (Priority Resolution) binäärijärjestelmän mukaisesti eli jos $PR0 = '1'$ ja $PR1 = '1' \Rightarrow CA3$ jne. CA3 käytetään verkon ohjaukseen ja erittäin viiveherkälle liikenteelle, kuten puheelle. CA2 käytetään viiveherkälle liikenteelle, kuten kuvalle ja äänelle. CA1 käytetään perustason liikenteelle. CA0 käytetään standardille LAN-liikenteelle (Local Area Network). Kuvassa 3.3 on esitetty periaatekuva kehyksen rakenteesta. Kuvassa näkyy kilpailujakso, jolloin pakettien lähetys on mahdollista suorittaa prioriteetin mukaisessa järjestyksessä ja prioriteetin valintajakso, jolloin lähetettävälle paketeille asetetaan prioriteetit tarpeen mukaan. Jos lähettäjä saa kuittauksen onnistuneesti vastaanotetusta paketista RIFS:n (Response Interframe Spacing) jälkeen, niin uusi prioriteetin valintajakso käynnistyy CIFS:n (Contention window Interframe Spacing) jälkeen [15].



Kuva 3.3. HomePlug 1.0-standardin kehyksen rakenteen periaatekuva. [15]

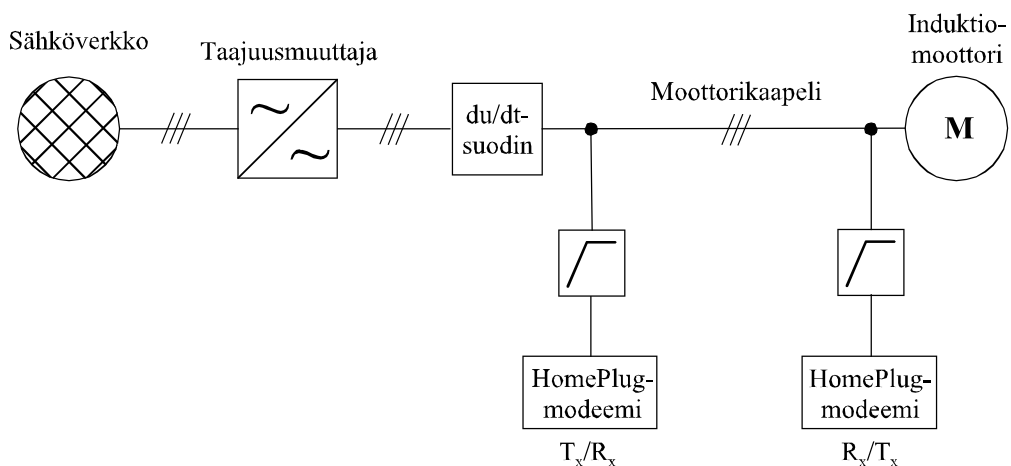
4 SIMULOINTIMALLIN KEHITYS TESTIYMPÄRISTÖLLE

Simulointimallin kehityksen tavoitteena on saada käsitys tiedonsiirtokanavan aiheuttamasta vaimennuksesta eri taajuuksilla modeemien lähetyspäästä vastaanottopäähän ilman mitausta. Simulointimalli helpottaa tiedonsiirron toimivuuden arviointia eri ympäristöissä. Simulointimallia voidaan myös hyödyntää kytkentärajapintojen suunnittelussa, koska eri parametrien vaikutus tiedonsiirron kokonaisvaimennukseen voidaan testata simuloimalla.

Tässä kappaleessa esitellään aluksi tiedonsiirtokanavan (osa sähköverkkoa) mallintamista. Eri komponenttimallien perusteella muodostetaan simulointimalli testiympäristölle. Lisäksi tarkastellaan hieman kohinan mallintamista ja vertaillaan saatuja simulointituloksia laboratoriossa mitattuihin.

4.1 Testiympäristön kuvaus

Testiympäristönä käytetään taajuusmuuttajakäyttöä, jossa moottoria voidaan syöttää joko du/dt -suotimen kanssa tai ilman. Testiympäristön mallintaminen tapahtuu väitöskirjassa [4] esitetyn menetelmän mukaan. Mallinnuksessa huomioidaan ainoastaan johtimet, joihin signaali kytketään. Tämä ei kuitenkaan ole ongelma väitöskirjan [4] mukaan, koska useimmat nykyisin asennettavista pienjännitemoottorikaapeleista ovat suojattuja ja symmetrisiä. Kolmijohtimisten moottorikaapeleiden symmetriaa, kun signaalin siirtoon käytetään ainoastaan kahta johdinta, on käsitelty enemmän artikkelissa [16]. Kuvassa 4.1 on esitetty mallinnettava testiympäristö.



Kuva 4.1. Mallinnettava testiympäristö. Kuvassa käytetyt merkinnät T_x ja R_x tarkoittavat lähetintä ja vastaanotinta. Tiedonsiirtokanavan pituus riippuu käytettävästä moottorikaapelin pituudesta. Kytkentärajapinnat on kytketty verkkoon (L1, PE)- tai (L1, L2, PE)-kytkennällä.

Kuvassa 4.1 esitetystä testiympäristöstä on tarkoitus mallintaa ainoastaan tiedonsiirtokanavana käytettävä osa. Lähetyspäänä voidaan käyttää moottorin päässä olevaa modeemia ja vastaanottopäänä taajuusmuuttajan läheisyydessä olevaa modeemia tai toisinpäin. Tiedonsiirtokanavan laatuun vaikuttaa käytettävä kaapelin pituus, kytkentärajapinnat, moottori ja taajuusmuuttaja sekä mahdollinen lähtösuodin. Edellä lueteltujen osien vaikutus täytyy huomioida kanavaa mallinnettaessa.

4.2 Tiedonsiirtokanavan mallintaminen

Jotta voisimme simuloida tiedonsiirtokanavaa, on tehtävä kanavamalli. Sähköverkkoa hyödyntävän tiedonsiirtokanavan simulointimallin muodostamiseen on olemassa useita eri vaihtoehtoja, mutta kaksi käytetyintä esitellään seuraavaksi. Ensimmäinen menetelmä on kehitetty radiokanavien mallintamiseen. Sähköverkonkin voidaan olettaa olevan samantapainen monitiekanava. Kanavan parametrien muodostus perustuu sähköverkon topologiaan tai kanavalle tehtäviin mittauksiin ja optimointialgoritmeihin. Tällaisia kanavamalleja on esitetty esimerkiksi artikkeleissa [17] ja [18]. Toinen vaihtoehto on soveltaa menetelmiä, joita käytetään sähkönjakeluverkon mallinnuksessa. Tällaisia menetelmiä on esitetty esimerkiksi artikkeleissa [19] ja [20]. Väitöskirjan [4] mukaan molemmilla menetelmillä omat hyvät ja huonot puolensa. Mutta tässä työssä valittiin viimeksi esitelty vaihtoehto, koska kuten väitöskirjassa [4], myös tässä testiverkon topologia tunnetaan ja yksittäisten komponenttien suurtaajuusominaisuudet mallinnetaan tai estimoidaan erikseen.

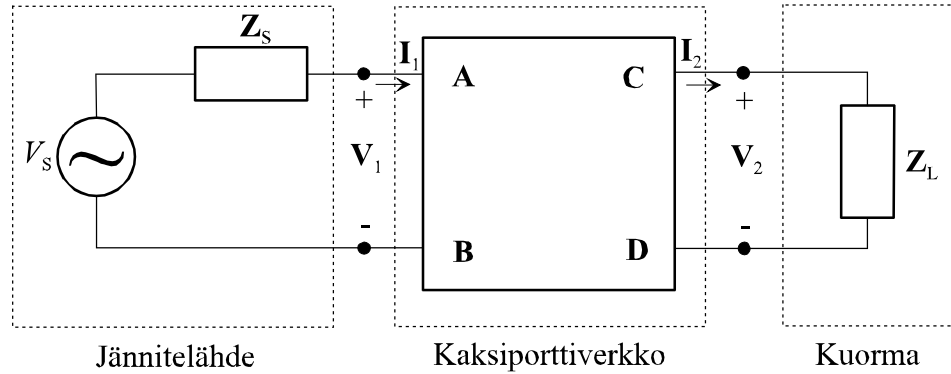
Tässä tapauksessa tiedonsiirtokanavana toimii osa sähköverkkoa. Simulointimallin tulee ottaa huomioon kanavan taajuusriippuva vaimennus ja häiriölähteet sekä kytkentärajapintojen ja impedanssien epäjatkuvuuskohtien vaikutukset. Simulointimallin avulla pystytään arvioimaan tiedonsiirtokanavan kokonaisvaimennusta taajuustasossa päästä päähän.

Tiedonsiirtokanavan siirtofunktion mallintamiseen voidaan soveltaa siirto- tai ketjuparametrimatriiseja. Analyysi on sovellettavissa TEM-aalloille (Transverse Electromagnetic). [4] TEM-aallossa sekä sähkö- että magneettikenttä ovat poikittaiset, eikä kummallakaan kentällä ole pitkittäistä komponenttia [21]. Resisttiiviset häviöt aiheuttavat moottorikaapeleissa myös pitkittäisen sähkökentän voimakkuuden, mutta tämä ei kuitenkaan estä sovelta-

masta analyysiä tiedonsiirtokanavan mallinnukseen. Tulojännitteen ja -virran ja lähtöjännitteen ja -virran suhde voidaan kuvata yhtälöllä

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

missä \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} ja \mathbf{D} ovat taajuudesta riippuvia kerroinmatriiseja. Yhtälö (4.1) voidaan esittää myös kuvan 4.2 avulla.



Kuva 4.2. Kaksiporttiverkko, johon on yhdistetty jännitelähde sekä kuormaimpedanssi. Jännitelähde sisältää sarjaan kytketyn sisäisen impedanssin. [4]

Kaksiporttiverkon taajuusriippuva tuloimpedanssi voidaan kuvata yhtälön (4.2) avulla.

$$\mathbf{Z}_{\text{in}} = \frac{\mathbf{AZ}_L + \mathbf{B}}{\mathbf{CZ}_L + \mathbf{D}}. \quad (4.2)$$

Kanavan siirtofunktiolle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{V}_2}{\mathbf{V}_s} = \frac{\mathbf{Z}_L}{\mathbf{AZ}_L + \mathbf{B} + \mathbf{CZ}_L\mathbf{Z}_s + \mathbf{DZ}_s}. \quad (4.3)$$

Siirtomatriisin kertoimet ovat riippuvaisia kuormaimpedanssin tyypistä. Tiedonsiirtokanavan kaapelin siirtomatriisi voidaan kuvata yhtälöllä

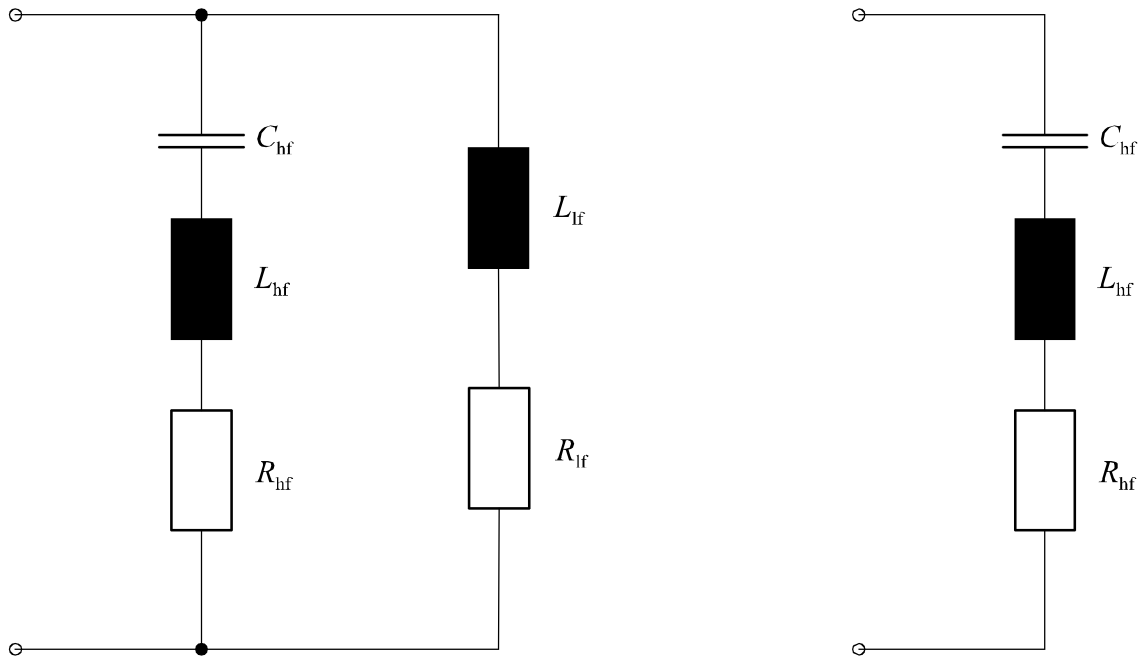
$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & \mathbf{Z}_0 \sinh(\gamma L) \\ \frac{1}{\mathbf{Z}_0} \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

missä L on kaapelin pituus ja γ etenemisvakio, jolle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} = \alpha + j\beta, \quad (4.5)$$

missä c on jakautunut kapasitanssi, g jakautunut konduktanssi, l jakautunut induktanssi ja r jakautunut resistanssi. α on vaimennuskerroin ja β etenemiskerroin.

Moottorin tuloimpedanssin mallintamiseen hyödynnetään artikkelissa [22] esitettyä mallia. Siinä moottorin mallina käytetään yksinkertaista kaksiporttituloimpedanssimallia. Malli on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3. Kaksiporttituloimpedanssimalli moottorille. Malli on tarkoitettu käytettäväksi taajuuskaistalla 10 kHz – 30 MHz. Vasemmanpuoleinen malli on tarkoitettu signaalikytkennöille (L1, L2) ja (L1, L2+L3), ja oikeanpuoleinen (L1, PE) ja (L1+L2+L3, PE). [4]

Kuvassa 4.3 esiintyvät parametrit tarkoittavat:

L_{if} = staattorikäämien induktanssi matalilla taajuuksilla

R_{if} = staattorikäämien resistanssi matalilla taajuuksilla

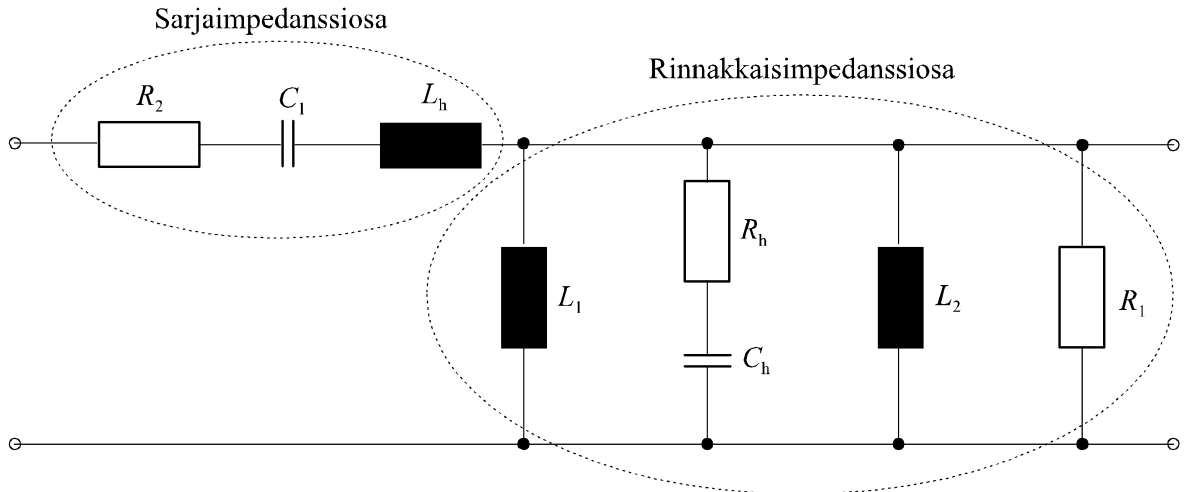
C_{hf} = kapasitanssi korkeilla taajuuksilla

L_{hf} = induktanssi korkeilla taajuuksilla

R_{hf} = resistanssi korkeilla taajuuksilla

Tässä tapauksessa voidaan käyttää oikeanpuoleista mallia myös (L1, L2)-kytkennälle, koska mallinnettava tiedonsiirtokanava on tarkoitus mallintaa taajuuskaistalla 100 kHz – 30 MHz. Näillä taajuuksilla vasemmanpuoleisen mallin osat L_{if} ja R_{if} näyttävät suurimpedanssisilta, joten ne voidaan jättää pois.

Kytkentärajapinnalle muodostettiin simulointimalli. Simulointimalli suunniteltiin kehitetyn kytkentärajapinnan perusteella. Suunnitellun kytkentärajapinnan mallintamisessa lasketaan sekä sarja, että rinnakkaisimpedanssit erikseen, jotta ne voidaan ottaa mallissa huomioon (kuva 4.4).



Kuva 4.4. Suunnitellun kytkentärajapinnan piirikaavio sekä (L1, PE)- että (L1, L2)-kytkennälle.

Sarjaan kytketyn impedanssin \mathbf{Z}_S tapauksessa siirtomatriisille voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Z}_S \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

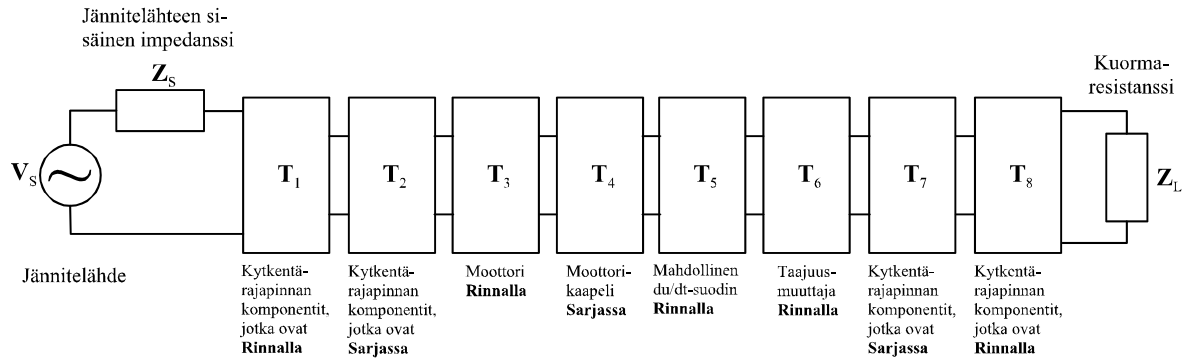
ja rinnankytketyn impedanssin \mathbf{Z}_P tapauksessa yhtälö

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/\mathbf{Z}_P & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Tiedonsiirtokanava lähteeltä kuormalle saattaa sisältää monia erilaisia verkko-osia, joissa on esimerkiksi erilaiset kaapeloinnit ja kuormat. Jokainen näistä osista täytyy kuvata omalla yksittäisellä siirtomatriisilla. Nämä osat on kytketty toisiinsa sarjaan. Tällöin siirtomatriisi \mathbf{T} lähteeltä kuormalle voidaan kuvata ketjusäännön mukaan yhtälöllä

$$\mathbf{T} = \prod_{i=1}^n \mathbf{T}_i, \quad (4.8)$$

missä n esittää verkko-osien määrää. Kuvassa 4.5 on esitetty kanavamalli testiympäristölle käyttämällä edellä esitettyjä siirtomatriiseja, kun tiedonsiirtokanava on moottorilta taajuusmuuttajalle.



Kuva 4.5. Kanavamalli testiympäristölle, joka on muodostettu käyttämällä siirtomatriiseja. Malli esittää tiedonsiirtokanavaa kuvalle 4.1, kun lähteenä on moottorin päässä oleva modeemi ja vastaanottimena taajuusmuuttajan päässä oleva modeemi.

4.3 Kanavamallin muodostus testiympäristölle

Tässä kappaleessa muodostetaan tiedonsiirtokanavalle siirtofunktio. Malli voidaan muodostaa sekä suoralle taajuusmuuttajakäytölle että taajuusmuuttajakäytölle, missä on du/dt-suodin. Suunnitellut kytkentärajapinnat otetaan laskennassa huomioon, mutta malli voidaan tehdä myös kanavalle, missä ei ole kytkentärajapintoja. Simuloitava tiedonsiirtokanava on esitetty kuvassa 4.1. Kaapelien parametreja, joita mittauksissa tullaan käyttämään, on esitetty taulukossa 4.1. Mittauksiin valittujen moottorien lasketut parametreja on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.1. Moottorikaapeleiden parametreja. Arvot ovat laskettuja keskiarvoja impedanssimittauksista taajuuskaistalle 100 kHz – 30 MHz. [4]

Kytkentä (L1, PE)					
Malli	Tyyppi	$Z_0 [\Omega]$	v_p / c_0	$l [\text{nH/m}]$	$c [\text{pF/m}]$
Pirelli	MCCMK 3x35+16	16	0.66	83	313
Pirelli	MCMK 3x70+35	15	0.63	82	342
Kytkentä (L1, L2)					
Malli	Tyyppi	$Z_0 [\Omega]$	v_p / c_0	$l [\text{nH/m}]$	$c [\text{pF/m}]$
Pirelli	MCCMK 3x35+16	27	0.64	141	190
Pirelli	MCMK 3x70+35	25	0.63	132	213

Taulukko 4.2. Lasketut parametrit kuvan 4.3 sarjaresonanssiin, joka mallintaa sähkömoottorin tuuloimpedanssin käyttäytymistä taajuuskaistalla 100 kHz – 30 MHz. Moottorin nimellisjännitteen perässä oleva merkki kertoo kytkentätavan, joka mittauksien aikana oli käytössä ja jonka mukaan moottorin nimellisarvot on taulukoitu. [4]

KytKentä (L1, PE)								
Malli	Tyyppi	I_N [A]	U_N [V]	P_N [W]	r / min	L_{hf} [nH]	C_{hf} [nF]	R_{hf} [Ω]
Invensys	T-01F160L4/01	28.5	400 (Δ)	15	1460	149	2.5	3
ABB	M2AA160L4	30	400 (Δ)	15	1455	140	0.8	6
Strömberg	XHUR368G2B3	43	400 (Δ)	22	1460	141	1.6	6
ABB	M2BA200MLA4B3	56	400 (Δ)	33	1473	239	2.3	2
ABB	M3BP315MLA4B3	202	690 (Y)	200	1486	407	13.9	1
ABB	M2BA35532B3	410	400 (Δ)	250	2980	270	12.2	1
KytKentä (L1, L2)								
Malli	Tyyppi	I_N [A]	U_N [V]	P_N [W]	r / min	L_{hf} [nH]	C_{hf} [nF]	R_{hf} [Ω]
Invensys	T-01F160L4/01	28.5	400 (Δ)	15	1460	198	1.7	5
ABB	M2AA160L4	30	400 (Δ)	15	1455	127	0.8	12
Strömberg	XHUR368G2B3	43	400 (Δ)	22	1460	127	0.8	12
ABB	M2BA200MLA4B3	56	400 (Δ)	33	1473	266	1.4	5
ABB	M3BP315MLA4B3	202	690 (Y)	200	1486	412	7.2	3
ABB	M2BA35532B3	410	400 (Δ)	250	2980	329	7.7	2

Kuvassa 4.5 esitettyä kaksiporttimallia käytetään tiedonsiirtokanavan mallintamiseen. Kaksiporttimalli sisältää kahdeksan siirtomatriisia ja kuormaimpedanssin. Ensimmäinen ja toinen siirtomatriisi kuvaa syöttävän sähköverkkomodeemin kytkentärajapinnan komponentteja, jotka ovat jännitelähteen kanssa rinnan ja sarjassa. Kolmas siirtomatriisi kuvaa moottoria, joka on jännitelähteen kanssa rinnan. Neljäs siirtomatriisi kuvaa moottorikaapelia, joka on kytketty moottorin ja taajuusmuuttajan välille. Kaapeli on jännitelähteen kanssa sarjassa. Viides siirtomatriisi kuvaa mahdollista du/dt-suodinta, joka on jännitelähteen kanssa rinnan. Kuudes siirtomatriisi kuvaa taajuusmuuttajaa, joka on jännitelähteen kanssa rinnan. Seitsemäs ja kahdeksas siirtomatriisi kuvaavat vastaanottavan sähköverkkomodeemin kytkentärajapinnan komponentteja, jotka ovat jännitelähteen kanssa sarjassa ja rinnan. Kuormaresistanssi on vastaanottavan modeemin kytkentärajapinnan kuormavastuksen R_l kanssa samankokoinen.

Ensimmäinen tiedonsiirtokanavan siirtomatriisi muodostetaan lähettävän sähköverkkomodeemin kytkentäraajapinnan komponenteille, jotka on kytketty rinnan jännitelähteen kanssa.

Siirtomatriisille $\mathbf{T}_1(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_1(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \mathbf{Z}_{p, \text{krp}}(f) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

missä $\mathbf{Z}_{p, \text{krp}}(f)$ esittää lähettävän modeemin kytkentäraajapinnan rinnakkaiskomponenttien impedanssia, joka voidaan laskea yhtälöstä

$$\mathbf{Z}_{p, \text{krp}}(f) = \frac{\mathbf{Z}_1(f)\mathbf{Z}_2(f)}{\mathbf{Z}_1(f) + \mathbf{Z}_2(f)}, \quad (4.10)$$

missä

$$\mathbf{Z}_1(f) = \frac{j2\pi f L_2 \cdot R_1}{j2\pi f L_2 + R_1} \quad (4.11)$$

ja

$$\mathbf{Z}_2(f) = \frac{j2\pi f L_1 \cdot \left(\frac{1}{j2\pi f C_h} + R_h \right)}{j2\pi f L_1 + \frac{1}{j2\pi f C_h} + R_h}. \quad (4.12)$$

Toinen siirtomatriisi muodostetaan lähettävän sähköverkkomodeemin kytkentäraajapinnan komponenteille, jotka on kytketty sarjaan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_2(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_2(f) = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Z}_{s, \text{krp}}(f) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

missä $\mathbf{Z}_{s, \text{krp}}(f)$ esittää lähettävän modeemin kytkentäraajapinnan sarjakomponenttien impedanssia, joka voidaan laskea yhtälöstä

$$\mathbf{Z}_{s, \text{krp}}(f) = R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_h. \quad (4.14)$$

Kolmas siirtomatriisi muodostetaan moottorille, joka on kytketty rinnan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_3(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_3(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \mathbf{Z}_M(f) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

missä $\mathbf{Z}_M(f)$ esittää moottorin tuloimpedanssia, joka voidaan laskea edellä esitellyn tuloimpedanssimallin avulla yhtälöstä

$$\mathbf{Z}_M(f) = R_{\text{hf}} + j2\pi f L_{\text{hf}} + \frac{1}{j2\pi f C_{\text{hf}}}. \quad (4.16)$$

Neljäs siirtomatriisi muodostetaan moottorikaapelille, joka on kytketty sarjaan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_4(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_4(f) = \begin{bmatrix} \cosh[\gamma(f)L] & \mathbf{Z}_0 \sinh[\gamma(f)L] \\ \frac{1}{\mathbf{Z}_0} \sinh[\gamma(f)L] & \cosh[\gamma(f)L] \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

missä kaapelin etenemisvakio on

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f), \quad (4.18)$$

missä

$$\alpha(f) = 0.5 \cdot 10^{-6} \cdot f^{0.63} \quad (4.19)$$

ja

$$\beta(f) = 2\pi f \sqrt{lc}, \quad (4.20)$$

ja kaapelin ominaisimpedanssi

$$\mathbf{Z}_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}. \quad (4.21)$$

Viides siirtomatriisi muodostetaan mahdolliselle du/dt-suotimelle, joka on kytketty rinnan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_5(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_5(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \mathbf{Z}_{\text{du/dt}}(f) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

missä $\mathbf{Z}_{\text{du/dt}}(f)$ esittää du/dt-suotimen tuloimpedanssia, joka voidaan ottaa mallinnuksessa huomioon hyödyntämällä suotimen mitattua tuloimpedanssia.

Kuudes siirtomatriisi muodostetaan taajuusmuuttajalle, joka on kytketty rinnan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_6(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_6(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\mathbf{Z}_1(f)} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.23)$$

missä $\mathbf{Z}_1(f)$ esittää taajuusmuuttajan tuloimpedanssia, joka voidaan ottaa mallinnuksessa huomioon hyödyntämällä taajuusmuuttajan mitattua tuloimpedanssia.

Seitsemäs siirtomatriisi muodostetaan vastaanottavan sähköverkkomodeemin kytkentärajapinnan komponenteille, jotka on kytketty sarjaan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_7(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_7(f) = \mathbf{T}_2(f). \quad (4.24)$$

Kahdeksas siirtomatriisi muodostetaan vastaanottavan sähköverkkomodeemin kytkentärajapinnan komponenteille, jotka on kytketty rinnan jännitelähteen kanssa. Siirtomatriisille $\mathbf{T}_8(f)$ voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{T}_8(f) = \mathbf{T}_1(f). \quad (4.25)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea koko siirtomatriisi ketjusääntöä hyödyntäen yhtälöstä

$$\mathbf{T}(f) = \prod_{i=1}^8 \mathbf{T}_i(f). \quad (4.26)$$

Yhtälöä (4.26) ei kannata ratkaista tässä tapauksessa yleisessä muodossa, koska siitä tulisi liian pitkä. Nyt voidaan laskea kokonaissiirtofunktio, kun tiedetään $\mathbf{Z}_L(f)$. Tiedonsiirtokanavan siirtofunktiolle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\mathbf{H}(f) = \frac{\mathbf{V}_2(f)}{\mathbf{V}_s(f)} = \frac{\mathbf{Z}_L(f)}{\mathbf{A}(f)\mathbf{Z}_L(f) + \mathbf{B}(f) + \mathbf{C}(f)\mathbf{Z}_L(f)\mathbf{Z}_s(f) + \mathbf{D}(f)\mathbf{Z}_s(f)}, \quad (4.27)$$

missä $\mathbf{A}(f) = \mathbf{T}(1,1)$, $\mathbf{B}(f) = \mathbf{T}(1,2)$, $\mathbf{C}(f) = \mathbf{T}(2,1)$ ja $\mathbf{D}(f) = \mathbf{T}(2,2)$.

Du/dt-suodinta käytettäessä on järkevää jättää huomioimatta taajuusmuuttajan siirtomatriisi, koska sen vaikutus tiedonsiirtokanavan vaimennukseen on minimaalinen. Tämän aiheuttaa se, että taajuusmuuttajan ja kanavan välissä olevat sarjakuristimet nostavat kanavan

impedanssitason huomattavasti taajuusmuuttajan suuntaan simuloinnissa käytettävällä taajuuskaistalla. Mutta jos kanavaa mallinnetaan ilman du/dt-suodinta, on taajuusmuuttajan vaikutus huomioitava. Asiaa selvitetään vielä mittauksien yhteydessä.

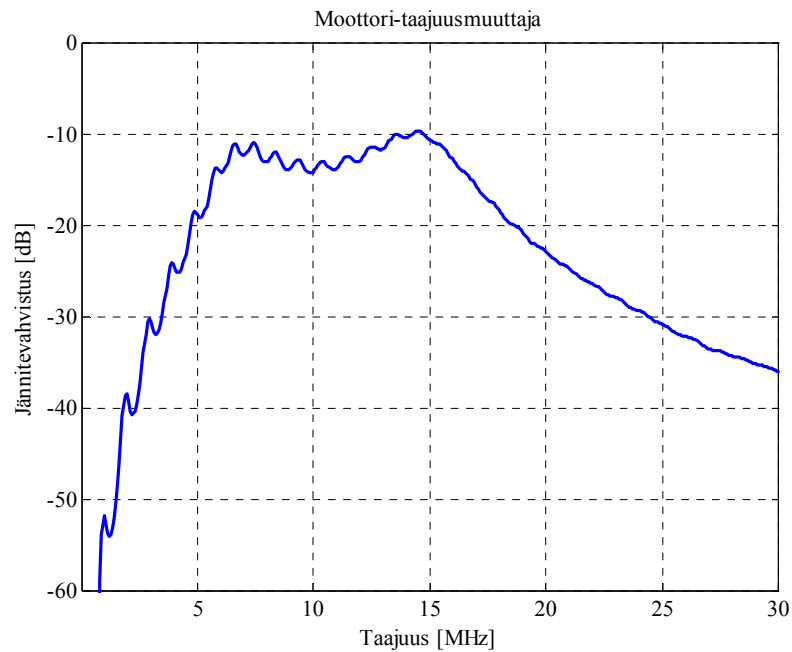
4.4 Simuloidut amplitudi- ja vaihevasteet testiympäristölle

Amplitudi- ja vaihevaste ovat tärkeitä tiedonsiirtokanavan kuvaamisessa. Amplitudivasteesta voidaan lukea signaalin vaimennus eri taajuuksilla, kun signaali etenee kanavassa lähettimeltä vastaanottimelle. Lisäksi signaali-kohinasuhteesta ja saavutettavissa olevasta kaistanleveydestä voidaan määrittää maksimitiedonsiirtonopeus, joka on mahdollista teoreettisesti saavuttaa. Kanavan lineaarinen vaihevaste olisi kaikkein paras ominaisuus, koska epälineaarisuudet johtavat etenemisestä aiheutuviin signaalin aaltomuodon muutoksiin. Tämä taas johtaa helposti synkronisointiongelmiiin. Vaihevasteen lineaarisuutta kuvataan termillä ryhmäviive

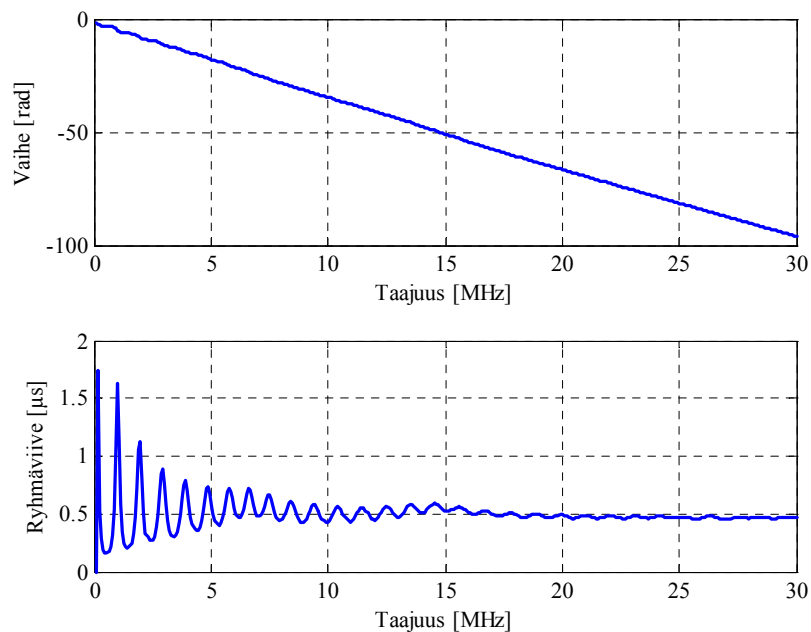
$$\tau_g(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(f)}{df}, \quad (4.28)$$

missä θ kuvaa signaalin vaihetta. Linearisella kanavalla ryhmäviive on vakio. Ryhmäviive voidaan tulkita signaalin taajuuskomponenttien etenemisaikana systeemin tulosta lähtöön. [4]

Kuvassa 4.6 on esitetty testikanavan simuloitu amplitudivaste taajuusalueella 100 kHz – 30 MHz, kun testilaitteistossa oli taajuusmuuttaja ACS400, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), du/dt-suodin, moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja vaiheiden välille suunniteltu kytkentäraja- pinta. Kytkentä oli (L1, L2, PE). Kuvassa 4.7 on esitetty saman testikanavan simuloitu vaihevaste ja ryhmäviive taajuuskaistalla 100 kHz – 30 MHz. Vaihevasteessa on otettu huomioon signaalin eteneminen, sillä vaihevaste kuvaa signaalin vastaanotto- ja lähtöpisteen välisen vaihe-eron.



Kuva 4.6. Testikanavan simuloitu amplitudivaste taajuusalueella 100 kHz – 30 MHz, kun testilaitteistossa oli taajuusmuuttaja ACS400, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), du/dt-suodin, moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja vaiheiden välille suunniteltu kytkentärajäpinta. KytKentä oli (L1, L2, PE).



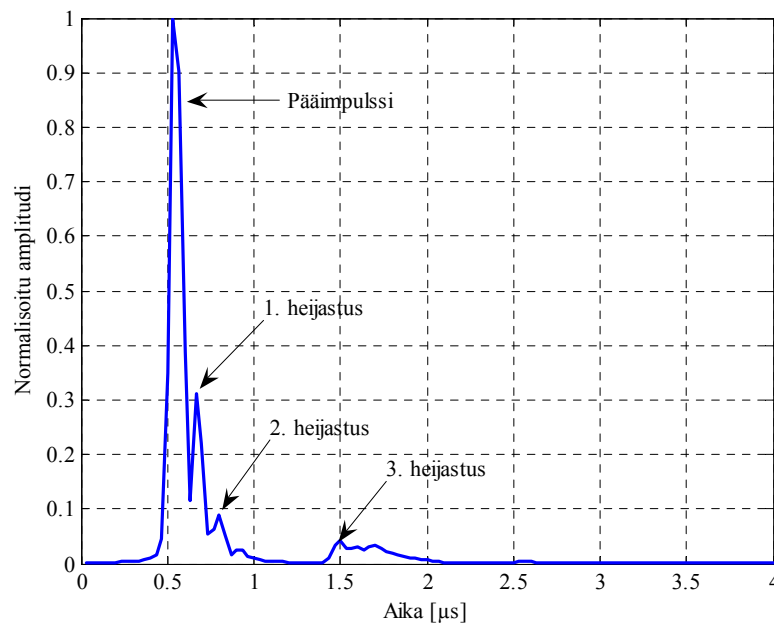
Kuva 4.7. Testikanavan simuloitu vaihevaste ja ryhmäviive taajuuskaistalla 100 kHz – 30 MHz, kun testilaitteistossa oli taajuusmuuttaja ACS400, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), du/dt-suodin, moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja vaiheiden välille suunniteltu kytkentärajäpinta. KytKentä oli (L1, L2, PE).

4.5 Testiympäristön impulssivaste

Tiedonsiirtokanavan impulssivaste voidaan muodostaa kanavan simuloidusta taajuusvasteesta käänteisellä diskreetillä Fourier-muunnoksella (IDFT \cong Inverse Discrete Fourier Transform) seuraavasti:

$$\mathbf{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{X}(k) e^{j2\pi kn/N} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4.29)$$

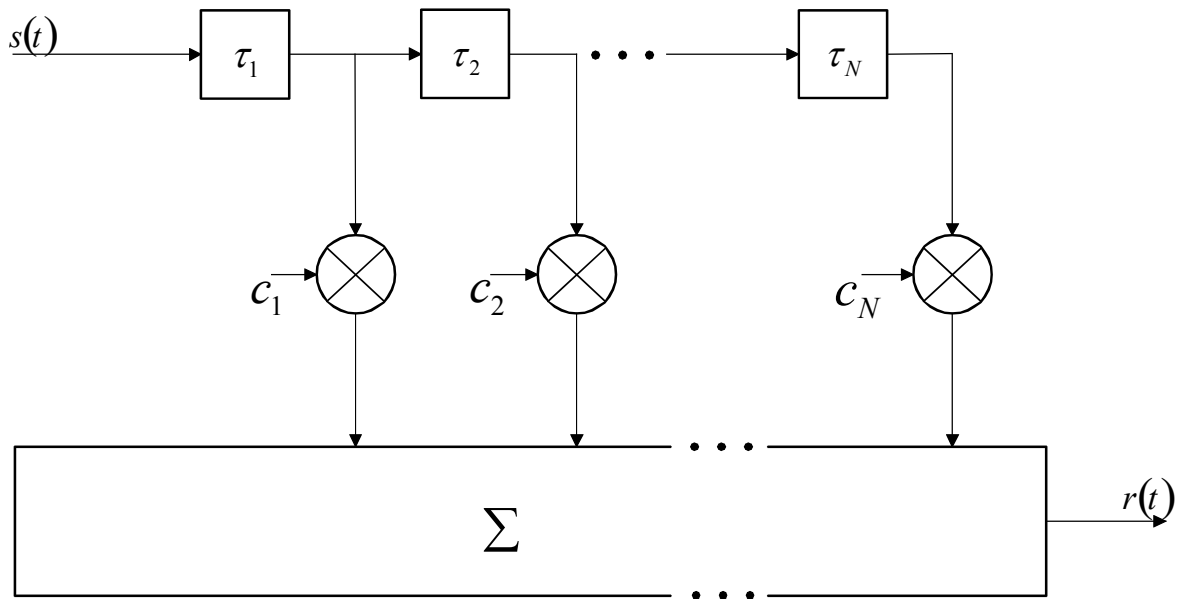
missä $\mathbf{x}(n)$ on diskreetti aikasarja, joka esittää kanavan impulssivastetta ja $\mathbf{X}(k)$:t ovat diskreetin Fourier-muunnoksen kertoimia, jotka esittävät kanavan N -pisteistä taajuusvastetta. Kuvassa 4.8 on esitetty testikanavan impulssivaste, jonka amplitudi on normalisoitu siten, että sen maksimiarvo on yksi. Kuvasta nähdään selvästi kanavassa esiintyvä monitie-eteneminen, joka on hyvin tyypillistä sähköverkkokanaville. Monitie-etenemisen aiheuttaa impedanssien epäsovitus ja haarat, joihin lähetetty teho jakautuu. Ensimmäinen impulssi saavuttaa vastaanottimen noin $0.53 \mu\text{s}$ kuluttua. Koska matka lähettimen ja vastaanottimen välillä oli noin 90 m, saadaan sähkömagneettisen aallon etenemisnopeudeksi $0.6c_0$. Osa lähetetystä tehosta kuluu moottorissa, osa heijastuu siitä takaisin impedanssin epäsovitukselta johtuen. Ensimmäinen heijastus kuvassa 4.8 aiheutuu signaalin heijastumisesta moottorista takaisin. Viive pääimpulssin ja ensimmäisen heijastuksen välillä on noin $0.14 \mu\text{s}$.



Kuva 4.8. Testikanavan impulssivaste, jonka amplitudi on normalisoitu maksimiarvoon. Eniten merkittävät impulssit on merkitty kuvaan nuolilla.

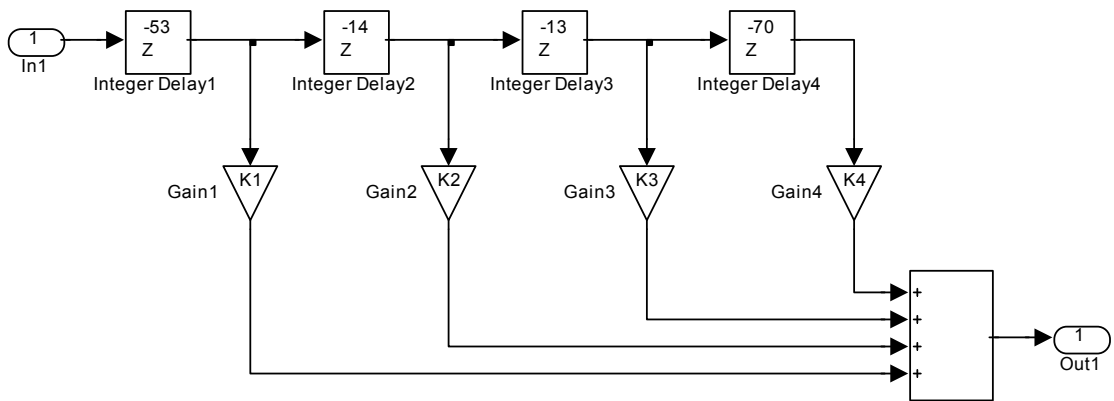
4.6 Kanavan Simulink-malli

Impulssivastekuvaajan perusteella kanavalle voidaan muodostaa ns. kaikumalli (echomodel). Sen etuna on yksinkertaisuus ja se on laskennallisesti tehokas tapa kuvata kanavan monitie-eteneminen ja vaimennus aikatasossa. Tätä voidaan hyödyntää tiedonsiirron fyysisen kerroksen simuloinnissa. Kaikumallissa kanavaa kuvataan viive- ja kerroinlohkojen avulla kuvan 4.9 mukaisesti, missä $s(t)$ on kanavaan tuleva signaali, $r(t)$ kanavasta lähtevä signaali, τ_N N :s viive ja c_N N :s kompleksinen kerroin.



Kuva 4.9. Kaikumallin perusrakenne. [2]

Testiympäristölle muodostettiin edellä esitelty kanavamalli, jotta tiedonsiirtoa voitaisiin simuloida Simulink-ympäristössä. Kanavamallin muodostuksessa käytettiin apuna kuvan 4.8 impulssivastekuvaajaa, josta saatiin viivelohkoille arvot impulssien ajallisten sijaintien perusteella. Kompleksisia kertoimia ei luonnollisestikaan pystytty katsomaan kuvasta, vaan ne selvitettiin impulssivasteen laskennallisten tulosten perusteella. Tässä tapauksessa otettiin huomioon ainoastaan neljä tärkeintä impulssia, koska niiden voidaan olettaa kuvaavan riittävän hyvin kanavaa. Kanavamalli on diskreetti, jonka näytteenottotaajuutena käytetään 100 MHz. Testiympäristölle muodostettu Simulink-kanavamalli on esitetty kuvassa 4.10.



Kuva 4.10. Testiympäristölle muodostettu Simulink-kanavamalli. Näytteenottotaajuutena on käytetty 100 MHz.

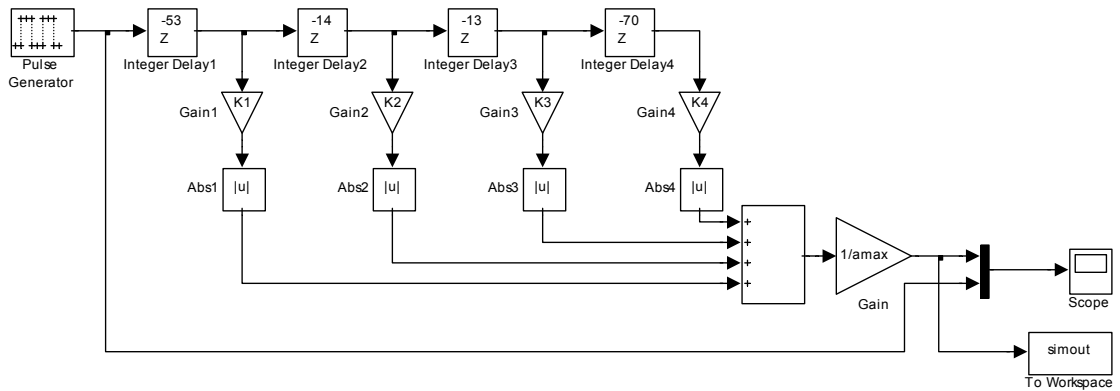
Kanavamallissa esiintyvien diskreettien viivelohkojen kertoimet on laskettu näytteenottotaajuuden mukaan yhtälöstä

$$d = \tau_N F_s, \quad (4.30)$$

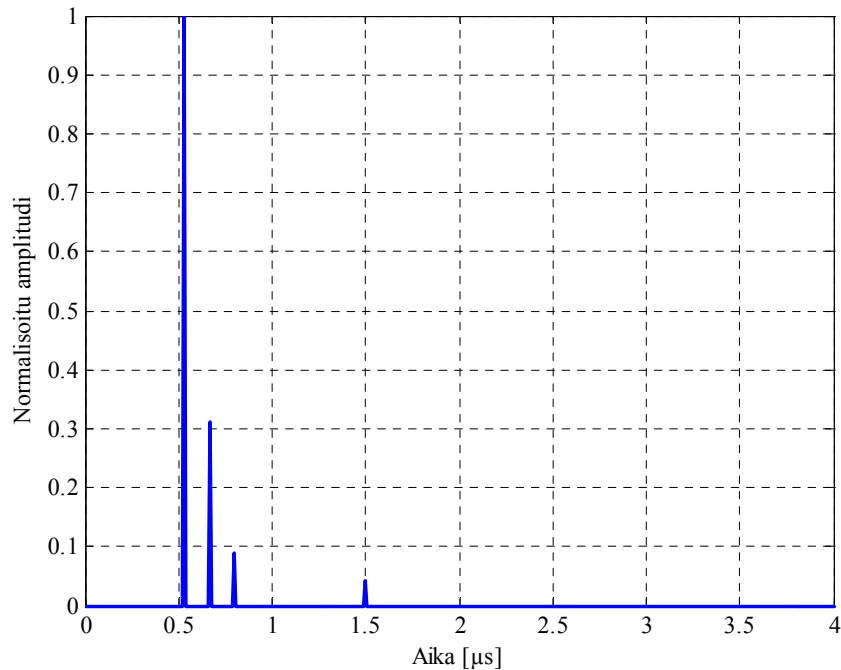
missä τ_N N :s viive ja F_s näytteenottotaajuus. Tässä tapauksessa näytteenottotaajuutena käytettiin 100 MHz, joka riittää kuvaamaan kaikki alle 50 MHz taajuudet Nyquistin näytteenottoteoreeman mukaan

$$F_N = \frac{F_s}{2}, \quad (4.31)$$

missä F_s on näytteenottotaajuus ja F_N Nyquistin taajuus, joka on suurin mahdollinen taajuus, mikä voidaan kuvata näytteenottotaajuudella. Tarkoituksena on simuloida tiedonsiirto-kanavaa taajuuksilla aina 30 MHz:in saakka. Kaikumallin toimivuus testattiin syöttämällä kuvan 4.10 kanavaan lyhyt impulssi ja vertaamalla saatua tulosta kuvan 4.8 impulssivaste-kuvaajaan. Kuvassa 4.11 on esitetty impulssivasteen simuloimista varten tehty kytkentä ja kuvassa 4.12 saatu simulointitulokset.



Kuva 4.11. Tiedonsiirtokanavan amplitudin maksimiarvoon normalisoidun impulssivasteen simulointiin tarvittava kytkentä. Diskreetin pulssigeneraattorin näytteenottoaika on 10^{-8} s.



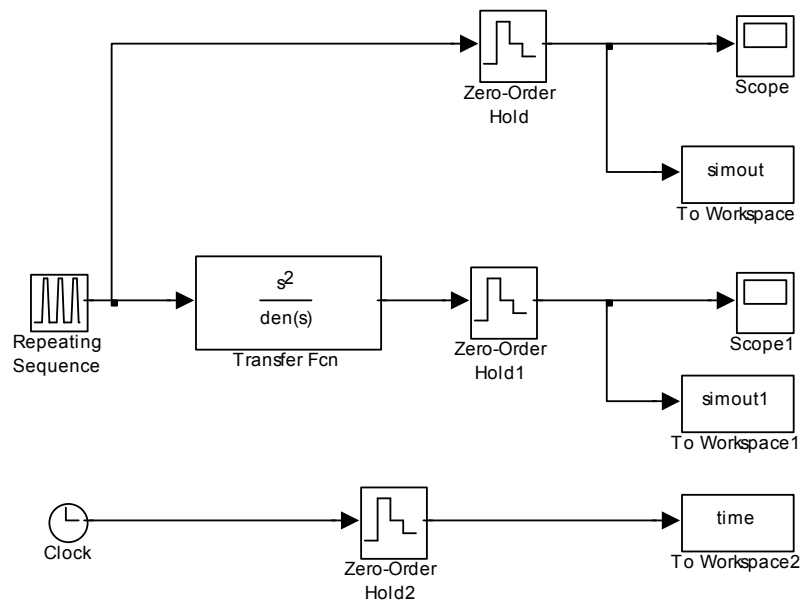
Kuva 4.12. Kanavamallille Simulink-ympäristössä simuloitu amplitudin maksimiarvoon normalisoitu impulssivaste.

Kuvassa 4.11 esiintyvät kertoimet K1 – K4 ovat kompleksisia kertoimia, jotka on saatu suoraan impulssivasteen kertoimista. Kuvan 4.12 impulssivaste näyttää hyvin samanlaiselta kuin kuvassa 4.8 esitettykin. Täten rakennettu malli kuvaa tältä osin testiympäristöä tiedonsiirtokanavana varsin hyvin.

Edellä esiteltyä tiedonsiirtokanavamallia voisi käyttää tiedonsiirtonopeuksien simuloimiseen erilaisissa ympäristöissä, jos esimerkiksi HomePlug-standardille tehtäisiin oma simuloimallimalli. Kanavassa esiintyvää taajuusmuuttajan aiheuttamaa kohinaa pitäisi myös simuloida. Tätä käsitellään lyhyesti seuraavaksi.

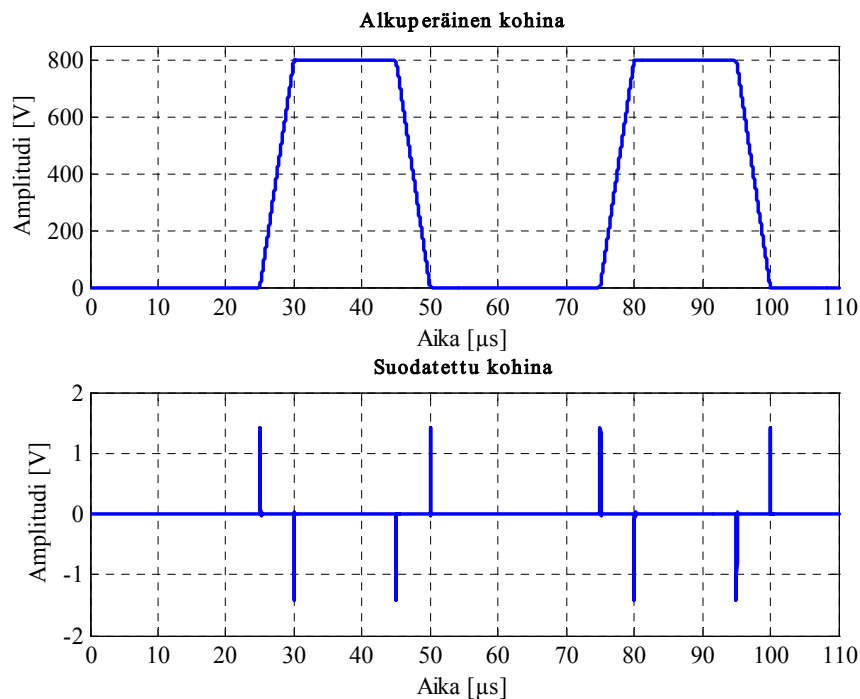
4.7 Kohinan simulointi

Kohinan simuloiminen on olennainen osa tiedonsiirtokanavaa, koska se vaikuttaa saataviin tiedonsiirtonopeuksiin. Sovelluskohteessa pääosa kohinatehosta syntyy taajuusmuuttajan lähtöasteen transistorien kytkennöistä. Kohinaa voidaan simuloida samanlaisilla kantiaalloilla kuin kytkentärajapintojen suunnittelussakin. Taajuusmuuttajakäytön, missä on du/dt -suodin, aiheuttama kohina, joka tulee kytkentärajapinnan läpi, voidaan simuloida syöttämällä kantiaaltoa (0 – 800 V, 5 μ s) liitteessä I johdetun siirtofunktion läpi. Tämän jälkeen kohina diskretoidaan näytteenottotaajuudella 100 MHz. Kuvassa 4.13 on esitetty kyseinen toimenpide Simulink-mallin avulla.



Kuva 4.13. Häiriökohinan simulointia varten tehty malli. Diskretointi tehdään 100 MHz näytteenottotaajuudella. Kantiaallon nousu- ja laskureunat ovat 5 μ s ja amplitudi 800 V.

Kuvassa 4.14 on esitetty alkuperäinen ja suodatettu kohina. Kuvasta nähdään, että kytkentärajapinnan suodatustulos on aika lailla samanlainen kuin alkuperäisestä mallista tehtykin simulointi. Tämä tulos ei kuitenkaan ollut niin yksinkertainen kuin miltä se näyttää, sillä saatuun suodatustulokseen vaikutti ratkaisevasti se, mitä ratkaisumenetelmää simuloinnin laskemisessa käytettiin. Tässä tapauksessa *ode23t (Mod. stiff/Trapezoidal)* osoittautui parhaimmaksi, kun $0.1 \mu\text{s}$ asetettiin maksimiaskelpituudeksi ja 10^{-6} suhteelliseksi toleranssiksi. Muut parametrit pidettiin alkuperäisinä. Ratkaisumenetelmien paremmuus ratkaistiin vertaamalla saatuja tuloksia aikaisemmin saatuihin simulointituloksiin. Simuloitaessa taajuusmuuttajan aiheuttamia kytkentöjä, pitäisi taajuusmuuttajalle olla myös simulointimalli, joka vastaisi paremmin todellista tilannetta sen lähtöjännitteen kannalta. Tämä on tarpeellista vasta siinä vaiheessa, kun halutaan simuloida tietyssä ympäristössä saavutettavia tiedonsiirtonopeuksia.

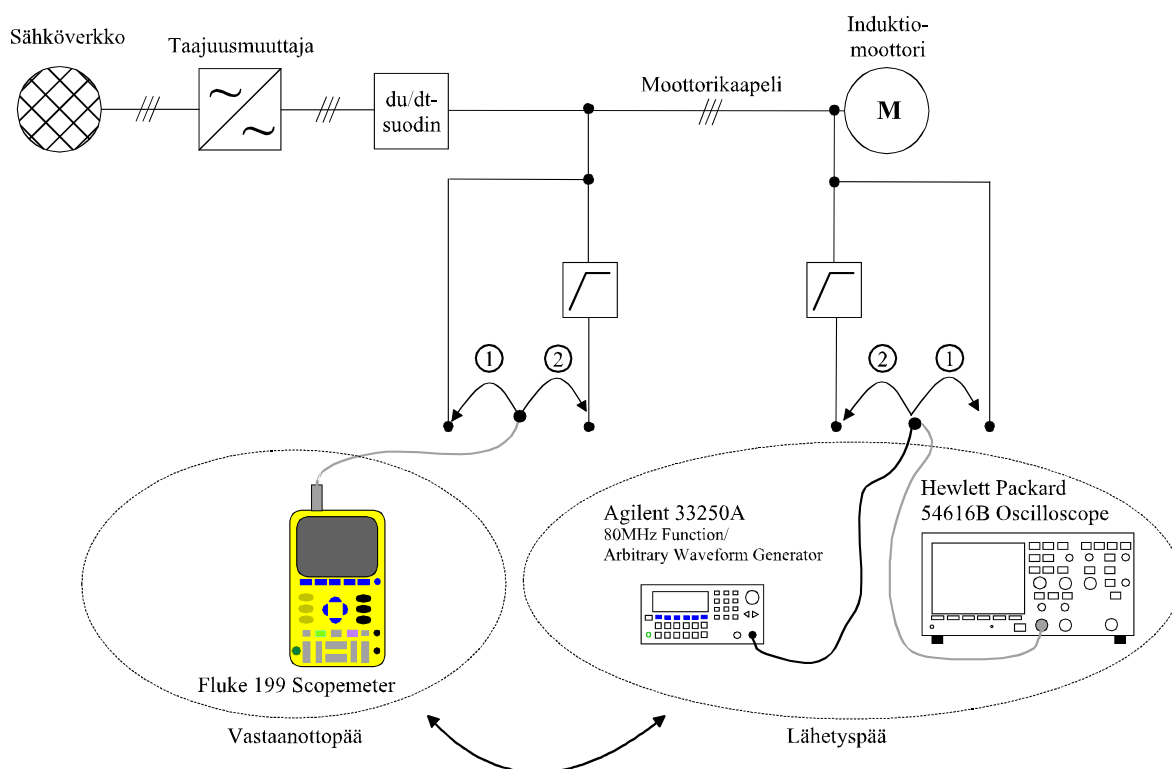


Kuva 4.14. Simuloitu taajuusmuuttajan alkuperäinen ja suodatettu kohina, missä on du/dt -suodin.

4.8 Laboratoriomittauksia testiympäristölle

Erilaisille testiympäristöille tehtiin mittauksia taajuuskaistalla $100 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}$, jotta saatiin selville kanavien todellinen jännitevaimennus erilaisissa tapauksissa. Mittauksien avulla pystyttiin myös testaamaan kehitetyn simulointimallin toimivuus eri parametrien vaihtuessa. Mittaukset tehtiin syöttämällä kanavaan signaaligeneraattorilla sinisignaalia.

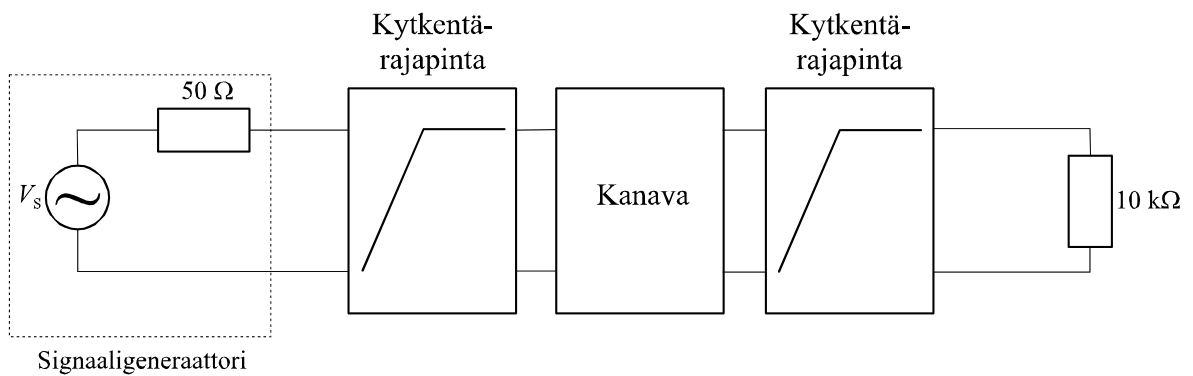
Sekä lähetys- että vastaanottopään jännite mitattiin oskilloskoopilla (kuva 4.15). Jännitteestä mitattiin huipusta huippuun -arvo (peak-to-peak). Kanavan jännitevahvistus mitattiin sekä ilman kytkentärajapintoja että kytkentärajapintojen kanssa. Mittaukset ilman kytkentärajapintoja tehtiin 100 kHz:n välein taajuuskaistalle 100 kHz – 3 MHz ja 200 kHz:n välein taajuuskaistalle 3 MHz – 30 MHz. Alemmalle taajuuskaistalle mittaukset tehtiin tarkemmin, koska muutokset vahvistuksessa tällä taajuusalueella olivat huomattavasti nopeampia kuin korkeammilla taajuuksilla. Kytkentärajapintojen kanssa mittaukset aloitettiin vasta 3.8 MHz:stä, koska tätä matalammilla taajuuksilla vaimennus oli liian suuri mitattavaksi. Mittauksissa käytettiin sekä (L1, PE)- että (L1, L2, PE)-kytkentöjä. Tärkeimpiä jännitevahvistusmittaustuloksia tullaan esittämään tässä diplomityössä myös jäljempänä.



Kuva 4.15. Kanavan jännitevahvistukseen käytetty mittausjärjestely. Jännitevahvistus mitattiin sekä kytkentärajapintojen kanssa että ilman ja lisäksi molempiin suuntiin eli yhteensä neljä mittausta jokaiselle testijärjestelylle. Kuvassa näkyy mittauksissa käytetyt mittalaitteet. Tapauksessa 1 mitataan jännitevahvistus ilman kytkentärajapintoja ja tapauksessa 2 kytkentärajapintojen kanssa.

Kuvassa 4.15 esitetystä jännitevahvistuksen mittausjärjestelystä jännite mitattiin 10 k Ω vastuksen yli (kuva 4.16). Kuormitusvastuksen suuruus vaikuttaa kanavan kokonaisvahvistuksen suuruuteen. Tehovahvistus saataisiin suoraan mitattua, jos jännite mitattaisiin 50 Ω vastuksen yli. Tällöin mitattu kanavan jännitevahvistus olisi huomattavasti pienempi kuin

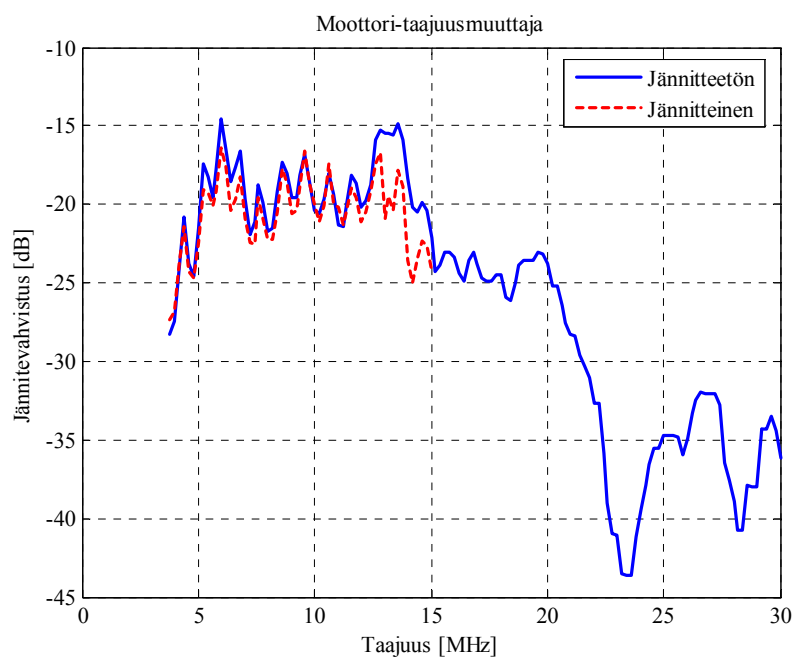
edellä esitetyllä mittaussuunnitelmällä. Tämän takia jännitteen mittaaminen olisi myös huomattavasti hankalampaa, koska mitattavat jännitteet olisivat pienempiä. Suuremman kuormitusvastuksen käyttöä puoltaa myös se, että itse modeemit vastaanottavat signaalin suuriresistanssisen vastuksen yli. Jännitevahvistuksen suuruus riippuu täysin mitattavasta ja käytetyistä kytkentärajapinnoista, mikä on aina otettava huomioon tuloksia analysoidessa. Periaatteessa mittaustavoilla ei ole silloin eroa, jos sekä kohina- että hyötysignaali mitataan samalla tavalla ja niitä vertaillaan keskenään. Kuvassa 4.16 on esitetty jännitteen mittaussuunnitelma, jota käytettiin eri kanavien jännitevahvistusmittauksissa sekä kytkentärajapintojen läpituloivan kohinan mittaustavoissa.



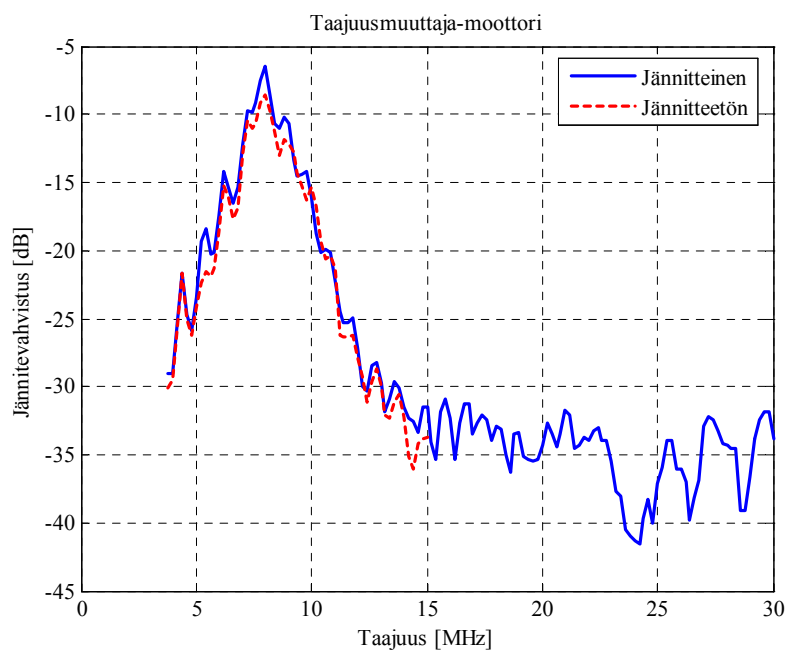
Kuva 4.16. Kanavan jännitevahvistusmittauksissa käytetty jännitteen mittaussuunnitelma.

4.8.1 Pääjännitteen vaikutus tiedonsiirtokanavan vaimennukseen

Kaikki jännitevahvistusmittaukset tehtiin jännitteettömänä, mutta mittausten oikeellisuus todettiin mittaamalla yhden testijärjestelyn kanavan jännitevahvistus jännitteellisenä. Kuvissa 4.17 ja 4.18 on esitetty kyseisten mittausten tulokset. Mittaukset tehtiin ainoastaan 15 MHz:in saakka, koska mittaustavoissa käytettiin erilaista signaaligeneraattoria (Hameg HM8131-2) kuin muissa testeissä mahdollisen särkymisvaaran takia. Kuvista 4.17 ja 4.18 nähdään, ettei mainittavaa eroa synny mitataanko kanavan jännitevahvistus jännitteettömänä vai jännitteisenä. Tulos oli odotettu, koska testiympäristön komponenttien ominaisuuksiin jännitteen kytkemisen ei pitäisi vaikuttaa. Signaalitaajuudet eivät osallistu mekaanisen tehon tuottoon moottorissa.



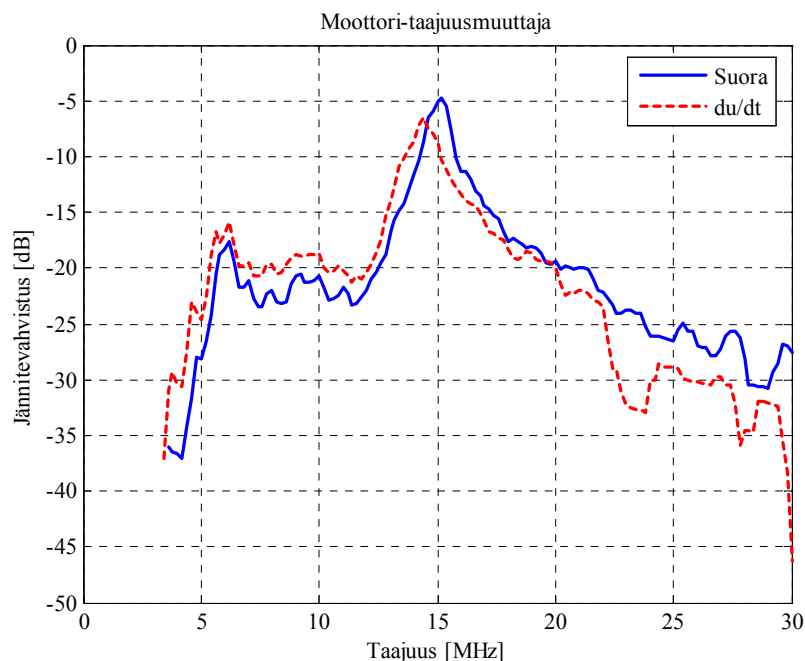
Kuva 4.17. Tiedonsiirtokanavan jännitevahvistus moottorilta taajuusmuuttajalle jännitteettömänä taajuuskaistalla 3.8 – 30 MHz ja jännitteisenä taajuuskaistalla 3.8 – 15 MHz. Testilaitteistona oli taajuusmuuttaja ACS400, du/dt-suodin, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), kaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja vaiheiden välille suunniteltu kytkentärajpinta. Kytkentä (L1, L2, PE).



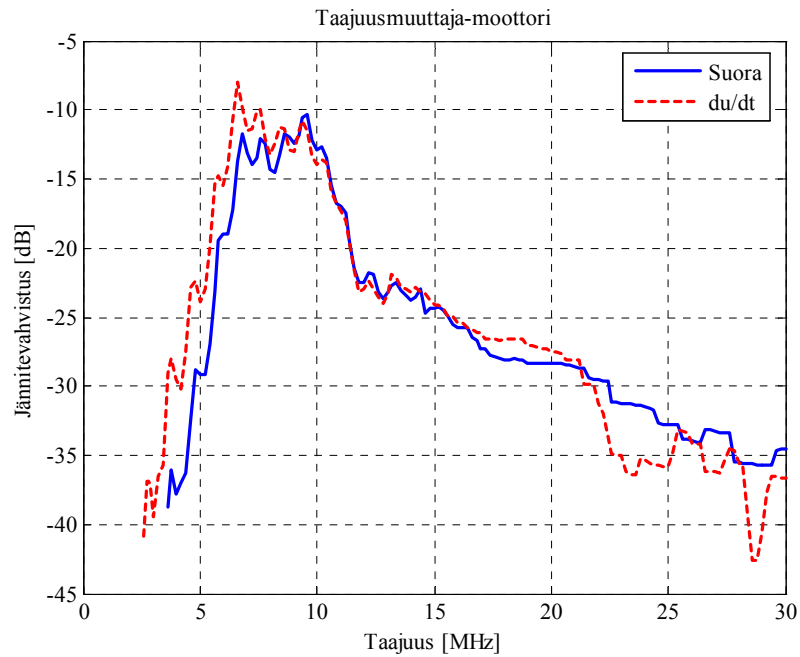
Kuva 4.18. Tiedonsiirtokanavan jännitevahvistus taajuusmuuttajalta moottorille jännitteettömänä taajuuskaistalla 3.8 – 30 MHz ja jännitteisenä taajuuskaistalla 3.8 – 15 MHz. Testilaitteistona oli taajuusmuuttaja ACS400, du/dt-suodin, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), kaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja vaiheiden välille suunniteltu kytkentärajpinta. Kytkentä (L1, L2, PE).

4.8.2 Du/dt-suotimen vaikutus

Kuvissa 4.19 – 4.20 on esitetty mitatut jännitevahvistukset du/dt-suotimen kanssa ja ilman eri suuntiin. Testijärjestelyssä oli taajuusmuuttaja ACS400, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), kaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m), vaiheen ja suojamaan välille suunniteltu kytkentärajapinta. Kytkenä oli (L3, PE). Mittauksissa täytyy huomioida, että kanavan tuloimpedanssi lähetyspäässä on taajuusriippuva, jonka takia kanavaan syötettävän jännitteen suuruus vaihtelee. Tämä ei kuitenkaan vaikuta mitattuihin jännitevahvistuksiin. Kuvista 4.19 ja 4.20 nähdään, että du/dt-suotimen lisääminen ei vaikuta oleellisesti kanavan jännitevahvistukseen jännitteettömänä, koska taajuusmuuttajan lähtöaste on tällöin korkeaimpedanssisessa tilassa. Täten voidaan todeta, että du/dt-suotimen lisäämisestä taajuusmuuttajakäyttöön ei ole ainakaan haittaa tiedonsiirron kannalta. Siitä on tosin paljon hyötyä, koska taajuusmuuttajan lähtöasteen tehotransistorien kytkentöjen aiheuttamat jännitteiden nousureunat saadaan huomattavasti loivemmiksi du/dt-suotimella. Suotimen avulla pystytään kasvattamaan impedanssitasoa taajuusmuuttajan suuntaan sen käydessä. Taajuusmuuttajan lähtöasteen tehokytkimet eivät näytä samanlaiselta impedanssilta ilman lähtösuodinta jännitteisenä kuin jännitteettömänä.



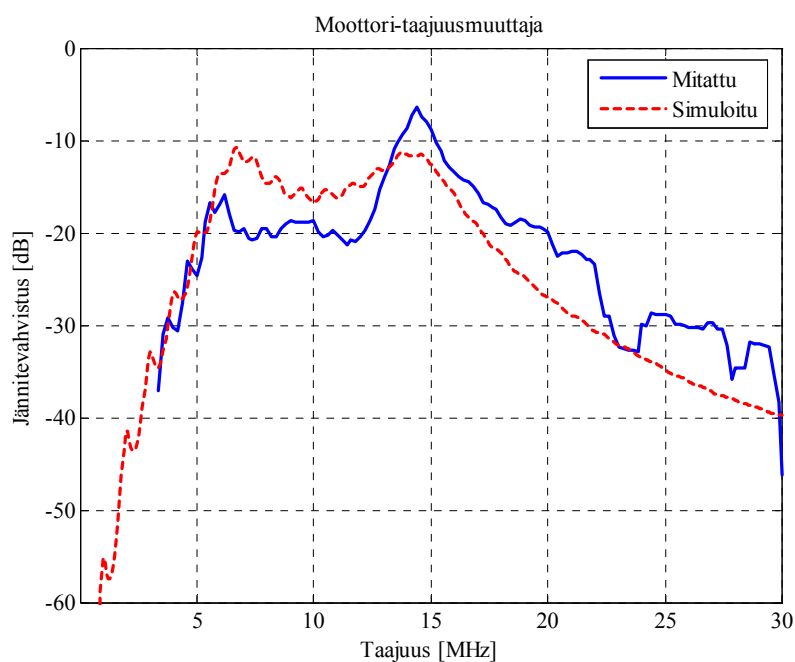
Kuva 4.19. Mitattu jännitevahvistus moottorilta taajuusmuuttajalle sekä suoralle taajuusmuuttajakäytölle että taajuusmuuttajakäytölle, missä käytetään du/dt-suodinta. Mittaus on tehty kytkentärajapintojen kanssa. Taajuuskaista oli 3.6 – 30 MHz.



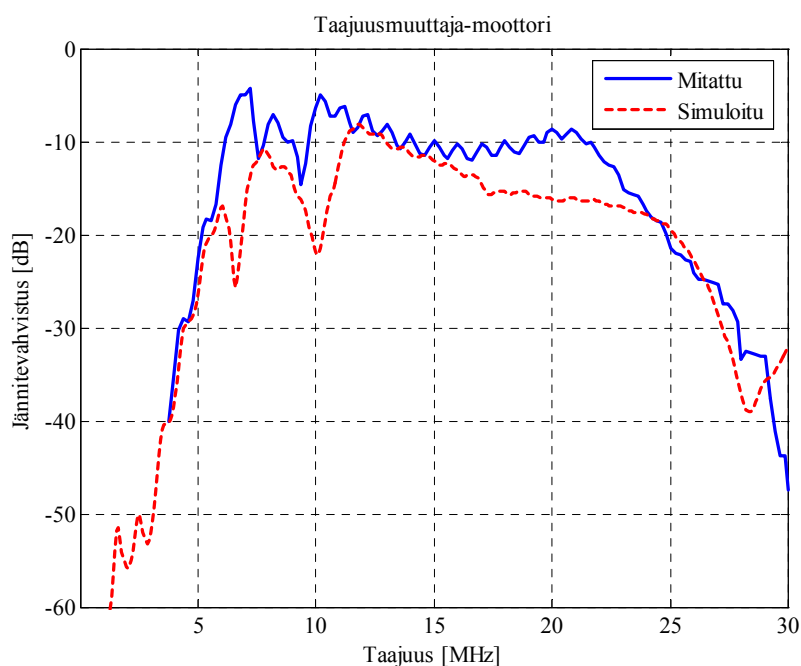
Kuva 4.20. Mitattu jännitevahvistus taajuusmuuttajalta moottorille sekä suoralle taajuusmuuttajakäytölle että taajuusmuuttajakäytölle, missä käytetään du/dt-suodinta. Mittaus on tehty kytkentärajapintojen kanssa. Taajuuskaista oli 3.6 – 30 MHz.

4.8.3 Mittaustuloksien vertailua simulointituloksiin

Kehitetyn simulointimallin toimivuutta testataan vertailemalla sen antamia tuloksia mitattuihin. Mittauksia on tehty useita, mutta tässä esitellään vain muutamia tärkeimpiä. Mittausten määrä varmistaa sen, että simulointimalli antaa oikeansuuntaisia tuloksia joka tilanteessa. Simulointimallilla on tarkoitus mallintaa tilanteita, joita ei ole mahdollista mitata. Esimerkiksi tällaisia tilanteita voisi olla moottorikaapelin pituuden tai moottorin koon vaikutus kanavan vaimennukseen taajuustasossa ja yleensäkin vaimennus erilaisissa ympäristöissä. Kuvissa 4.21 ja 4.22 on esitetty erilaisten testiympäristöjen kanavien jännitevahvistuksia sekä simuloituna että mitattuna.



Kuva 4.21. Mitattu ja simuloitu jännitevahvistus moottorilta taajuusmuuttajalle. Testilaitteistona oli taajuusmuuttaja ACS400, du/dt-suodin, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), kaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m) sekä vaiheen ja suojamaan välille suunniteltu kytkentärajpinta. KytKentä (L3, PE).



Kuva 4.22. Mitattu ja simuloitu jännitevahvistus taajuusmuuttajalta moottorille. Testilaitteistona oli taajuusmuuttaja Vacon, du/dt-suodin, moottori ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW), kaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja kahden vaiheen välille suunniteltu kytkentärajpinta. KytKentä (L1, L2, PE).

Kuvista 4.21 ja 4.22 nähdään, että simulointimalli kuvaa kanavan jännitevaimennusta varsin hyvin. Erona väitöskirjassa [4] esitettyyn mallinnukseen on se, että tässä mallissa käytettiin vaimennuskertoimen α yhtälössä (4.19) taajuuden f potenssina 0.63, kun väitöskirjassa se oli 0.60. Tämän muutoksen ansiosta malli saatiin täsmäämään paremmin pidemmillä moottorikaapeleilla. Väitöskirjan [4] mukaan MCMK-tyyppisten PVC-eristeisten (Polyvinyl Chloride) kaapelien pääasiallisena häviömekanismina HF-taajuuksilla on eristemateriaalin dielektriset häviöt. Dielektriset häviöt riippuvat eristemateriaalin lämpötilasta ja seoksesta. Lisäksi pienen moottorin (15 kW) mallista jouduttiin jättämään huomiotta parametri L_{hf} , koska se aiheutti ongelmia saatavaan vaimennukseen. Suuremmilla moottoreilla tämä ei aiheuttanut ongelmia. Simulointimalli ei kuvaa kanavaa täydellisesti, koska yksittäisten komponenttien mallinuksissa on tehty yksinkertaistuksia. Simulointimalli täsmää toisissa ympäristöissä paremmin kuin toisissa, jonka aiheuttaa yksittäisten mallien virheiden kertaantuminen tai niiden kumoutuminen. Jos mallia haluttaisiin parantaa, täytyisi yksittäisten komponenttien malleja parantaa, joka käytännössä tarkoittaisi niiden monimutkaistumista ja mittaustarpeen kasvamista.

Edellä esitetyistä laboratoriomittauksista nähdään, että kanavana käytettävä moottorikaapeli vaimentaa varsin vähän signaalia tiedonsiirtoon käytettävällä taajuuskaistalla 4.49 – 20.7 MHz. Pienjännitejakeluverkkojen osalta on tehty tilastollisia kanavamalleja. Mittauksissa on käytetty tyypillisiä Eurooppalaisia kolmivaiheisia jakeluverkkoja, joissa kaapelit ovat PVC-eristeisiä. Näitä malleja on esitelty artikkelissa [23]. Edellä esitellyt 90 m moottorikaapelilla tehdyt laboratoriomittaukset voidaan kaikkien katsoa kuuluvan referenssikanavaan 1, joka on laadultaan erinomainen. Referenssikanava 1 on kuitenkin tapauksena lähes identtinen mitattujen kanssa, koska referenssikanavan 1 pituus on 100 m ja signaalilla on ainoastaan yksi kulkureitti (haaroja ei ole). Jopa 200 m moottorikaapelilla tehdyt laboratoriomittaukset voidaan artikkelin [23] luokittelun perusteella laskea kuuluvaksi hyvän ja erinomaisen välimaastoon. Huomioitavaa on, että referenssikanavien mittauksissa käytetty kytkentärajapinta on erilainen kuin laboratoriomittauksissa käytetty. Tämä aiheuttaa sen, että laboratoriomittaukset eivät ole suoraan vertailukelpoisia artikkelin [23] referenssikanavien kanssa alle 5 MHz taajuuksilla. Taajuusmuuttajakäytössä esiintyvä voimakas kohina vaikuttaa kuitenkin saavutettaviin tiedonsiirtonopeuksiin, vaikka kanavan laatu olisikin erinomainen.

5 KYTKENTÄRAJAPINTOJEN SUUNNITTELU

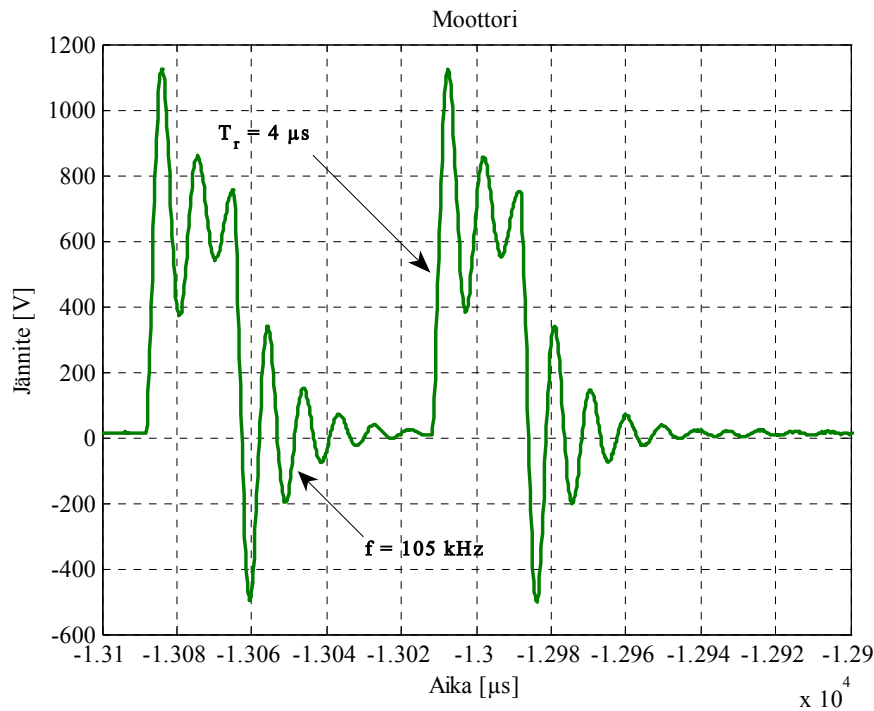
Tässä pääkappaleessa käydään läpi asioita, joita kytkentäraajapinnan suunnittelussa on otettu huomioon. Kytkentäraajapinta suunnitellaan sekä vaiheen ja suojamaan että kahden vaiheen välille. Kytkentäraajapinnasta rakennetaan sellainen, että sen voi laittaa suoraan taajuusmuuttajakäyttöön, taajuusmuuttajakäyttöön, missä on du/dt-suodin tai suoraan käyttöön. Kytkentäraajapinnasta tehdään lähetykseen ja vastaanottoon soveltuva, koska tietoa täytyy pystyä siirtämään sekä moottorilta taajuusmuuttajalle että toisinpäin.

5.1 Taajuusmuuttajakäyttö tiedonsiirron kannalta

Pienjännitteisen taajuusmuuttajan syöttämä jännite 400 V:n verkossa voi nousta parhaimmillaan jopa yli 1000 V:in kaapelivärähtelyjen takia [4]. IGBT-transistorien (Insulated Gate Bipolar Transistor) tuottamien lähtöjännitteiden nousureunat voivat vaihdella välillä 0.1 – 10 μ s ja niiden kytkentätaajuudet ovat luokkaa 2 – 20 kHz [24]. Taajuusmuuttajan välipiirin jännite on 400 V:n sähköverkossa seuraavan yhtälön mukaisesti

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{L-L,rms} = 540 \text{ V}. \quad (5.1)$$

Du/dt-suodinta käytettäessä jännitteen muutosnopeuksia saadaan hidastettua taajuusmuuttajan lähdössä. Du/dt-suotimissa käytetään tähän tarkoitukseen sarjakuristimia. Lisäksi osassa du/dt-suotimista käytetään kuristimien rinnalla purkausvastuksia, joiden kautta voidaan kelaan varautunut energia purkaa. Sarjakuristimen induktanssi määrää sen, kuinka paljon jännitteen nousureunoja voidaan hidastaa. Induktanssin arvoa ei tosin voida nostaa liian suureksi kuristimen impedanssin kasvun takia. Testeissä käytetyissä du/dt-suotimissa kuristimien induktanssi oli μ H-luokkaa. Kuvassa 5.1 on esitetty taajuusmuuttajan tuottama jännite ajan funktiona moottorin päästä mitattuna vaiheiden L1 ja L2 väliltä. Kuvan 5.1 tapauksessa jännite nousee 0 – 1100 V ajassa 4 μ s ja kaapelivärähtely on taajuudella n. 105 kHz. Jännitteen nousuaikaa on tässä tapauksessa hidastettu du/dt-suotimen ansiosta.



Kuva 5.1. Taajuusmuuttajan syöttämä jännite mitattuna moottorilta vaiheiden L1 ja L2 väliltä. Testijärjestelyssä käytettiin seuraavia laitteita: taajuusmuuttaja Vacon, du/dt-suodin, kaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m), moottori ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW). Taajuusmuuttajaa syöttävän verkon pääjännite oli 500 V.

Suuritehoisissa taajuusmuuttajissa kytkentätaajuus ja jännitteen nousureunat ovat hitaammat kuin pienissä. Tämän takia pienemmät taajuusmuuttajat ovat todennäköisesti vaikeampia tapauksia tiedonsiirron kannalta kuin suuremmat taajuusmuuttajat. Väitöskirjan [4] mukaan taajuusmuuttajan kytkennät tuottavat korkeataajuisia ja suurienergia pulsseja ($\sim 100 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$) moottorin syöttökaapeliin, mikä ilmenee kuvasta 5.1. Tämän lisäksi taajuusmuuttajan tuloimpedanssi kahden vaiheen välillä on lähellä nollaa, koska tehotransistorit kytkyvät vaiheet yhteen tai välipiirin kondensaattorin yli. Tämä vaikeuttaa tiedonsiirtoa kahden vaiheen välillä huomattavasti ilman du/dt-suodinta, sillä du/dt-suotimella saataisiin nostettua taajuusmuuttajan impedanssitaso tiedonsiirron kannalta.

5.2 Tiedonsiirtolaitteiston kytkeytyminen moottorikaapeliin

Kytkeytymistapoja on olemassa kaksi, induktiivinen ja kapasitiivinen. Kapasitiivinen kytkentä kytketään kuorman rinnalle, kun taas induktiivinen kuorman kanssa sarjaan [2]. Molemmilla menetelmillä on omat hyvät ja huonot puolensa. Induktiivisen kytkennän etuna on se, että asennus voidaan suorittaa ajon aikana, koska johtoja ei tarvitse irrottaa. Haitta-

puolina on, että kuormavirta kulkee kokonaisuudessa induktiivisen kytkennän läpi ja sillä on huonompi hyötysuhde verrattuna kapasitiiviseen kytkentään. Kaikkein ratkaisevin syy siihen, miksi induktiivinen kytkentä ei ole käytännöllinen tässä sovelluksessa on se, että moottorikaapelissa kulkevat virrat ovat suuria. Päävirta kulkee induktiivisen kytkennän läpi, joka aiheuttaa kyllästymisen ellei kytkeytymiseen käytettävää ferriittirengasta mitoite-ta riittävän suureksi. Kyllästyminen aiheuttaisi taas sen, että signaalia ei voitaisi käytän-nössä syöttää moottorikaapeliin ollenkaan. Ferriittirengas tulisi mitoittaa moottorin nimel-lisvirran mukaan aina tapauskohtaisesti. Ongelmina tässä olisivat ferriitin suuri koko ja kustannuskysymykset. Tämän takia kytkentäraja-pinta liitetään sähkökäyttöön kapasitiivi-vesti. Kapasitiivisesti kytkeydyttäessä joudutaan asennus tekemään seisokin aikana. Kyt-kentäraja-pinta laitetaan kiinni sekä moottorin että taajuusmuuttajan tai du/dt -suotimen ter-minaaleihin. Kytkentä vaatii johdonsuojasulakkeet suojaamaan kytkentäraja-pinnalle mene-viä vaihejohtoja.

Taajuusmuuttajakäyttöön päätettiin kytkeytyä joko vaiheen ja suojamaan tai kahden vai-heen välille. Tämän takia on suunniteltava kaksi erilaista kytkentäraja-pintaa. Näiden keski-näistä paremmuutta vertaillaan jatkossa tiedonsiirtotestien avulla. Vaiheen ja suojamaan välisessä tiedonsiirrossa hyödynnetään suojamaata paluuvirtajohtimena. Tämä ei ole erityi-sen järkevää, koska ylimääräisen maavirran tuottaminen saattaa aiheuttaa hankaluuksia esimerkiksi vikavirtasuojauksien toiminnassa. Vikavirtasuojaukset perustuvat juuri maavir-ran tarkkailuun. Lisäksi suojamaan käyttämisessä paluuvirtajohtimena on toinen huono puoli. Monesti sähkökäytöissä esiintyy ns. maalenkkejä, joka tarkoittaa sitä, että maavirral-la on useita erilaisia paluureittejä. Tämän aiheuttaa se, että moottori on esimerkiksi suoja-maadoitettu useampaa kuin yhtä reittiä. Suuri paluulenkki toimii antennina, joka kerää ja lähettää häiriöitä. Kahden vaiheen välisen kytkennän hyvänä puolena on signaalin differen-tiaalinen siirto, joka ideaalitapauksessa ei tuota yhteismuotoista virtaa. Kahden vaiheen välisessä kytkennässä suojamaajohdinta ei käytetä signaalin siirtoon ollenkaan.

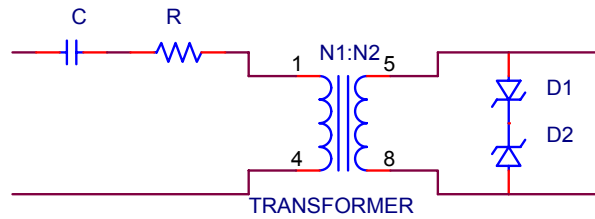
5.3 Kytkentäraja-pinnan suunnittelu

Kytkentäraja-pinnat suunnitellaan toimiviksi HomePlug-standardia toteuttavien sähköverk-komodeemien kanssa, jotka hyödyntävät tiedonsiirrossa taajuuskaistaa 4.49 – 20.7 MHz. Kytkentäraja-pintojen avulla sähköverkkomodeemit voidaan liittää kolmivaiheiseen moot-

torikaapeliin, jonka jälkeen modeemit voivat siirtää tietoa moottorin/generaattorin ja sitä ohjaavan taajuusmuuttajan välillä moottorikaapelia pitkin.

Kytkentäraajapinnalta vaaditaan seuraavia ominaisuuksia. Kytkentäraajapinnan täytyy pystyä suodattamaan verkkotaajuinen jännitekomponentti sekä edellä esiteltyt taajuusmuuttajan kytkennöistä aiheutuvat jännitetransientit riittävän matalaan tasoon, jotta modeemit voivat toimia tuhoutumatta. Samanaikaisesti kytkentäraajapinnan täytyy pystyä päästämään läpi mahdollisimman vähän vaimentaen modeemien käyttämän taajuuskaistan signaalit sekä lähetyksessä että vastaanotossa. Lisäksi kytkentäraajapinnan täytyy tehdä galvaaninen erotus moottorikaapelin ja sähköverkkomodeemien välillä, jolla estetään eri laitteiden maatasojen mahdolliset potentiaalierot. Maatasojen potentiaalieroista voisi muuten tulla ongelmia esimerkiksi tehonsyöttöä suunniteltaessa. Kytkentäraajapinnan tulee myös suojata modeemia ylijännitetransienteilta.

Yleisesti ottaen erilaisia kytkentäraajapintaratkaisuja sähköverkkotiedonsiirtoa varten on kehitetty ja patentoitu. Sähköverkkomodeemeissa käytetään tavallisimmin liityntää vaihe- ja nollajohtimen väliin. Tavallisimmin käytetty ratkaisu kytkentäraajapinnaksi on esitetty kirjassa [2]. Kuvassa 5.2 on esitetty sen piirikaavio. Ratkaisussa liityntä sähköverkkoon tehdään kapasitiivisesti kytkemällä rajapinta rinnalle. Jännitteen verkkotaajuuden suodatus perustuu jännitejakoon kondensaattorin ja erotusmuuntajan magnetointi-induktanssin välillä. Pienillä taajuuksilla (verkkotaajuus 50 Hz) sarjaan kytketyn kapasitanssin impedanssi dominoi. Tiedonsiirrossa käytetyillä taajuuksilla (4.49 – 20.7 MHz) impedanssi kapasitanssin yli on pieni ja puolestaan muuntajan magnetointi-induktanssin muodostama rinnakkainen impedanssi dominoi. Erotusmuuntajan toisiopuolella on transienttisuojaus. Transienttisuojan tarkoituksena on suojella laitetta ylijännitepiikeiltä. Vastaavia kytkentäraajapintoja sovelletaan yleisesti esimerkiksi kaupallisissa, pääasiallisesti koti- ja toimistokäyttöön kehitetyissä HomePlug-sähköverkkotiedonsiirtotuotteissa.



Kuva 5.2. Perinteisesti sovellettu kytkentärajapinnan topologia, jolla sähköverkkomodeemit liitetään sähköverkkoon. Kytkentä perustuu jännitteen verkkotaajuuden komponentin suodattavaan kondensaattoriin ja galvaanisen erotuksen tekevään muuntajaan. Lisäksi muuntajan toisiopuolella käytetään transienttidiodeilla toteutettua transienttisuojaa.

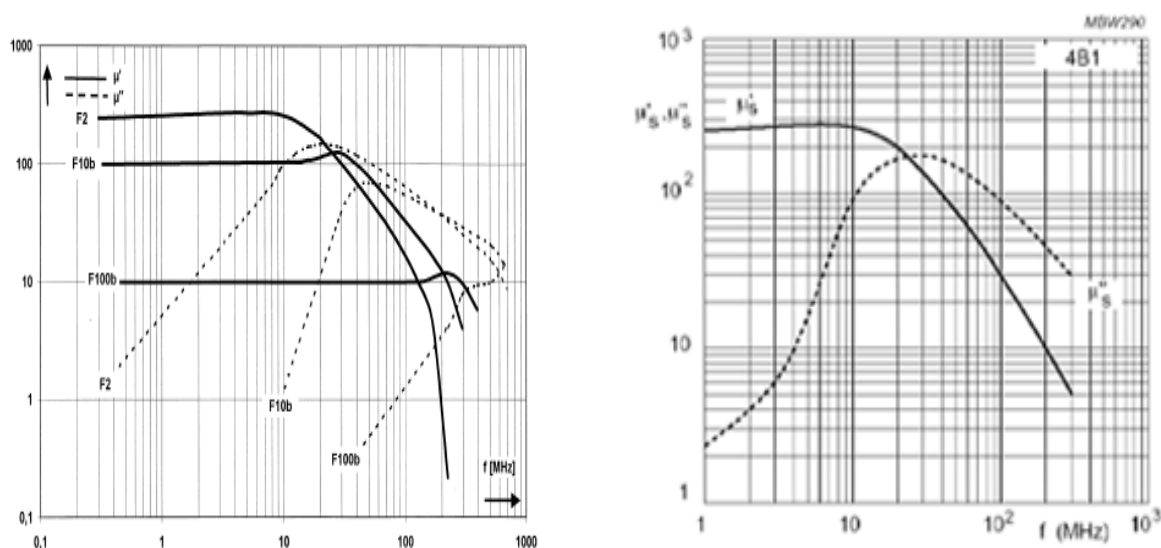
Kytkentärajapintojen suunnittelussa sovellettiin kuvan 5.2 topologiaa. Sitä käytettiin ainoastaan pohjana suunnittelussa, koska se ei sovi sellaisenaan käytettäväksi taajuusmuuttajakäytössä. Sitä jouduttiin muokkaamaan varsin radikaalisti, mutta idea pysyi kuitenkin melko samana. Ensiksi suunniteltiin vaiheen ja suojamaan välinen kytkentärajapinta, jota sitten käytettiin pohjana kahden vaiheen välisen kytkentärajapinnan suunnittelussa. Seuraavassa on koottu suunnittelussa esiin tulleita asioita.

5.4 Kytkentärajapinnassa huomioitavat asiat

Suunnitelluissa kytkentärajapinnoissa kytkentä tehdään kapasitiivisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että kondensaattori on valittava huolella. Tärkeintä on, että kondensaattorin jännitekestoisuuteen kiinnitetään erityistä huomiota. Kondensaattorin on kestettävä taajuusmuuttajan aiheuttamat jännitepiikit vaurioitumatta. Kaapelivärähtelyjen takia jännitteen maksimi-amplitudi vaiheiden välissä voi olla moottorilla noin kaksinkertainen taajuudenmuuttajan välipiirin jännitteeseen nähden. Esimerkiksi 690 V kolmivaiheverkkoon kytketyn taajuusmuuttajan ohjaamalla moottorilla voi esiintyä kaapelivärähtelyjen ansiosta jopa 2 kV jännitteen amplitudeja. Toinen kytkentäkondensaattorien tehtävä on läpäistä pienillä häviöillä tiedonsiirtosignaali. Tämän takia kondensaattorin häviökertoimeen ja sen taajuusriippuvuuteen on kiinnitettävä huomiota.

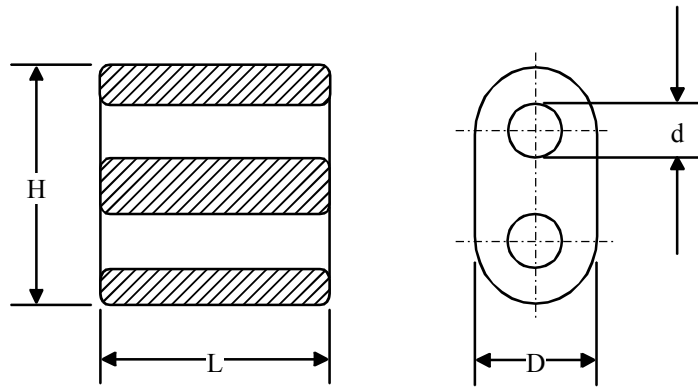
Erotusmuuttajan suunnittelussa on kiinnitettävä muuttajan sydänmateriaaliin erityistä huomiota, koska se vaikuttaa oleellisesti modeemien toimintaan. Muuttajan tulisi läpäistä modeemien käyttämät taajuudet vaimentumattomina. Modeemien käyttämällä taajuuksilla ainoastaan jotkin ferriittimateriaalit käyttäytyvät stabiilisti 30 MHz saakka. Häviöiden suuruuteen vaikuttaa materiaalin kompleksinen permeabiliteetti. Tämän takia sen tulisi olla

mahdollisimman pieni ko. taajuusalueella, koska sen suuruus vaikuttaa resistiivisiin häviöihin. Permeabiliteetin reaaliosa taas vaikuttaa käämivuon suuruuteen eli mitä pienempi permeabiliteetin reaaliosa on, sitä enemmän on laitettava käämikierroksia tietyn induktanssin saavuttamiseksi. Kuvan 5.3 materiaalit sopivat hyvin käytettäviksi muuntajan sydänmateriaaleina MHz-taajuuksilla. Kuvasta kuitenkin nähdään, että F10b-materiaali sopii käytettäväksi korkeammille taajuuksille asti kuin 4B1-materiaali. Kuvasta nähdään myös, että F10b-materiaalista valmistettuun identtiseen ferriittiin on laitettava enemmän käämikierroksia kuin 4B1-materiaalista valmistettuun, jotta voitaisiin saavuttaa yhtä suuri induktanssi, koska materiaalien permeabiliteetit eroavat toisistaan ($\mu_{F10b} = 100$ vs. $\mu_{4B1} = 250$).



Kuva 5.3. MHz-taajuuksille sopivien sydänmateriaalien permeabiliteettikuvaajat taajuuden funktiona. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on Neosidin F10b ja oikeanpuoleisessa Ferroxcuben 4B1 materiaalien kuvaajat. [25], [26]

Muuntaja on järkevä toteuttaa tuplareikäisellä ferriittirenkaalla, koska rakenne soveltuu jopa yli 50 MHz signaalitaajuuksille [2]. Tällaista käytetään yleisesti RF-muuntajissa (Radio Frequency). Kuvassa 5.4 on esitetty tuplareikäisen ferriittirenkaan läpileikkauskuva. Taulukossa 5.1 on esitetty ferriittirenkaan dimensiot, joita on saatavilla F10b- ja 4B1-materiaaleilla.



Kuva 5.4. Tuplareikäisen ferriittirenkaan läpileikkauskuva. Rakenne soveltuu käytettäväksi korkeilla signaalitaajuuksilla.

Taulukko 5.1. Ferriittirenkaiden dimensiot kuvan 5.4 merkintöjen perusteella, joita on saatavilla Neosidilta ja Ferroxcubelta. [25], [26]

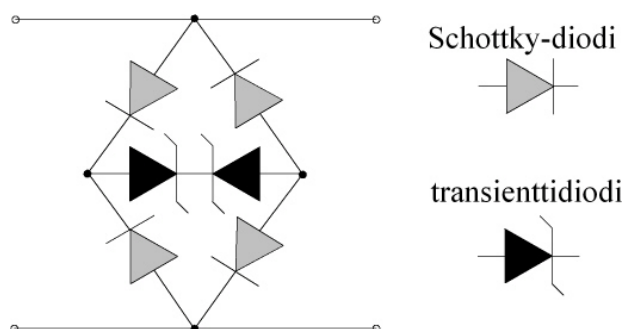
Materiaali	Tyyppi	D [mm]	d [mm]	L [mm]	H [mm]
4B1	MHB2-13/8/6-4B1	8.0	3.0	6.0	13.0
F10b	Ft 8	8.5	3.5	8.3	14.4
F10b	Ft 8a	8.5	3.5	14.5	14.4

Muuntajien käämilangan valinnassa on myös huomioitava muutamia asioita. Käämilangan eristemateriaali on ratkaisevassa asemassa toimittaessa MHz-luokan taajuuksilla. Näille taajuuksille sopiva eristemateriaali on esimerkiksi teflon (PTFE \cong Polytetrafluorieteeni). Lisäksi käämilangan paksuus on oltava sellainen, että saadaan tarvittava määrä kierroksia käämittyä ferriittirenkaaseen.

Transienttisuojaus on tärkeä osa kytkentärajapintaa, koska sen avulla pystytään torjumaan ylijännitetransientit, jotka voisivat tuhota modeemin. Suojaus tapahtuu leikkaamalla rajapinnan yli vaikuttava jännite tiettyyn maksimitasoon. Taajuusmuuttajakäytön tapauksessa jännitetransientteja aiheuttavat esimerkiksi taajuusmuuttajan kytkennät, joita kytkentärajapinta ei pysty kaikissa tapauksissa riittävän hyvin suodattamaan. Riittävän suodatuksen toteutus ilman transienttisuojausta kasvattaisi tiedonsiirtosignaalin vaimennusta.

Kirjan [2] mukaan tavalliset transienttidiodit eivät sovellu käytettäväksi korkeilla taajuuksilla, koska niillä on suhteellisen suuri kapasitanssi (nF-luokkaa), joka vaimentaisi huomattavan osan signaalista. Kuvassa 5.5 on esitetty kytkentä, joka sopii aina 30 MHz taajuuksiin saakka. Kytkennässä käytetään neljää Schottky-diodia, joiden sisäpuolelle on sijoitettu

diagonaalisesti kaksisuuntainen transienttidiodi. Tällä menettelyllä varmistetaan, että Schottky-diodit pysyvät aina (kaikilla signaalin amplitudeilla, joita lähetetään) estosuuntaan biasoituina, koska niiden kapasitanssi laskee nostettaessa estosuuntaista jännitettä. Transienttidiodin suuresta kapasitanssista johtuen kytkennän diagonaalinen jännite ei seuraa RF-signaalia, mutta se pysyy lähes muuttumattomana ja on verrattavissa lähetetyn signaalin huippuarvoon. Kytkennän Schottky-diodit on valittava harkiten, koska niiden kapasitanssi vaihtelee suuresti. [2]



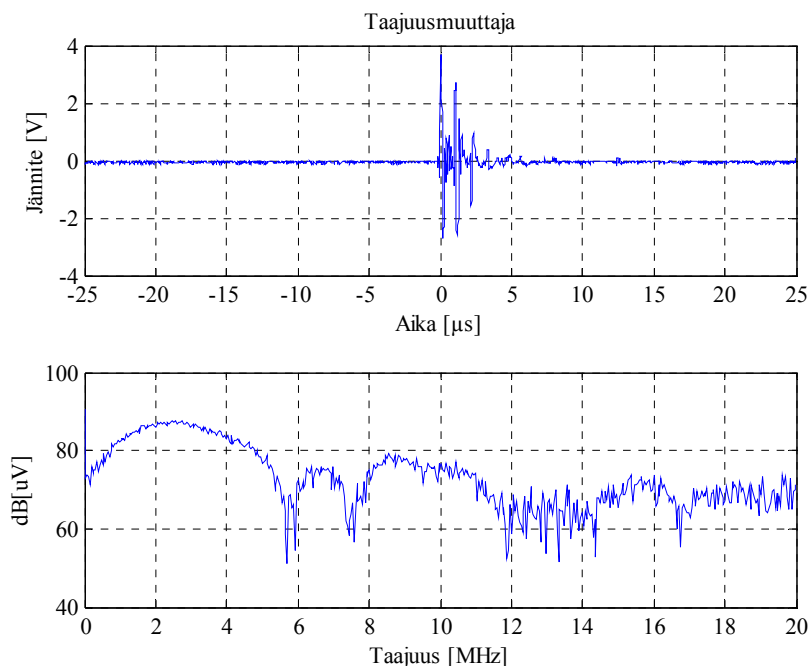
Kuva 5.5. Suojaussilta, joka soveltuu käytettäväksi ylijännitetransienttien torjumiseen aina 30 MHz taajuuksiin saakka. [2]

Edellä oli ainoastaan yksi esimerkki transienttisuojauksen toteutuksesta, mutta tapoja on olemassa myös muita. Tärkeintä on kuitenkin kiinnittää huomiota MHz-taajuuksilla toimitaessa transienttisuojauksen nopeuteen ja sen kapasitanssin suuruuteen.

5.5 Laboratoriomittauksia kytkentärajapinnoille

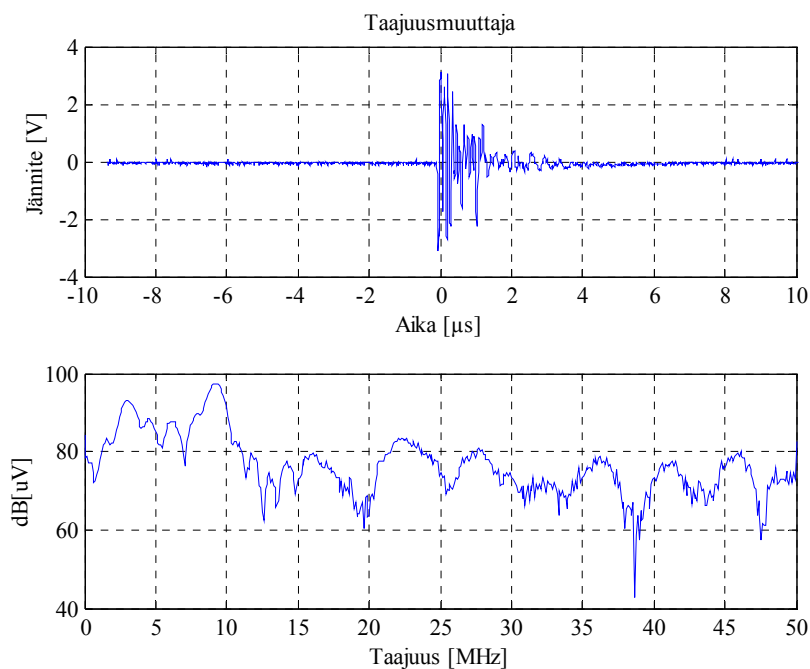
Kytkentärajapintojen toimintaa testattiin käytännössä lähinnä mittaamalla niiden läpitulevien jännitepiikkien suuruutta. Jännitepiikkien suuruus on toiminnan kannalta tärkeää, koska liian suuret jännitepiikit saattavat rikkoa modeemit. Kytkentärajapinta kytkettiin taajuusmuuttajaan kiinni ja taajuusmuuttajalla ajettiin moottoria. Mittaukset kohinasosta tehtiin taajuusmuuttajan päästä, koska kohina on siellä voimakas. Oskilloskoopilla mitattiin kytkentärajapinnan läpituleva jännite ajan funktiona ja sen perusteella piirrettiin läpitulevan kohinan taajuusvaste. Oskilloskoopin näytteenottotaajuutena käytettiin 40 MHz ja FFT:n laskennassa 1024 pistettä. Näytteitä otettiin kaikkiaan 2000. Kuvassa 5.6 on esitetty suunnitellun vaiheen ja suojamaan välisen kytkentärajapinnan läpituleva jännite ajan funktiona sekä sen taajuussisältö suorassa taajuusmuuttajakäytössä taajuusmuuttajan päästä mitattuna. Kuvassa näkyy yhden tehotransistorin kytkennästä aiheutuvat jännitepiikit. Mittauksen perusteella voidaan todeta, että suunnittelu onnistui kohinan suodatuksen osalta hy-

vin, sillä jännitetransientit näyttäisivät jäävän alle 4 V tasoon. Tämän perusteella kytkentärajapinnat voidaan kytkeä modeemeihin kiinni ja kokeilla tiedonsiirron toimivuutta taajuusmuuttajakäytössä, vaikka siinä ei käytettäisi du/dt -suodinta lainkaan. du/dt -suodinta käytettäessä jännitetransientit jäävät kuitenkin pienemmiksi kuin kuvassa 5.6, koska tällöin jännitteen nousuajat ovat pidempiä.

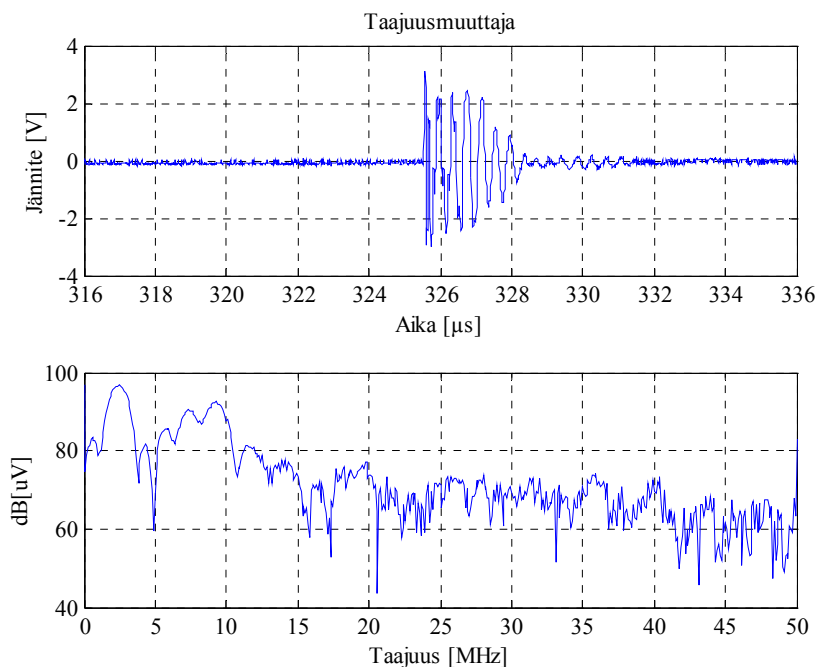


Kuva 5.6. Vaiheen ja suojamaan välisen kytkentärajapinnan läpitulevat jännitepiikit suorassa taajuusmuuttajakäytössä taajuusmuuttajan päästä mitattuna. Ylemmässä kuvassa on esitetty jännite ajan funktiona, kun oskilloskoopin aika-askel on 5 μ s ja alemmassa sen FFT:llä (1024 pistettä) laskettu taajuusvaste. Testijärjestelyssä oli taajuusmuuttaja ACS400, moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW) ja moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m).

Kuvissa 5.7 ja 5.8 on esitetty vaiheen ja suojamaan sekä vaiheiden välisen kytkentärajapintojen läpitulevat jännitepiikit suuressa taajuusmuuttajakäytössä (moottori 200 kW) taajuusmuuttajan päästä mitattuna. Oskilloskoopin asetukset olivat muuten samat kuin edellä, mutta nyt näytteenottotaajuutena käytettiin 100 MHz ja aika-askeleena 2 μ s. Kuvista nähdään, että kahden vaiheen välinen kytkentärajapinta jää värähtelemään noin 2 μ s pidemmäksi aikaa kuin vaiheen ja suojamaan välinen kytkentärajapinta. Taajuusvasteiden kuvajista nähdään, että häiriötasot ovat suuremmat modeemien käyttämällä taajuuskaistalla (4.49 – 20.7 MHz) vaiheen ja suojamaan välisellä kytkentärajapinnalla kuin kahden vaiheen välisellä. Tämä voi vaikuttaa saavutettaviin tiedonsiirtonopeuksiin.



Kuva 5.7. Vaiheen ja suojamaan välisen kytkentärajan läpituulet jännitepiikit ajan ja taajuuden funktiona taajuusmuuttajan päästä mitattuna. Ylemmässä kuvassa on esitetty jännite ajan funktiona ja alemmassa sen FFT:llä (1024 pistettä) laskettu taajuusvaste. Testijärjestelyssä oli taajuusmuuttaja Vacon, du/dt-suodin, moottori ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW) ja moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m).



Kuva 5.8. Kahden vaiheen välisen kytkentärajan läpituulet jännitepiikit ajan ja taajuuden funktiona taajuusmuuttajan päästä mitattuna. Ylemmässä kuvassa on esitetty jännite ajan funktiona ja alemmassa sen FFT:llä (1024 pistettä) laskettu taajuusvaste. Testijärjestelyssä oli taajuusmuuttaja Vacon, du/dt-suodin, moottori ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW) ja moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m).

5.6 Kytöntärajapinnan simulointimallin hajaparametrien määrittäminen

Kytöntärajapinnan hajakomponentit määritettiin impedanssimittauksien perusteella. Kytöntärajapinnan tuloimpedanssi mitattiin molemmista suunnista sekä toinen pää oikosuljetuna, että avoimena. Näiden mittausten perusteella voitiin arvioida, millä tavalla hajasuureita kytöntärajapinta sisältää. Hajasuureiden arvot saatiin kokeilemalla. Hajakomponentteja lisättiin simulointimalliin kolme kappaletta: R_h , C_h ja L_h . Hajakomponentit aiheutuvat erilaisista syistä. Hajainduktanssi aiheutuu muuntajasta. Tässä tapauksessa muuntajan hajainduktanssi on noin kymmenesosa muuntajan omasta induktanssista. Muuntajan käännettyä aiheuttavat luultavimmin hajakapasitanssin, koska muuntajassa johtimet ovat lähellä toisiaan. Hajakomponentit ovat merkitty kuvan 4.4 simulointimalliin.

6 PILOT-LAITTEISTON SUUNNITTELU

Pilot-laitteiston suunnittelun tarkoituksena on tehdä testilaitteet tiedonsiirron laboratorio-testeihin. Testilaitteissa hyödynnettiin valmiita sähköverkkotiedonsiirtoon tarkoitettuja HomePlug-modeemeja. Tämä tehtiin siksi, että niissä elektroniikka on suunniteltu jo valmiiksi ja toimivaksi. Tällä tavalla säästettiin aikaa ja kustannuksia. Modeemit eivät tosin kelvanneet sellaisenaan testeihin, vaan niihin täytyi tehdä muutamia modifikaatioita. Ensinnäkin niihin täytyi pystyä liittämään edellä suunniteltuja kytkentärajapintoja sekä niiden tehosityöttö täytyi suunnitella uudestaan. Tehosityöttö tehtiin uusiksi, koska modeemit haluttiin erottaa täysin sähköverkosta. Seuraavassa on kerrottu testilaitteen suunnittelusta.

6.1 Teholähteen suunnittelu

Sähköverkkomodeemeille täytyi suunnitella täysin ulkopuolinen teholähde. Tässä tapauksessa parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui akku. Akkusyöttö valittiin sen takia, jotta modeemit saatiin erotettua tavallisesta sähköverkosta. Tällä toimenpiteellä varmistettiin se, etteivät modeemit pystyisi kommunikoimaan keskenään alkuperäisen teholähteen kautta. Siinä tapauksessa tieto ei kulkisi haluttua reittiä (moottorikaapeli) pitkin. Akkusyöttö takasi varmasti datan oikean kulkureitin.

6.1.1 Teholähde

Sähköverkkomodeemien teholähteeksi valittiin tavallinen 12 V:n auton akku. 12 V:n akkujännite täytyi muuttaa edelleen modeemeille sopivaksi. Modeemien käyttämä jännite oli ± 5 V, joka saatiin muutettua halutuksi dc-dc-hakkurin avulla. Tällaisia hakkureita löytyi valmiina, joten niitä ei kannattanut käydä suunnittelemaan tähän sovellukseen. Hakkurin tuottamaksi tehoksi valittiin 12 W, jolla varmistettiin modeemeille syötetyn tehon riittävyys. Hakkuriksi valittiin Tracon valmistama hakkuri TEN 12-2421, sillä se täytti vaaditut kriteerit ja se on koteloitu asiallisesti metallikoteloon. Kuvassa 6.1 on esitetty teholähteesseen valittu dc-dc-hakkuri.



Kuva 6.1. Modeemien akkutehonsyötössä käytetty dc-dc-hakkuri. Tuloina ovat GND ja V_{in} ja lähtöinä $-V_{out}$ (-5 V), GND (0 V) ja $+V_{in}$ (+5 V). Tulojännite voi olla välillä 9 – 36 Vdc. [27]

6.1.2 Alkuperäisen teholähteen korvaus akkusyötöllä

Modeemien alkuperäiset teholähteet irrotettiin modeemeista, jotta akkusyötössä tarvittavat johdot saatiin läpivietyä ongelmitta modeemien sisälle. Irrotus tehtiin myös sen takia, jotta dc-dc-hakkuri olisi mahdollista sijoittaa modeemin sisäpuolelle. Tässä tapauksessa hakkuria ei sijoitettu vielä sinne, jotta johtojen irrotus onnistuisi helposti.

Akkusyötön jännitejohdot liitettiin modeemien käyttöjänniteliittimiin, jonka jälkeen modeemit olivat valmiita akkusyötön osalta. dc-dc-hakkurien toiminta tosin testattiin ennen kuin ne kytkettiin modeemeihin. Niiden lähtöjännite mitattiin yleismittarilla ilman kuormaa.

6.2 Suunniteltujen kytkentäraajapintojen liittäminen modeemeihin

Sähköverkkomodeemeja modifioitiin ottamalla lähetys-/vastaanottopää erilleen käyttöjännitteistä. Tämä toteutettiin katkaisemalla modeemien oman kytkentäraajapinnan muuntajan toisiopuolen johtimet (verkkajännitteen puolelta katsottuna). Katkaisun jälkeen johtimien päihin pystyttiin liittämään edellä suunniteltuja kytkentäraajapintoja. Tämä toimenpide tehtiin molemmille sähköverkkomodeemeille. Sähköverkkomodeemien alkuperäinen kytkentäraajapinta jätettiin kytkemättä, koska se oli samalla piirilevyllä kuin tehölähdekin. Edellä kuvatun toimenpiteen etuna oli se, että sähköverkkomodeemit voitiin nyt kytkeä lähettämään/vastaanottamaan signaalia erilaisissa testiympäristöissä sekä kokeilla erilaisten kytkentäraajapintojen toimivuutta. Aikaisemmin tämä ei ollut mahdollista, koska sähköverkkomodeemit oli mahdollista kytkeä ainoastaan tavalliseen sähköverkkopistorasiaan.

Näillä modifikaatioilla tehtiin kaikki tiedonsiirtonopeustestit lukuun ottamatta testejä 200 m moottorikaapelilla. Modeemit olivat omissa muovikoteloissaan ja kytkentäraajapinta

kotelon ulkopuolella. Modeemeille haluttiin kuitenkin laboratoriotestien lisäksi tehdä muutamia testejä oikeissa tehdasolosuhteissa. Tämän takia jouduttiin suunnittelemaan uusi layout, koska edellä tehty alkeellinen pilot-laitteisto ei palvelisi tehdasolosuhteissa kovinkaan hyvin. Seuraavassa kappaleessa on esitelty kyseisen testilaitteiston suunnittelu.

6.3 Testilaitteiston suunnittelu

Testilaitteisto suunniteltiin, koska modeemien toimintaa oli tarkoitus testata oikeassa tehdasympäristössä. Tämä tarkoitti sitä, että testilaitte oli koteloitava yhteen hyvin suojattuun koteloon, josta johdot tuotiin läpivientien avulla ulkopuolelle. Testilaitteiden koteloksi valittiin metallinen 250x250x100 kotelo. Kotelo valittiin riittävän suureksi, jotta sinne pystyttiin sijoittamaan tarvittavat oheislaitteet, esim. lyijyhyytelöakku. Kytkentärajapinta rakennettiin reikälevylle, jolloin johtimien määrä saatiin minimoitua ja pystyttiin takaamaan riittävän tukeva kiinnitys kotelon runkoon. Kytkentärajapintojen rakentamisessa ja kiinnityksessä täytyi huomioida riittävä eristysväli, koska kytkentärajapintaan tuotiin taajuusmuuttajan lähtöjännite suoraan. Tämä jännite voi nousta jopa yli 1000 V. dc-dc-hakkuri kiinnitettiin myös samaan reikälevyyn. Samalle levyille kiinnitettiin myös riviliittimet, jotta käytösähkön valinta olisi ollut mahdollista. Piirikortti, jossa oli kytkentärajapinta yms., kasattiin 130x71 -kokoiselle reikälevylle.

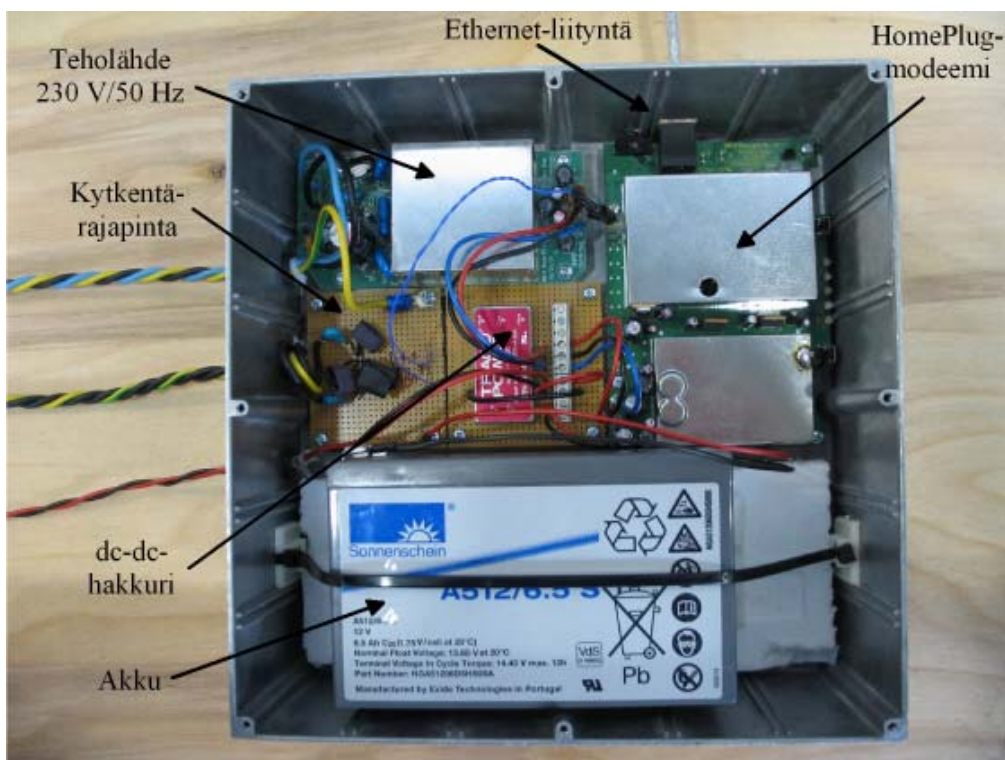
Kotelon sisälle sijoitettavat piirikortit pultattiin kiinni korokkeiden päälle, jolla estettiin oikosulkujen mahdollisuus. Kotelon sisään sijoitettiin HomePlug-modeemista irrotetut piirikortit (teholähde ja HomePlug-osa), piirikortti, joka sisälsi kytkentärajapinnan ja muut oheiskomponentit, sekä lyijyhyytelöakku.

Tehonsyöttö voitiin edellä esitellyn järjestelyn avulla toteuttaa kolmella eri tavalla. Testilaitteistoa voitiin syöttää suoraan 230 Vac verkosta, dc-jännitteellä (9 – 36 V) tai koteloon sijoitettavasta akusta. Akkusyötöllä voitiin varmistaa tiedonsiirtoreitin oikeellisuus. Kotelon seiniin ei ole tarkoitus laittaa minkäänlaisia liittimiä, vaan kaikki sisään tuotavat johdot viedään läpivientien avulla kotelon sisälle. Tällä menettelyllä voidaan taata parempi suojaus kosteutta vastaan sekä EMC-suojaus (Electromagnetic Compatibility) verrattuna liitinratkaisuun. Ainoastaan Ethernet-verkkokaapelin liitin laitettiin kotelon seinään, koska liitin

oli jo valmiiksi kiinni piirikortilla ja kaapelille olisi kuitenkin jouduttu tekemään samankoinen reikä kuin tässäkin tapauksessa.

Kotelon ulkopuolelle oli tarkoitus tuoda johtimia kahdeksan/seitsemän kappaletta, riippuen kytkentymistavasta (L1, PE / L1, L2, PE). Kolme verkkosyöttöä (L1, N, PE), kaksi dc-syöttöä ja kolme/kaksi kytkentärajpintaa varten. Molemmat sisään tuotavat suojamaat kytkettiin kotelon runkoon kiinni, jotta kotelo olisi aina suojamaadoitettu. Tällä menettelyllä estetään kotelon tuleminen jännitteiseksi mahdollisissa vikatilanteissa, sillä kotelo on metallinen. Tehosyöttö voidaan valita kotelon sisällä kytkemällä johdot riviliittimiin. Kotelon ulkopuolelle tuotaville johdoille tehtiin läpiviennit kotelon vasempaan laitaan. Ethernet-verkkokaapeli tuodaan ulkopuolelle kotelon ylälaidasta (ylhäältäpäin katsottuna). Näin menettelemällä minimoitiin kotelon sisään jäävää johtimien määrää. Rakennettavasta testilaitteistosta on esitetty layout-piirros liitteessä II.

Valmis testilaitte on esitetty kuvassa 6.2 ja sen koetestit kappaleessa 7.4. Kuvassa ylimmät johdot vasemmalla ovat verkkovirralla toimivalle teholahteelle, keskimmäiset kytkentärajpinnalle (L1, L2, PE) ja alimmat ulkopuoliselle tasajännitesyötölle.

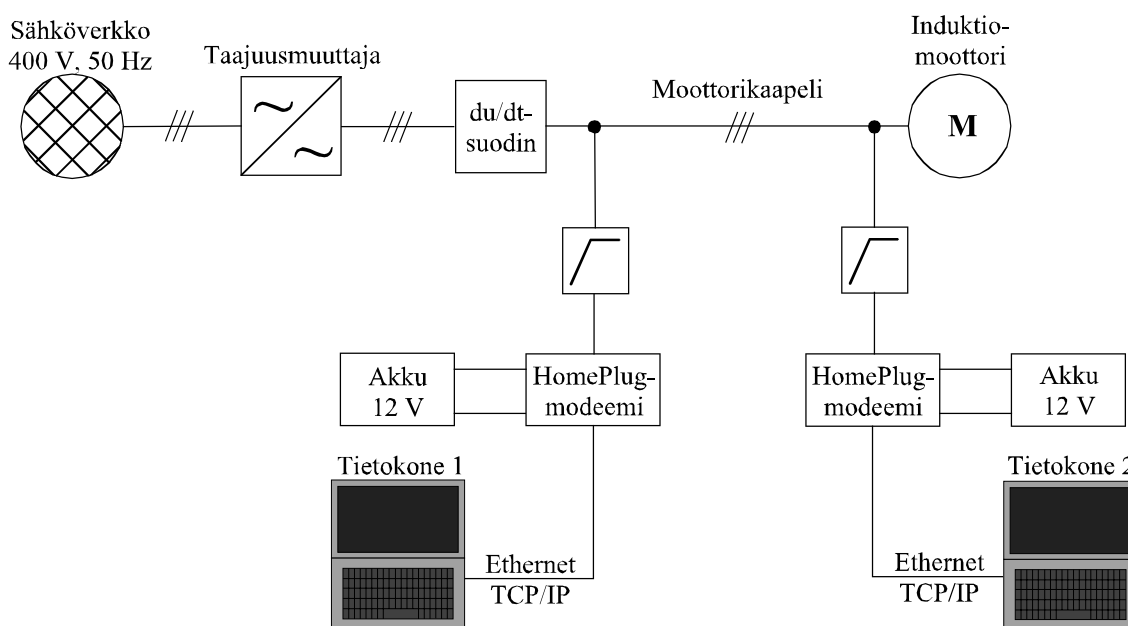


Kuva 6.2. Tehdastestihin kehitetty testilaitte.

7 TIEDONSIIRTOTESTIT

7.1 Testien toteutus

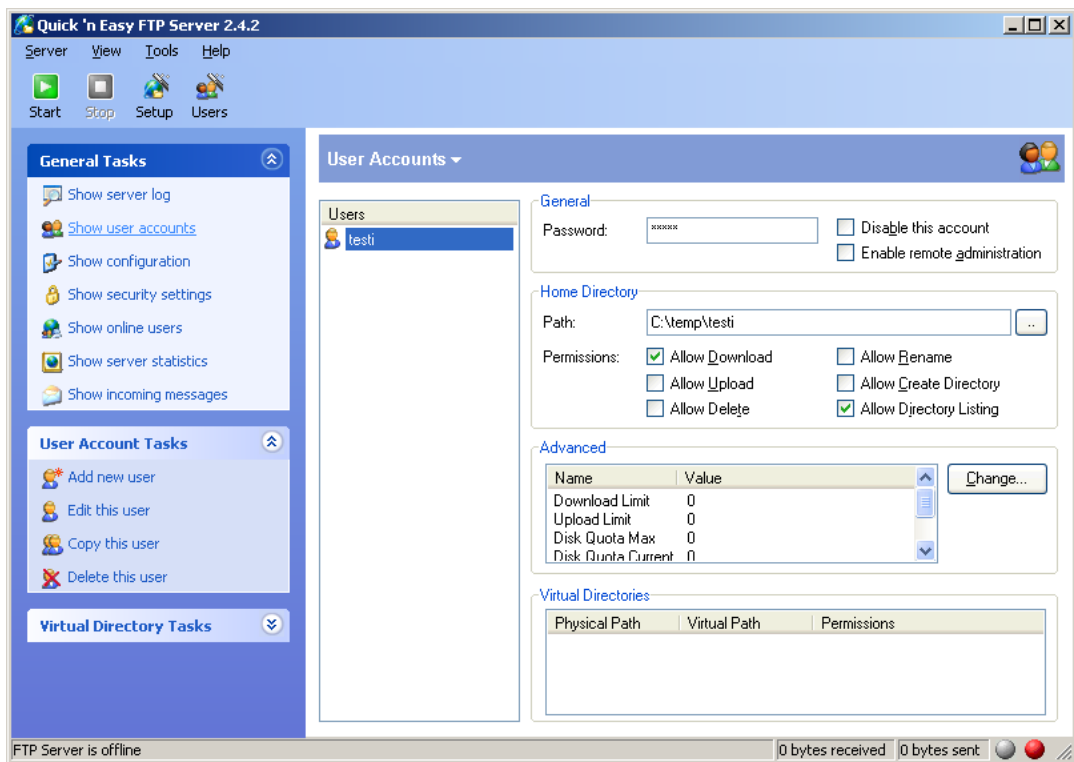
Tiedonsiirtotestit toteutettiin lähettämällä dataa tiedonsiirtokanavan läpi sekä moottorilta taajuusmuuttajalle että toisinpäin. Sähkökäyttö, jossa tietoa siirrettiin, sisälsi taajuusmuuttajan, lähtösuotimen (ei kaikissa tapauksissa), moottorikaapelin ja sähkömoottorin. Modeemit kytkettiin moottorin terminaaleihin ja du/dt-suotimen tai taajuusmuuttajan lähtöterminaaleihin. Modeemeja syötettiin akuista, jolla varmistettiin tiedon oikea kulkureitti. Modeemit kytkettiin verkkokaapelilla tietokoneiden verkkokortteihin. Verkkokortit eivät tässä tapauksessa pystyneet rajoittamaan tiedonsiirtonopeutta, koska modeemien TCP-nopeus rajoittuu tiedonsiirtonopeuteen 6.3 Mb/s, kun taas niiden Ethernet-liityntä tiedonsiirtonopeuteen 10 Mb/s, joka on sama myös tietokoneiden verkkokortteissa. Kuvassa 7.1 on esitetty kaaviokuva tiedonsiirtotestien toteutuksesta. Muutamia testejä suoritettiin kuitenkin myös suorassa käytössä. Testit tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tehoelektronikan laboratoriossa.



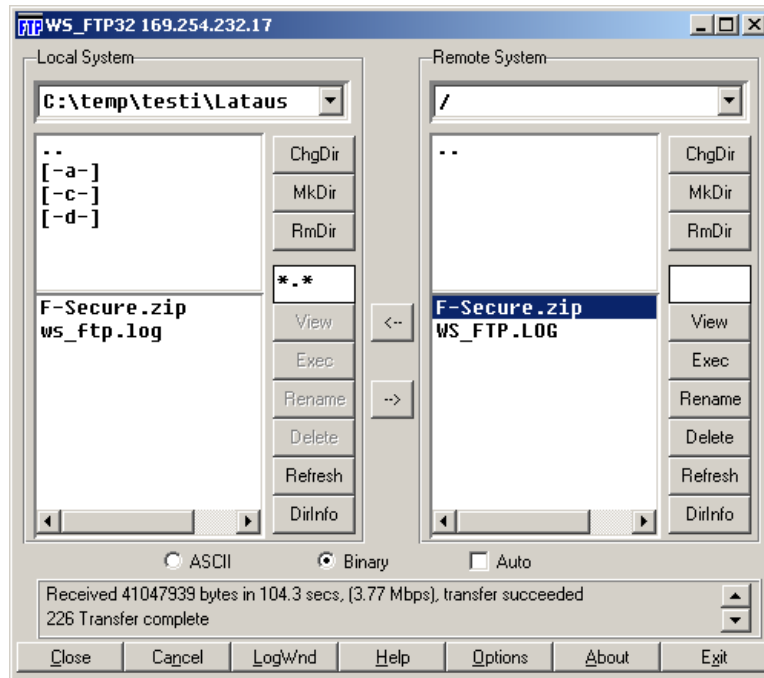
Kuva 7.1. Kaaviokuva tiedonsiirtotestien toteutuksesta. Modeemien sähkönsyöttö on toteutettu akuilla. Akkujen jännite muokataan dc-dc-hakkureilla $12\text{ V} \rightarrow \pm 5\text{ V}$. Tietokoneet on kytketty modeemeihin Ethernet-verkkokaapelilla. Modeemit on kytketty verkkoon kytkentärajapintojen avulla. Kytkentänä käytettiin (L1, PE) ja (L1, L2, PE).

Molempiin tietokoneisiin asennettiin FTP-palvelin- (File Transfer Protocol) ja FTP-tiedostonsiirto-ohjelma, jotta tiedonsiirtoa voitaisiin testata molempiin suuntiin. Sekä lähe-

tyksessä, että vastaanotossa siis käytettiin FTP-ohjelmaa. FTP pohjautuu TCP/IP-protokollaan (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) FTP-palvelimena käytettiin *Quick'n Easy FTP Server 2.4.2* -ohjelmaa ja tiedoston siirrossa *WS_FTP32* tiedostonsiirto-ohjelmaa. Kahden tietokoneen välille muodostettiin verkko, jossa tiedostoa siirrettiin. Vastaanottavan tietokoneen FTP-tiedostonsiirto-ohjelma mittasi tiedoston lähetykseen kuluvan ajan ja tiedonsiirtonopeuden. Siirrettävänä tiedostona käytettiin n. 40 MB zip-tiedostoa. Tiedoston täytyi olla riittävän suuri, jotta saatiin riittävän hyvä kuva keskimääräisestä tiedonsiirtonopeudesta ja sen luotettavuudesta. Normaaliolosuhteissa tuon kokoisen tiedoston siirtämiseen menisi aikaa noin minuutti modeemien maksimitiedonsiirtonopeudella (n. 6 Mb/s). Kuvassa 7.2 on esitetty tiedonsiirtotesteissä käytetty FTP-palvelinohjelma ja kuvassa 7.3 FTP-tiedostonsiirto-ohjelma.



Kuva 7.2. Tiedonsiirtotesteissä käytetty Quick'n Easy FTP Server 2.4.2 -palvelinohjelma. Palvelinohjelmassa määrättiin käyttäjäoikeudet haluttuihin tiedostoihin, jotka voitiin ladata FTP-tiedostonsiirto-ohjelman avulla.



Kuva 7.3. Tiedonsiirtotesteissä käytetty WS_FTP32 -tiedostonsiirto-ohjelma. Ohjelma mittasi tiedoston lähetukseen kuluvan ajan ja tiedonsiirtonopeuden, jotka kirjattiin jokaisesta mittauksesta muistiin. Siirrettävänä tiedostona käytettiin n. 40 MB zip-tiedostoa.

Tiedonsiirtotesteissä testattiin erilaisten muuttujien vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen ja toimivuuteen. Muuttujina käytettiin erilaisia moottoreita, kaapeleita, taajuusmuuttajia ja kappaleessa 5 suunniteltuja kytkentärajapintoja. Lisäksi testejä tehtiin du/dt-suotimen kanssa ja ilman. Edellä esitellyjä muuttujia vaihtelemalla pystyttiin varmistamaan tiedonsiirron toimivuus kyseisessä sovelluksessa ja rajaamaan tilanteet, joissa menetelmä ei mahdollisesti toimi. Tiedonsiirron toimivuus riippuu lähinnä kytkentärajapinnasta, moottorista, kaapelin pituudesta ja taajuusmuuttajan tuottamista häiriöistä. Kaapelihäviöt ja monitie eteneminen aiheuttavat signaalin säröytymistä, mutta kaikkein haitallisinta digitaalisen tiedonsiirron kannalta on kuitenkin kanavassa esiintyvä kohina. Kytkentärajapintojen läpi täytyy saada modeemien signaali mahdollisimman pienellä vaimennuksella, kun taas häiriöt pitää suodattaa alle ± 5 V tasoon, jotta modeemit eivät tuhoutuisi.

Lisäksi muutamissa testeissä mitattiin tiedonsiirtoyhteyden vasteaikaa, joka on erityisen tärkeä; jopa tärkeämpi kuin tiedonsiirtonopeus. Myös vasteajan vaihtelu on tärkeää. Ethernet:n ongelmana on nimenomaan epädeterministisyys. Vasteajasta ja sen vaihtelusta riippuu se, mihin sovellukseen tiedonsiirtokanavaa voidaan käyttää. Esimerkiksi säätösovel-

luksissa vasteajan tulisi olla mahdollisimman pieni, jotta reaaliaikainen säätö olisi mahdollista. Tiedonsiirtoyhteyden vasteaikaa mitattiin ping-testiohjelmalla. Vasteaika mitattiin tapauskohtaisesti, mutta kuitenkin aina taajuusmuuttajalta moottorille päin. Jokaisessa testissä lähetettiin sata kappaletta 32 tavun kokoisia paketteja. Ping antoi tulokseksi maksimi-, minimi- ja keskiarvoviiheen sekä hävinneiden pakettien määrän.

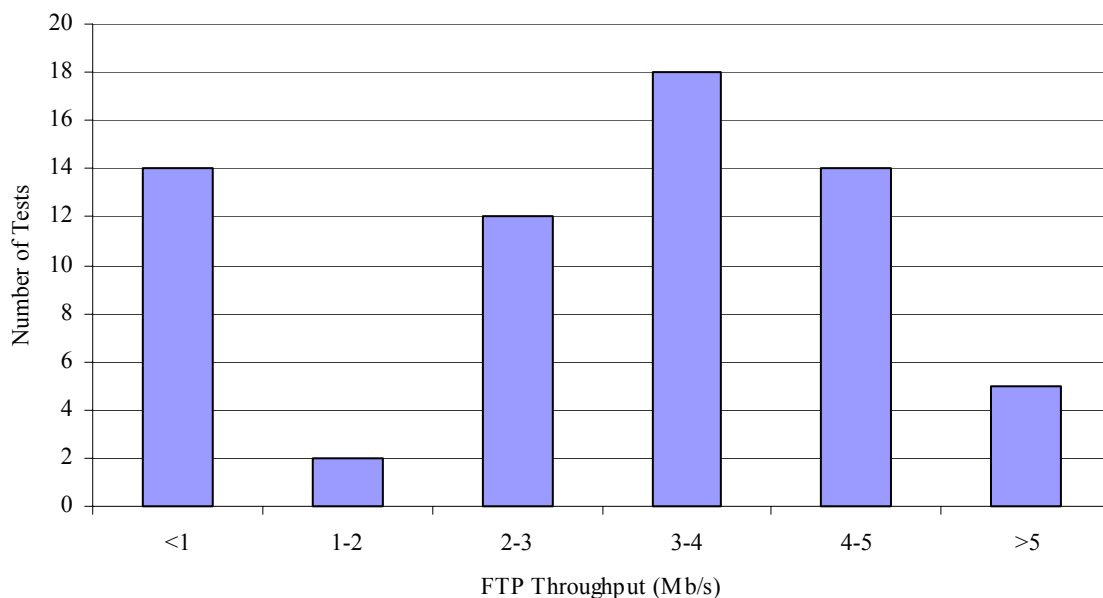
7.2 Testit

Tiedonsiirtonopeustesteissä siirrettiin samaa noin 40 MB zip-tiedostoa moottorikaapelin läpi kahden tietokoneen välillä FTP:lla. Tiedonsiirrosta mitattiin lähetyksen kesto ja keskimääräinen tiedonsiirtonopeus. Lisäksi mitattiin tapauskohtaisesti ping-testiohjelmalla kanavan vasteaika. Testiympäristössä muuteltiin useita eri tiedonsiirtonopeuteen vaikuttavia parametreja. Kaikki testissä muunnellut parametrit on lueteltu seuraavassa:

- Taajuusmuuttajan tyyppi ja testeissä käytetty verkon pääjännite
 - ABB ACS400 (400 V)
 - Vacon (500 V)
- Suotimen vaikutus
 - Du/dt-suodin
 - LC-suodin ("Sinifiltteri")
 - Ei suodinta
- Kytkeytymistapa
 - (L1, PE)
 - (L1, L2, PE)
- Tiedonsiirron suunta
 - Moottori – taajuusmuuttaja
 - Taajuusmuuttaja – moottori
- Moottorikaapeli ja pituus
 - Pirelli MCMK 3x70+35 (7.5 m)
 - Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m ja 200 m)
- Moottori
 - Invensys T-01F160L4/01 (15 kW)
 - Strömberg HXUR368G2B3 (22 kW)
 - ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW)
- Maalenkkien vaikutus
 - Molemmat päät maadoitettu omaa reittiä pitkin (moottori maadoitettu sekä moottorikaapelilla, että erillisellä maajohdolla)
 - Toinen pää maadoitettu (moottori maadoitettu ainoastaan moottorikaapelia pitkin)
- KytKentärajapintojen komponentit
 - Ferriittirenkaat: Ferroxcube 4B1
Neosid F10b
 - Kondensaattori: muRata, class X1, Y1 (2 kV)
Bccomponents, 2252 712 Series (2 kV)
Panasonic, ECK Series (10 kV)

Edellä esiteltiin kaikki parametrit, joita testissä käytettiin. Kaikkia variaatioita ei kuitenkaan testattu. Kytkenärajapinnan komponenttiarvojen ja -tyyppien vaikutusta testattiin pääasiassa vaiheen ja suojamaan välisellä kytkentärajapinnalla, mutta muiden parametrien vaikutusta molemmilla kytkentätavoilla.

Taajuusmuuttajalla ajettiin moottoria useimmissa testeissä, mutta myös suoraa käyttöä testattiin. Jokainen testi tehtiin moottorin pyöriessä. FTP-ohjelman antamat tiedonsiirtonopeustulokset kaikille suoritetuille mittauksille on esitetty kuvassa 7.4. Tiedonsiirtonopeus kuvaa kanavan laatua tiedonsiirron kannalta, koska modeemit muuttavat tiedonsiirtonopeutta juuri kanavan laadun mukaan. Suurin nopeus (5.24 Mb/s) saavutettiin suorassa käytössä ja vastaavasti pienin (0.37 Mb/s), jolloin tiedonsiirto vielä toimi, suorassa taajuusmuuttajakäytössä kytkennällä (L1, L2, PE). Muutamassa tapauksessa vaiheen ja suojamaan välisellä kytkennällä tiedonsiirtoyhteyttä ei saatu muodostettua lainkaan. Tällöin moottori-kaapelin pituus oli 200 m. Kahden vaiheen välisellä kytkennällä yhteys saatiin muodostettua kaikissa muissa testatuissa tapauksissa paitsi du/dt-suotimen läpi.



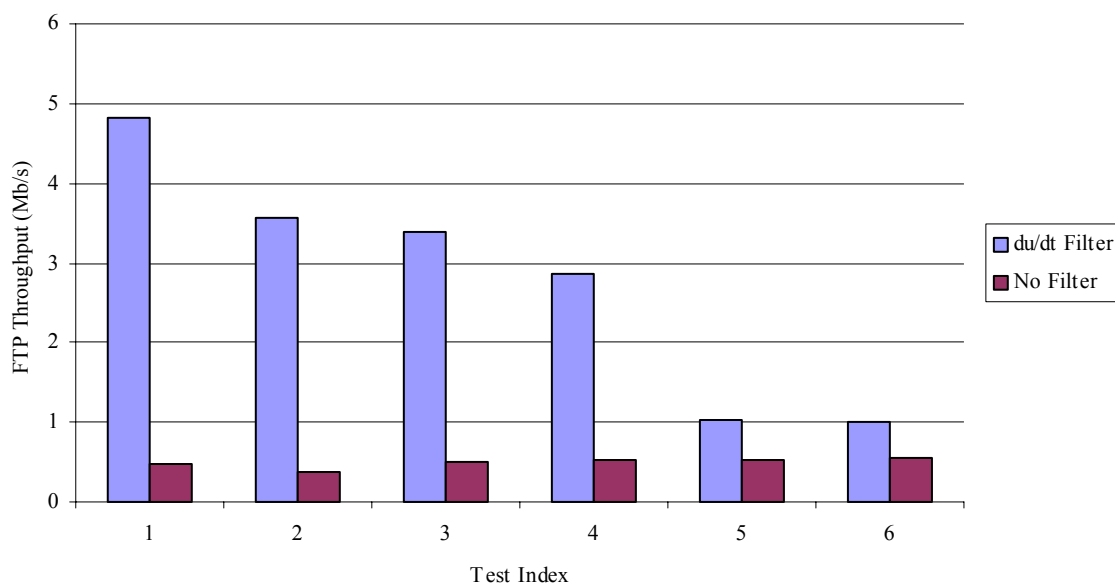
Kuva 7.4. FTP-tiedonsiirtonopeudet tehdyissä testeissä. Testejä tehtiin kaikkiaan 65 kappaletta.

7.3 Tiedonsiirtonopeustestien analysointi

Tiedonsiirtonopeustestien tuloksia analysoitiin. Tavoitteena oli löytää eri parametrien vaikutus ja merkittävyys kanavan laatuun tiedonsiirron kannalta. Analysointi tehtiin tiedonsiirtonopeustestien perusteella. Tutkittavaa parametria muutettiin muun systeemin pysyessä samanlaisena. Seuraavassa on kerrottu analyysin tuloksista sekä sanallisesti että kuvin.

7.3.1 Du/dt-suotimen vaikutus

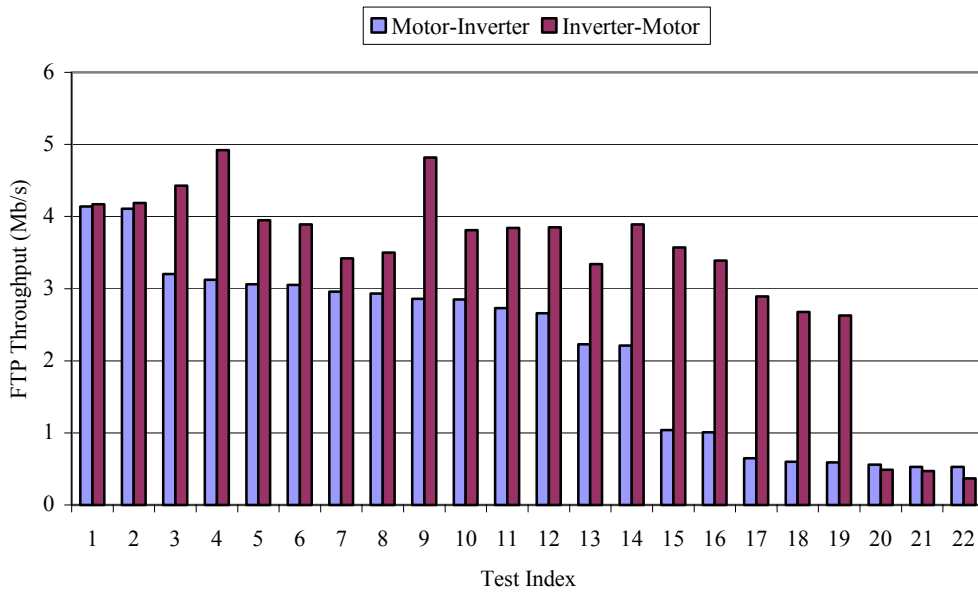
Taajuusmuuttajan lähdössä oleva du/dt-suodin oli analyysin perusteella merkittävin yksittäinen osatekijä saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen. Tulos oli jo ennalta tiedostettavissa, koska du/dt-suotimella suodatetaan korkeita signaalitaajuuksia taajuusmuuttajan lähdestä. Korkeiden häiriötaajuuksien suodattaminen taas vaikuttaa kytkentärajapinnan läpituloisiin jännitepiikkien suuruuteen, jolla taas on suoranainen vaikutus saavutettavaan signaalikohinasuhteeseen. Du/dt-suodin kasvattaa tiedonsiirtokanavan impedanssitasoa taajuusmuuttajan päässä, minkä ansiosta pystytään syöttämään enemmän tehoa vastaanottimen suuntaan kuin ilman du/dt-suodinta. Yleisesti ottaen impedanssitaso vaiheiden välissä ilman suodinta on matala taajuusmuuttajan lähdössä, koska tehotransistorit kytkevät vaiheet joko välipiirin kondensaattorin yli tai samaan vaiheeseen. Impedanssitaso on testien perusteella matala myös kytkeydyttäessä vaiheen ja suojamaan väliin, koska välipiiri on usein sidottu pienellä (1 μ F) kondensaattorilla taajuusmuuttajan suojamaahan. Kuvassa 7.5 on esitetty du/dt-suotimen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen. Du/dt-suodin vaikuttaa saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen kahden asian takia. Suurin syy on se, että se nostaa merkittävästi impedanssitasoa modeemien käyttämällä taajuuksilla taajuusmuuttajan suuntaan. Toinen syy on se, että tehotransistorien aiheuttamien kytkentöjen nousureunoja saadaan hidastettua.



Kuva 7.5. Du/dt-suotimen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen.

7.3.2 Tiedonsiirron suunnan vaikutus

Analyysin perusteella toiseksi merkittävin osatekijä tiedonsiirtonopeuteen oli tiedonsiirron suunta. Samanlaisissa testeissä tiedonsiirtonopeus taajuusmuuttajalta moottorille oli nopeampaa kuin toisinpäin. Taajuusmuuttajan tuottamat häiriöt ovat suuremmat taajuusmuuttajan kuin moottorin päässä, koska taajuusmuuttajan tuottamat korkeat taajuudet vaimenevat edetessään moottorikaapelia pitkin moottorille. Signaalin vaimennusta tapahtuu myös moдемien kanavaan syöttämälle signaalille. Tämän takia myös signaali-kohinasuhde on pienempi vastaanottopäässä moottorilta taajuusmuuttajalle tapahtuvassa tiedonsiirrossa kuin vastaavassa tilanteessa toisinpäin. Signaali-kohinasuhde vaikuttaa saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen varsin suoraan. Tämä ilmenee kuvassa 7.6.



Kuva 7.6. Tiedonsiirronsuunnan vaikutus tiedonsiirtonopeuteen.

7.3.3 Moottorikaapelin pituuden vaikutus

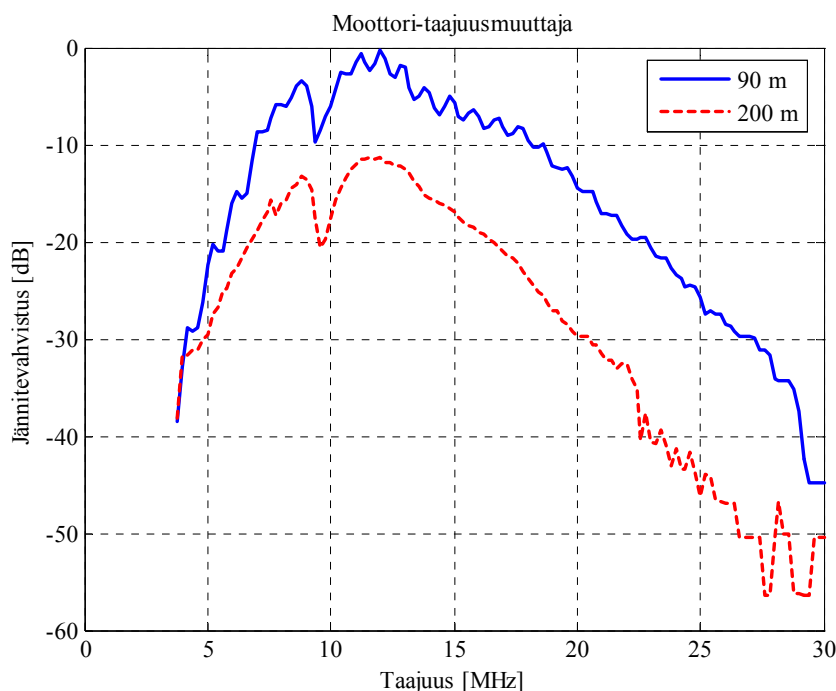
Moottorikaapelin pituuden vaikutusta tiedonsiirtonopeuteen testattiin 90 m ja 200 m Pirelli MCCMK 3x35+16 kaapeleilla. Testien perusteella pituus vaikuttaa oleellisesti saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen moottorilta taajuusmuuttajalle. Tämän aiheuttaa se, että signaali-kohinasuhde heikkenee kaapelin pituuden kasvaessa. Kun kaapelin pituus kasvaa sadalla metrillä, kasvaa tiedonsiirtokanavan vaimennus jopa yli 15 dB (kuva 7.7). Tämän takia myös signaali-kohinasuhde putoaa samassa suhteessa, koska kohinataso pysyy samana taajuusmuuttajan päässä. Shannonin teoreeman mukaan signaali-kohinasuhde vaikuttaa tiedonsiirtokanavan teoreettiseen kapasiteettiin logaritmisesti yhtälön (7.1) mukaan

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (7.1)$$

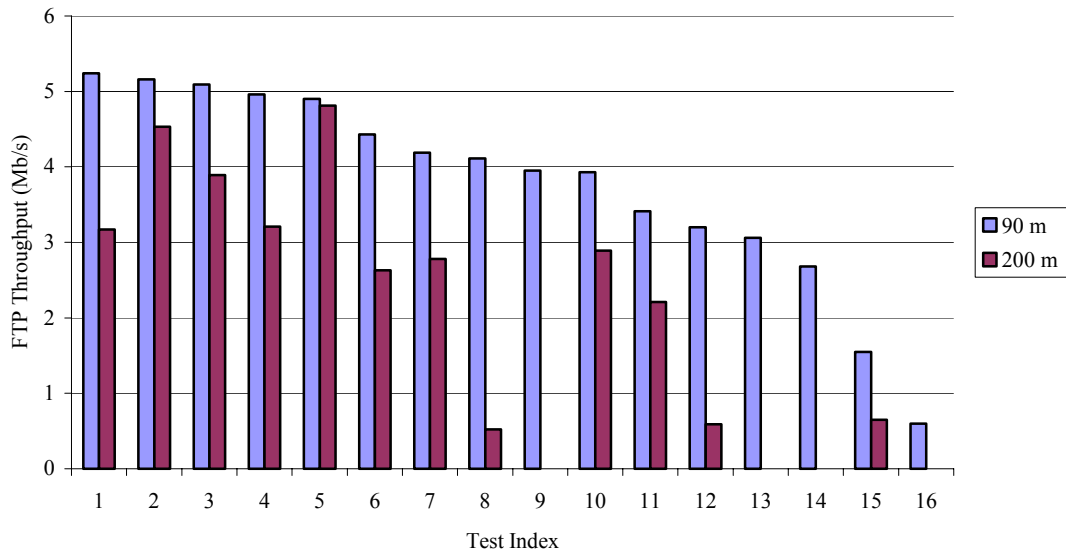
missä C on kanavan tiedonsiirtonopeus (b/s), B taajuuskaistanleveys sekä symbolit S ja N signaali- ja kohinateho vastaanottimella. Väitöskirjassa [4] on esitetty Shannonin teoreeman mukaan laskettuja tiedonsiirtokapasiteetteja eri lähetystehoilla, joista nähdään logaritminen vaikutus. Tämän takia signaali-kohinasuhteen putoaminen ei kaikissa tapauksissa vaikuta niin voimakkaasti saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen, koska se riippuu miten lähellä ollaan kyseistä rajaa, jonka jälkeen tiedonsiirtonopeus alkaa pudota merkittävästi (kuva 7.8). Tiedonsiirtonopeus taajuusmuuttajalta moottorille ei muutu yhtä merkittävästi kuin toiseen suuntaan, koska signaali-kohinasuhde pysyy melko vakiona. Kohinasignaali

ja hyötysignaali vaimenevat samassa suhteessa. Taajuusmuuttajan aiheuttama kohina on kuitenkin merkittävin häiriö taajuusmuuttaja ohjatussa sähkökäytössä. Kuvassa 7.8 on esitetty kaapelin pituuden vaikutus saavutettavaan tiedonsiirtonopeuteen. Kuvasta nähdään, että tiedonsiirtonopeus hidastuu moottorikaapelin pituuden kasvaessa kaikissa tapauksissa. Pidemmällä moottorikaapelilla (200 m) saavutettiin myös ensimmäistä kertaa tilanne, missä tiedonsiirtoyhteyttä ei saatu muodostettua lainkaan. Näissä tapauksissa käytettiin vaiheen ja suojamaan välistä kytkentää. Kahden vaiheen välisellä kytkennällä tiedonsiirto toimi kaikissa tapauksissa.

Testien perusteella voidaan päätellä, että 200 m pitkä moottorikaapeli on maksimi tiedonsiirron kannalta taajuusmuuttajakäytössä, jos toimintavarmuus on tärkeää. Todennäköisesti joissain taajuusmuuttajakäytöissä tiedonsiirto toimii luotettavasti myös yli 200 m moottorikaapelilla, mutta näiden testien perusteella ei voida yleispätevästi sanoa niitä, koska se riippuu niin monesta muustakin tekijästä. Suorassa käytössä ei vielä ollut vaikeuksia lainkaan, sillä siinä päästiin yli 3 Mb/s nopeuksiin kaikissa testatuissa tapauksissa.



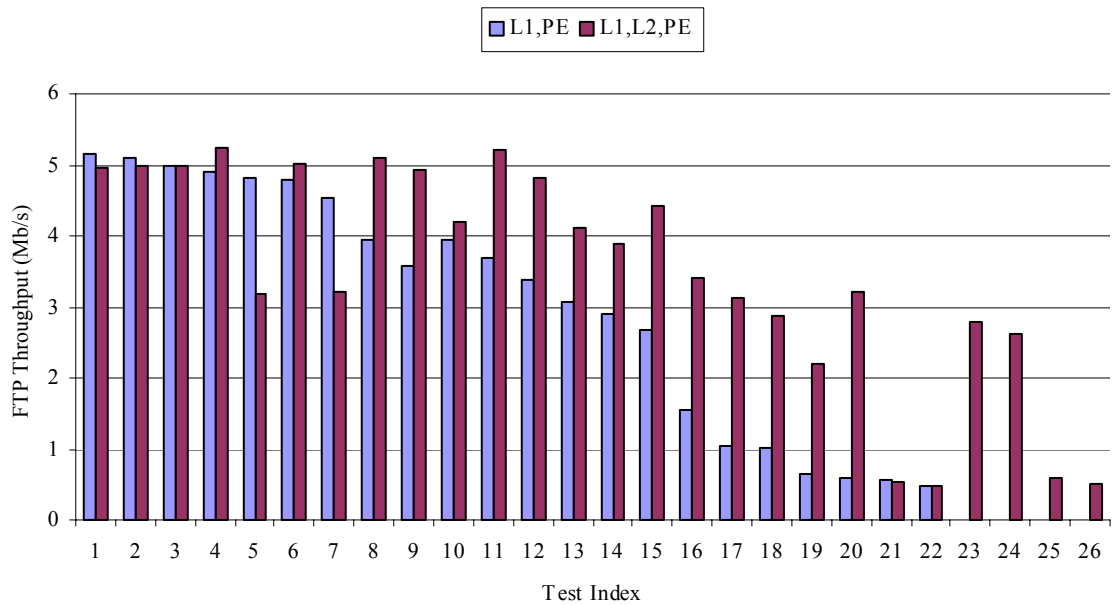
Kuva 7.7. Mitattu tiedonsiirtokanavan vaimennus 90 m ja 200 m moottorikaapelilla taajuuskaistalla 3.8 – 30 MHz. Taajuusmuuttaja Vacon, du/dt-suodin, moottori ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW), moottorikaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16. KytKentä (L1, L2, PE).



Kuva 7.8. Moottorikaapelin pituuden vaikutus tiedonsiirtonopeuteen.

7.3.4 Modeemien kytkeytymistavan vaikutus

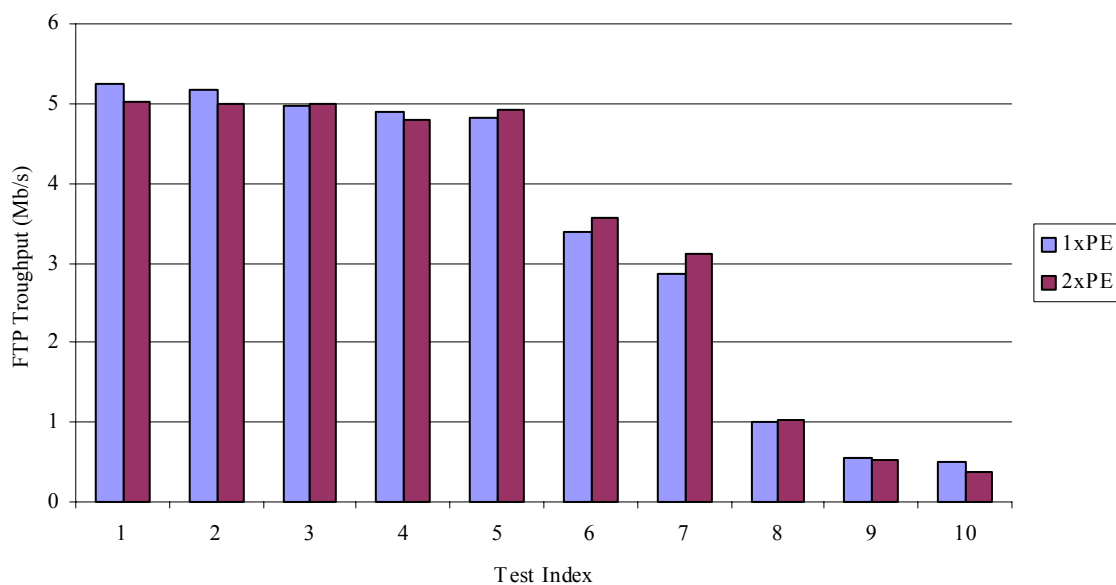
Modeemien kytkeytymistavan vaikutus ei ole selkeä kaikissa tilanteissa. Suorassa käytössä erot ovat varsin pieniä puoleen ja toiseen (testit 1 – 7). Samanlainen suuntaus on myös suorassa taajuusmuuttajakäytössä (testit 21 ja 22). Kun taajuusmuuttajan lähtöön on kytketty lähtösuodin, on ero varsin selvä kahden vaiheen välisen kytkennän hyväksi (testit 8 – 20 ja 23 – 26). Näissä kaikissa tapauksissa kahden vaiheen välinen tiedonsiirto oli nopeampaa kuin vaiheen ja suojavaan välinen. Ero korostui entisestään kasvatettaessa moottorikaapelin pituutta 200 metriin. Testeistä 23 – 26 huomataan, että vaiheen ja suojavaan välisellä kytkennällä ei saatu yhteyttä muodostettua lainkaan, kun taas kahden vaiheen välisellä kytkennällä tiedonsiirto toimi. Kahden vaiheen välisessä tiedonsiirrossa kytkeydytään myös suojavaahan, mutta sitä ei käytetä tiedonsiirrossa. Ylimääräiset maavirrat voivat aiheuttaa ongelmia muiden laitteiden toiminnassa sekä vaikeuttaa vikavirtasuojauksen toimintaa. Vaiheen ja suojavaan välisessä tiedonsiirrossa käytetään suojavaata tiedonsiirtoon, joka tuottaa edellä mainittuja maavirtoja. Kuvassa 7.9 on esitetty kytkeytymistavan vaikutus.



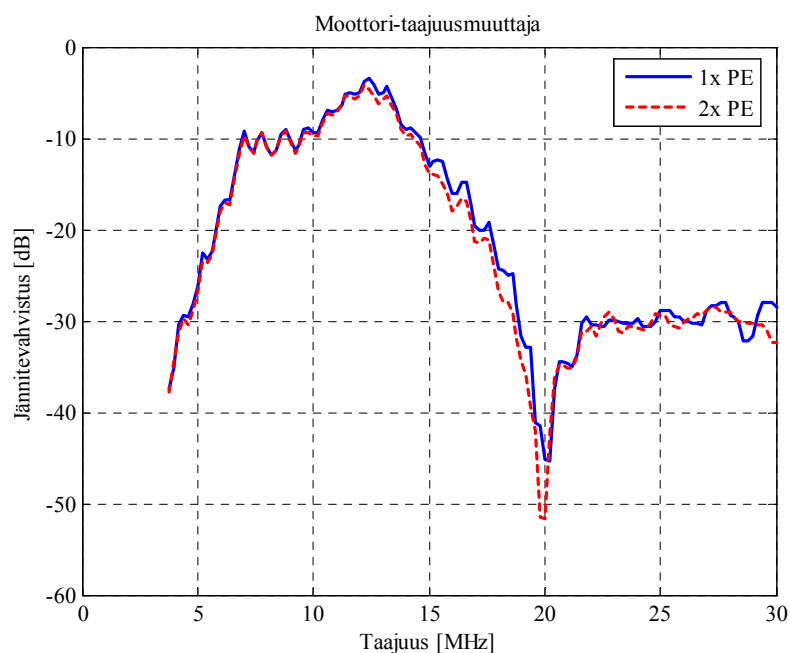
Kuva 7.9. Modeemien kytkeytymistavan vaikutus tiedonsiirtonopeuteen. Testit 1 – 7 on tehty suoralla käytöllä, testit 21 ja 22 suoralla taajuusmuuttajakäytöllä sekä testit 8 – 20 ja 23 – 26 taajuusmuuttajakäytöllä, missä lähtöön on laitettu du/dt-suodin.

7.3.5 Maadoitustavan vaikutus

Neljäs tutkittava kohde oli maadoituksen vaikutus. Testeissä moottorin maadoitus toteutettiin yleisimmin moottorikaapelin avulla. Tämän takia oli oleellista testata maalenkkien vaikutusta tiedonsiirtonopeuksiin, koska käytännössä moottorilla on useampia maadoitusreittejä. Tätä testattiin maadoittamalla moottori sekä moottorikaapelin että erillisen suojaamaan avulla ja vertaamalla tuloksia alkuperäisten järjestelyjen tuloksiin. Molemmista päistä maadoittaminen tuottaa suojaamaassa kulkevalle paluuvirralle toisen vaihtoehdoisen reitin (vaiheen ja suojaamaan välinen kytkeytyminen). Testien perusteella voidaan todeta, että kahdella edellä esitetyllä maadoitustavalla ei ollut vaikutusta tiedonsiirtonopeuksiin kummallakaan kytkentätavalla. Kuvassa 7.10 on esitetty maadoituksen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen ja kuvassa 7.11 kanavan vahvistukseen. Kuvasta 7.11 nähdään, että maadoituksella ei ollut juuri minkäänlaista vaikutusta kanavan vaimennukseen testatuissa tapauksissa.



Kuva 7.10. Maadoituksen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen.



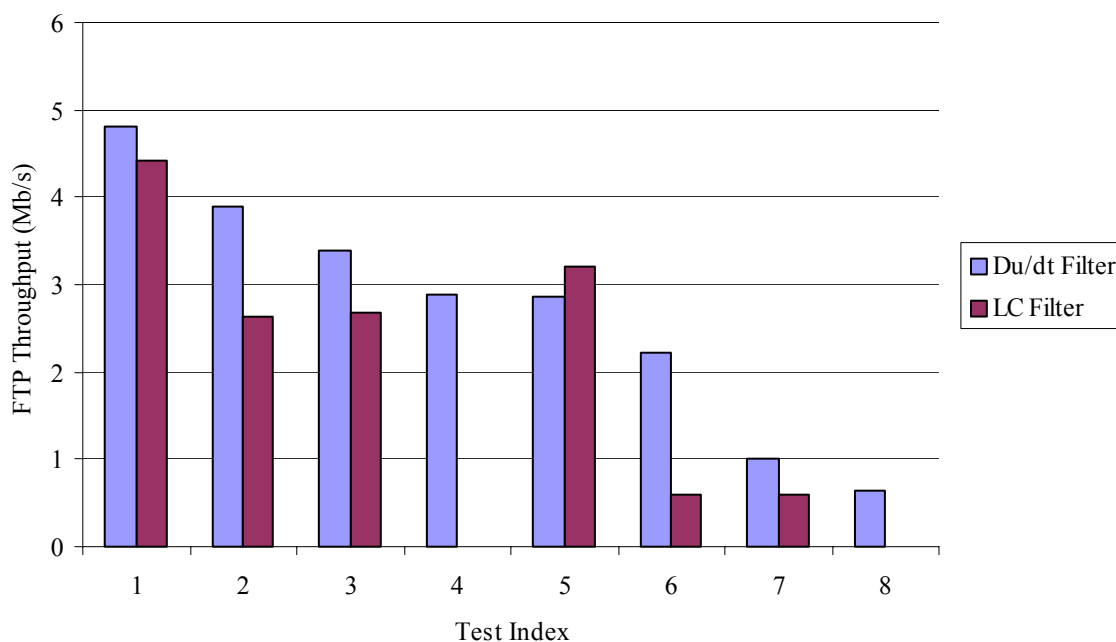
Kuva 7.11. Maadoituksen vaikutus tiedonsiirtokanavan vahvistukseen taajuuskaistalla 3.8 – 30 MHz. Taajuusmuuttaja Vacon, du/dt-suodin, moottori ABB M3BP315MLA4B3 (200 kW), moottorikaapeli Pirelli MCCMK3x35+16 (90 m) ja vaiheen ja suojamaan väliin suunnitellut kytkentäraajapinnat. Kytkentä (L1, PE).

7.3.6 Lähtösuotimen vaikutus

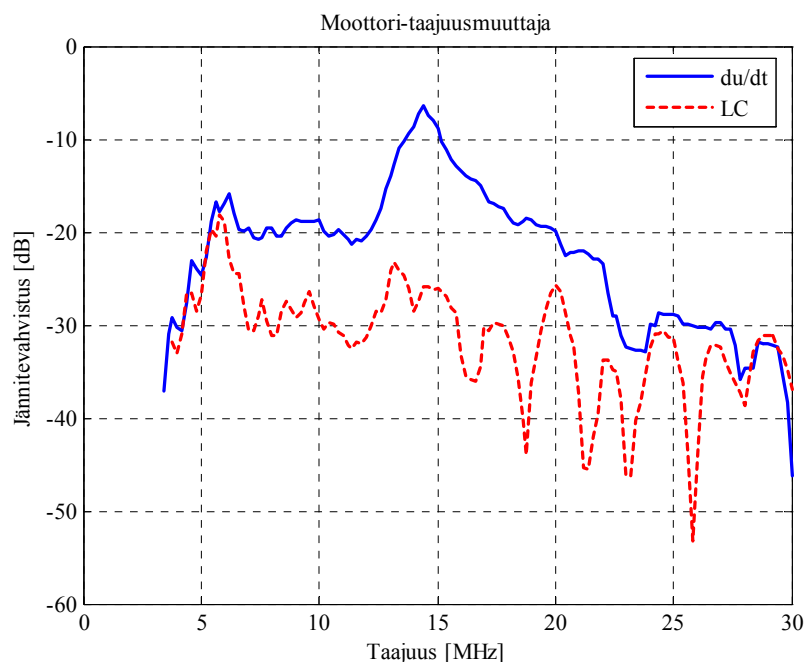
Lähtösuotimen vaikutusta testattiin vertailemalla kahta erilaista suodinta. Ensimmäinen testatuista oli jo aikaisemminkin esillä ollut du/dt-suodin, missä käytetään sarjainduktansseja ja rinnakkaisresistansseja. Toinen oli LC-suodin, ns. ”sinifilteri”, missä lähtöjännit-

teen suodatukseen käytetään keloja ja kondensaattoreita. LC-suotimen lähtöjännite pitäisi olla sinimuotoisempaa kuin du/dt-suotimen. Du/dt-suotimella jännitteestä pyritään poistamaan ainoastaan nopeat nousureunat, kun taas LC-suotimella taajuusmuuttajan jännitepulsseista pyritään tekemään perustaajuista siniaaltoja.

Du/dt-suodin osoittautui paremmaksi tiedonsiirron kannalta kuin LC-suodin (kuva 7.12). LC-suodin aiheutti suuria ongelmia varsinkin vaiheen ja suojamaan välisessä tiedonsiirrossa. Kahden vaiheen välisessä tiedonsiirrossa ei ollut juurikaan eroa lyhyellä (90 m) moottorikaapelilla, mutta pitkällä (200 m) ero kasvoi huomattavasti. Näiden tulosten takia mitattiin kanavan vaimennus LC-suodinta käytettäessä. Tiedonsiirtokanavan vaimennus kahden vaiheen välisessä tapauksessa oli molemmilla suotimilla lähes samanlainen. Vaiheen ja suojamaan tapauksessa ero suotimien välillä oli varsin huomattava (kuva 7.13). Tästä juuri aiheutui suuri ero tiedonsiirtonopeuksissa du/dt-suotimen hyväksi, kun kytkentänä oli (L1, PE). Tiedonsiirron kannalta on tärkeämpää se, millaiseksi kanavan kokonaisvaimennus muodostuu eli kuinka paljon tehoa pystytään siirtämään lähettimeltä vastaanottimelle. LC-suodin vaikuttaisi testien perusteella huonontavan kanavan laatua du/dt-suotimeen verrattuna erityisesti vaiheen ja suojamaan välisessä tiedonsiirrossa. LC-suodin aiheutti ongelmia myös kahden vaiheen välisessä tiedonsiirrossa, kun käytettiin 200 m moottorikaapelia.



Kuva 7.12. Lähtösuotimen vaikutus tiedonsiirtonopeuteen.



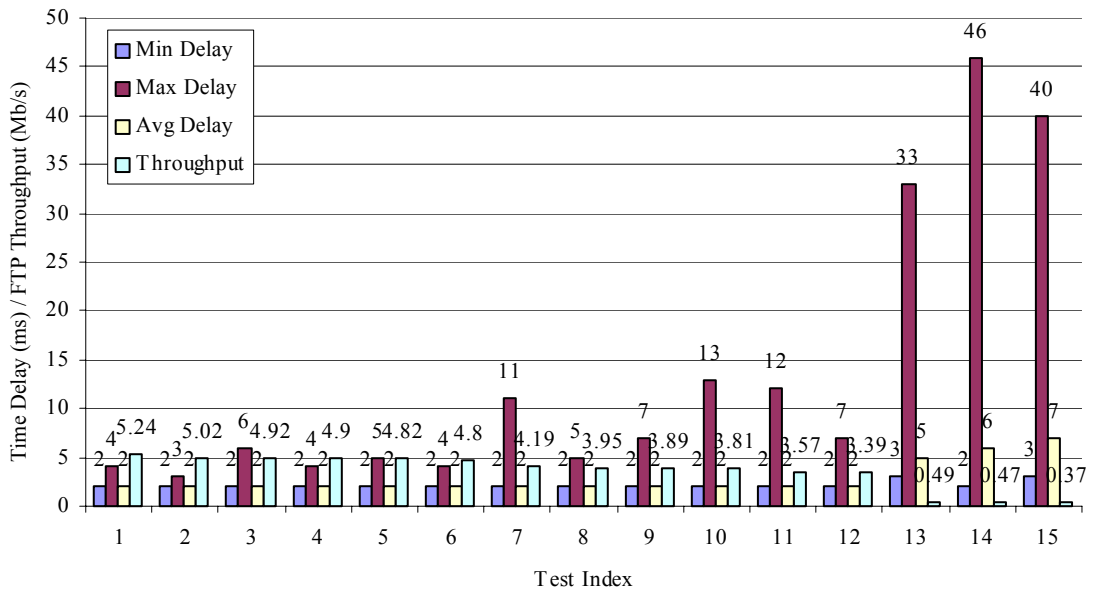
Kuva 7.13. Mitattu tiedonsiirtokanavan vaimennus du/dt- ja LC-suodinta käytettäessä taajuuskaistalla 3.8 – 30 MHz. Testissä käytettiin ACS400 taajuusmuuttajaa, Invensys T-01F160L4/01 moottoria (15 kW), Pirelli MCCMK 3x35+16 moottorikaapelia (90 m) sekä vaiheen ja suojamaan välistä kytkentäraja- pinta-aa.

Suoritettujen testien perusteella voitaisiin päätellä, että taajuusmuuttajan tuottaman häiriön suodatus ei ole tärkeintä vaan se, että suodin mahdollistaa tehon siirtämisen kanavan eikä taajuusmuuttajan suuntaan. Suotimen pitäisi tällöin näyttää suurelta impedanssilta modeemien käyttämällä taajuuksilla.

7.3.7 Tiedonsiirron viive

Tiedonsiirtonopeutta tärkeämpi tekijä varsinkin säätösovellusten kannalta on tiedonsiirron viive. Tiedonsiirron viivettä testattiin ping-testiohjelman avulla. Se perustuu Ethernet:n IP-kehukseen kapseloitavaan ICMP-protokollaan (Internet Control Message Protocol). Ping-testiohjelma lähettää paketin kohdeosoitteeseen ja mittaa viivettä, joka kuluu siihen kunnes se vastaanottaa saman paketin kohdeosoitteesta. Jokaisessa testissä lähetettiin sata kappaletta 32 tavun kokoisia paketteja. Paketteja ei kadonnut, koska Ethernet:n kapseloiva HomePlug 1.0-protokolla sisältää virheenkorjausmekanismin, missä kadonneet paketit lähetetään uudelleen. Tämän takia häiriöisessä ympäristössä, missä tiedonsiirtonopeudet ovat heikkoja, vasteajat saattavat olla suuria. Testien tulokset on koottu kuvaan 7.14. Kuvassa on esitetty jokaisesta testistä minimi-, maksimi- ja keskiarvoviive sekä saavutettu tiedonsiirtonopeus. Suurimmassa osassa testejä keskimääräinen viive on 2 ms ja vaihtelu pientä.

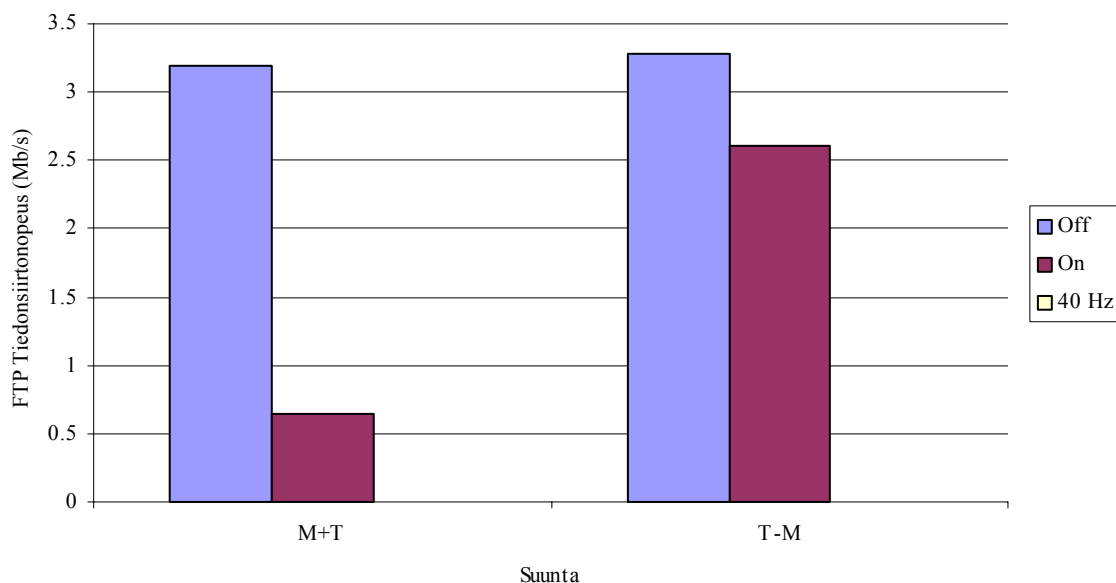
Huonolaatuisessa kanavassa, jolloin tiedonsiirtonopeus on alle 1 Mb/s, keskimääräinen viive kasvaa ja yksittäiset viiveet voivat olla lähes 50 ms.



Kuva 7.14. Ping-testiohjelmalla mitatut vasteajat ja FTP:lla mitatut tiedonsiirtonopeudet.

7.3.8 Tiedonsiirto läpi du/dt-suotimen

Tiedonsiirron toimivuutta du/dt-suotimen läpi testattiin taajuusmuuttajakäytössä. Lähtökohdat testin onnistumiselle olivat varsin huonot, koska tiedonsiirto suorassa taajuusmuuttajakäytössä oli aikaisemmissa testeissä hidasta. Testissä toinen modeemi kytkettiin taajuusmuuttajan lähtöön ennen du/dt-suodinta ja toinen moottorin liittimiin. Tiedonsiirron toimivuutta testattiin jännitteettömänä, jännitteisenä ja siten, että taajuusmuuttajalla ajettiin moottoria. Tiedonsiirtoyhteys saatiin muodostettua kahdessa ensin mainitussa tapauksessa, mutta ei viimeisessä. Tiedonsiirtonopeus moottorilta taajuusmuuttajalle oli hidasta (0.65 Mb/s), kun taajuusmuuttaja oli päällä, mutta sillä ei ajettu moottoria. Kun taajuusmuuttajalla ajettiin moottoria, tiedonsiirtoyhteyttä ei saatu muodostettua lainkaan. Kuvassa 7.15 on esitetty tulokset tiedonsiirtotestistä. Testin perusteella voidaan todeta, että edellä esitelty järjestely ei ole mahdollista tiedonsiirron kannalta taajuusmuuttajakäytössä ainakaan järkevän pituisilla moottorikaapeleilla. Aikaisemmissa testeissä tiedonsiirto toimi moitteettomasti kahden vaiheen välillä vielä 200 m moottorikaapelilla, kun nyt ei saatu muodostettua edes yhteyttä modeemien välille 90 m moottorikaapelilla. Täten, jos tiedonsiirtoyhteys halutaan viedä du/dt-suotimelta taajuusmuuttajalle päin, on se tehtävä jollain muulla tavalla kuin moottorin syöttökaapelia pitkin.



Kuva 7.15. Tiedonsiirtonopeus du/dt-suotimen läpi. Testissä oli moottori Invensys T-01F160L4/01 (15 kW), kaapeli Pirelli MCCMK 3x35+16 (90 m), taajuusmuuttaja ACS400, du/dt-suodin ja vaiheiden väliset kytkentäraja- pinnat. Verkon pääjännite oli 400 V. KytKentäraja- pinta oli kiinnitetty taajuusmuuttajan terminaaleihin.

7.4 Testilaitteen koetestit

Testilaitteiston toimivuutta testattiin tiedonsiirtotestein. Ensiksi mitattiin, ettei ole oikosulkuja, jonka jälkeen laitteet kiinnitettiin taajuusmuuttajakäyttöön. Testilaitteilla mitattiin tiedonsiirtonopeudet samassa käytössä, missä oli aiemminkin mitattu. Taajuusmuuttajana oli ACS400, du/dt-suodin, MCCMK 3x35+16 moottorikaapeli (90 m) ja moottori Invensys (15 kW). KytKentänä käytettiin sekä (L1, L2, PE) että (L1, PE). KytKentäraja- pinnan vaihto onnistui piirilevyä vaihtamalla. Testilaitteiden toimivuus testattiin sekä verkko- että akkusähköllä. Alla olevassa taulukossa 7.1 on esitetty testituloksia. Testissä lähetettiin n. 40 MB zip-tiedostoa FTP:lla sekä moottorilta taajuusmuuttajalle että toisinpäin ja mitattiin tiedoston lähetykseen kulunut aika ja keskimääräinen tiedonsiirtonopeus.

Taulukko 7.1. Testilaitteiston testaustuloksia. Taajuusmuuttaja ACS400, du/dt-suodin, moottorikaapeli MCCMK 3x35+16 (90 m) ja moottori Invensys (15 kW).

C [Mb/s]	t [s]	Suunta	Testikokoonpano	Sähkösyöttö	Kytkenä
2.86	137.4	M – T	Alkuperäinen	akku	(L1, L2, PE)
3.41	115.1	M – T	Testilaitteisto	akku	(L1, L2, PE)
4.27	92.1	M – T	Testilaitteisto	verkko	(L1, L2, PE)
4.82	81.6	T – M	Alkuperäinen	akku	(L1, L2, PE)
5.09	77.2	T – M	Testilaitteisto	akku	(L1, L2, PE)
5.12	76.8	T – M	Testilaitteisto	verkko	(L1, L2, PE)
1.01	398.6	M – T	Alkuperäinen	akku	(L1, PE)
1.55	253.2	M – T	Testilaitteisto	akku	(L1, PE)
1.31	300.3	M – T	Testilaitteisto	verkko	(L1, PE)
3.39	116.1	T – M	Alkuperäinen	akku	(L1, PE)
3.93	100.0	T – M	Testilaitteisto	akku	(L1, PE)
3.44	114.2	T – M	Testilaitteisto	verkko	(L1, PE)

Taulukosta 7.1 nähdään, että testilaitteisto toimi hyvin. Kaikissa tapauksissa tiedonsiirtonopeudet olivat suurempia kuin alkuperäisellä pilot-laitteella suoritettujen mittauksien. Tiedonsiirron tehdastestejä varten tehtiin 4 testilaitteistoa eli yhteensä 8 testilaitetta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Tiedonsiirtotestien perusteella voidaan todeta, että tiedonsiirto moottorikaapelissa on varsin luotettavaa, kun kaapelipituudet ovat alle 200 m ja taajuusmuuttajan lähdössä käytetään suodinta, joka nostaa impedanssitasoa taajuusmuuttajan suuntaan. Tämä on tuloksena hyvä, koska Suomen prosessiteollisuudessa käytettävien moottori- ja generaattorikaapeleiden pituus on tyypillisesti 70 – 80 metriä [28]. Tiedonsiirto on järkevintä tehdä kahden vaiheen välillä. Tällä tavoin ei tuoteta yhteismuotoista virtaa, koska signaali kytketään moottorikaapeliin differentiaalisena. HomePlug-tekniikkaa voidaan edellä esitettyjen mittauksien perusteella soveltaa moottorikaapelissa tapahtuvaan tiedonsiirtoon. Modeemiverkko toimii Ethernet-verkon keskuksena/kytkimenä ja se vaatii ainoastaan Ethernet-liitynnän siihen liittyviltä laitteilta. Tekniikka mahdollistaa laajakaistaisen tiedonsiirron, joka avaa monia mahdollisuuksia. Menetelmällä saavutettavat tiedonsiirtonopeudet moottorikaapelissa vaihtelevat välillä n. 0.5 – 5 Mb/s. Standardoidun tekniikan hyödyntäminen on helppoa, koska laitevalmistajia on useita ja standardin laitteet ovat toistensa kanssa yhteensopivia. Taulukossa 8.1 on esitetty saavutettaviin tiedonsiirtonopeuksiin eniten vaikuttavia tekijöitä.

Taulukko 8.1. Eniten merkitsevien parametrien vaikutus tiedonsiirtonopeuteen moottorikaapelissa taajuusmuuttajan ja moottorin välillä.

Testi	Vaikutus	Kommentit
Taajuusmuuttajan lähtösuodin		
Du/dt-suodin vs. ei suodinta	+++	Tiedonsiirtonopeus kasvaa voimakkaasti, kun taajuusmuuttaja varustetaan du/dt-suotimella.
Tiedonsiirron suunta		
Taajuusmuuttaja-moottori vs. moottori-taajuusmuuttaja	++	Tiedonsiirto taajuusmuuttajalta moottorille on nopeampaa kuin päinvastoin.
Modeemin kytkentätavan vaikutus		
Signaalin kytkentä vaiheiden väliin (L1, L2) vs. signaalin kytkentä vaiheen ja suojamaan väliin (L1, PE)	+	Tiedonsiirto vaiheiden välissä on hiukan nopeampaa kuin vaiheen ja suojamaan välissä. Tilanne kuitenkin muuttuu, mikäli taajuusmuuttajassa ei käytetä du/dt-suodinta.
Moottorikaapelin maadoitus		
PE-johtimen sitominen suojamaan taajuusmuuttajan päästä vs. PE-johtimen sitominen suojamaan sekä moottorin ja taajuusmuuttajan päistä	ei vaikutusta	Yleisesti ottaen teollisuusympäristössä signaalilla, joka on sidottu suojamaan on muita kulkureittejä kaapelin PE-johtimen lisäksi.

Tässä diplomityössä esitelty tiedonsiirtomenetelmä ja kehitetty kytkentärajapinta moottorikaapelissa tapahtuvaan tiedonsiirtoon taajuusmuuttajakäytössä eroavat radikaalisti aikai-

semmin esitetyistä. Saavutettaviin tiedonsiirtonopeuksiin vaikuttaa oleellisesti käytettävä HomePlug-tekniikka, joka soveltuu erinomaisesti kyseiseen sovellukseen sellaisenaan. Työssä kehitetty kytkentäraja-alue eroi oleellisesti aikaisemmin esitetystä (artikkeli [9]). Kytkentäraja-alue on samanlainen sekä lähetys- että vastaanottopäässä. Taajuusmuuttajan aiheuttama jännite saadaan suodatettua alle 6 V peak-to-peak jännitetasoon (vrt. 70 V peak-to-peak jännitetaso [9]) käytöstä riippuen. Tiedonsiirto on kaksisuuntaista. Tiedonsiirtonopeudet ovat välillä n. 0.5 – 5 Mb/s (vrt. 9600 b/s [9]). Tiedonsiirto toimi kahden vaiheen välillä vielä 200 m moottorikaapelilla. Kehitettyä simulointimallia voidaan käyttää arvioitaessa erilaisten tiedonsiirtokanavien kokonaisvaimennuksia taajuustasossa kanavan päästä päähän. Simulointimallista saadut tulokset vastasivat laboratorioissa mitattuja.

Menetelmän tärkein sovellus on moottorin kunnonvalvontaan liittyvä tiedonsiirto. Menetelmällä saavutetut tiedonsiirtonopeudet riittävät moottorin jatkuvaan kunnonvalvontaan tarvittaviin sovelluksiin. Artikkelin [8] mukaan menetelmän suurin etu on se, ettei uusia kaapeleita tarvitse asentaa. Menetelmää voidaan myös pitää luotettavampana kuin langattomia menetelmiä, koska tiedonsiirtokanavan ominaisuudet ovat suhteellisen aikainvariantteja. Langattomiin menetelmiin verrattuna menetelmälle ei ole haittaa esimerkiksi lattioista, metallipinnoista ja erityisesti liikkuvista esineistä [8]. Artikkelin [7] mukaan esiteltyä menetelmää voidaan käyttää moottorin tai generaattorin säätöön. Yksi mahdollisuus olisi käyttää tässä tapauksessa tiedonsiirtokanavaa ns. takaisinkytkentäkanavana. Yleisesti moottorin säädössä hyödynnetään pyörimisnopeus- ja roottorin kulman mittauksia. Toinen sovellus voisi olla parametrien siirto moottorilta taajuusmuuttajalle tai moottorin ohjaimelle ennen kuin niillä ryhdytään ajamaan uutta moottoria. Kolmas mahdollinen sovellus olisi yhdistää tiedonsiirto laitekokonaisuuteen, jota ohjataan sähkökäytöllä. Esimerkiksi pumppun tai puhaltimen kunnonvalvontajärjestelmä voitaisiin yhdistää moottorin kunnonvalvontajärjestelmään. Se olisi hyödyllistä, koska nämä yhdessä muodostavat mekaanisen kokonaisuuden ja täten eri komponenttien toiminta vaikuttaa myös toisten komponenttien toimintaan. [7] Neljäs mahdollinen sovellus olisi pyöritettävän laitteen säätö. Pyöritettävän laitteen mittausravot voitaisiin tuoda taajuusmuuttajassa olevalle säätöalgoritmille tai pyöritettävässä laitteessa sijaitseva säätäjä voisi lähettää taajuusmuuttajalle suoraan toimintaohjeen (asetusarvon).

Aiheeseen liittyvää tutkimustyötä on vielä paljon. Simulointimallia voidaan kehittää entisestään, jotta sillä voitaisiin arvioida esimerkiksi tiedonsiirron toimivuutta tietyssä sähkökäytössä. Vielä edistyneemmän simulointimallin avulla voitaisiin arvioida taajuusmuuttajakäytössä saavutettavia tiedonsiirtonopeuksia. Tämä vaatisi HomePlug-protokollan simulointimallin sekä hyvän mallin myös taajuusmuuttajan lähtösignaalille. Kytkentärajapintaa voidaan vielä jatkokehittää, jotta tiedonsiirrosta saataisiin kaikki mahdollinen irti. Mielenkiintoista olisi myös selvittää uuden HomePlug AV-standardin modeemien toimivuus taajuusmuuttajakäytössä. Tämä ei vielä ole mahdollista, koska uuden standardin mukaisia modeemeja ei ole vielä saatavilla. HomePlug AV käyttää taajuuskaistaa 2 – 28 MHz [3]. Taajuuskaista on jaettu OFDM-monikantoaaltoimenetelmällä yli 1000 kantaaltoon ja virheenkorjauksessa käytetään tehokkaita koodausmenetelmiä (Turbo Convolutional Codes) [29]. Näiden perusteella voisi helposti olettaa, että HomePlug AV-standardin modeemeilla saavutettaisiin paljon suurempia tiedonsiirtonopeuksia kuin diplomityössä testatuilla HomePlug 1.0-standardin modeemeilla. Ainakin teoriassa nopeuksien pitäisi olla yli kymmenkertaisia. HomePlug 1.0:n uudempi versio (HomePlug 1.0 with Turbo) olisi myös mielenkiintoista testata. Näiden lisäksi menetelmän testaaminen moottorin säädössä, erilaisissa kunnonvalvontasovelluksissa ja teollisuusympäristössä ovat mielenkiintoisia kohteita. Tehdasolosuhteissa tehtävät testit antavat kuvaa menetelmän toimivuudesta oikeissa sovelluksissa. Tiedonsiirtonopeus riittää kuitenkin lähes kaikkiin kunnonvalvonnan ja säädön sovelluksiin. Vasteaika ja sen vaihtelut ovat kriittisempiä ainoastaan säädön kannalta.

9 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia sähköverkkotiedonsiirron soveltuvuutta moottorin tai generaattorin ja taajuusmuuttajan tai moottorinohjaimen väliseen tiedonsiirtoon sekä suunnitella tarvittava pilot-laitteisto tiedonsiirtotestejä varten. Diplomityössä esiteltiin menetelmä Ethernet-yhteyden muodostamiseen moottorin ja taajuusmuuttajan välille. Menetelmä hyödyntää tiedonsiirrossa moottorikaapelia ja HomePlug-tekniikkaa. Modeemiverkko toimii Ethernet-verkon keskuksena/kytkimenä. Tämän takia menetelmä on sovelias sellaisenaan useimpiin sovelluksiin, koska modeemit eivät tarvitse toimiakseen mitään ylimääräisiä ohjelmistoja. Menetelmä mahdollistaa moottorille asennettujen anturien mittausdatan siirtämisen ylemmälle tietojärjestelmätasolle (taajuusmuuttaja) ja mahdollisuuden hyödyntää tiedonsiirtoa erilaisissa säätösovelluksissa, jotka eivät ole erityisen aikakriittisiä.

Työssä kehitettiin simulointimalli tiedonsiirtokanavana toimivan taajuusmuuttajakäytön simuloimiseen. Simulointimalli ottaa huomioon kanavan taajuusriippuvan vaimennuksen sekä kytkentärajapintojen ja impedanssien epäjatkuvuuskohtien vaikutukset. Sen avulla pystytään muun muassa arvioimaan erilaisten osien vaikutusta tiedonsiirtokanavan taajuusriippuvaan kokonaisvaimennukseen, tiedonsiirron toimivuutta erilaisissa ympäristöissä ja esimerkiksi suunnittelemaan ja testaamaan erilaisia kytkentärajapintoja. Lisäksi käsiteltiin kanavamallin muodostusta ja kohinan simulointia. Simulointimallin toimivuus varmistettiin erilaisille taajuusmuuttajakäyttöille tehtyjen laboratoriomittausten avulla. Mittauksista saatiin eri tiedonsiirtokanavien taajuusriippuva jännitevaimennus.

Työssä kehitettiin kaksi erilaista kytkentärajapintaa, joilla voitiin liittää sähköverkkomodeemit kolmivaiheiseen moottorikaapeliin. Kytkentärajapinnat suunniteltiin sekä vaiheen ja suojamaan että kahden vaiheen välille. Kytkentärajapintoja vertailtiin keskenään. Kytkentärajapinta mahdollisti tiedonsiirron moottorikaapelia pitkin taajuusmuuttajakäytössä. Kytkentärajapinta on kaistanpäästösuodin, joka suodattaa taajuusmuuttajan lähtöasteen tuottamat jännitteet, mutta päästää läpi modeemien lähettämän signaalin pienellä vaimennuksella molempiin suuntiin. Kytkentärajapinta erottaa galvaanisesti moottorikaapelin ja modeemit toisistaan. Lisäksi kytkentärajapinta suojaa modeemeja ylijännitetransienteilta.

Lisäksi työssä rakennettiin pilot-laitteita tiedonsiirron laboratoriotestejä varten. Tiedonsiirtotestejä tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tehoelektroniikan laboratoriossa. Tiedonsiirtotestien avulla saatiin selvyys menetelmän soveltuvuudesta moottorikaapelissa tapahtuvaan tiedonsiirtoon taajuusmuuttajaohjatussa moottorikäytössä. Tiedonsiirtotestien tarkoituksena oli määrittää erilaisten taajuusmuuttajakäytössä olevien osien (taajuusmuuttaja, moottori, kaapelin pituus, lähtösuodin, maadoitus yms.) vaikutusta tiedonsiirron toimivuuteen. Tiedonsiirtotestien analysoinnin perusteella saatiin selvä käsitys erilaisten parametrien vaikutuksesta tiedonsiirron toimintaan taajuusmuuttajaohjatussa sähkökäytössä. Testeissä testattiin myös suoria sähkökäyttöjä, joiden voidaan ajatella olevan kuitenkin erikoistapaus nopeussäädettävästä käytöstä. Lisäksi saatiin määritettyä suuntaa-antavat reunaehdot tiedonsiirron toiminnalle. Tulokset ovat merkittäviä luotettavan tiedonsiirtoyhteyden muodostamisen kannalta moottorin ja taajuusmuuttajan tai moottorinohjaimen välisessä moottorikaapelissa.

LÄHTEET

- [1] Lindh, Tuomo 2003. On The Condition Monitoring of Induction Machines. Dissertation, Lappeenranta University of Technology. ISBN 951-764-841-3
- [2] Dostert, Klaus 2001. Power Line Communications. Prentice-Hall International, Inc.: Upper Saddle River, NJ 07458. ISBN 0-13-029342-3
- [3] HomePlug Powerline Alliance, www.homeplug.org.
- [4] Ahola, Jero 2003. Applicability of Power-Line Communications to Data Transfer of On-Line Condition Monitoring of Electrical Drives. Dissertation, Lappeenranta University of Technology. ISBN 951-764-783-2
- [5] Hansen, Diethard 2002. Update on Power Line Telecommunication (PLT) Activities in Europe. Electromagnetic Compatibility, 2002 IEEE International Symposium on Vol. 1, 19-23 Aug. 2002.
- [6] EN 50 065-1, Signalling on Low Voltage Electrical Installations in the Frequency Range 3 kHz to 148.5 kHz, GENELEC, Brussels 1991.
- [7] J. Ahola, J. Toukonen, A. Kosonen, T. Lindh and R. Tiainen 2005. Ethernet to Electric Motor – Via Mains Cable. The 18th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 2005 COMADEM International 31st – 2nd August, Cranfield University, UK.
- [8] J. Ahola, J. Toukonen, A. Kosonen, T. Lindh and V. Särkimäki 2005. Electric Motor Cable Communication Overcomes the Biggest Obstacle in On-line Condition Monitoring. Proceedings of Condition Monitoring 2005 Conference, 18th – 21st July, King's College Cambridge, UK.

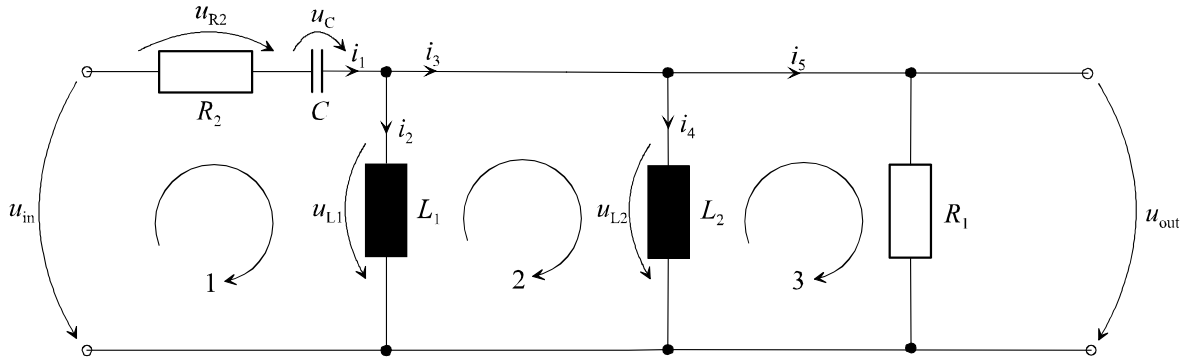
- [9] Shaotang Chen, Erkuan Zhong, and Thomas A. Lipo 1994. A New Approach to Motor Condition Monitoring in Induction Motor Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, July / August 1994.
- [10] Kaywan H. Afkhamie, Srinivas Katar, Larry Yonge, and Richard Newman, 2005. An Overview of the upcoming HomePlug AV Standard. Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on 6th – 8th April 2005.
- [11] Yu-Ju Lin, Haniph A. Latchman, Richard E. Newman, and Srinivas Katar, 2003. A Comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks. University of Florida and Intellon Corporation. IEEE Communications Magazine, Vol. 41, No. 4, April 2003.
- [12] M. K. Lee, H. A. Latchman, R. E. Newman, S. Katar, and L. Yonge, 2002. Field Performance Comparison of IEEE 802.11b and HomePlug 1.0. Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'02). 0742-1303/02 © 2002 IEEE.
- [13] HomePlug Field Test Results, 2003. www.homeplug.org.
- [14] M. K. Lee, R. E. Newman, H. A. Latchman, S. Katar, and L. Yonge 2000. HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs – *Protocol Description and Performance Results, version 5.4*. International Journal of Communication Systems, 2000; **00**:1-6.
- [15] Myong-Hee Jung, Min Young Chung, and Tae-Jin Lee, 2005. MAC Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, Vol. 9, No. 2, February 2005.
- [16] Ioannis C. Papaleonidopoulos, Constantinos G. Karagiannopoulos, Nickolas J. Theodorou, and Christos N. Capsalis, 2005. Theoretical Transmission-Line Study

of Symmetrical Indoor Triple-Pole Cables for Single-Phase HF Signalling. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

- [17] Manfred Zimmermann, and Klaus Dostert 1999. A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Lancaster UK 30th May – 1st June 1999, pp. 45-51.
- [18] Phillips, Holger 1999. Modelling of Power-line Communication Channels. 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Lancaster UK 30th May – 1st June 1999, pp. 14-21.
- [19] T. C. Banwell, and S. Galli 2001. A New Approach to the Modelling of the Transfer Function of The Power Line Channel. ISPLC 2001, Lund University, Malmö, Sweden, 4th – 6th April 2001, pp. 319-324.
- [20] T. Esmailian, F. R. Kschischang, and P. G. Gulak 2002. An In-building Power Line Channel Simulator. ISPLC 2002, Athens, Greece, 27th – 29th March 2002.
- [21] Pyrhönen, Juha ja Nerg, Janne 2002. Sähkömagnetismi, opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- [22] J. Ahola, T. Lindh and J. Partanen 2003. Simulation Model for Input Impedance of Low Voltage Power Cables at Frequency Band 100 kHz – 30 MHz. IEEE IEMDC'03, 1st – 4th June 2003, Madison, Wisconsin, USA.
- [23] Matthias Götz, Manuel Rapp, and Klaus Dostert, 2004. Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design. IEEE Communications Magazine, Vol. 42, No. 4, April 2004.

- [24] Ettore J. Bartolucci, Bob H. Fince, 2001. Cable Design for PWM Variable-Speed AC Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 2, March / April 2001.
- [25] Neosid, 18th Jun. 2002. F10b datasheet.
- [26] Ferroxcube, 1st Sep. 2004. 4B1 datasheet.
- [27] Traco Power, Dec. 2004. TEN 12-2421 datasheet.
- [28] Ahola, Jero 2001. Pienjännitevoimakaapeliin ominaisuudet sähköverkkotiedonsiirron kannalta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- [29] Intellon, HomePlug[®] AV Overview, 2005. www.intellon.com.

Kuvassa I.1 on esitetty kytkentärajapinnan simulointimalli, mistä on poistettu hajakomponentit. Hajakomponentit poistettiin, jotta siirtofunktiota saataisiin yksinkertaistettua. Ne eivät kuitenkaan vaikuta oleellisesti kytkentäpiikkien suodatustulokseen.



Kuva I.1. Kytkentärajapinnan simulointimalli, mistä on poistettu hajakomponentit. Kuvaan on merkitty siirtofunktion johtamisessa tarvittavat jännitteet ja virrat sekä numeroidut silmukat.

Kuvan I.1 perusteella voidaan kirjoittaa seuraavat yhtälöt jännitteille

$$\begin{cases} u_{R2} = R_2 i_1 \\ u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

ja virroille

$$\begin{cases} i_2 = \frac{1}{L_1} \int_0^t u_{L1} dt \\ i_4 = \frac{1}{L_2} \int_0^t u_{L2} dt \\ i_5 = \frac{u_{out}}{R_1} \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

Kirchhoff:n virtalain perusteella voidaan kirjoittaa

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ i_3 = i_4 + i_5 \end{cases} \Rightarrow i_1 = i_2 + i_4 + i_5 \quad (\text{I.3})$$

Silmukayhtälöt järjestyksessä 1, 2 ja 3

$$\begin{cases} u_{in} = u_{R2} + u_C + u_{L1} \\ u_{L1} = u_{L2} \\ u_{L2} = u_{out} \end{cases} \Rightarrow u_{in} = u_{R2} + u_C + u_{out} \quad (\text{I.4})$$

LIITE I, 2

Yhdistämällä yhtälöitä (I.1), (I.2), (I.3) ja (I.4) sopivasti, voidaan tulojännitteelle kirjoittaa

$$u_{\text{in}} = R_2 i_1 + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + u_{\text{out}}, \quad (\text{I.5})$$

missä

$$i_1 = \frac{1}{L_1} \int_0^t u_{\text{out}} dt + \frac{1}{L_2} \int_0^t u_{\text{out}} dt + \frac{u_{\text{out}}}{R_1}. \quad (\text{I.6})$$

Laplace-muunnetaan yhtälöt (I.5) ja (I.6), jolloin saadaan

$$U_{\text{in}} = R_2 I_1 + \frac{I_1}{sC} + U_{\text{out}}, \quad (\text{I.7})$$

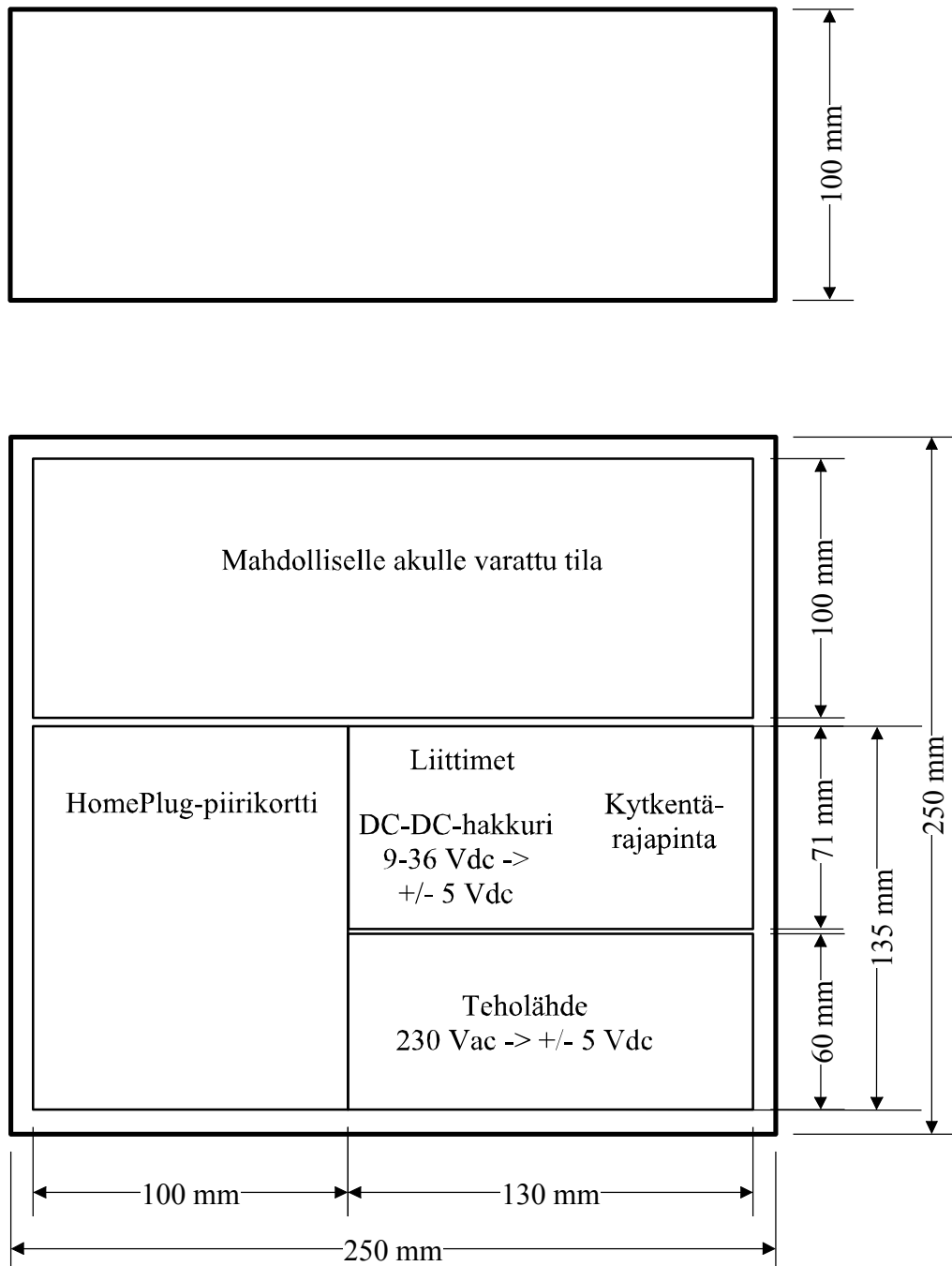
missä

$$I_1 = \frac{U_{\text{out}}}{sL_1} + \frac{U_{\text{out}}}{sL_2} + \frac{U_{\text{out}}}{R_1}. \quad (\text{I.8})$$

Nyt voidaan kirjoittaa kytkentärajapinnan siirtofunktio tulo- ja lähtöjännitteiden avulla.

$$G(s) = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{s^2}{\frac{R_1 + R_2}{R_1} s^2 + \frac{CL_1 R_1 R_2 + CL_2 R_1 R_2 + L_1 L_2}{CL_1 L_2 R_1} s + \frac{L_1 + L_2}{CL_1 L_2}}. \quad (\text{I.9})$$

LIITE II



Kuva II.1. Suunnittelun testilaitteen layout-piirros. Jokaiselle piirikortille sekä akulle on varattu oma tila.