

Jarno Honkanen

## **Polkupyörän dynamokäyttöinen laturi elektroniikkalaitteille**

### **Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 24.05.2013.

**Työn valvoja ja ohjaaja:**

Prof. Marko Hinkkanen



**Aalto-yliopisto**  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

Tekijä: Jarno Honkanen

Työn nimi: Polkupyörän dynamokäyttöinen  
laturi elektroniikkalaitteille

Päivämäärä: 24.05.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 9+66

Sähkötekniikan laitos

Professori: Sähkökäytöt

Koodi: S-81

Valvoja ja ohjaaja: Prof. Marko Hinkkanen

Työn tavoitteena on selvittää millaisia sähköisiä ominaisuuksia ja erityispiirteitä polkupyörän dynamokäyttöiseltä laturilta vaaditaan, jotta laturi toimisi asetettujen vaatimusten mukaisesti. Lisäksi tavoitteena on tutkia dynamon ominaisuuksia energianlähteenä ja millaisia ongelmia dynamokäytössä voidaan kohdata. Työssä polkupyörän dynamo mallinnetaan ideaalisena yksivaiheisena tahtikoneena. Lisäksi työssä esitellään dynamokäyttöisen laturin toimintaperiaate ja esitellään vaihtoehtoisia piiritopologioita laturin toteuttamiseksi. Työssä toteutetaan dynamokäyttöinen laturi simulointiympäristöön ja tarkastellaan latauslaitteen toimintaa eri toimintapisteissä. Simuloidulle latauslaitteelle toteutetaan yksinkertaistettu ohjausalgoritmi. Lisäksi työssä määritetään kahden napadynamon sijaiskytkennän parametrit laboratoriomittauksien avulla. Työn tuloksien perusteella simuloitu laturi todetaan toimivaksi useissa eri käyttötilanteissa riippuen käytetystä piiritopologiasta. Lisäksi työssä käytetty yksinkertaistettu laturin ohjausalgoritmi todetaan toimivaksi, mutta suurilla kuormilla laturin tehoa rajoittavaksi.

Avainsanat: Dynamo, laturi, polkupyörä, USB

Author: Jarno Honkanen

Title: Bicycle dynamo powered charger for electronic devices

Date: 24.05.2013

Language: Finnish

Number of pages:9+66

Department of Electrical Engineering

Professorship: Electrical Drives

Code: S-81

Supervisor and instructor: Prof. Marko Hinkkanen

The aim of this thesis is to find out what kind of electrical characteristics a bicycle dynamo-powered charger requires in order to operate. Additionally the properties of a bicycle dynamo as an energy source will be studied and the problems that the dynamo drive may encounter examined. The bicycle dynamo is modelled as an ideal single-phase synchronous machine. The operation principle of the dynamo powered charger is presented, as well as the various circuit topologies which could be used to implement the charger electronics. In this thesis the dynamo-powered charger is implemented in a simulation environment and the charging operation of the device is examined at different operating points. A controller algorithm is implemented in simplified form and equivalent circuit parameters for two hub dynamos are defined by using laboratory measurements. Based on results the simulated charger is verified to operate in many different situations depending on the circuit topologies. The simplified control algorithm of the charger is verified to be functional, but the high loads will be the limiting factor of charging power.

Keywords: Bicycle, charger, dynamo, USB

## Esipuhe

Tämän diplomityön taustalla on pyöräilyharrastukseni kautta muodostunut kiinnostus ja tarve laitteelle, jonka avulla voisin ladata mobiililaitetta pyöräilymatkan aikana. Lisäksi pyöräilyä harrastavat ystäväni ovat myös olleet kiinnostuneita laturilaitteesta. Tämän työn ohessa sain myös syyn hankkia pari napadynamoja ja opetella kiekkojen rakentamisen osista.

Haluan kiittää erityisesti professori Marko Hinkkasta työn erinomaisesta ohjauksesta ja hänen tarjoamasta mahdollisuudesta tehdä työtä kokopäiväisesti parin kuukauden ajan yliopistolla. Laboratoriomestari Ilkka Hanhivaara ansaitsee myös kiitokset, sillä hänen avustuksella sain valmisteltua mittausjärjestelyt laboratoriomittauksia varten. Erityisesti haluan kiittää morsiantani Anua kaikesta tuesta ja kannustuksesta, että jaksoin saattaa työn valmiiksi.

Vantaalla toukokuussa 2013

Jarno Honkanen

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>vii</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Työn taustoja</b>	<b>3</b>
2.1 Polkupyörän dynamo . . . . .	3
2.1.1 Pullodynamo . . . . .	3
2.1.2 Napadynamo . . . . .	4
2.1.3 Lait, määräykset ja tekniset vaatimukset . . . . .	5
2.2 Dynamokäyttöinen USB-laturi . . . . .	6
2.2.1 USB-laturi . . . . .	7
2.2.2 Dynamokäyttöisen USB-laturin toiminta . . . . .	7
2.2.3 Kaupallisia laturiratkaisuja . . . . .	8
<b>3 Dynamon sähkökonemalli</b>	<b>11</b>
3.1 Dynamon sijaiskytkentä . . . . .	11
3.2 Sijaiskytkennän parametrien määrittäminen . . . . .	13
3.2.1 Tyhjäkäyntikoe . . . . .	14
3.2.2 Oikosulkukoe . . . . .	15
3.2.3 Pienimmän neliösumman menetelmä . . . . .	16
3.3 Dynamon reaktansin kompensointi . . . . .	17
3.3.1 Reaktanssin passiivinen kompensointi . . . . .	18
3.3.2 Reaktanssin aktiivinen kompensointi . . . . .	21
<b>4 Dynamokäyttöinen USB-laturi</b>	<b>23</b>
4.1 Normaali toimintatila . . . . .	24
4.2 Sammutettu toimintatila . . . . .	24
4.3 Yksinkertaistettu ohjausalgoritmi . . . . .	25
4.4 Tasasuuntaus . . . . .	25
4.4.1 Tasasuuntaajan hyötysuhteen parantaminen . . . . .	27
4.4.2 Jännitteen kahdennuskytkentä . . . . .	27

4.5	Jännitteen regulointi . . . . .	28
4.5.1	Esiregulointi tyristoritasasuuntaajalla . . . . .	29
4.5.2	Lineaarinen regulaattori . . . . .	30
4.5.3	Hakkuriin perustuva regulaattori . . . . .	31
4.6	Ylijännitesuojaus . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Jännitettä laskeva hakkuri</b>	<b>36</b>
5.1	Tilayhtälöt ja linearisointi . . . . .	36
5.2	Säätimen suunnittelu . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Tulokset</b>	<b>42</b>
6.1	Dynamomittaukset . . . . .	42
6.1.1	Shimano DH3N30-dynamon mittausten tulokset . . . . .	43
6.1.2	Shimano DH3N72-dynamon mittausten tulokset . . . . .	44
6.1.3	Mittausten analysointi . . . . .	47
6.2	Laturin simuloinnit . . . . .	51
6.2.1	Hakkurin säätimen parametrien valitseminen . . . . .	52
6.2.2	Kuormamuutosten simulointi nimellispistessä . . . . .	53
6.2.3	Kuormamuutosten simulointi nimellispisteen alapuolella . . . . .	55
6.2.4	Kuormamuutosten simulointi nimellispisteen alapuolella käytettäessä loistehon kompensointia . . . . .	57
6.2.5	Kuormamuutosten simulointi suurella kulmataajuudella . . . . .	58
6.2.6	Muita havaintoja . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>62</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>64</b>

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$b$	Systemaattinen mittausvirhe
$C$	Kapasitanssi [F]
$C_a$	Dynamon reaktanssin kompensointi kapasitanssi [F]
$C_{dc}$	Tasajännitteen tasoituskondensaattorin kapasitanssi [F]
$D$	Pulssisuhteen jatkuvan tilan komponentti
$d$	Pulssisuhde
$\tilde{d}$	Pulssisuhteen värekomponentti
$G_{ol}$	Avoimen silmukan siirtofunktio
$I_L$	Induktanssin virran jatkuvan tilan komponentti [A]
$i_L$	Induktanssin virta [A]
$\tilde{i}_L$	Induktanssin virran värekomponentti [A]
$i_{L,ref}$	Induktanssivirran referenssi [A]
$I_{dc}$	Tasavirran jatkuvan tilan komponentti [A]
$i_{dc}$	Tasavirta [A]
$\tilde{i}_{dc}$	Tasavirran värekomponentti [A]
$I_{DCP}$	USB-laturin vaadittu lähtövirran alue [A]
$I_o$	Laturin lähtövirran jatkuvan tilan komponentti [A]
$i_o$	Laturin lähtövirta [A]
$\tilde{i}_o$	Laturin lähtövirran värekomponentti [A]
$I_s$	Dynamon staattoivirran tehollisarvo [A]
$\underline{I}_s$	Dynamon staattorivirta osoitinmuodossa [A]
$i_s$	Dynamon staattorivirta [A]
$j$	Imaginaariyksikkö
$K$	K-factor -menetelmässä käytetty kerroin
$k_c$	Säätimen vahvistus
$L$	Induktanssi [H]
$L_s$	Dynamon sarjainduktanssi [H]
$P_a$	Kuormaan saatava pätöteho [W]
$p$	Dynamon napapariluku
$U_C$	Kapasitanssin jännitteen jatkuvan tilan komponentti [V]
$u_C$	Kapasitanssin jännite [V]
$\tilde{u}_C$	Kapasitanssin jännitteen värekomponentti [V]
$U_{CHG}$	USB-laturin vaadittu lähtöjännitealue [V]

$U_{dc}$	Tasajännitteen jatkuvan tilan komponentti [V]
$u_{dc}$	Tasajännite [V]
$\tilde{u}_{dc}$	Tasajännitteen värekomponentti [V]
$u_g$	Dynamon sähkömotorinen voima [V]
$U_{LGK}$	USB-laturin vuotojännite [V]
$U_o$	Lähtöjännitteen jatkuvan tilan komponentti [V]
$u_o$	Lähtöjännite [V]
$\tilde{u}_o$	Lähtöjännitteen värekomponentti [V]
$U_s$	Dynamon staattorijännitteen tehollisarvo [V]
$\underline{U}_s$	Dynamon staattorijännitte osoitinmuodossa [V]
$u_s$	Dynamon staattorijännite [V]
$U_{SHDN}$	Lähtöjännitteen kynnsarvo, jolloin USB-laturin täytyy siirtyä sammutettuun tilaan [V]
$R$	Resistanssi, kuormavastus [ $\Omega$ ]
$R_a$	Dynamon kuormavastus [ $\Omega$ ]
$R_s$	Dynamon sarjaresistanssi [ $\Omega$ ]
$r_C$	Kondensaattorin ekvivalenttinen sarjaresistanssi [ $\Omega$ ]
$r_{ds,on}$	MOSFET-transistorin on-tilan resistanssi [ $\Omega$ ]
$s$	Laplace-muuttuja
$v$	Polkupyörän ajonopeus [m/s]
$X_a$	Kuormareaktanssi [ $\Omega$ ]
$\underline{Y}_a$	Kuormaadmittanssi [S]
$\underline{Z}_a$	Kuormaimpedanssi [ $\Omega$ ]
$\alpha$	Tyristorin sytytyskulma
$\beta$	Pienimmän neliösumman menetelmässä käytetty parametrivektori
$\eta$	Hyötysuhde
$\omega$	Kulmataajuus [rad/s]
$\omega_m$	Mekaaninen kulmataajuus [rad/s]
$\omega_0$	LC-piirin resonanssikulmataajuus [rad/s]
$\omega_c$	Säätimen ylimenokulmataajuus [rad/s]
$\omega_p$	Säätimen navan kulmataajuus [rad/s]
$\omega_z$	Säätimen nollan kulmataajuus [rad/s]
$\Phi$	Magneettivuo [Vs]
$\Psi_s$	Dynamon käämivuo [Vs]
$\Psi_{PM}$	Kestomagneettien käämivuo [Vs]
$\theta_{boost}$	Säätimen vaiheenjohto ylimenokulmataajuudella [ $^\circ$ ]



$\theta_{ol}$	Avoimen silmukan vaihe ylimenokulmataajuudella [°]
$\theta_{PM}$	Vaihevara [°]
$\theta_1$	Hakkurin tehoasteen ja modulaattorin vaihe ylimenokulmataajuudella [°]
$\vartheta$	Sähkökulma [rad/s]

## Lyhenteet

AC	Vaihtovirta
CDP	Lataava USB-portti (Charging Downstream Port)
DC	Tasavirta
DCP	Eriytynen USB-laturiportti (Dedicated Charging Port)
D+	USB-portin positiivinen datalinja
D-	USB-portin negatiivinen datalinja
ESR	Sarjavastus (Equivalent Series Resistance)
MOSFET	Metallioksidipuolijohdekanavatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
PLL	Vaihelukko (Phase-locked loop)
PM	Kestomagnetoitu (Permanent Magnet)
StVZO	Saksan tieliikennelaki (Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung)
SMV	Sähkömotorinen voima
TA	Tekniset vaatimukset (Technische Anforderungen)
TVS	Transienttisuojadiodi (Transient Voltage Suppression diode)
USB	Universaali sarjaväylä (Universal Serial Bus)

# 1 Johdanto

Nykyään ihmiset haluavat usein kuunnella musiikkia tai käyttää paikannuslaitetta polkupyöräretkillä. Usein kuitenkin käy niin, että pitkien retkien aikana laitteen akku tyhjenee ennenaikaisesti. Nykyaikaisiin matkapuhelimiin on lähes aina integroitu musiikkisoitin, kartta- ja paikannusominaisuudet, internet-selain ja luonnollisesti puhelintoiminnot. Kuitenkaan laitteiden akkukapasiteetti ei ole kehittynyt samalla nopeudella kuin laitteiden ominaisuudet ja tehonkulutus. Näistä syistä modernien mobiililaitteiden käyttöaika on varsin lyhyt aktiivisessa käytössä.

Puhelimen akun lataamiseen matkalla on kehitetty useita erilaisia ratkaisuja. On olemassa paristo- tai akkukäyttöisiä latauslaitteita, joiden energiavaraus muutetaan puhelimen lataamiseen sopivaksi. Joihinkin akkukäyttöisiin laitteisiin on myös integroitu pieni aurinkopaneeli, jolla auringon säteilyenergia saadaan taltioitua myöhempäälle käyttöä varten. Nämä ratkaisut toimivat hyvin väliaikaisessa käytössä, mutta pitkällä pyörämatkalla voi joutua kuljettamaan paljon kertakäyttöisiä paristoja mukana, mikä ei ole kovinkaan käytännöllistä. Aurinkokaan ei välttämättä aina paisa, joten tämä ratkaisu on varsin tehoton pilvisellä säällä tai pimeällä. Polkupyörä voidaan varustaa dynamolla, jonka tuottamaa sähköenergiaa yleensä käytetään ensisijaisesti polkupyörän valaisimen tai valaisimien energialähteenä. Samaa energiaa voidaan käyttää myös matkapuhelimen akun lataamiseen käyttäen sopivaa latauslaitetta. Ratkaisu ei ole riippuvainen mukana kuljetettavien paristojen, akkujen eikä auringonvalon riittävydestä vaan latausmahdollisuus olisi aina käytettävissä, kun polkupyörällä ajetaan vähintään kohtuullisella nopeudella.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, millaisista rakennuspalikoista dynamokäyttöinen latauslaite koostuu. Lisäksi selvitetään, millaisia ominaisuuksia laturilta vaaditaan sen kuorman ja jännitesyötön erityispiirteiden takia. Työssä myös esitellään polkupyörän dynamoa energialähteenä, millaisia ominaisuuksia dynamolla on ja millaisia lisähaasteita dynamo tuo latauslaitteen suunnitteluun. Lisätavoitteena on myös toteuttaa prototyypilaitteisto.

Aiheen laajuuden takia työssä dynamojen osalta rajoitutaan käsittelemään lähinnä napadynamoja. Dynamokäyttöisiä latauslaitteita rajoitutaan tarkastelemaan lähinnä konseptitasolla ja esitellään joitakin mahdollisia ratkaisuehdotuksia eri ongelmiin, joita dynamokäyttöisen laturin suunnittelussa voi kohdata. Työssä tarvittavan latauslaitteen mallina käytetyn hakkurin mitoitukset ja tarkempi analysointi on rajattu työn ulkopuolelle, vaikkakin käytännön suunnittelussa nämä näkökohdat täytyy ottaa huomioon.

Työssä toteutetaan dynamokäyttöinen latauslaite simulointiympäristöön, jossa

tarkastellaan latauslaitteen toimintaa eri toimintapisteissä, jotta voidaan vertailla eri topologioiden käyttökelpoisuutta. Simuloidulle latauslaitteelle toteutetaan yksinkertaistettu ohjausalgoritmi, jotta laturi toimisi annettujen vaatimusten mukaisesti. Lisäksi työssä määritetään kahden napadynamon sijaiskytkennän parametrit laboratoriomittauksien avulla ja yhdelle vertailukohtana toimivalle napadynamolle haetaan parametrit kirjallisuudesta.

Työ on jaettu osiin siten, että kohdassa kaksi esitellään työn taustalla olevia käsitteitä. Kohdassa kolme esitellään dynamon sähkökonemalli ja menetelmä sijaiskytkennän parametrien määrittämiseksi. Kohdassa neljä esitellään dynamokäyttöisen latauslaitteen ominaisuuksia, teknisiä vaatimuksia ja tuodaan esiin laturin suunnitteluun vaikuttavia asioita. Kohdassa viisi esitellään jännitettä laskevalle hakkurille tilayhtälömalli ja menetelmä, jolla hakkurin säätäjä voidaan suunnitella. Kohdassa kuusi esitellään kahden napadynamon laboratoriomittausten tulokset ja dynamokäyttöisen laturin simulointitulokset.

## 2 Työn taustoja

Aluksi esitellään lyhyesti, millainen laite polkupyörän dynamo on ja millaisia dynamoja on saatavilla, joista esitellään vähän tarkemmin kaksi tunnetuimpaa dynamotyyppiä: pullo- sekä napadynamo. Lopuksi esitellään yleisellä tasolla, mitä tarkoitetaan dynamokäyttöisellä universaalilla sarjaväylällä (Universal Serial Bus, USB) kautta lataavalla laturilla.

### 2.1 Polkupyörän dynamo

Polkupyörän dynamo on polkupyörään asennettava sähkögeneraattori, joka muuttaa mekaanisen pyörimisenergian sähköenergiaksi. Polkupyörän dynamoista puhuttaessa termi dynamo ei ole täysin todenmukainen, koska dynamo tarkoittaa tasasähköä tuottavaa generaattoria. Oikeampi nimitys olisi magneetto, koska polkupyörän dynamot ovat nykyään yleensä vaihtosähkögeneraattoreita. Käytän kuitenkin termiä dynamo, koska se on vakiintunut nimitys polkupyörän sähkögeneraattorille. Vaihtosähkögeneraattoria käytetään yksinkertaisesti siitä syystä, että sen rakenne on paljon yksinkertaisempi, edullisempi toteuttaa ja toiminnaltaan luotettavampi kuin tasasähkögeneraattorissa. Vaihtosähkögeneraattorissa ainoat mekaanisesti kuluvat osat ovat laakerointi, vastaavasti tasasähkögeneraattorissa tarvitaan kommutaattori virran suunnan kääntämiseksi, jolloin myös tarvitaan hiiliharjat, jotka hankaavat kommutaattoria ja näin ollen ne myös kuluvat mekaanisesti.

Polkupyörän dynamo on rakenteeltaan varsin yksinkertainen sähkömekaaninen kone. Laitteessa on kestmagnetoitu (Permanent Magnet, PM) roottori, joka pyörii kelan sisällä, jolloin kelaan indusoituu sähkömotorinen voima Faradayn induktiolain mukaisesti.

$$U_g = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Polkupyörän dynamoja on monen tyyppisiä. Yleisimpiä ovat rengasta vasten hankaavat niin sanotut pullodynamot, sekä nykyään yleistyneet pyörän napaan integroidut napadynamot. Myös muita rengasta vasten hankaavia dynamoja on ollut saatavilla, kuten esimerkiksi rulladynamot [1], jotka asennetaan yleensä polkupyörän keskiön lähelle.

#### 2.1.1 Pullodynamo

Perinteinen polkupyörän dynamo on kuvan 1 mukainen pullodynamo. Dynamo on asennettu pyörän etuhaarukkaan siten, että dynamon roottoria pyörittävä rulla saa-



Kuva 1: Bosch pullodynamo ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bicycle\\_dynamo.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bicycle_dynamo.jpg)).

daan pyörimisliikkeeseen. Pyörän pyörimisliike välittyy vierimiskitkan välityksellä roottorin rullaan, ja tämä liike-energia muuttuu sähkömagneettisen induktion avulla sähköenergiaksi.

Pullodynamot ovat kohtuullisen edullisia, helppoja asentaa, ottaa käyttöön ja pois käytöstä milloin vain. Ongelmana on kuitenkin niitä käytettäessä suuri vastus, joka aiheutuu suoraan pullodynamoson toimintaperiaatteesta. Kitkan avulla siirretty energia aiheuttaa huomattavan lisävastuksen pyörällä ajettaessa. Lisäksi dynamoson rulla kuluttaa renkaan kylkeä, joka ei ole yhtä kulutusta kestävä kuin renkaan keskiosa. Jos pullodynamoa käyttää paljon, voi rulla kuluttaa rengasta niin paljon, että renkaan kylki rikkoutuu. Märällä kelillä dynamoson rulla voi helposti alkaa luisutamaan, jolloin dynamoson sähkönantokyky heikkenee ja rengasta kuluttava vaikutus kasvaa.

### 2.1.2 Napadynamo

Nykyään napadynamot ovat alkaneet korvata pullodynamoja, sillä ne ovat monessa suhteessa parempia ja käyttövarmempia kuin pullodynamot. Niiden suurimpia etuja ovat erittäin pieni vierintävastus, sillä yleensä napadynamossa ainut mekaaninen vastus muodostuu navan laakeroinnista; poikkeuksena mainittakoon vaihteelliset dynamot, esimerkiksi ulkoiset hammasratas- tai hihnavetoiset ja navan sisään integroidut planeettavaihteiset dynamot [2]. Lisähäviöitä aiheuttavat vain generaattorin sähkömagneettiset häviöt. Kuvassa 2 on tyypillinen polkupyörän etupyörän etunavan tilalle kiinteästi asennettu napadynamo. Tyypillinen napadynamo on siis



Kuva 2: SONdelux napadynamo (<http://www.nabendynamo.de/>).

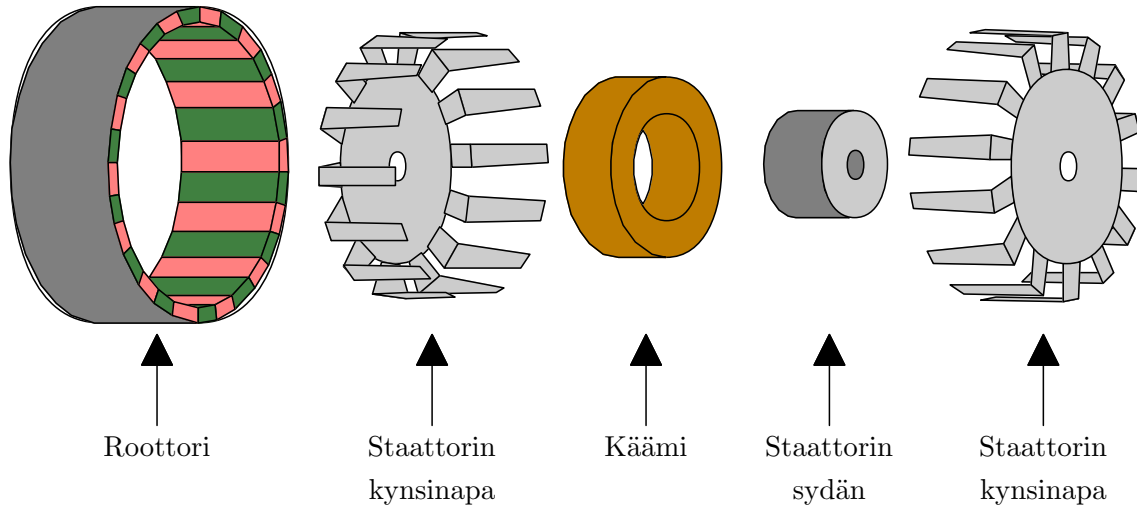
polkupyörän etunapaan integroitu ratkaisu, mutta esimerkiksi Shimano on patentoinut myös takanapaan integroidun napadynamon [3]. Shimano on myös tuotteistanut takanapaan integroidun dynamoratkaisun.

Nykyiset napadynamot ovat yleensä niin sanottuja kynsinapageneraattoreita. Ratkaisua suositaan niiden suhteellisen yksinkertaisen rakenteensa takia [4]. Napadynamon periaatteellinen rakenne on nähtävissä räjäytyskuvasta 3. Napadynamo rakenne poikkeaa tavanomaisesta pyörivästä sähkökoneesta siten, että roottori on staattorin ulkopuolella ja pyörän akseli on kiinnitetty staattoriin. Tämä ratkaisu tarvitaan siksi, että pyörä kiinnittyy puolien avulla dynamonavan kuoreen, eli kehään, joka siis toimii roottorina ja staattori kiinnittyy kiinnitysakselin avulla polkupyörän runkoon. Napadynamon toimintaperiaate on kuitenkin täsmälleen samanlainen kuin normaalissa kynsinapakoneessa.

Napadynamon toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen. Navan kehä toimii roottorina, johon on kiinnitetty kestopagneetteja. Staattori ja roottoriin kestopagneetit muodostavat magneettiä. Roottorin pyöriessä magneettiä napaisuus ilmevässä vaihtelee, jolloin staattorin magneettivuo myös vaihtaa suuntansa ja staattorin ympärillä olevaan kelaan indusoituu vaihtojännite Faradayn induktiolain (1) mukaisesti.

### 2.1.3 Lait, määräykset ja tekniset vaatimukset

Polkupyörän dynamoille ei ole määritelty varsinaisia vaatimuksia maailmanlaajuisesti, kuitenkin joissakin maissa on säädetty lakeja, jotka määrittelevät tiettyjä vaatimuksia polkupyörässä käytetyille dynamoille. Merkittävinpänä voidaan pitää Sak-



Kuva 3: Napadynamon rakenne räjäytyskuvana. [4]

san tieliikennelakia (Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, StVZO). StVZO:n pykälät §63–67 määrittelevät vaatimuksia polkupyörän valaistukselle ja StVZO:n teknisissä vaatimuksissa (Technische Anforderungen, TA) määritellään dynamon jännite- ja jännite-eritasot eri toiminta-alueilla ja millaista kuormaa on käytettävä valaistuksen näkökulmasta. StVZO/TA:n mukaan dynamo, jonka nimellisen jännitteen tehollinen arvo on kuusi voltia ja jota kuormitetaan kuormavastuksella, jonka resistanssi on  $12 \Omega$ , tulee täyttää seuraavat ehdot: Kun ajetaan  $5 \text{ km/h}$ , niin dynamon täytyy kehittää jännite, jonka vaihteluväli on  $3 \dots 7,5 \text{ V}$ . Ajettaessa vähintään  $15 \text{ km/h}$ , jännitteen vaihteluväli tulee olla  $5,7 \dots 7,5 \text{ V}$ . [4, 5]

## 2.2 Dynamokäyttöinen USB-laturi

Dynamokäyttöinen Universal Serial Bus (USB) laturi on USB-laturimääritelmää [6] noudattava latauslaite, joka ottaa sähköenergian polkupyörän dynamosta ja muuntaa sen USB-väylässä käytettäväksi  $5 \text{ V}$  tasajännitteeksi. USB 1.x ja 2.0 määritelmien mukaan väylän täytyy kyetä antamaan  $5 \text{ V} \pm 5 \%$  käyttöjännitteen väylään kytketyille laitteille. USB-määritelmän mukaan väylää voi kuormittaa kuormitusyksikön  $I_{unit} = 100 \text{ mA}$  kokoisilla virtakuormilla ja laite voi kuormittaa väylää maksimissaan viiden kuormitusyksikön verran eli  $500 \text{ mA}$ . Oletuksena USB-väylää ei saa kuormittaa kuin maksimissaan yhden kuormitusyksikön suuruisella virralla. USB-laite voi halutessaan anoa lupaa suuremmalle kuormalle väylähallinnalta ja vain jos väylähallinta myöntää luvan suuremmalle virtakuormalle, niin vain tällöin laite voi kuormittaa väylää myönnettyllä virtakuormalla.

### 2.2.1 USB-laturi

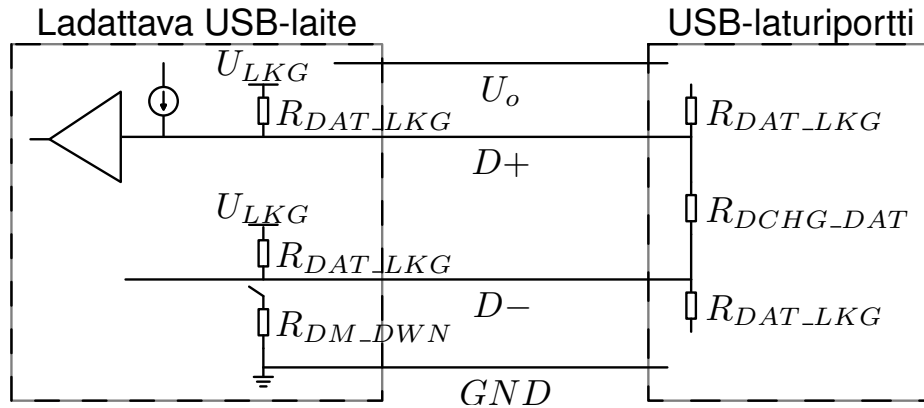
USB 1.x ja 2.0 määritelmä soveltuu hyvin tavallisille USB-laitteille, mutta ei ole käyttökelpoinen laturikäyttöä ajatellen. Jotta ladattava laite kykenisi toimimaan USB-määritelmän mukaisesti, sen tulisi kyetä keskustelemaan USB-portin kanssa aktiivisesti, jolloin sekä laturin että ladattavan laitteen täytyisi toteuttaa USB-määritelmän minimivaatimukset. USB:n käyttäminen lataukseen alkoi kiinnostaa laitesuunnittelijoita ja muun muassa Apple loi oman epästandardin menetelmän laitteiden lataukseen USB-portista. USB-määritelmiä ylläpitävä taho USB Implementers Forum, Inc. julkaisi vuonna 2007 virallisen USB-laturimääritelmän. Määritelmän mukaan USB-porttia voidaan kuormittaa yli 100 mA, ilman että laitteen tarvitsee neuvotella väylähallinnan kanssa. Alle 500 mA kuormavirroilla portin antojännitteen  $U_o$  tulee olla 5 V ja jos porttia kuormitetaan enemmän, niin jännite saa laskea alemmaksi. USB-portin jännite saa laskea aina 3.6 V tasolle, kun porttia kuormitetaan sen nimellisellä virralla. Jos porttia kuormitetaan vieläkin enemmän, niin tällöin laturi voi sammuttaa itsensä. [6]

USB-laturimääritelmä esittelee kolme USB-porttia, joista yksi edustaa USB 1.x ja 2.0 -määritelmissä esiteltyä niin sanottua standardia USB-porttia. Lisäksi esitellään kaksi uudentyyppistä lataukseen soveltuvaa USB-porttia, joista yksi on lataava USB-portti (Charging Downstream Port, CDP) ja toinen on erityinen USB-laturiportti (Dedicated Charging Port, DCP). Ladattava laite voi tunnistaa eri porttityypit siitä, että miten datalinjat D+ ja D- on kytketty. Erityinen laturiportti voidaan tunnistaa siitä, että datalinjat D+ ja D- on oikosuljettu vastuksella  $R_{DCHG\_DAT,max} = 200 \Omega$ . Ladattavan USB-laitteen ja erityisen USB-laturiportin periaatteellinen kytkentä on nähtävissä kuvasta 4. Tämässä työssä tarkastellaan USB-laturia vain lataavan USB-portin osalta.

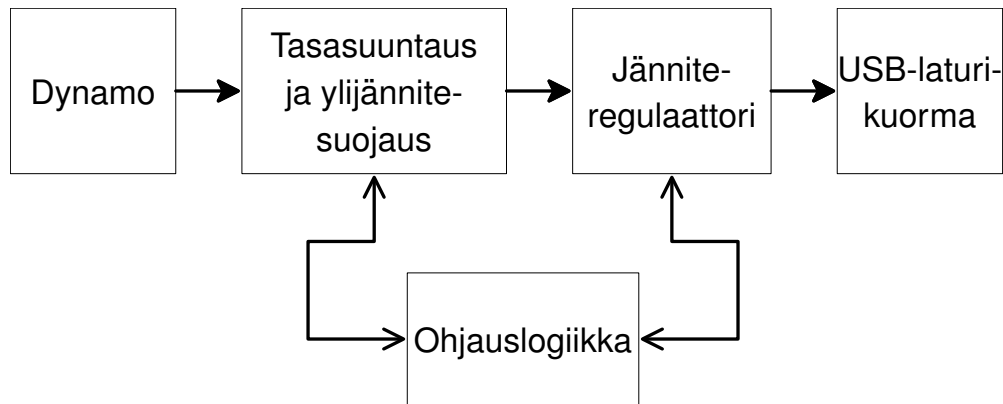
### 2.2.2 Dynamokäyttöisen USB-laturin toiminta

Dynamokäyttöinen USB-laturi voidaan kuvata kuvan 5 mukaisesti, jossa polkupyörän dynamo toimii laturielektroniikan teholähteenä ja laturia kuormittaa ladattava USB-laite. Laturin elektroniikka huolehtii dynamon vaihtojännitteen muuttamisesta USB-laturimääritelmän mukaiseksi. Lisäksi elektroniikan täytyy huolehtia mahdollisista häiriötilanteista, joita voi olla latauslaitteen aiheuttamat ylikuormitustilanteet, tai kenties laturin lähdön oikosulku. Elektroniikan täytyy myös kyetä selviytymään rikkoutumatta, kun dynamoa pyöritetään äärimmäisen suurella pyörimisnopeudella, jolloin dynamon kehittämä syöttöjännite voi nousta erittäin suureksi.





Kuva 4: Ladattavan USB-laitteen ja erityisen USB-laturiportin periaatteellinen kytkentä. [6]



Kuva 5: Dynamokäyttöisen USB-laturin lohkokaavio.

Dynamokäyttöinen USB-laturi voi toimia suoraan lataavana yksikkönä tai osittain akkukäyttöisenä. Suoraan lataava laturi on toiminnallisuudeltaan hyvin samankaltainen kuin tavalliseen sähköverkkoon kytkettävä tai auton tyopakansyöttöpistokkeen kautta sähkönsä saava USB-laturi. Tällöin laturi voi toimia vain pyörällä ajettaessa. Osittain akkukäyttöinen USB-laturi hyödyntää sisäistä akkua energiavarastona, jolloin laturi voi ottaa energiaa talteen sisäiseen akkuun ajon aika, vaikkei varsinainen ladattava laite ole kytkettynä laturiin. Näin kerätty energia voidaan myöhemmin vapauttaa varsinaiseen käyttökohteeseen.

### 2.2.3 Kaupallisia laturiratkaisuja

Kaupallisesti on saatavilla joitakin polkupyörään tarkoitettuja dynamokäyttöisiä laturiratkaisuja. Osaan latureista on integroitu sisäinen akku, jota käytetään energian välivarastona, jolloin lataus ei lopu, kun pyörä pysähtyy. Lisäksi joihinkin akun sisältäviin ratkaisuihin on integroitu lisätoiminnallisuuksia, kuten käyttämisen usean eri-

laisen energialähteen kanssa, esimerkiksi lataaminen aurinkopaneelilla. Vaikka suurin osa latureista on näennäisesti USB-latureita, niin teknisten tietojen perusteella hyvin harva markkinoilta löytyvä dynamokäyttöinen USB-laturi on oikeasti USB-laturimääritelmän mukainen laite. Lisäksi hyvin harva näiden laitteiden valmistajista lupaa, että laturi toimisi suurilla syöttöjännitteillä, mikä on kuitenkin erittäin tärkeää dynamokäytössä.

### **Nokia Bicycle Charger DC-14**

Nokia Bicycle Charger DC-14 [7] on Nokian valmistama matkapuhelimen laturiratkaisu. Pakkauksessa tulee mukana pullodynamo, laturi ja polkupyörän ohjaustankoon kiinnitettävä puhelinteline. Nokian laturi ei ole suoranaisesti tarkoitettu USB-laturiksi, sillä sen latausporttina on Nokian 2 mm latauspistoke, mutta lisävarusteena on saatavissa Nokia Charger Adapter CA-146C [8] -sovitin, jolloin DC-14:tä voi käyttää USB-laturina.

Laturissa ei ole sisäistä akkua, vaan laturi alkaa ladata, kun pyörän nopeus on riittävän suuri ja lopettaa lataamisen, kun nopeus kasvaa liian suureksi. Nokian mukaan tämä tapahtuu, kun pyörän nopeus saavuttaa kävelynopeuden (6 km/h) tai jos nopeus ylittää noin 50 km/h. Lisäksi heidän mukaansa laturi saavuttaa Nokia Compact Charger AC-3 -laturin tehokkuuden, kun ajonopeus on 12 km/h. Laturi ei ole kuitenkaan USB-laturimääritelmän mukainen vähintäänkin sen takia, ettei siinä ole laturimääritelmässä vaadittua USB-liitintä.

### **Busch & Müller E-Werk**

E-Werk [9] on Busch & Müllerin valmistama dynamokäyttöinen laturi. Sitä ei ole tarkoitettu vain USB-lataukseen, vaan se on itse asiassa yleislaturi, jonka antojännite on säädettävissä välillä 2,8...13,3 V ja antovirta rajoitettavissa välille 0,1...1,5 A [9, 10]. Laitteen mukana tulee useita eri käyttöihin tarkoitettuja syöttökaapeleita mukaan lukien microUSB, joka on USB-laturimääritelmän [6] mukainen liitin.

Laturissa ei ole sisäistä akkua, vaan laturi lataa vain silloin, kun pyörällä ajetaan. E-Werk käyttöohjeen [10] mukaan laturin teho saavuttaa normaalin verkkovirtalaturin tehon jo 15 km/h ajonopeudella. E-Werkin käyttö ei ole rajoitettu vain dynamoihin, vaan sen jännitesyöttö on suunniteltu 0...40 V AC- ja 0...50 V DC-syötöille. Laturin teknisistä tiedoista ei kuitenkaan selviä, että onko laturi USB-laturimääritelmän mukainen latauslaite.

## **Bike2Power SpinPOWER S1**

SpinPOWER S1 [11] on BikePowerin kehittämä USB-laturi. Tuotteen sisämallit I3 ja I4 soveltuvat myös Apple iPhone 3G:n ja iPhone 4G:n lataamiseen. Tuotepakkaukset sisältävät perinteisen pullodynamon, laturin ja puhelintelineen. Valmistajan mukaan laturit alkavat lataamaan vasta, kun pyörä saavuttaa noin kävelynopeuden, tästä voitaneen päätellä, että latureissa ei ole sisäistä akkua. Tämänkään laitteen teknisistä tiedoista ei käy selväksi se, että toteuttaako laite oikeasti USB-laturimääritelmän vaatimukset.

## **Zzing USB Charger**

Zzing USB Charger [12] poikkeaa edellisistä latureista siten, että tähän laturiin on integroitu 2700 mAh akku, jolloin lataus ei keskeydy, vaikka pyörä pysähtyy. Lisäksi sisäinen akku varmistaa sen, että laite kykenee antamaan tasaisen 5 V jännitteen 0,5 A virralla, mikä vastaa USB-laturimäärityksen [6] mukaista erityistä laturiporttia. Toisealta laitteen teknisistä tiedoista ei selviä, että onko laite USB-laturimääritelmän mukainen latauslaite. Valmistajan mukaan laturi on myös suunniteltu siten, että se kykenee toimimaan myös, kun pyörällä ajetaan äärimmäisen suurella nopeudella (jopa 100 km/h) tällaisia nopeuksia voi saavuttaa esimerkiksi alamäkiajossa, joskaan tällaisissa olosuhteissa ei dynamoja yleensä ole järkevää edes käyttää.

## **ADA Bikeconverter**

ADA Bikeconverter [13] on pienen saksalaisvalmistajan tuote. ADA Bikeconverter sisältää Zzing USB Chargerin tapaan pienen akun, jossa on valmistajan mukaan 160 mAh kapasiteetti. Valmistaja lupaa laitteelle maksimissaan 48 V DC syöttöjännitteen keston. Laturin teknisten tietojen perusteella laturin tulisi kyetä antamaan jopa 800 mA lähtövirta 5 V DC lähtöjännitteellä. Teknisistä tiedoista ei tosin käy selväksi, että toteuttaako laite USB-laturimääritelmän vaatimukset, vaikka laitetta mainostetaankin polkupyörän USB-laturina.

### 3 Dynamon sähkökonemalli

Dynamon mallintamiseksi muodostetaan sen ideaalinen sähkökonemalli. Tässä sähkökonemalli johdetaan napadynamolle, mutta periaate on universaali kaikkien sähkökoneiden kohdalla. Luvun lopussa esitellään yksi menetelmä ideaalisen sähkökone-mallin mukaisen sijaiskytkennän parametrien määrittämiseksi. Dynamon mallintamisessa rajoitun käsittelemään vain yksivaiheisia vaihtojännitelähdöllä varustettuja napadynamoja, koska tällaiset dynamot ovat yleistyneet ja edustavat paremmin dynamojen nykytilaa. Joitakin kolmevaiheisia dynamoja on saatavilla, mutta näihin ratkaisuihin on yleensä integroitu tasasuuntassilta ja dynamon lähtö on tasajännitelähtö.

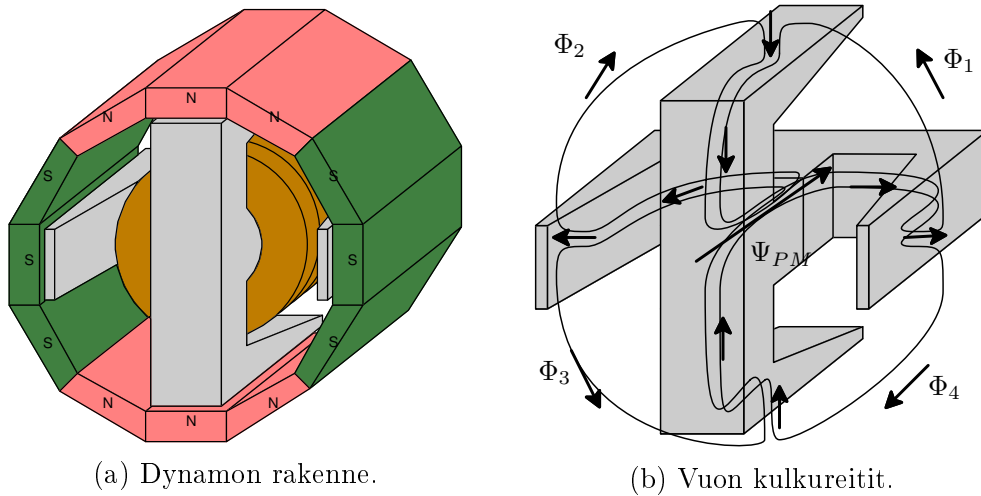
#### 3.1 Dynamon sijaiskytkentä

Napadynamon toimintamallin ymmärtämiseksi voidaan piirtää kuvan 6 mukaisesti magneettivuon  $\Phi_i$  kulkureitit, joiden avulla voidaan ymmärtää, mistä osavoista staattorivuo muodostuu. Roottorin kiertyessä staattoriin nähden ilmapälin magneettivuon suunta vaihtuu, jolloin myös staattoriin läpi kulkevan vuon suunta muuttuu. Kuvan avulla voidaan päätellä, että roottorivuo muodostuu kestmagneettien magneettivoiden summana

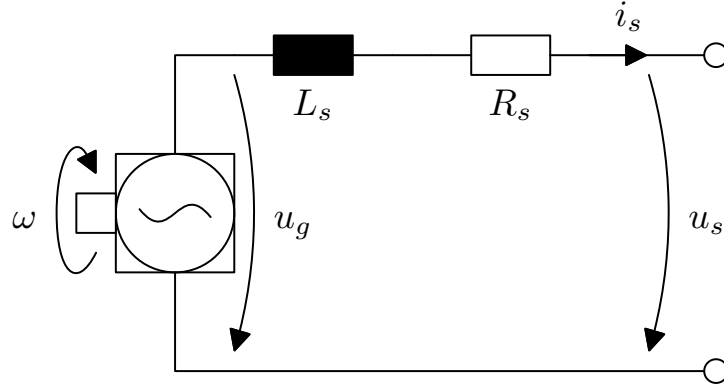
$$\Psi_{PM} = \sum \Phi_i \quad (2)$$

Staattorivuo  $\Psi_s$  saadaan virran muodostaman magneettivuon  $N\Phi$  ja roottorivuon  $\Psi_{PM}$  summana:

$$\Psi_s = N\Phi + \Psi_{PM} \quad (3)$$



Kuva 6: Yksinkertaistettu nelinapainen kynsinapakone.



Kuva 7: Idealisoitu dynamon sijaiskytkentä.

$N$ -kierroksisen käämin induktanssi  $L$  on määritelty siten, että

$$Li = N\Phi \quad (4)$$

Staattorin avonapaisuudesta johtuen induktanssin suuruus riippuu roottorin sähkökulmasta  $\vartheta = \omega t$  staattoriin nähden [14]. Staattorivuon lauseke (3) voidaan kirjoittaa näin ollen muodossa

$$\Psi_s(\vartheta, i_s) = L_s(\vartheta) i_s + \Psi_{PM}(\vartheta) \quad (5)$$

jossa  $L_s$  on staattorikäämin induktanssi. Induktiolaista (1) seuraa, että staattorijännite  $u_s$  voidaan kirjoittaa kuvan 7 mukaisen sähköisen sijaiskytkennän avulla muotoon

$$\begin{aligned} u_s &= -R_s i_s - \frac{d\Psi_s}{dt} \\ &= -R_s i_s - L_s(\vartheta) \frac{di_s}{dt} + u_g(\vartheta) \end{aligned} \quad (6)$$

jossa  $R_s$  on käämin resistanssi ja  $u_g(\vartheta)$  on roottorin pyörimisestä johtuva sähkömotorinen voima (smv). Termiä kutsutaan myös vasta-smv:ksi

$$u_g(\vartheta) = - \left( \frac{\partial L_s}{\partial \vartheta} i_s + \frac{\partial \Psi_{PM}}{\partial \vartheta} \right) \omega \quad (7)$$

jossa  $\omega = d\vartheta/dt$  eli sähkökulmataajuus. Tässä työssä kuitenkin oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että staattorin avonapaisuus on häviävän pientä, jolloin staattorinduktanssi  $L_s$  ei riipu sähkökulmasta  $\vartheta$ . Näin ollen yhtälö (6) voidaan kirjoittaa

muotoon

$$u_s = -R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} + u_g \quad (8)$$

ja yhtälö (7) muotoon

$$u_g = -\frac{d\Psi_{PM}}{dt} \quad (9)$$

Edellä johdettu idealisoitu dynamon sijaiskytkentä kuvassa 7 ei täysin vastaa todellisuutta, koska siinä ei ole otettu huomioon hajavoita, staattorin magneettista kyllästymistä, eikä myöskään staattorin pyörrevirtahäviöitä. Häviöiden vaikutus voitaisiin ottaa huomioon sijoittamalla sijaiskytkentään resistanssi  $R_{Fe}$  induktanssin  $L_s$  rinnalle [15], mutta tämän resistanssin arvo riippuisi taajuudesta ja magneettisesta kyllästymisestä, jolloin analysointi muuttuisi turhan hankalaksi suhteessa tarvittavaan mallinnustarkkuuteen nähden. Edellisistä syistä tulen käyttämään idealisoitua kuvan 7 mukaista sijaiskytkentää olettamalla häviöt olemattoman pieniksi.

Sähkökulmataajuuden  $\omega$  ja roottorin kulmanopeuden  $\omega_m$  välinen yhteys riippuu napapariluvusta  $p$

$$\omega = p\omega_m \quad (10)$$

Roottorin mekaaninen kulmanopeus  $\omega_m$  ja polkupyörän ajonopeus  $v$  ovat suoraan verrannollisia keskenään ja niiden välinen riippuvuus voidaan esittää muodossa

$$\omega_m = \frac{2}{d_{circ}} v \quad (11)$$

jossa  $d_{circ}$  on pyörän halkaisija. Näin ollen sähkökulmataajuuden ja ajonopeuden välinen konversiokaava voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon

$$\omega = \frac{2p}{d_{circ}} v \quad (12)$$

Yhtälöä voidaan käyttää, kun halutaan laskea pyörän ajonopeutta vastaava kulmataajuus.

### 3.2 Sijaiskytkennän parametrien määrittäminen

Polkupyörän dynamon sijaiskytkennän parametrien määrittäminen on yhtä haastavaa kuin muidenkin sähkökoneiden tapauksessa, sillä dynamojen valmistajat eivät ilmoita dynamojensa teknisiä tietoja kovin tarkasti. Tällöin mittaaminen jää ainoaksi tavaksi selvittää parametrien arvot. Sijaiskytkennän parametrien määrittämiseksi

on useita mittaustapoja. Staattori-resistanssi on helposti mitattavissa suoraan dynamon navoista esimerkiksi yleismittarilla. Muut parametrit joudutaan määrittelemään erilaisten mittausten avulla. Tässä työssä muut parametrit määritetään käyttäen oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeita, jolloin voidaan määrittää puuttuvista parametreista vuokerroin ja staattori-induktanssi. Staattori-induktanssin voisi määrittää myös muun muassa askelvastekokeen avulla. Mittauksissa on myöskin huomioitava mahdolliset yliaallot, joita muodostuu muun muassa roottorin ja staattorin mekaanisen rakenteen takia.

### 3.2.1 Tyhjäkäyntikoe

Yksinkertaisuuden vuoksi oletan, ettei staattorilla ole avonapaisuutta, joten voin käyttää jänniteyhtälöä (8). Laplace-muunnetaan yhtälö ja käytetään tehollisarvoja ja laskennassa, jolloin voidaan käyttää osoitinlaskentaa ja superpositioperiaatetta yliaaltojen käsittelyn helpottamiseksi. Laplace-muunnetuksi yhtälöksi saadaan

$$\underline{U}_s(s) = -(R_s + sL_s) \underline{I}_s(s) + s\Psi_{PM} \quad (13)$$

Kun edellistä yhtälöä tarkastellaan taajuustasossa ja kaikkien muutosilmiöiden on annettu tasaantua, niin Laplace-muuttuja  $s$  voidaan korvata kompleksisella kulmataajuudella

$$s = jn\omega \quad (14)$$

missä yliaallot on huomioitu muuttujan  $n$  avulla. Näin ollen yhtälö (13) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underline{U}_s(jn\omega) = -(R_s + jn\omega L_s) \underline{I}_s(jn\omega) + jn\omega \Psi_{PM,n} \quad (15)$$

Muuttujan vaihdon jälkeen jännite, virta ja vuo voidaan ajatella staattisina osoittimina taajuustasossa, joilla on suuruus ja vaihekulma.

Tyhjäkäyntikokeessa dynamo jätetään kuormittamattomaksi eli sijaiskytkentä vastaa avointa piiriä, jolloin virta ei kulje ja se voidaan merkitä nolllaksi. Avoimen piirin jännitteeksi saadaan

$$\underline{U}_s(jn\omega) = jn\omega \Psi_{PM,n} \quad (16)$$

ja sen itseisarvona jänniteyliaallon mitattavissa oleva tehollisarvo

$$\begin{aligned} U_{s,n} &= |jn\omega\Psi_{PM,n}| \\ &= n\omega\Psi_{PM,n} \end{aligned} \quad (17)$$

Yhtälö vastaa sähkökulmataajuuteen verrannollista suoraa, jonka kulmakertoimesta voidaan jänniteyliaalta vastaava vuokerroin määrittää. Systemaattisen mittausvirheen eliminoimiseksi edellinen yhtälö kirjoitetaan seuraavaan muotoon

$$U_{s,n} = n\omega\Psi_{PM,n} + b \quad (18)$$

jossa  $b$  kuvaa systemaattista mittausvirhettä. Tämän jälkeen saatu suora sovitetaan pistejoukkoon pienimmän neliösumman menetelmällä.

Vuokertoimien  $\Psi_{PM,n}$  perusteella voidaan laskea dynamon staattorilla vaikuttavan magneettivuon käyrämuoto. Integroimalla yhtälöä (8) voidaan ratkaista kesto-  
magneettien generoima käämivuo  $\Psi_{PM}$

$$\Psi_{PM} = - \int \left( u_s + R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \right) dt \quad (19)$$

Tyhjäkäynnissä olevan dynamon staattorivirta on nolla  $i_s = 0$ , jolloin yhtälö (19) supistuu muotoon

$$\Psi_{PM} = - \int u_s dt \quad (20)$$

Yhtälöä voidaan käyttää, kun halutaan rekonstruoida vuon käyrämuoto, kun vuokertoimet tunnetaan.

### 3.2.2 Oikosulkukoe

Oikosulkukokeessa staattorin navat oikosuljetaan, jolloin staattorijännite (15) on nolla. Käytännön mittauksissa oikosulku ei ole täydellinen, vaan dynamoa kuormittaa pieni kuormavastus  $R_a$ , jolloin dynamon antojännite ei ole nolla vaan  $U_s = R_a I_s$ . Kun edellinen virhe huomioidaan, voidaan staattorijänniteyhtälö kirjoittaa seuraavaan muotoon

$$0 = - (R_a + R_s + jn\omega L_s) \underline{I}_s (jn\omega) + jn\omega\Psi_{PM,n} \quad (21)$$



Virtayliaalto voidaan nyt ratkaista

$$\underline{I}_s(jn\omega) = \frac{jn\omega\Psi_{PM,n}}{R_a + R_s + jn\omega L_s} \quad (22)$$

ja sen mitattu tehollisarvo

$$\begin{aligned} I_{s,n} &= \left| \frac{jn\omega\Psi_{PM,n}}{R_a + R_s + jn\omega L_s} \right| \\ &= \frac{\Psi_{PM,n}}{\sqrt{L_s^2 + \left(\frac{R_a+R_s}{n\omega}\right)^2}} \end{aligned} \quad (23)$$

Edellisestä yhtälöstä havaitaan, että oikosulussa staattori-resistanssin vaikutus oikosulkuvirtaan vähenee kulmataajuuden kasvaessa, eli riittävän suurella kulmataajuudella oikosulkuvirta riippuu lähinnä vain vuokertoimesta ja staattori-induktanssista:

$$I_{s,n} \approx \frac{\Psi_{PM,n}}{L_s} \quad (24)$$

Yhtälö (23) pätee vain jos mittauksissa on voitu eliminoida systemaattisen virheen mahdollisuus. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole, joten huomioidaan systemaattisen virheen mahdollisuus, jolloin yhtälö (23) voidaan kirjoittaa muotoon

$$I_{s,n} = \frac{\Psi_{PM,n}}{\sqrt{L_s^2 + \left(\frac{R_a+R_s}{n\omega}\right)^2}} + b \quad (25)$$

jossa  $b$  kuvaa systemaattista mittausvirhettä. Edellä saatu käyrä sovitetaan pistejoukkoon pienimmän neliösumman menetelmällä, jolloin tuntemattoman staattori-induktanssin arvo saadaan määritettyä.

### 3.2.3 Pienimmän neliösumman menetelmä

Käyrän sovittaminen pistejoukkoon onnistuu helposti käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää. Menetelmässä määritellään funktio  $f(x_i, \boldsymbol{\beta})$  ja tavoitteena on sovittaa kyseinen funktio mahdollisimman hyvin mitattujen pisteiden  $(x_i, y_i)$  joukkoon. Sovitus tehdään niin, että residuaalien  $r_i$  neliöiden summa

$$S = \sum_{i=1}^N r_i^2 \quad (26)$$

minimoidaan. Residuaali on määritelty siten, että se on mitatun arvon  $y_i$  ja funktion  $f(x_i, \boldsymbol{\beta})$  erotus

$$r_i = y_i - f(x_i, \boldsymbol{\beta}). \quad (27)$$

missä  $\boldsymbol{\beta}$  on riippumattomien parametrien vektori.

Tyhjäkäyntikokeessa määritettävä parametri on vektorin sijasta skalaari  $\beta = \Psi_{PM,n}$  ja tyhjäkäyntikokeen tavoin myös oikosulkukokeessa parametri on skalaari  $\beta = L_s$ . Vaihtoehtoisesti useampi parametri voitaisiin määrittää samalla menetelmällä, mutta tällöin mittausvirheiden vaikutus korostuu huomattavasti. Näistä yleistä mittaukset suoritetaan siten, että mittaussarjasta määritellään vain yksi parametri kerrallaan.

### 3.3 Dynamon reaktansin kompensointi

Dynamon generoiman vaihtojännitteen taajuuden riippuvuus nopeudesta vaikuttaa dynamon reaktanssiin, mikä on myös nähtävissä jänniteyhtälöstä (15). Kirjallisuudessa [15] on esitelty ja myös alan harrastelijat [16] ovat ehdottaneet käytettäväksi dynamon suuren induktanssin muodostaman reaktanssin kompensointia käyttäen dynamon ja tasasuuntaajan välistä sarja- tai rinnakkaiskondensaattoria. Ideana on sovittaa dynamon impedanssi kuormaimpedanssin kanssa siten, että halutulla syöttöjännitteen taajuudella dynamon ja kuorman reaktiiviset komponentit kumoavat toisensa. Tässä tilanteessa dynamon vasta-smv:tä  $u_g$  kuormitetaan tehokertoimella yksi, jolloin dynamon generoima sähköteho on kokonaan pätötehoa

$$P = \text{Re} \{ \underline{U} \underline{I}^* \} \quad (28)$$

Dynamoita kuormittava kuorma voidaan kuvata impedanssina

$$\underline{Z}_a = R_a + jX_a \quad (29)$$

Kun edelliset yhtälöt (28), (29) ja jänniteyhtälö (15) yhdistetään, voidaan kuorman saatava pätötehon lauseke kirjoittaa muotoon

$$P_a = \frac{R_a U_g^2}{(R_s + R_a)^2 + (\omega L_s + X_a)^2} \quad (30)$$

jossa  $U_g$  on dynamon vasta-smv pysyvässä tilassa. Jos kuormana on puhtaasti resistiivinen kuorma, kuormaimpedanssin (29) imaginaariosa on tällöin nolla ja pätöteho

$$P_a = \frac{R_a U_g^2}{(R_s + R_a)^2 + (\omega L_s)^2} \quad (31)$$

Pätötehon maksimi löytyy ratkaisemalla osittaisderivaattojen nollakohdat

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_a}{\partial R_a} &= 0 \\ \frac{\partial P_a}{\partial X_a} &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

ja osoittautuu, että kuorman pätöteho saavuttaa maksimiarvon, kun kuormaimpedanssi on

$$\underline{Z}_a = R_s - j\omega L_s \quad (33)$$

Reaktanssin kompensoinnin voi tulkita myös niin, että sillä kasvatetaan dynamon oikosulkuvirtaa. Reaktanssin kompensoinnin jälkeen oikosulkuvirran lauseke (23) supistuu muotoon

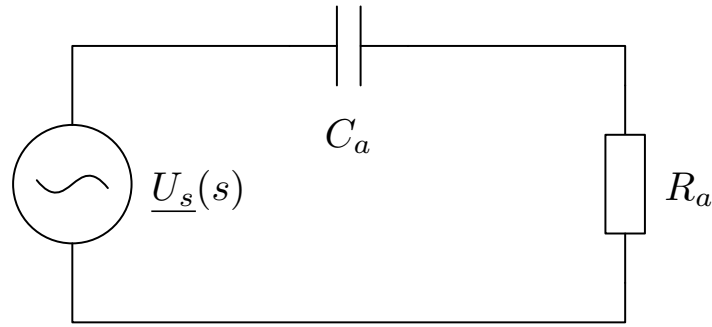
$$\begin{aligned} I_n &= \left| \frac{jn\omega\Psi_{PM,n}}{R_a + R_s} \right| \\ &= \frac{n\omega\Psi_{PM,n}}{R_a + R_s} \end{aligned} \quad (34)$$

jolloin virta riippuu enää vain vuokertoimesta, staattori- ja kuormaresistanssista. Reaktanssin kompensoinnin käyttämisessä on myös riskejä. Jos staattorivirta kasvaa paljon suuremmaksi kuin dynamon valmistaja on olettanut, niin tällöin dynamo voi ylikuumeta ja dynamon käyttöikä voi lyhentyä.

Reaktanssin kompensointi on toteutettavissa käyttämällä passiivisia komponentteja tai tehoelektronikan avulla aktiivisesti, jolloin kompensoinnin toimintapistettä voidaan muuttaa syöttötaajuutta vastaavaksi.

### 3.3.1 Reaktanssin passiivinen kompensointi

Dynamon reaktanssin passiivinen kompensointi voidaan toteuttaa joko kuorman kanssa sarjassa tai rinnakkain olevalla kapasitanssilla [15, 16]. Menetelmän ideana on muodostaa eräänlainen resonanssiipiiri, jonka avulla kuormaimpedanssi soviteaan dynamon antoimpedanssin kanssa. Menetelmän kiinnostavuus piilee siinä, että tarvittava kytkentä on varsin helppo toteuttaa. Haasteena on kuitenkin kiinteä resonanssitaajuus ja kuormariippuvuus. Taajuusaluetta voidaan laajentaa käyttämällä useampia kondensaattoreita ja kytkemällä niitä piiriin ja pois, kun taajuus lähestyy toista esimääriteltyä taajuutta. Tällainen ratkaisu on kuitenkin varsin monimutkai-



Kuva 8: Passiivinen sarjakompensointi

nen toteutta. Passiivisen kompensoinnin haasteena on myös se, että kondensaattori on vaihtosähköpiirissä, jolloin täytyy käyttää polarisoimatonta kondensaattoria. Edellä mainittua ongelmaa voidaan jossain määrin kiertää piiriteknisellä ratkaisulla, jossa kondensaattori jaetaan kahteen osaan, jolloin voidaan käyttää polarisoituja kondensaattoreita [16].

Passiivista reaktanssin kompensointia suunniteltaessa on huomioitava, että seuraavana esiteltävät tulokset pätevät suoraan vain lineaarisille kuormille, eli virrat ja jännitteet ovat sinimuotoisia. Epälineaarisen kuorman, esimerkiksi tasasuuntaajan tapauksessa kuormajännite sisältää paljon yliaaltoja, jolloin jokaisen yliaallon osuus tulisi käsitellä erikseen. Käytännössä kuitenkin riittää tarkastella perusaallon osuutta ja jättää yliaallot kokonaan huomioimatta. [15]

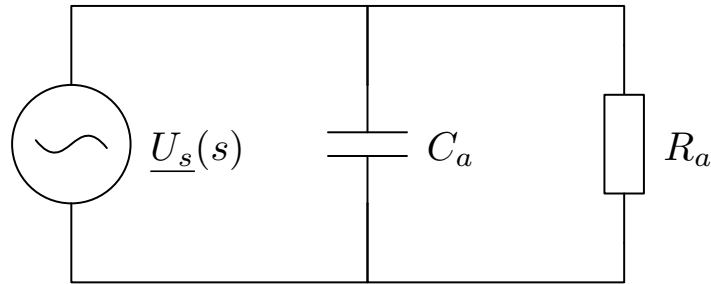
Passiivinen sarjakompensointi toteutetaan lisäämällä dynamon ja kuorman väliin sarjakondensaattori kuvan 8 mukaisesti, jolloin dynamon induktanssi ja kompensointikondensaattori muodostavat sarjaresonanssipiirin, jonka resonanssitaajuus on

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_s C_a} \quad (35)$$

Sarjakompensointia käytettäessä dynamon näkemä kuormaimpedanssi on

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= R_a + \frac{1}{j\omega C_a} \\ &= R_a - j\frac{1}{\omega C_a} \end{aligned} \quad (36)$$

Impedanssin imaginaarisen osan taajuusriippuvuus on nyt kuitenkin kääntäen verrannollinen suoraan verrannollisen sijaan, kuten ideaalisen kompensoinnin yhtälön (33) mukaan pitäisi olla. Tästä syystä täydellinen reaktanssin kompensointi saa-



Kuva 9: Passiivinen rinnakkaiskompensointi

daan vain yhdellä ennalta valitulla resonanssitaajuudella yhtälön (35) mukaisesti. Pätötehon lauseke (30) voidaan nyt kirjoittaa muotoon

$$P_{a,komp} = \frac{R_a U_g^2}{(R_s + R_a)^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_a}\right)^2} \quad (37)$$

Tarvittavan sarjakondensaattorin kapasitanssin arvo voidaan laskea, kun kapasitanssi ratkaistaan sarjaresonanssin kaavasta (35)

$$C_a = \frac{1}{\omega_0^2 L_s} \quad (38)$$

Rinnakkaiskompensointi toteutetaan lisäämällä kuorman rinnalle kondensaattori kuvan 9 mukaisesti. Passiivista rinnakkaiskompensointia käytettäessä dynamon näkemä kuormaimpedanssi voidaan määrittellä kuorma-admittanssin avulla

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{R_a} + j\omega C_a \quad (39)$$

jolloin kuormaimpedanssiksi saadaan

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{1}{\underline{Y}_a} \\ &= R_x - jX_x \end{aligned} \quad (40)$$

jossa

$$R_x = \frac{R_a}{1 + (\omega R_a C_a)^2}$$

$$X_x = \frac{\omega R_a^2 C_a}{1 + (\omega R_a C_a)^2}$$

Rinnakkaiskompensointia käytettäessä dynamon näkemä kuormaimpedanssi on varsin erilainen sarjakompensointiin verrattuna, sillä kompensointi vaikuttaa myös reaaliseen osaan. Pätötehon lause voidaan nyt kirjoittaa muotoon

$$P_{a, komp} = \frac{R_x U_g^2}{(R_s + R_x)^2 + (\omega L_s - X_x)^2} \quad (41)$$

### 3.3.2 Reaktanssin aktiivinen kompensointi

Dynamon reaktanssi voidaan kompensoida myös käyttäen aktiivista tasasuuntausta ja reaktiivisen tehon säätöä. Menetelmä on hyvin samankaltainen kuin tehokertoimen korjaus (Power Factor Correction, PFC) ja voidaan toteuttaa samanlaisella ohjainpiirillä, ainoastaan takaisinkytkentä toteutetaan eri tavalla kuin normaalia tehokertoimen korjausta käytettäessä. [17] Menetelmä vaatii täysin ohjatun sillan käyttämistä ja virran mittaamista vaihtosähköpiiristä. Lisäksi dynamon tapauksessa virtareferenssin muotokertoimenä oleva syöte täytyy estimoida, sillä dynamosovelluksessa referenssin tulisi olla vasta-smv  $u_g$ , mutta vasta-smv:tä ei voi suoraan dynamosta mitata.

Vasta-smv voitaisiin ideaalitapauksessa estimoida siten, että ratkaistaan vasta-smv  $u_g$  staattorijänniteyhtälöstä (8)

$$u_g = u_s + R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad (42)$$

ja sama asia Laplace-muunnettuna

$$\underline{U}_g(s) = \underline{U}_s(s) + (R_s + sL_s) \underline{I}_s(s) \quad (43)$$

Muodostuneessa yhtälössä staattorivirtaa  $i_s$  täytyisi derivoida. Käytännössä tällaista ideaalista derivointia ei voida kuitenkaan toteuttaa, sillä korkeataajuinen kohina virran mittaauksessa voisi aiheuttaa suurta virhettä vasta-smv:n estimaattiin. Sen sijaan ideaalisen derivoinnin voi mallintaa vaiheenjohtopiiriä käyttämällä, jolloin derivointi voidaan rajata tietylle taajuusalueelle. Vaiheenjohtopiiri voidaan kuvata

siirtofunktiolla

$$G_{pd}(s) = k_c \frac{1 + s/\omega_z}{1 + s/\omega_p} \quad (44)$$

Vaihejohtopiirin siirtofunktio viritetään siten, että se käyttäytyy halutulla taajuusalueella lähes ideaalisen derivaattorin tavoin. Lisähaasteena estimaatin laske-  
miselle on se, että dynamon sijaiskytkennän parametrit täytyy tuntea suhteellisen tarkasti. Jos estimaatti lasketaan ohjelmallisesti, niin ohjain voitaneen ohjelmoida siten, että myös parametrit pyritään määrittämään automaattisesti, jolloin estimaatti voitaisiin laskea tarkemmin.

$$\hat{U}_g(s) = \underline{U}_s(s) + \left( \hat{R}_s + G_{pd}(s)\hat{L}_s \right) \underline{I}_s(s) \quad (45)$$

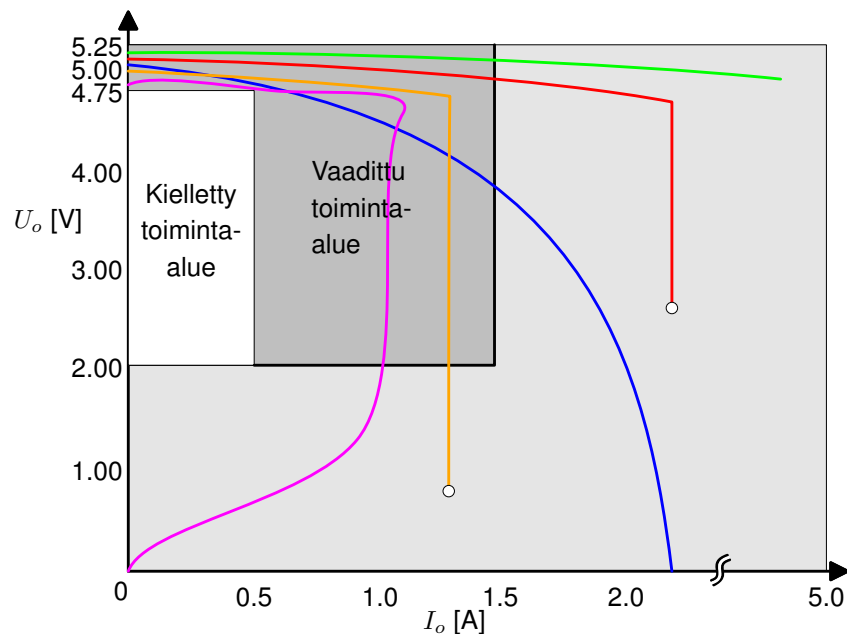
Aktiivinen loistehon säätö ei kuitenkaan välttämättä ole järkevää dynamokäytössä, koska järjestelmän kustannukset voivat nousta kohtuuttoman suuriksi suhteessa lopputuotteen hintaan, jonka kuitenkin tulisi olla kohtuullisella tasolla, jotta mahdollisimman monella kuluttajalla olisi varaa tarvittaessa hankkia dynamokäyttöinen laturi.

## 4 Dynamokäyttöinen USB-laturi

USB-laturimääritelmä [6] määrittelee USB-laturin toimintalogiikan varsin selkeästi, minkä perusteella yksinkertainen laturilogiikka voitaisiin kirjoittaa. Sen sijaan dynamokäyttöisen USB-laturin toimintalogiikan kirjoittaminen ei ole yhtä yksinkertaista kuin esimerkiksi normaalililla verkkovirralla toimivan laturin toimintalogiikka.

Laturimääritelmän mukaan erityisellä USB-laturiportilla on kaksi staattista toimintatilaa: normaali ja sammutettu toimintatila. Laturimääritelmässä kuvaillaan varsin suoraviivaisesti, miten laturiportin täytyy toimia näissä tiloissa. Määritelmässä kuvaillaan myös, miten normaalissa toimintatilassa toimivan laturiportin tulee käyttäytyä kuormamuutosten tapahtuessa. Lisäksi kerrotaan miten laturi voi siirtyä sammutettuun tilaan ja takaisin normaaliin toimintatilaan siten, että USB-laite voi tunnistaa toimintatilojen vaihtumisen. Kuvassa 10 on nähtävissä USB-laturin eri toiminta-alueet.

Dynamokäyttöisen USB-laturin toteuttamista varten täytyy valita sopiva piiritopologia. Käyttökelpoisia piiritopologioita on varsin useita, joilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Sopivan piiritopologian valitseminen ei kuitenkaan ole täysin suoraviivaista, sillä sähkögeneraattorina toimiva dynamo ei ole tavanomaisen sähköverkon tavoin jäykkä jännitelähde, vaan dynamon antojännite vaihtelee voimakkaasti



Kuva 10: USB-laturin toiminta-alue erilaisilla kuormavirroilla. Eri väriset käyrät kuvaavat sallittuja kuormituskäyriä. Valkoinen piste kuvaa toimintapistettä, jossa laturin ohjauslogiikka sammuttaa laturin lähdön. [6]



kuormituksen ja ajonopeuden mukaan, mikä on nähtävissä myös dynamon sijaiskytkentää kuvaavasta jänniteyhtälöstä (8). Lisäksi ylijännitteiltä suojautuminen täytyy ottaa huomioon. Näin ollen ei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa piiritopologiaa, vaan suunnittelijan on tehtävä kompromissi eri topologioiden hyvien ja huonojen ominaisuuksien välillä. Nämä rajoitteet täytyy pitää mielessä laturin sekä toimintalogiikkaa että piiritopologiaa suunnitellessa.

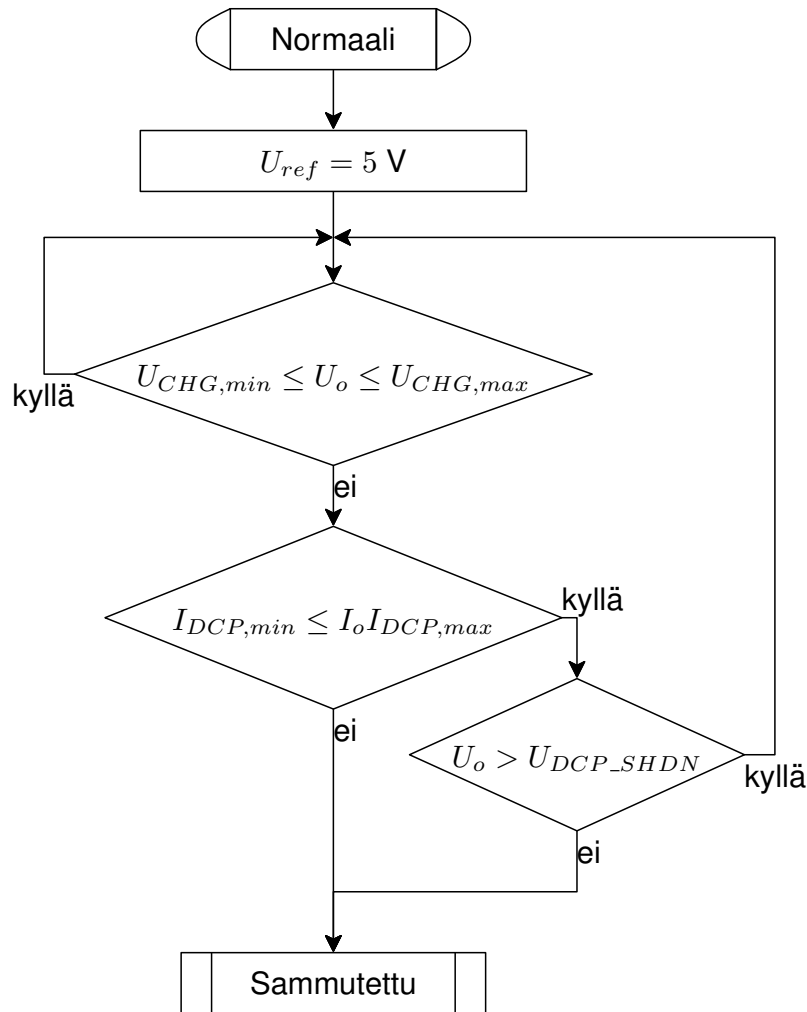
## 4.1 Normaali toimintatila

USB-laturimääritelmän mukaan normaalissa toimintatilassa laturin lähtöjännite  $U_o$  tulee olla  $U_{CHG} = 4,75 - 5,25$  V rajojen sisällä, jos kuormavirta  $I_o$  on pienempi kuin  $I_{DCP,min} = 500$  mA. Lähtöjännitteen keskiarvo lasketaan  $T_{AVG} = 250$  ms ajalta. Lisäksi laturin ei tulisi sammuttaa itseään tässä tilassa. Tosin tämä ehto on osittain ristiriidassa sen asian kanssa, että dynamokäytössä syöttöjännite voi romahtaa esimerkiksi silloin, kun pyörä pysähtyy, joka voidaan tosin tulkita siten, että tilanne vastaa samaa tilannetta kuin se, että verkkolaturi irrotettaisiin pistokkeesta. Sen sijaan, jos kuormavirta  $I_o = I_{DCP} = 500 - 1500$  mA rajojen sisällä, niin lähtöjännite tulee olla kuitenkin suurempi kuin  $U_{SHDN} = 2,0$  V. Jos lähtöjännite laskee alle  $U_{SHDN}$  suuruiseksi, niin portin täytyy siirtyä sammutettu tilaan. Edellinen ohjausalgoritmi voidaan esittää graafisesti kuvan 11 mukaisesti.

## 4.2 Sammutettu toimintatila

USB-laturimääritelmä ei määrittele tarkasti, miten sammutettu toimintatila tulisi toteuttaa, vaan on annettu suunnittelijoille vapaat kädet toimia. Sammutetussa tilassa lähtövirta voidaan esimerkiksi rajoittaa, käyttää taipuvaa virtarajaa tai pudottaa lähtöjännite alas siten, että  $U_o \leq U_{LKG} = 0,7$  V. Tässä työssä käytän viimeksi mainittua tilaa kuvaamaan sammutettua tilaa.

Laturin siirtyessä normaalista toimintatilasta sammutettuun tilaan, ohjausalgoritmi kytkee lähtöjännitteen pois päältä. Lähtöjännitteen täytyy tällöin laskea arvoon  $U_{LKG}$  maksimissaan  $T_{VLKG} = 500$  ms ajan kuluessa. Sen jälkeen kun jännite on laskenut riittävän alas, käynnistetään ajastin, jotta minimaikavaatimus  $T_{REAPP,min} = 100$  ms lähtöjännitteen takaisin noston ja sammuttamisen välillä voidaan taata. Lisäksi dynamokäytössä laturiohjaimen täytyy tarkkailla syöttöjännitteen tasoa, jotta jänniteregulaattorin minimisyöttöjännitevaatimus täytyy. Laturiohjaimen toimintalogiikka on kuvattu graafisesti kuvassa 12.



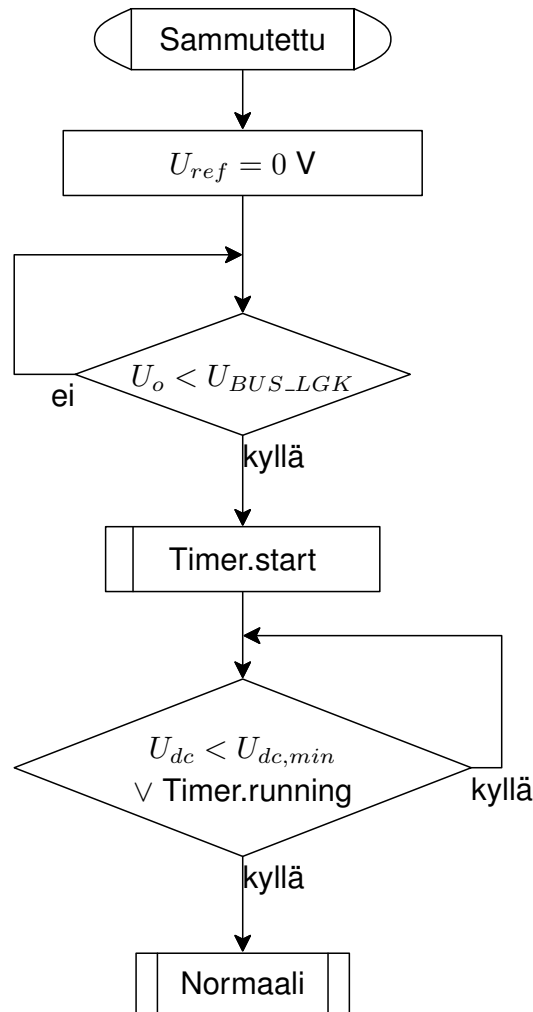
Kuva 11: USB-laturin ohjauslogiikka laturin ollessa normaalissa toimintatilassa.

### 4.3 Yksinkertaistettu ohjausalgoritmi

Dynamokäytössä ohjausalgoritmina on mahdollista käyttää yksinkertaistettua algoritmia, sillä tulojännite voi vaihdella voimakkaasti kuormituksesta riippuen. Tällöin normaalissa toimintatilassa ohjausalgoritmi ei tarkkaile lähtöjännitettä, vaan tulojännitettä. Tulojännitteen laskiessa ennalta määritetyn raja-arvon alapuolelle algoritmi ohjaa laturin normaalista toimintatilasta sammutettuun toimintatilaan. Paluu takaisin normaaliin toimintatilaan tapahtuu kuitenkin normaalisti. Yksinkertaistetun algoritmin toteuttaminen on varsin suoraviivaista.

### 4.4 Tasasuuntaus

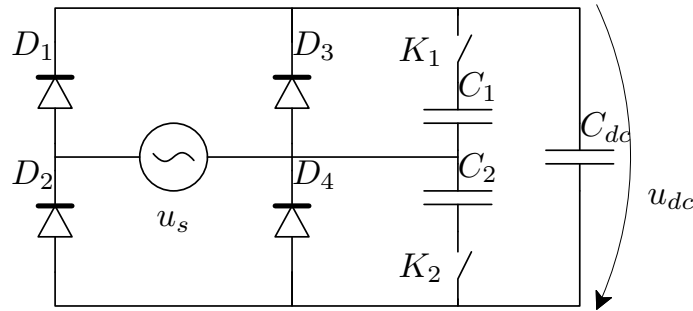
Dynamon kuormana on tavallisesti hehkulamppu tai halogeenivalaisin. Tällaiset kuormat toimivat yhtä hyvin sekä tasa- että vaihtosähköllä, joten dynamon ge-



Kuva 12: USB-laturin ohjauslogiikka laturin ollessa sammutetussa toimintatilassa.

neroima vaihtosähkö ei ole ongelma ja kuorma voidaan kytkeä suoraan dynamon vaihtosähköpiiriin. USB-laitteen lataaminen vaihtosähköllä ei onnistu ilman, että vaihtosähkö tasasuunnataan ja lähtöjännite säädetään halutun suuruiseksi.

Vaihtosähkön tasasuuntaus onnistuu suoraviivaisesti käyttämällä kuvan 13 mukaista neljästä diodista muodostettua kokoaaltotasasuuntaajaa. Ohjaamaton diodisilta on helppo, yksinkertainen ja edullinen tapa toteuttaa tasasuuntaus. Tällainen yksinkertainen ratkaisu kuitenkin tuottaa lisähaasteita varsinaisen säädinpiirin suunnitteluun, sillä dynamon napajännite vaihtelee eri kuormitustilanteissa suurella jännitealueella.



Kuva 13: Yksivaiheinen kokoaaltozasuuntaaja, johon on lisätty jännitteen kahdennus.

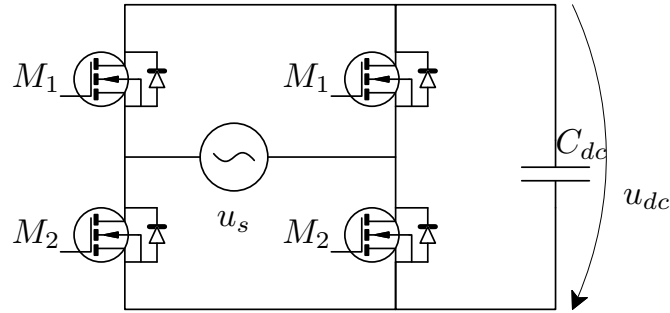
#### 4.4.1 Tasasuuntaajan hyötysuhteen parantaminen

Pienillä ajonopeuksilla diodisillan jännitehäviö voi olla merkittävän suurta. Diodisillan hyötysuhdetta voidaan parantaa siten, että käytetään aktiivista tasasuuntausta [18]. Aktiivinen tasasuuntaaja poikkeaa tavanomaisesta diodisillasta siten, että tasasuuntaajan diodit korvataan metallioksidi-puolijohdekanavatransistoreilla (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET). Transistoreja ohjataan tahdistetusti siten, että ne toimivat ulkoisesti kuten diodit, mutta jännitehäviö komponentin yli jää vain murto-osaan vastaavan diodin jännitehäviöstä ja riippuu vain transistorin  $r_{ds,on}$ -arvosta ja komponentin läpi kulkevasta virrasta. [19]

MOSFET:illa toteutetun tasasuuntaussillan ohjaaminen ei ole aivan yksinkertaista ja vaatii siten kohtuullisen monimutkaisen kytkennän. Lisäksi kuormavirta aiheuttaa dynamon impedanssissa jännitehäviön, joka voi aiheuttaa kytkentävärähtelyä. MOSFET:illa toteutetun tasasuuntaussillan tapauksessa täytyy huomioida, että ilman ohjausta kytkentä käyttäytyy kuin diodisilta, koska teho-MOSFET:n rakenteesta johtuen siinä on parasiittinen diodi [19]. MOSFET-kytkennän heikkous on jännitekestoisuus ylijännitetilanteissa ja varsin monimutkainen kytkentä, joka voi nostaa laitteen valmistuskustannukset liian suuriksi.

#### 4.4.2 Jännitteen kahdennuskytkentä

Pienillä nopeuksilla ajettaessa dynamon kehittämä jännite jää varsin matalaksi ja kuormitettaessa napajännite laskee voimakkaasti dynamon sisäisen resistanssin ja kelan induktanssin muodostaman reaktanssin takia. Asiaa voidaan yrittää korjata käyttämällä niin sanottua jännitteen kahdennuskytkentää, jolloin kuvan 13 kytkin  $K_1$  ja  $K_2$  suljetaan. Kondensaattoreja  $C_1$  ja  $C_2$  ladataan vuoron perään jokaisella puolijaksolla, siten että kondensaattori  $C_1$  ladataan positiivisella ja  $C_2$  negatiivisella



Kuva 14: MOSFET:illa toteutettu yksivaiheinen kokoaaltotasasuuntaaja.

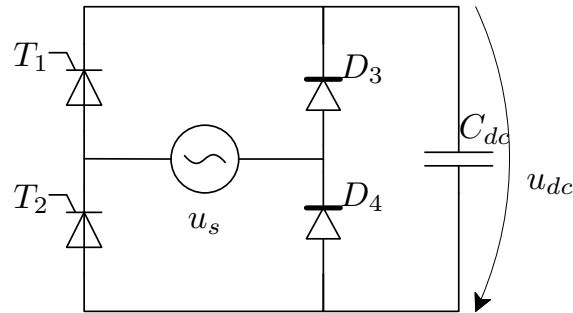
puolijaksolla. Diodit  $D_3$  ja  $D_4$  pitävät kondensaattorit positiivisesti esijännitettynä, tosin reaalkomponenteilla kondensaattorien jännite voi laskea diodin myötäjännitteen verran negatiiviseksi. Simulointien perusteella kondensaattorien  $C_1$  ja  $C_2$  kapasitanssien arvot tulisi olla samaa suuruusluokkaa kuin tasoituskondensaattorin  $C$  kapasitanssi.

Jännitteen kahdennuskytkentää toteutettaessa standardiratkaisu olisi käyttää yhtä kytkintä ja jättää kondensaattori  $C$  pois, mutta dynamokäytössä tällainen ratkaisu ei kuitenkaan toimi riittävän hyvin, sillä kondensaattorien  $C_1$  ja  $C_2$  varaus ei riittäisi yksinään ylläpitämään tasajännitettä, vaikka kapasitanssien arvoa kasvatettaisiin mitoitetuista suuremmaksi. Lisäksi käyttämällä kuvan 13 mukaista kytkentää, kytkimet voidaan korvata MOSFET-transistoreilla, jolloin kytkennän toteuttaminen on varsin suoraviivaista.

## 4.5 Jännitteen regulointi

USB-laturimääritelmän [6] perusteella tasajännite täytyy muuttua säädetyksi 5 V tasajännitteeksi. Ideaalitulanteessa tasasuunnattu säädetty tasajännite voidaan syöttää suoraan lähtöjännitesäätimelle, esimerkiksi jännitettä laskevalle hakkurille. Dynamokäytössä joudutaan kuitenkin ottamaan huomioon se tosiasia, että dynamon generoima napajännite vaihtelee erittäin suurella jännitealueella riippuen dynamon toimintapisteestä. Toimintapisteeseen vaikuttavat sekä dynamon pyöritysnopeus että kuormitus.

Esimerkiksi, jos pyörällä ajetaan 45 km/h nopeudella ja käytettäessä 700C-tyyppistä rengasta, jolloin pyörän ulkohalkaisija  $d_{circ} \approx 0,7$  m niin kulmataajuus saadaan laskettua kaavalla (12), jolloin saadaan  $\omega = 500$  rad/s. Käytettäessä esimerkiksi Shimano NX30-napadynamo [15], joka toimii tyhjäkäynnissä, eli staattorivirta on nolla, niin dynamon napajännitteen huippuarvo saavuttaa arvon  $\hat{u}_s \approx 88$  V,



Kuva 15: Yksivaiheinen tyristoritasasuuntaaja.

joka on tässä tilanteessa myös tasajännitteen  $u_{dc}$  arvo. Esimerkin 45 km/h nopeus voidaan saavuttaa kohtuullisilla ponnisteluilla, joten jännitteen arvo on varsin realistinen arvio. Hyvin tyypillinen tilanne, jolloin kuormitus laskee nolnaan, voi tapahtua silloin, kun ladattavan laitteen akku täyttyy, ladattavan laitteen latausjohto irtoaa jostain syystä: esimerkiksi käyttäjän toimesta tai tärähdyksen voimasta.

Laaja syöttöjännitteen vaihtelualue tekee lähtöjänniteregulaattorin toteuttamisesta varsin haastavaa. Yksi keino on toteuttaa jännitteen säätö kahdessa vaiheessa. Lähtöjännitettä voidaan säätää jo tasasuuntaajalla, kun ohjaamattoman diodisillan sijaan käytetään ohjattua tyristorisiltaa ja tavanomaista jännitesäätöä. Vaihtoehtoisesti tasasuunnattu jännite voidaan säätää käyttäen useampiasteista hakkuritopologiaa.

#### 4.5.1 Esiregulointi tyristoritasasuuntaajalla

Tasajännitettä voidaan säätää jo tasasuuntaajassa, jos tasasuuntaaja on ohjattavissa. Puoli ohjattu tyristoritasasuuntaaja voidaan muodostaa siten, että diodisillan diodit  $D_1$  ja  $D_2$  korvataan tyristoreilla  $T_1$  ja  $T_2$  kuvan 15 mukaisesti. Lisäksi puoli ohjattuun tyristoritasasuuntaan on mahdollista integroida jännitteen kahdennuskytkentä yhtä helposti kuin tavalliseen dioditasasuuntaajaan, jolloin muodostuvasta piiristä saadaan varsin yksinkertainen, kompakti ja samalla kohtuullisen edullinen kytkentä.

Tyristoritasasuuntaajan ohjaus voidaan toteuttaa useammalla eri tavalla. Yksinkertaisin menetelmä on ohjata tyristoreja puolijaksoittain siten, että sytytyspulssi annetaan vain, jos kondensaattorin jännite laskee ennalta määritellyn tason alle. Tyristorien sammuminen tapahtuu automaattisesti, kun niiden läpi kulkeva virta laskee pienemmäksi kuin kyseisen tyristorin pitovirta. Tällaisen yksinkertaisen ohjauksen suurin ongelma on kuitenkin se, että pahimmassa tapauksessa tyristorin

sytytyspulsseja annetaan heti puolijakson alussa, jos tasajännite on laskenut kynysarvon alle, jolloin kyseinen tyristori sytytetään samoilla ehdoilla, kuin tavallinen diodi syttyisi. Tällöin kytkentään muodostuu suuri virtapulssi, joka lataa tasoituskondensaattorin hetkessä liian korkeaan jännitteeseen. Käytännössä tasajännitteen esisäätöä ei voi oikeasti toteuttaa tällaisella ohjauksella. Parempi ratkaisu on ohjata tyristoreja jänniteohjeen avulla siten, että säädin säätää ohjearvon ja oloarvon välisen eron perusteella tyristorien sytytyskulmaa  $\alpha$ . Tyristoriohjauksella saadaan tehokkaasti säädettyä tasajännitettä ja samalla voidaan huolehtia siitä, että dynamon kuormavirran katkeaminen tapahtuu vain virran nollakohdissa.

Tyristoriohjauksen toteuttaminen voi kuitenkin olla käytännössä hyvin haasteellista. Ensinnäkin tyristoriohjaimen syöttöjännitteen generoiminen voi tuottaa ongelmia, sillä jännitetasot vaihtelevat suurella alueella. Ohjaimen täytyy myös synkronisoitua syöttöjännitteeseen, jotta kullakin puolijaksolla ohjattaisiin oikeaa tyristoria. Syöttöjännitteen synkronoinnin toteuttaminen on myöskin varsin hankalaa, sillä syöttötaajuuskin vaihtelee varsin suurella alueella: lähes nolla taajuudesta useisiin kymmeneen ellei jopa yli sataan hertsiin. Tämän takia synkronointi joudutaan käytännössä toteuttamaan vaihelukon (Phase-locked loop, PLL) avulla. Edelliset erityisvaatimukset voivat tehdä vaihelukon toteuttamisesta erittäin problemaattista. Tyristorin sytytyskulman  $\alpha$  laskeminen voidaan toteuttaa esimerkiksi sopivasti viritetyllä P- tai PI-tyyppisellä säätimellä.

#### 4.5.2 Lineaarinen regulaattori

Lineaariregulaattorin toimintaperiaate vaatii sen, että regulaattorin syöttöjännite on suurempi kuin antojännite. Regulaattori säätää regulaattorin yli jäävää jännitehäviötä siten, että antojännite on halutun suuruinen. Regulaattoria voidaan kuvata yhtälöllä

$$U_o = U_{dc} - R(U_o)I_o \quad (46)$$

jossa  $R$  on reguloitivastus, jonka suuruus riippuu lähtöjännitteestä. Regulaattorikytkennän hyviä puolia on se, että regulaattori voidaan toteuttaa hyvin pienellä komponenttimäärällä, joten se on yksinkertainen ja vähän tilaa vievä. Suurin haitta on kuitenkin lämmöksi muuttuva hukkaenergia, joka syntyy lineaarisen regulaattorin toimintaperiaatteen takia. Hukkaenergiaa voidaan kuitenkin säätää pienemmäksi, jos syöttöjännite valitaan riittävän alhaiseksi lähtöjännitteeseen nähden

$$P_{loss} = (U_{dc} - U_o) I_o \quad (47)$$

USB-laturimääritelmän mukaan vähimmäisvaatimuksena on, että kuormavirta voi nousta 500 milliampeerin suuruiseksi. Jos lähtöjännitteen säätö toteutetaan esimerkiksi 7805-lineaariregulaattorilla, niin sen vaatimuksena on tyypillisesti se, että syöttöjännitteen tulee olla vähintään 2 V lähtöjännitettä suurempi [20]. Kun arvot sijoitetaan yhtälöön (47), niin hukkateho  $P_{loss} = 1$  W ja kokonaistehotarve on tällöin 3,5 W ja hyötysuhde

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (48)$$

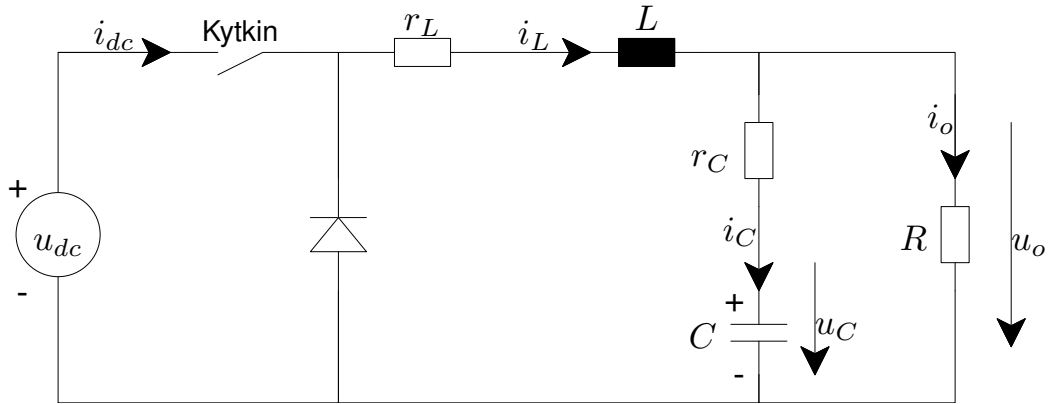
parhaimmassa tapauksessa  $\eta \approx 0,71$ , kun syöttöjännite on alimmillaan. Jos taas säätöön käytetään niin sanottua matalan jännitehäviön regulaattoria (Low-Dropout, LDO), niin hyötysuhde voidaan saada paremmaksi. LDO:lla, esimerkiksi MIC29150 [21], tyypillinen minimijännitehäviö on 0,2 V. Tehohäviö on siis ideaalitalanteessa 0,1 W, eli hyötysuhde parhaimmassa tapauksessa  $\eta \approx 0,96$ . Jotta kokonaishyötysuhteen saisi mahdollisimman hyväksi lineaariregulaattoria käytettäessä, täytyy esiregulaattorin syöttöjännite rajata varsin matalalle, mikä onnistuu käyttämällä aiempaa puoliohjattua tyristoritasasuuntaajaa. Lineaariregulaattorin käyttäminen on siis kompromissi häviöiden ja yksinkertaisen ja edullisen toteutuksen välillä.

### 4.5.3 Hakkuriin perustuva regulaattori

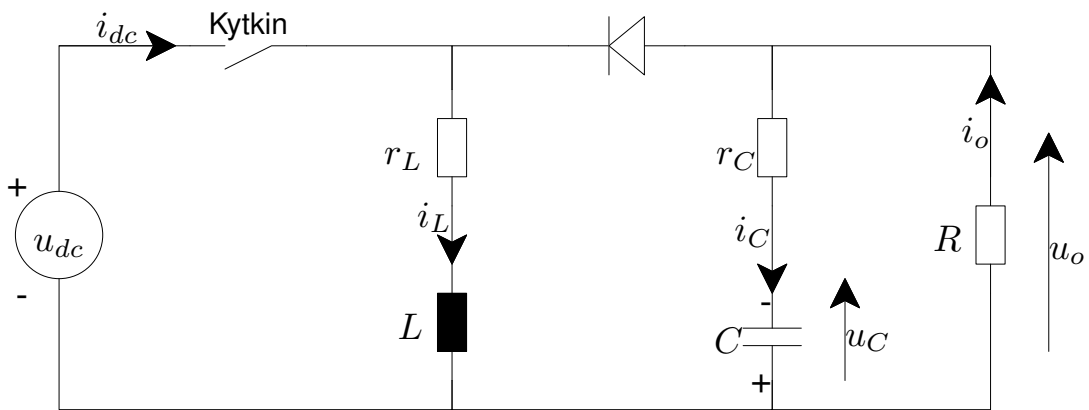
Puoliohjatun tyristoritasasuuntaajan ohjauksen haasteiden ratkaiseminen voi osoittautua erittäin ongelmalliseksi ja epätaloudelliseksi, joten jännitesäädön toteuttaminen hakkuriin perustuvalla kytkennällä voi olla hyvinkin perusteltua. Yksinkertainen ja hyvin käyttökelpoinen hakkuritopologia on kuvan 16 mukainen jännitettä laskeva (buck) hakkuri. Myös kuvan 17 mukainen jännitettä laskeva-nostavaa (buck-boost) hakkuria voidaan käyttää. [18]

Dynamokäytössä yhdellä hakkuriasteella ei kuitenkaan käytännössä voida suoraan toteuttaa tasajännitteen säätöä, sillä dynamon ominaisuuksien takia syöttöjännitealue on varsin laaja. Laajan jännitealueen takia pulssisuhteen vaihteluväli kasvaa aivan liian suureksi, jotta yksiasteinen hakkuri olisi käyttökelpoinen [22]. Lisäksi pulssisuhdetta rajoittaa kytkinkomponenttien nopeus tai paremminkin sanoen niiden hitaus, joka riippuu suuresti käytetyistä puolijohdekomponenteista [18], minimijohtoaika ja kytkentätaajuus. Esimerkiksi, jos syöttöjännitteen vaihteluväli on 6...100 V, niin ideaalisen jännitettä laskevan hakkurin pulssisuhte vaihtelee tällöin





Kuva 16: Jännitettä laskeva hakkuri.



Kuva 17: Jännitettä nostava ja laskeva hakkuri.

välillä

$$D = \frac{U_o}{U_{dc}} \quad (49)$$

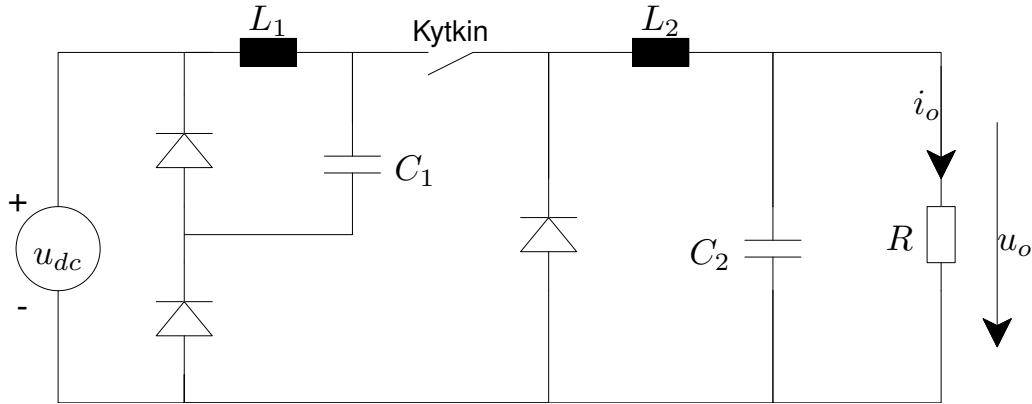
$$\approx 0,050 \dots 0,833$$

ja ideaalisella jännitettä nostavan ja laskevan hakkurin pulssisuhde vaihtelisi välillä

$$D = \frac{U_o}{U_o + U_{dc}} \quad (50)$$

$$\approx 0,047 \dots 0,455$$

Jos tasajännite on säädetty esiregulaattorilla ja tasajännitteen vaihteluväli on  $U_{dc} = 6 \dots 20$  V, niin tällöin jännitettä laskevan hakkurin pulssisuhteen vaihteluväli  $D \approx 0,250 \dots 0,833$  tai jännitettä nostavan ja laskevan hakkurin  $D \approx 0,200 \dots 0,455$  eli esiregulointia käytettäessä pulssisuhteen vaihteluväli on realistisella alueella ja siten tavanomaista hakkuria voitaisiin käyttää.



Kuva 18: Ideaalinen neliöllinen jännitettä laskeva hakkuri.

Laajan syöttöjännitealueen ongelmaa voidaan lähestyä myös käyttämällä esimerkiksi peräkkäin kytkettyjä hakkureita [22] ja ohjata niitä joko itsenäisesti tai tahdistetusti. Esimerkiksi kaksiasteisen jännitettä laskevan hakkurin efektiivinen pulssisuhte on tällöin

$$D = \sqrt{\frac{U_o}{U_{dc}}} \quad (51)$$

$$\approx 0,224 \dots 0,913$$

joka on paljon realistisempi pulssisuhteen vaihteluväli, kuin yksiasteisissa tapauksessa.

Peräkkäin kytkettyjen erillisten hakkurien sijaan voidaan käyttää niin sanottuja neliöllisiä (Quadratic) hakkuritopologioita. Näillä topologioilla on suoraan edellisten neliöllisten pulssisuhteiden ominaisuudet. Lisäksi kuvan 18 mukaista piiritopologiaa käyttämällä voidaan aktiivisten kytkinten määrää vähentää yhteen. [22]

Työläin osuus neliöllisten piiritopologioiden toteutuksessa on lähinnä säätösilmukan stabilointi, joka on huomattavasti hankalampaa kuin yksiasteisilla topologioilla. Silmukan stabiloinnin haastavuus tulee siitä, että näissä topologioissa on kaksi LC-suodatinta, jonka takia hakkurin siirtofunktio ohjaussuhteesta lähtöjännitteeseen on neljättä astetta. Lisäksi, jos hakkurin piirikomponenttien ekvivalenttinen sarjaresistanssi on pieni, niin siirtofunktiossa voi tällöin esiintyä oikean puolitason nollia, jotka rajoittavat hakkurin kaistanleveyttä ja hakkurin suorituskyky voi jäädä todella heikoksi. Kirjallisuudessa on myös esitetty, että neliöllisen hakkurin säädön toteuttaminen kannattaa toteuttaa kaskadisäätönä tavallisen jännitemuotoisen säädön sijaan. Tällöin sisempi säätösilmukka säätää induktanssin  $L_1$  virtaa ja ulompi säätösilmukka lähtöjännitettä. [23]

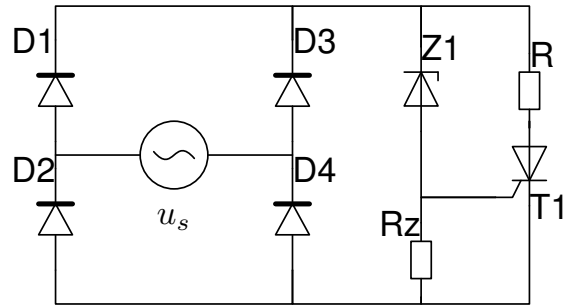
Kirjallisuudessa [15] on esitelty lisäksi hakkuritopologia, jossa tavanomaisen tasasuuntaajan ja hakkurin yhdistelmän sijaan on käytetty kahden hakkurin kombinaatiota, jossa käytetään sekä jännitettä laskevaa että jännitettä nostavaa ja laskevaa hakkuria rinnakkain toteuttamaan sekä tasasuuntaus että jännitesäätö. Topologian ideana on ohjata katkojia siten, että jännitettä laskeva hakkuri saa ohjausta syöttöjännitteen positiivisella puolijaksolla ja jännitettä nostava ja laskeva hakkuri negatiivisella puolijaksolla, jolloin tasasuuntaussillan jännitehäviö jäisi pois. Ideana tämä kuulostaa houkuttelevalta, mutta ongelmana on se, että tässä tapauksessa jouduttaisiin käyttämään katkojien perusversioita, jolloin pulssisuhteen vaihteluväli voi kasvaa liian suureksi, tai peräkkäin kytkettyjä katkojia, jolloin komponenttikustannukset kasvaisivat tarvittavien aktiivisten kytkinten ja ohjainpiirien takia. Lisäksi jännitekesto voi muodostua ongelmaksi. Neliöllisten topologioiden käyttäminen on myöskin hankalaa, koska esimerkiksi kuvan 18 mukaisessa neliöllisessä jännitettä laskevassa hakkurissa olevat diodit oikosulkisivat syöttöjännitteen negatiivisella puolijaksolla.

## 4.6 Ylijännitesuojaus

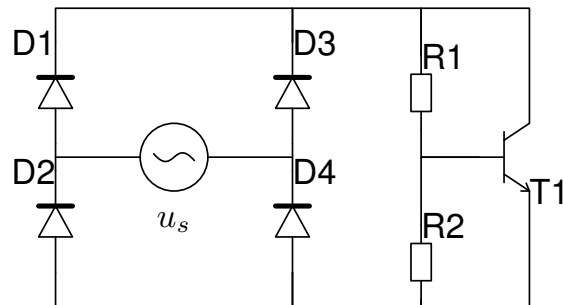
Tietyissä toimintapisteissä dynamon kehittämät korkeat jännitetasot ovat täysin normaaleja, joka täytyy ottaa huomioon laturin elektroniikkaa ja ylijännitesuojaa suunnitellessa. Dynamo voi kehittää myös erittäin suuria jännitepiikkejä nopeiden virtatranssienttien aikana dynamon suuren sarjainduktanssin takia. Jännitepiikkejä vastaan voidaan suojautua käyttäen erilaisia transienttisuojia esimerkiksi transienttisuojadiodeja (Transient Voltage Suppression diode, TVS), varistoreja tai kaasupurkausputkia joko yksinään tai yhdistellen. Lisäksi ylijännitesuojina voidaan käyttää jännitettä leikkaavia ratkaisuja kuten Zenerdiodeja.

Yksinkertainen mutta toimiva ratkaisu toteuttaa ylijännitesuojaus on käyttää niin sanottua rautakankitekniikkaa (crowbar). Tällöin piirissä on yksikkö, joka aiheuttaa syöttöjännitteen oikosulun, kun syöttöjännite saavuttaa asetetun kynnystason. Dynamokäytössä oikosulku ei kuitenkaan ole kovin voimakas, sillä dynamon suuren impedanssin vuoksi oikosulkuvirta on rajoitettua. Rautakankisuojausta pehmeämpi ratkaisu on käyttää dynaamisesti muuttuvaa vastusta, jolloin dynamon kuormitusta voidaan keinotekoisesti kasvattaa. Tällöin dynamon impedanssissa tapahtuvan jännitehäviön vaikutuksesta lähtöjännite voidaan rajoittaa halutulle tasolle.

Edelliset rautakankisuojaukset voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttäen kuvan 19 mukaista periaatteellista kytkentää. Kuvan kytkentä voidaan sijoittaa laturielekt-



Kuva 19: Pehmeällä rautakankitekniikalla toteutettu ylijännitesuojaus.



Kuva 20: Dynaamisella vastuksella toteutettu ylijännitesuojaus.

roniikan rinnalle, jolloin kytkentä ei vaikuta laturin tasajännitteeseen  $u_{dc}$ . Laturin rinnalle siis kytketään toinen tasasuuntaussilta ja sillan kuormana on sopivan tehokaston omaava tehovastus  $R$  ja zenerdiodilla  $Z_1$  ohjattu tyristori  $T_1$ . Zenerdiodi toimii jännitemonitorina, jolla tyristori saadaan ohjattua johtavaksi, kun syöttöjännite kasvaa ennalta valitulle tasolle. Vaihtoehtoisesti tyristorin sijaan voidaan käyttää transistoria, joka ohjataan osittain johtavaksi samantapaisella jännitemonitorilla, kuin edellisessä rautakankisuojuuksessa.

Kuvassa 20 on periaatteellinen transistorikytkentä, joka toimii dynaamisena vastuksena, jolla dynamon kuormitusta lisätään. Resistanssien  $R_1$  ja  $R_2$  muodostamalla jännitteenjako valitaan siten, että transistorin  $T_1$  alkaa johtaa, kun haluttu kynnystaso saavutetaan. Transistorin johtaessa se aiheuttaa ylimääräistä kuormitusta, jolloin dynamon näkemä kuormaimpedanssi laskee ja tasajännite asettuu halutulle tasolle. Transistorikytkentä voidaan sijoittaa samaan DC-piiriin, kuin laturielektroniikka, sillä kytkentä ei oikosulje DC-piiriä, kuten rautakankisuojuuskytkentä tekee. Lisäksi yhdistämällä transienttisuoja ja pehmeä tai kova ylijännitesuojaus, voidaan laturielektroniikka suojata varsin hyvin ylijännitteitä vastaan.

## 5 Jännitettä laskeva hakkuri

Jännitettä laskevan hakkurin mallintamiseksi ja hakkurin säätimen suunnittelemiseksi täytyy hakkurille muodostaa tilayhtälöt ja linearisoida ne. Tilayhtälöitä tarvitaan myös simuloitaessa, kun hakkuria simuloidaan käyttäen keskiarvoistusmenetelmää.

### 5.1 Tilayhtälöt ja linearisointi

Muodostetaan tilayhtälöt jännitettä laskevalle hakkurille. Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että hakkuri on mitoitettu niin, että induktanssin virta on jatkuvaa. Induktanssin virta on jatkuvaa myös siinä tapauksessa, jos hakkurin kytkimiä ohjataan synkronoidusti. Kuvan 16 perusteella voidaan kirjoittaa seuraavanlaiset keskiarvostetut yhtälöt

$$L \frac{di_L}{dt} = -ri_L - \frac{R}{r_C + R} u_C + u_{dc}d \quad (52)$$

$$C \frac{du_C}{dt} = \frac{R}{r_C + R} i_L - \frac{1}{r_C + R} u_C \quad (53)$$

$$u_o = \frac{r_C R}{r_C + R} i_L + \frac{R}{r_C + R} u_C \quad (54)$$

$$i_{dc} = i_L d \quad (55)$$

jossa

$$r = r_L + \frac{r_C R}{r_C + R}$$

Hakkurin suhteellista johtoaikaa  $d$  säädetään. Jotta tarvittava säädin voidaan muodostaa, niin hakkurille täytyy muodostaa piensignaalinmalli [18]. Tämä onnistuu linearisoimalla ja perturboimalla edelliset tilayhtälöt. Perturbointi tehdään siten, että oletetaan tilamuuttujien, syötteiden ja lähtöarvojen sisältävän jatkuvan tilan komponentin ja huomattavan pienen värekomponentin. Merkitään muuttujia siten, että

$$\begin{aligned} d &= D + \tilde{d} & i_L &= I_L + \tilde{i}_L & u_C &= U_C + \tilde{u}_C \\ u_o &= U_o + \tilde{u}_o & u_{dc} &= U_{dc} + \tilde{u}_{dc} & i_{dc} &= I_{dc} + \tilde{i}_{dc} \end{aligned}$$

jossa muuttujat  $D$ ,  $I_L$ ,  $U_C$ ,  $U_o$ ,  $U_{dc}$  ja  $I_{dc}$  ovat jatkuvuustilan komponentteja ja  $\tilde{d}$ ,  $\tilde{i}_L$ ,  $\tilde{u}_C$ ,  $\tilde{u}_o$ ,  $\tilde{u}_{dc}$  ja  $\tilde{i}_{dc}$  ovat dynaamisen tilan värekomponentteja. Sijoittamalla

perturboidut muuttujat hakkurin tilayhtälöihin (52)–(55), saadaan muodostettua linearisoitu piensignaalinmalli:

$$L \frac{d\tilde{i}_L}{dt} = -r\tilde{i}_L - \frac{r_C}{r_C + R} \tilde{u}_C + D\tilde{u}_{dc} + U_{dc}\tilde{d} \quad (56)$$

$$C \frac{d\tilde{u}_C}{dt} = \frac{R}{r_C + R} \tilde{i}_L - \frac{1}{r_C + R} \tilde{u}_C \quad (57)$$

$$\tilde{u}_o = \frac{r_C R}{r_C + R} \tilde{i}_L + \frac{R}{r_C + R} \tilde{u}_C \quad (58)$$

$$\tilde{i}_{dc} = D\tilde{i}_L + I_L\tilde{d} \quad (59)$$

Hakkurin lähtöjännite  $u_o$  on syöttöjännitteen  $u_{dc}$ , pulssisuhteen  $d$  ja hakkurin piirikomponenttien funktio. Hakkurin lähtöjännite halutaan pitää vakiona syöttöjännite- tai kuormamuutoksista riippumatta. Lähtöjännitteen tulee pysyä tyypillisesti  $\pm 1$  % rajoissa [18], tosin USB-laturimääritelmä [6] sallii lähtöjännitteelle  $\pm 5$  % vaihteluvälin.

Lähtöjännitteen halutaan seuraavan referenssijännitettä mahdollisimman tarkasti muuttamalla pulssisuhdetta sopivasti. Referenssijännite on vakio  $U_{o,ref} = 5$  V, kun laturi toimii normaalissa tilassa [6]. Hakkurin säätö toteutetaan siten, että piiriin lisätään negatiivinen takaisinkytkentä ja säätäjä, jolloin muodostuu suljettu säätösilmukka. Suljettu säätösilmukka voidaan tehdä varsin immuuniksi ulkoisia häiriötekijöitä vastaan. [18]

Lähtöjännitteen säätö voidaan toteuttaa käyttämällä joko jännitesäätöä (Voltage-mode Control) tai virtasäätöä (Current-mode Control). Jännitesäädössä pulssisuhdetta ohjataan lähtöjännitteen perusteella. Virtasäädetyssä hakkurin säätösilmukka toteutetaan kaskadisäätönä, jolloin hakkurin säädin koostuu kahdesta sisäkkäisestä säätösilmukasta. Sisempi nopea säätösilmukka ohjaa pulssisuhdetta induktanssin virran  $i_L$  perusteella ja virtasäädön referenssi  $i_{L,ref}$  tulee tällöin ulommalta jännitesäätimeltä, joka laskee virtareferenssin lähtöjännitteen perusteella. Vaikka virtasäädetty hakkuri mahdollistaa helpommin muun muassa virran rajoittamisen, niin se on kuitenkin hieman monimutkaisempi toteuttaa. [18]

Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan pelkästään jännitesäätöä. Määritellään piensignaalinmallista (56)–(59) siirtofunktiot

$$G_{i_L,d}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{U_{dc}}{r + sL} \quad (60)$$

$$G_{i_L, u_{dc}}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{u}_{dc}(s)} = \frac{D}{r + sL} \quad (61)$$

$$G_{i_L, u_C}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{u}_C(s)} = \frac{1}{r + sL} \quad (62)$$

$$G_{u_C, i_L}(s) = \frac{\tilde{u}_C(s)}{\tilde{i}_L(s)} = \frac{R}{1 + s(r_C + R)C} \quad (63)$$

$$G_{i_L, d}(s) = \frac{G_{i_L, d}(s)}{1 + G_{i_L, u_C}(s)G_{u_C, i_L}(s)} \quad (64)$$

$$G_{i_L, u_{dc}}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{G_{i_L, u_{dc}}(s)}{1 + G_{i_L, u_C}(s)G_{u_C, i_L}(s)} \quad (65)$$

$$G_{u_C, i_L, d}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = G_{u_C, i_L}(s)G_{i_L, d}(s) \quad (66)$$

jotta voidaan muodostaa säätäjän kannalta tärkeä siirtofunktio ohjaussuhteesta  $\tilde{d}$  lähtöjännitteeseen  $\tilde{u}_o$

$$G_{u_o, d}(s) = \frac{\tilde{u}_o}{\tilde{d}} = \frac{R}{r_C + R} \left( r_C G_{i_L, d}(s) + G_{u_C, i_L, d}(s) \right) \quad (67)$$

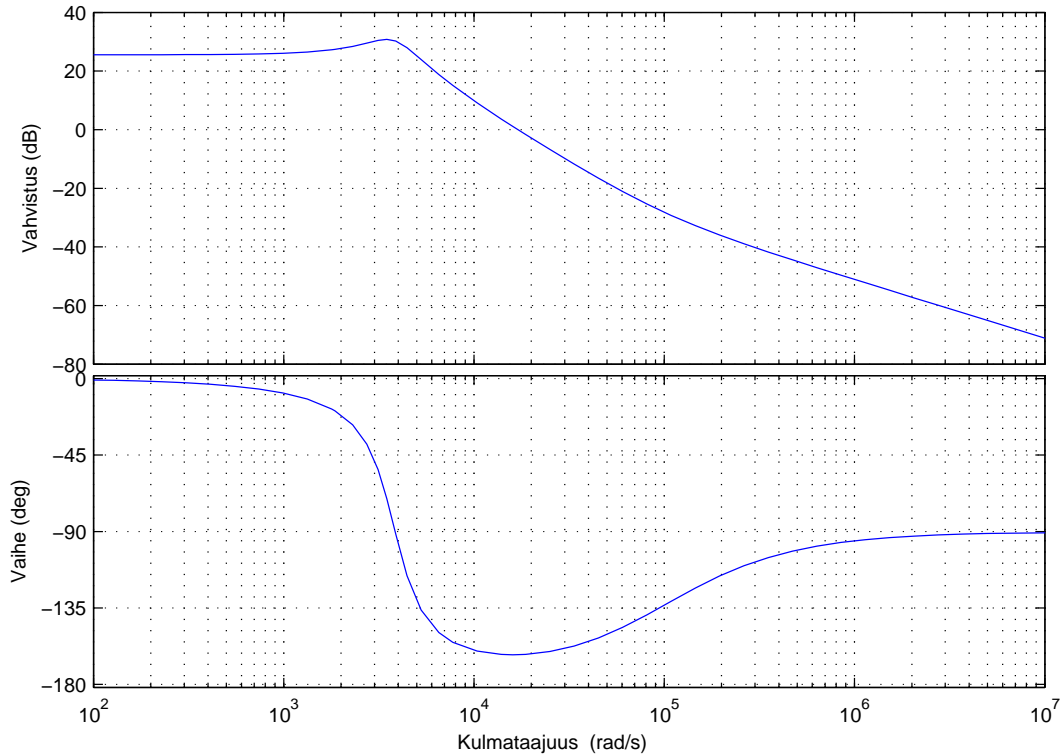
Säädettävän hakkurin avoimen silmukan siirtofunktioksi voidaan nyt kirjoittaa

$$G_{ol}(s) = G_c(s)G_m(s)G_{u_o, d}(s) \quad (68)$$

jossa  $G_m(s)$  on pulssinleveysmodulaattorin siirtofunktio

$$G_m(s) = \frac{1}{\hat{U}_r} \quad (69)$$

Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että modulaattorin huippuarvo  $\hat{U}_r = 1$ , jolloin modulaattorin lauseke sievenee pois avoimen silmukan lausekkeesta. Hakkurin avoimen silmukan siirtofunktion  $G_{ol}(s)$  vahvistus- ja vaihekäyrät voidaan piirtää, jos hakkurin piirikomponentit tunnetaan. Kuvassa 21 on piirretty on erään hakkurin avoimen silmukan vahvistus- ja vaihekäyrät ohjaussuhteesta lähtöjännitteeseen. Kuvasta on nähtävissä kondensaattorin sarjavastus (Equivalent Series Resistance, ESR) muodostaman nollan vaikutus, joka nostaa vahvistusta ja vaihetta suurilla taajuuksilla. Säätimen suunnittelussa ei kuitenkaan kannata luottaa ESR:n, koska sen arvo



Kuva 21: Buck-hakkurin avoimen silmukan vahvistus- ja vaihekaivat.

voi vaihdella huomattavasti eri komponenttien välillä. Lisäksi kondensaattorin ESR voi muuttua kondensaattorin ikääntyessä ja lämpötilan vaikutuksesta.

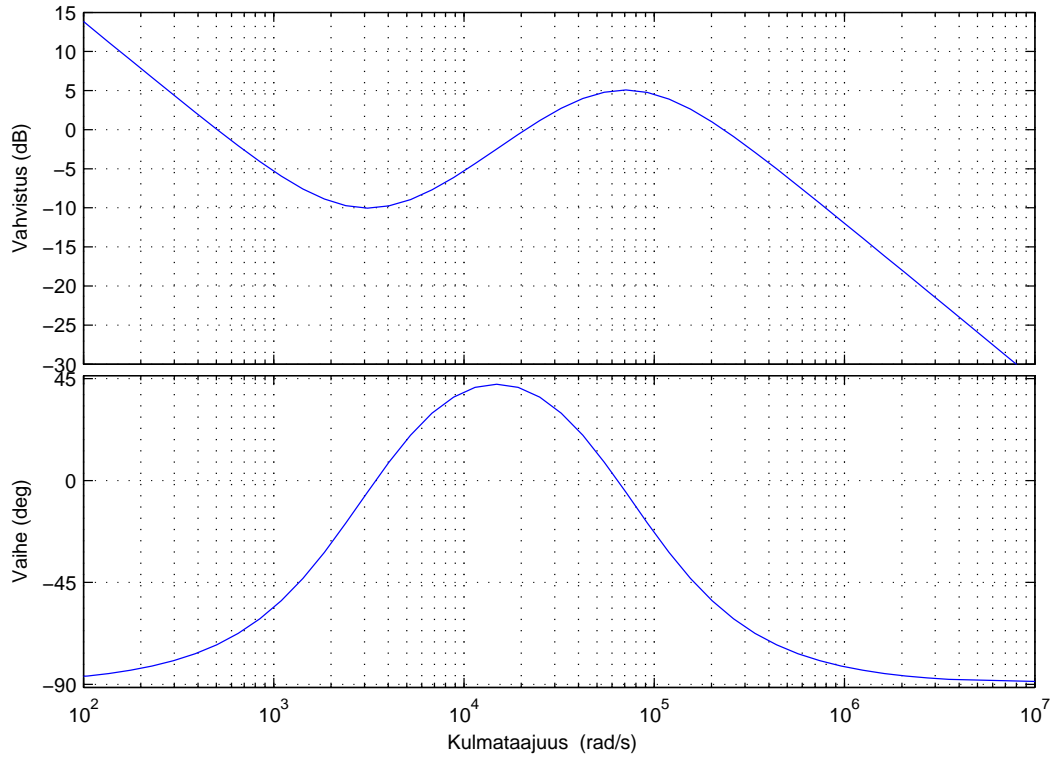
## 5.2 Säätimen suunnittelu

Suunnitellaan säätäjä siten, että avoimen silmukan vahvistus on pienillä taajuuksilla mahdollisimman suuri, jotta pysyvän tilan virhe minimoituisi. Ylimenotaajuus  $\omega_c$ , jolla avoimen silmukan vahvistus on yksi, tulisi olla mahdollisimman suuri, jotta säädetty järjestelmä reagoisi nopeasti ohjearvon muutoksiin. Ylimenotaajuuden tulisi kuitenkin olla noin dekadin kytkentätaajuuden alla puolella. Määritellään vaihevara  $\theta_{PM}$  siten että

$$\theta_{PM} = \theta_{ol} + 180^\circ \quad (70)$$

jossa  $\theta_{ol}$  on avoimen silmukan vaihe ylimenotaajuudella  $\omega_c$ . Vaihevaran  $\theta_{PM}$ :n tulisi olla  $40^\circ \dots 60^\circ$ , jotta säädetty järjestelmä ei värähtelisi voimakkaasti muutostilanteissa. Lisäksi vahvistusvaran tulisi olla 10–20 dB, eikä vaiheen tulisi käydä negatiivisena ylimenotaajuuden alapuolella. [18, 24]





Kuva 22: Säätäjän vahvistus- ja vaihekäyrät.

Säätäjän parametrit voidaan määrittää käyttäen yksinkertaista niin sanottua K-factor -menetelmää [18, 24]. Hakkurin siirtofunktion (67) ja kuvan 21 perusteella säätäjän siirtofunktioksi voidaan valita muotoa

$$G_c(s) = \frac{k_c}{s} \left( \frac{1 + s/\omega_z}{1 + s/\omega_p} \right)^2 \quad (71)$$

oleva säätäjä, joka on helposti toteutettavissa yhdellä operaatiovahvistimella [24]. Säädin vie pysyvän tilan virheen nollaan, koska  $G_c(s)$ :n lausekkeessa on napa origossa. Napa aiheuttaa ylimääräisen  $-90^\circ$  vaihesiirron säätäjän vaihekäyrään. Säätäjän vahvistus- ja vaihekäyrän muoto näyttää kuvan 22 mukaiselta.

K-factor -menetelmässä valitaan sekä haluttu ylimenokulmataajuus  $\omega_c$  että tarvittava vaihevara  $\theta_{PM}$ . Säätimen nollat ja navat sijoitetaan siten, että niiden geometrinen keskiarvo on sama kuin ylimenokulmataajuus

$$\omega_c = \sqrt{\omega_z \omega_p} \quad (72)$$

Sijoitetaan säätimen nollakohdat ja navat siten, että

$$\omega_z = \frac{\omega_c}{K} \quad (73)$$

ja

$$\omega_p = K\omega_c \quad (74)$$

Kerroin  $K$  voidaan laskea lausekkeesta

$$K = \tan\left(45^\circ + \frac{\theta_{boost}}{4}\right) \quad (75)$$

Tarvittava vaiheenjohto riippuu vaihevarasta

$$\theta_{PM} = 180^\circ + \theta_1 + \theta_c \quad (76)$$

jossa  $\theta_c$  on säätäjän,  $\theta_1$  modulaattorin ja tehoasteen vaihe ylimenotajuudella  $\omega_c$ . Säätäjän vaihekäyrästä 22 nähdään, että ylimenotajuuden kohdalla vaihe on

$$\theta_c = -90^\circ + \theta_{boost} \quad (77)$$

jolloin vaihenjohdoksi saadaan

$$\theta_{boost} = -90^\circ + \theta_{PM} - \theta_1 \quad (78)$$

Sijoittamalla  $\theta_{boost}$  yhtälöön (75) saadaan määritettyä  $K$ :lle arvo, jonka jälkeen nollien ja napojen sijainnit voidaan laskea. Säätimen vahvistus  $k_c$  valitaan siten, että ylimenotajuudella avoimen silmukan  $G_{ol}$  vahvistus on yksi. Säätäjän vahvistus  $k_c$  saadaan siten määritettyä

$$k_c = \frac{1}{|G_m(s)G_1(s)|} \Big|_{s=j\omega_c} \quad (79)$$

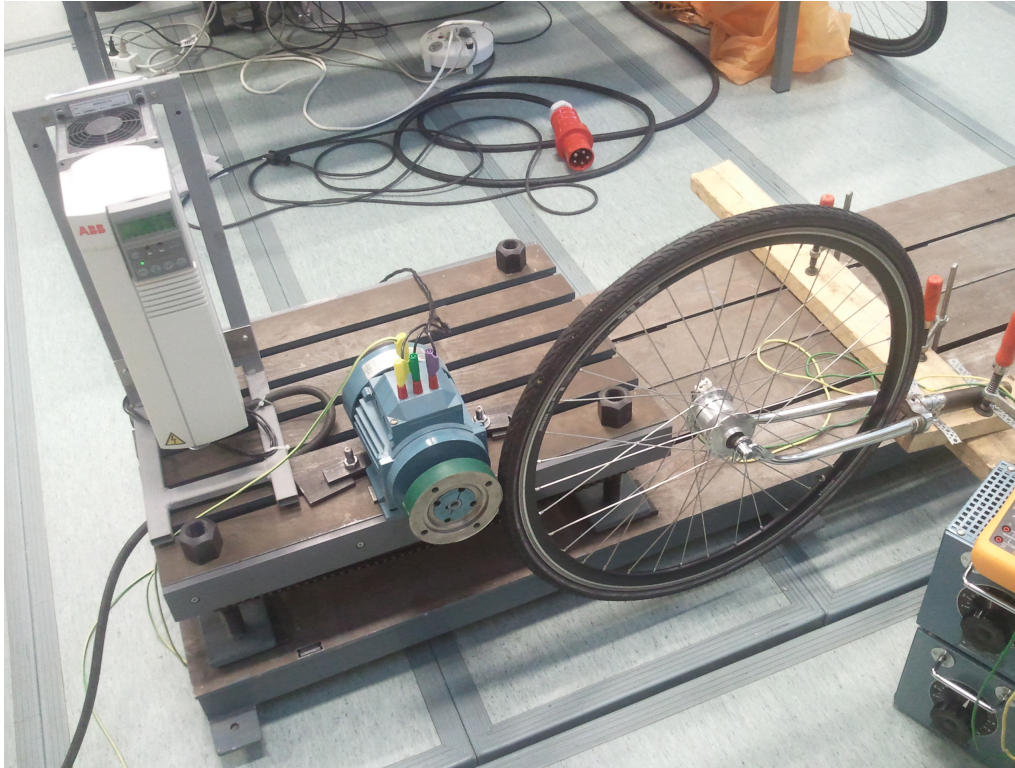
## 6 Tulokset

Dynamomittaukset käsittelevät kahden eri Shimano-merkkisen napadynamon mitaustuloksia, joiden perusteella dynamon sijaiskytkennän parametrit voidaan määrittää. Parametreja tarvitaan myös luvun lopussa esitetyissä simuloinneissa. Simulointiosiossa esitetään napadynamoilla sähköistetyn USB-laturin toimintaa eri toimintapisteissä, sekä vertaillaan miten käyttökelpoinen diodisilta ja jännitteen kahdentaja on eri toimintapisteissä. Simulointitarkasteluista rajataan käsittelyn ulkopuolelle mahdolliset ylijännitesuojat.

### 6.1 Dynamomittaukset

Suoritin mittaukset kahdelle Shimanon valmistamalle kolmen watin dynamolle: DH3N30 ja DH3N72. DH3N30 on keskihintainen dynamo ja suunnattu tavallisille pyöräilijöille [25]. DH3N72 on taas huomattavasti kalliimpi ja massaltaan kevyempi kuin DH3N30 [26]. Tämä dynamo on suunnattu vaativampaan käyttöön, kuten harjoituskilpapyöriin tai muihin vastaaviin käyttöihin, sillä muun muassa sen laakerointi vastaa niin sanottujen sport-etunapojen laakerointeja ja laakerit ovat paremmin suojatut kuin DH3N30:ssä [5, 26]. Kolmantena vertailudynamona käytän Shimano NX30-dynamo [15], jonka parametrit on määritetty myöskin kokeellisesti, mutta tietoja koejärjestelystä ei ollut saatavilla. Kaikkien edellä mainittujen dynamojen napapari-luku  $p = 14$ . Mittauksia varten valmistettiin kuvan 23 mukainen testipenki, johon napadynamon ympärille rakennettu pyörä voitiin asentaa. Pyörän tasaisesta pyöritysnopeudesta vastasi taajuusmuuttajalla ohjattu oikosulkumoottori. Fluke-yleismittarin avulla mittasin dynamon generoiman sähkönsä taajuuden, jolloin pyörän nopeuden ja sähkökulmataajuuden välistä korjausta (12) ei tarvinnut käyttää tuloksia analysoitaessa.

Tyhjäkäyntikoetta varten mittasin tyhjäkäyntijännitteen sekä yleismittarilla että digitaalisella oskilloskoopilla. Lisäksi käytin digitaalisen oskilloskoopin taajuusanalysointiominaisuutta yliaaltojen määrittämiseksi, sillä hypoteesini mukaan tyhjäkäyntijännitteessä on huomattava yliaaltosisältö, jolloin pelkällä yleismittarilla mitattusta tyhjäkäyntijännitteestä ei vuokertoimia voisi määrittää. Oikosulkukokeen suoritin vastaavalla tavalla kuin tyhjäkäyntikokeen, mutta jännitteen sijasta mittasin virran sekä yleismittarilla että oskilloskoopilla käyttäen virranmittausanturina pihtianturia. Oikosulkukokeen tuloksissa huomioin vain perusaallon, sillä yliaallot olivat vaimenneet lähes kokonaan, enkä siksi saanut niitä mitattua.

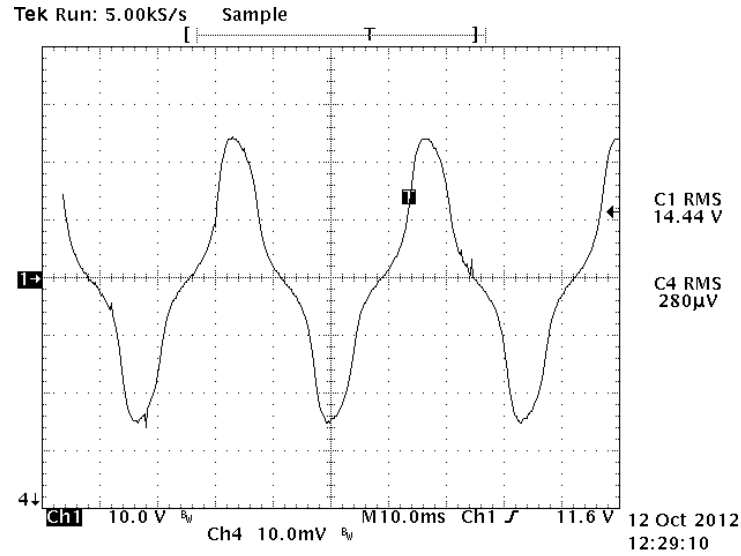


Kuva 23: Shimano DH3N72-dynamo asennettuna testipenkkiin.

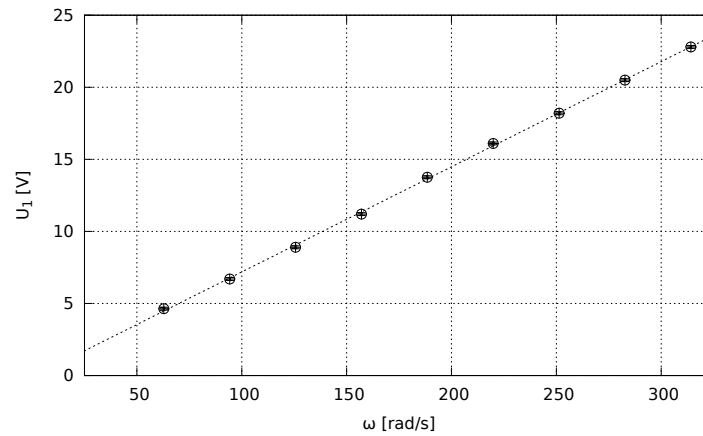
### 6.1.1 Shimano DH3N30-dynamon mittausten tulokset

Kuvaan 24 mukainen käyrä on saatu mittaamalla dynamon antojännite tyhjäkäynnissä kulmataajuudella  $\omega \approx 188$  rad/s. Tyhjäkäyntijännitteessä on havaittavissa perusaallon lisäksi jonkin verran yliaaltoja. Taajuusanalysaattorin avulla mitatut yliaaltojen tehollisarvot on piirretty kuviin 25, 26 ja 27. Kuviin on piirretty myös pistejoukkoihin sovitetut suorat. Mittasin myös seitsemännen ja yhdeksännen yliaallon tehollisarvot, mutta tuloksien virhemarginaalit olivat varsin suuria suhteessa yliaaltojen suuruuteen, joten päätin, että seitsemäs ja yhdeksäs yliaalto ovat merkittömän pieniä. Lisäksi kun vertasin kuvan 24 mitattua ja yhtälön (9) avulla rekonstroitua kuvan 28 mukaista tyhjäkäyntijännitteen käyrämuotoa, niin muodot täsmäivät lähes täysin, kun huomioin vain perusaallon, kolmannen yliaallon ja viidennen yliaallon. Taulukkoon 1 on kerätty suoran sovituksen tuloksena saadut vuokertoimet. Yhtälöä (20) ja taulukon 1 vuokertoimia käyttäen voidaan rekonstruoida dynamossa vaikuttavan vuon käyrämuoto, joka on piirretty kuvaan 29.

Oikosulkukoetta varten mittasin dynamon sisäisen resistanssin arvoksi  $R_s = 2,2 \Omega$  ja ulkoiseksi kuormaresistanssiksi  $R_a = 0,2 \Omega$ . Sijoittamalla edellä mainitut arvot yhtälöön (25) ja sovittamalla muodostuva käyrä oikosulkukokeella saatuun



Kuva 24: Shimano DH3N30-dynamon mitattu tyhjäkäyntijännitteen  $u_s$  käyrämuoto,  $\omega \approx 188$  rad/s.

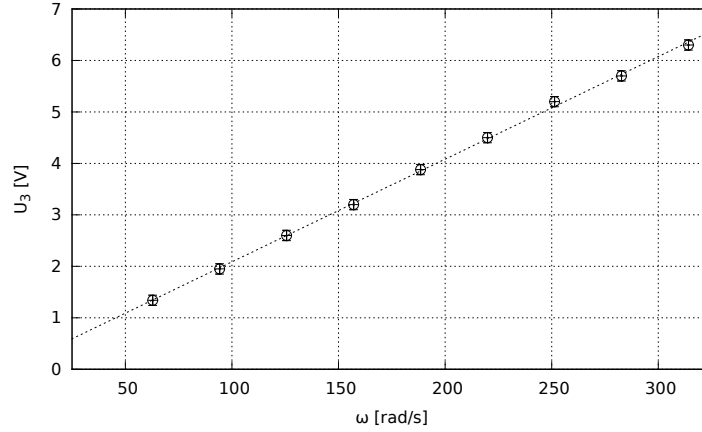


Kuva 25: Shimano DH3N30-dynamon tyhjäkäyntijännite  $U_{s,1}$ .

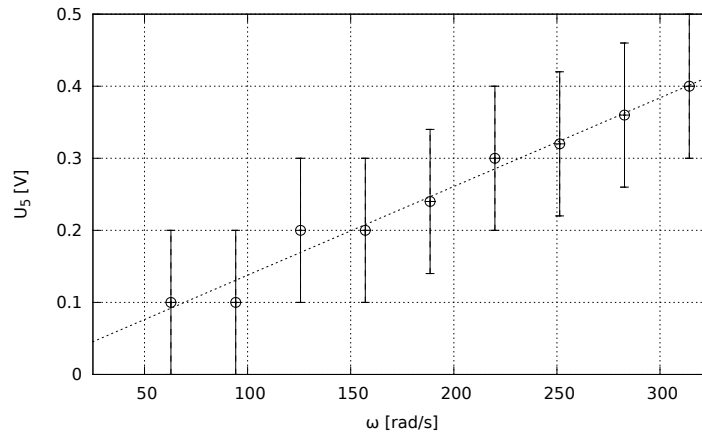
pistejoukkoon saadaan staattori-induktanssi määritettyä. Kuvaan 30 on piirretty mitattu oikosulkuvirta ja pistejoukkoon sijoitettu oikosulkuvirran käyrä (25). Käyrän sovituksen jälkeen staattori-induktanssin arvoksi saadaan  $L_s = 123 \pm 1,9$  mH.

### 6.1.2 Shimano DH3N72-dynamon mittausten tulokset

Kuvan 31 mukainen käyrä on saatu mittaamalla dynamon antojännite tyhjäkäynnissä kulmataajuudella  $\omega \approx 188$  rad/s. Kuten Shimano DH3N30-dynamon tapauksessakin, tyhjäkäyntijännitteessä on havaittavissa perusaallon lisäksi jonkin verran yliaaltoja. Samoin kuin DH3N30:n tapauksessa, DH3N72-dynamon tyhjäkäyntijännitteen seitsemäs ja yhdeksäs yliaalto olivat todella pieniä virhemarginaaleihin näh-



Kuva 26: Shimano DH3N30-dynamon tyhjäkäyntijännite  $U_{s,3}$ .

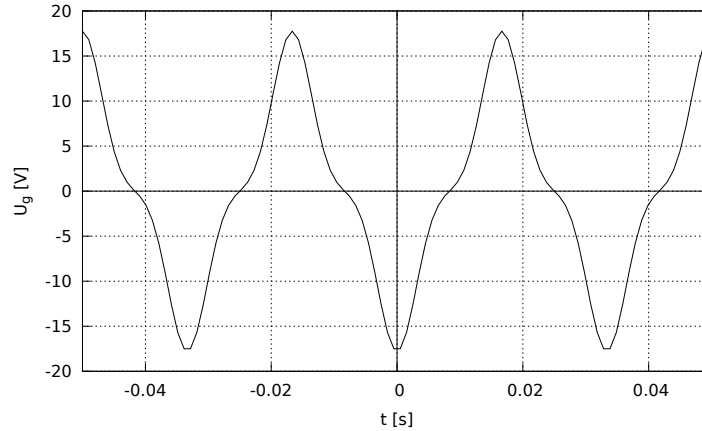


Kuva 27: Shimano DH3N30-dynamon tyhjäkäyntijännite  $U_{s,5}$ .

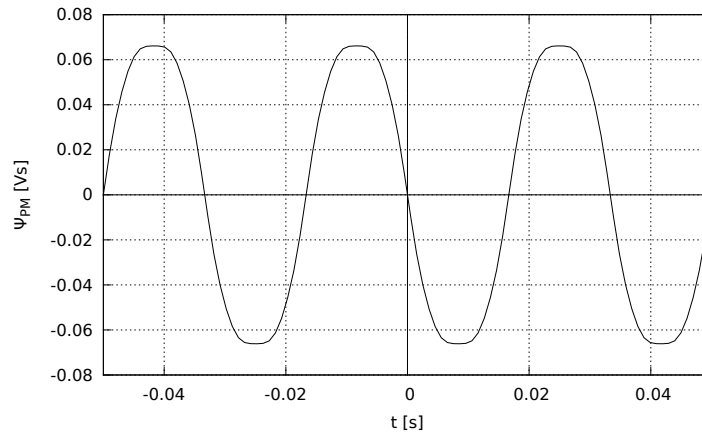
den, joten päätin, että kyseisten yliaaltojen olevan merkitsemättömän pieniä. Verrattaessa kuvan 31 mukaista mitattua ja kuvan 35 laskettua tyhjäkäyntijännitteen käyrämuotoa, niin muodot täsmäävät lähes täysin, kun huomioin vain perusaallon, kolmannen- ja viidennen yliaallon. Taulukkoon 2 on kerätty suoran sovituksen tuloksina saadut vuokertoimet. Vuokertoimien perusteella voidaan laskea dynamon staattorilla vaikuttavan tyhjäkäyvän dynamon käämivuon käyrämuoto kuvan 36 mu-

Taulukko 1: Shimano DH3N30-dynamolle pienimmän neliösumman menetelmällä lasketut vuokertoimet perus- ja yliaalloille.

$\Psi_{PM,n}$	[mVs/rad]	[mVs/rad]
$\Psi_{PM,1}$	73,0	$\pm 0,54$
$\Psi_{PM,3}$	0,542	$\pm 0,065$
$\Psi_{PM,5}$	0,246	$\pm 0,015$



Kuva 28: Shimano DH3N30-dynamon laskettu tyhjäkäyntijännitteen käyrämuoto  $u_s = u_{s,1} + u_{s,3} + u_{s,5}$ ,  $\omega = 188 \text{ rad/s}$ .



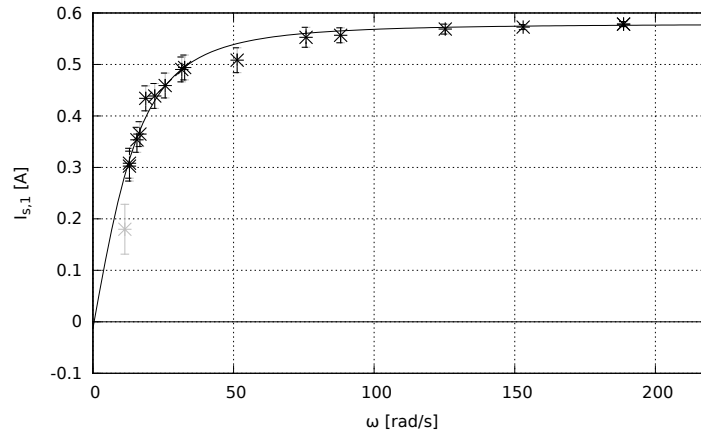
Kuva 29: DH3N30 dynamon laskettu käämivuonvuon käyrämuoto tyhjäkäynnissä,  $\omega = 188 \text{ rad/s}$ .

kaisesti käyttämällä yhtälöä (20).

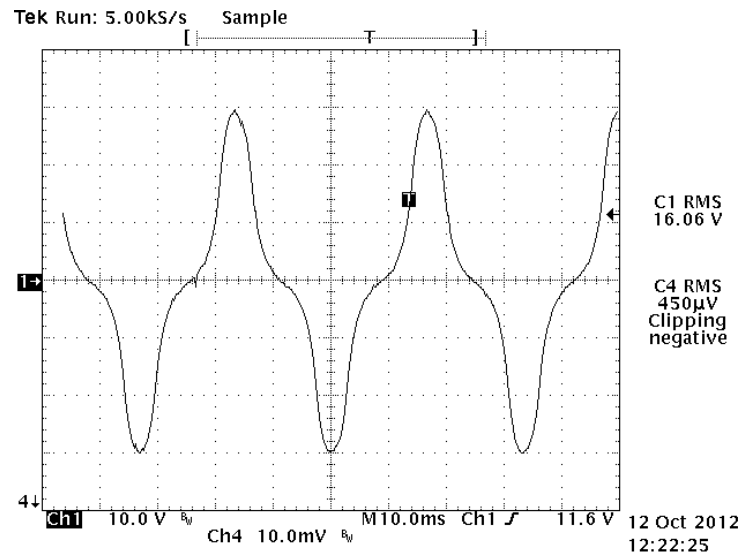
Oikosulkukoetta varten mittasin dynamon sisäisen resistanssin arvoksi  $R_s = 4,1 \Omega$  ja ulkoiseksi kuormaresistanssiksi  $R_a = 0,1 \Omega$ . Sijoittamalla edellä mainitut arvot yhtälöön (25) ja sovittamalla käyrä oikosulkukokeella saatuun pistejoukkoon, saadaan staattori-induktanssi määritettyä. Kuvaan 37 on piirretty mitattu oikosul-

Taulukko 2: Shimano DH3N72-dynamolle lasketut vuokertoimet perus- ja yliaalloille.

$\Psi_{PM,n}$	[mVs/rad]	[mVs/rad]
$\Psi_{PM,1}$	79,3	$\pm 0,085$
$\Psi_{PM,3}$	10,0	$\pm 0,022$
$\Psi_{PM,5}$	0,922	$\pm 0,034$



Kuva 30: Shimano DH3N30-dynamon oikosulkuvirta  $I_{s,1}$ .



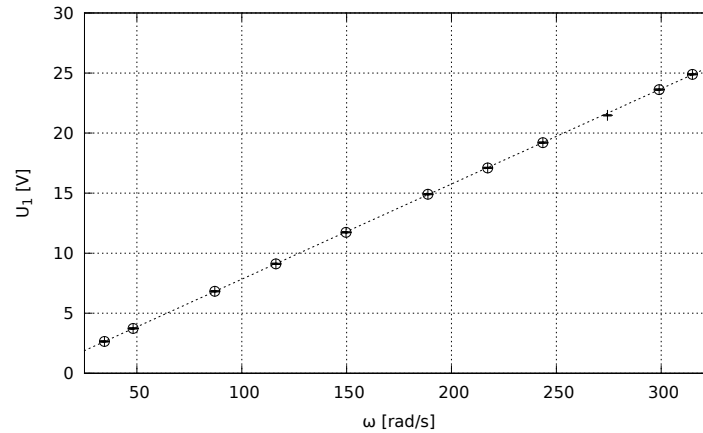
Kuva 31: Shimano DH3N72-dynamon mitattu tyhjäkäyntijännitteen käyrämuoto  $u_s$ ,  $\omega \approx 188$  rad/s.

kuvirta ja pistejoukkoon sovitettu oikosulkuvirran käyrä. Käyrän sovituksen jälkeen staattori-induktanssin arvoksi saadaan  $L_s = 138 \pm 3,2$  mH.

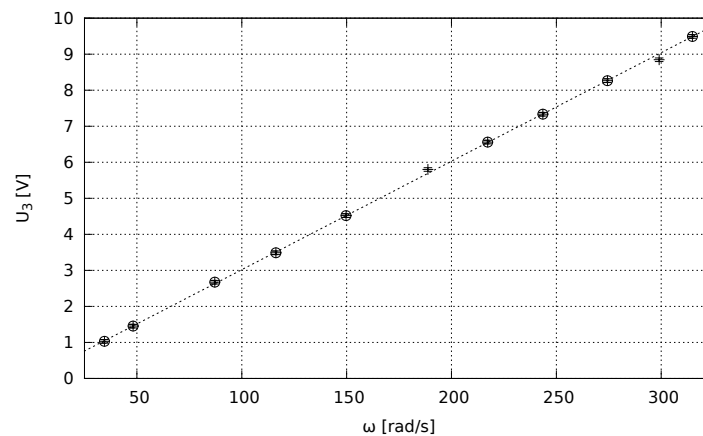
### 6.1.3 Mittausten analysointi

Taulukkoon 3 on koottu kolmen erimallisen Shimanon valmistaman kolmen watin dynamon sähköisen sijaiskytkennän parametrit. Kyseiset dynamot ovat nimellisesti samanlaisia, mutta mekaaniselta ja sähköiseltä rakenteeltaan jonkin verran toisistaan poikkeavia. Kuitenkin yhtälön (24) mukainen oikosulkuvirta, kun  $n = 1$  on likimäärin saman suuruinen kaikissa taulukon 3 tapauksissa. Saman suuruinen oikosulkuvirta kuvaa myös sitä, että dynamot ovat käyttäjän näkökulmasta samankal-





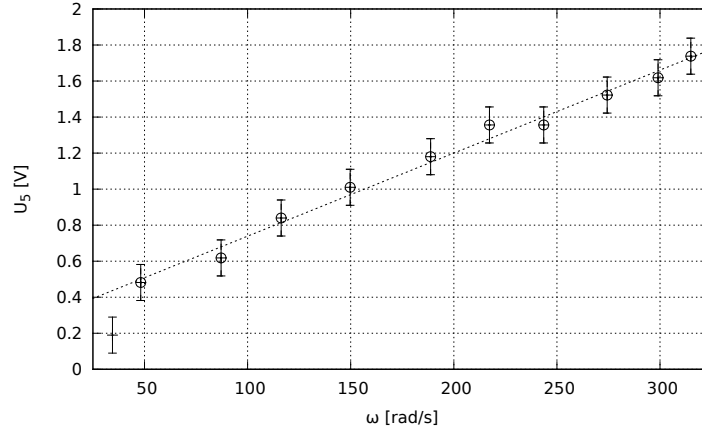
Kuva 32: Shimano DH3N72-dynamon tyhjäkäyntijännite  $U_1$ .



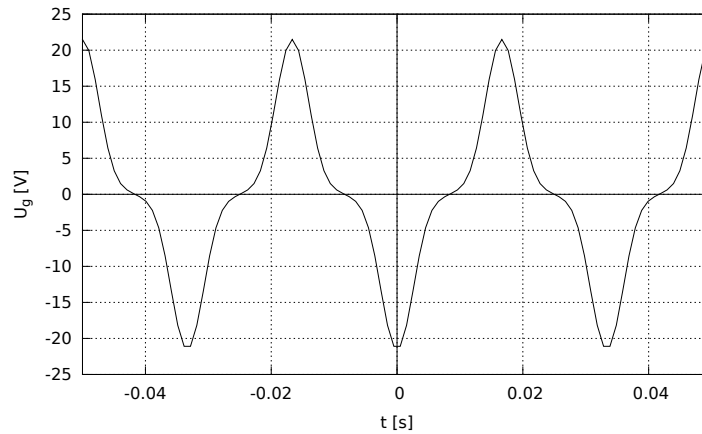
Kuva 33: Shimano DH3N72-dynamon tyhjäkäyntijännite  $U_3$ .

taisia.

Shimano DH3N30-dynamon massiivisuuden ja pienen sisäisen resistanssin perusteella voitaneen päätellä, että staattorikäimissä on käytetty paksuhkoa käämilankaa. Kun verrataan DH3N30- ja DH3N72-dynamoita, niin DH3N72:n rakenne on sirompi ja massaltaan kevyempi kuin DH3N30. Tämä näkyy muun muassa siinä, että staattoriresistanssi on suurempi. Koska staattorikäimin tilavuus on pienempi, niin Shimano on joutunut käyttämään staattorikäimissä ohuempaa käämilankaa. Induktanssi on taas jonkin verran suurempi, mikä voisi olla selitettävissä siten, että suuremman resistanssin takia sen aiheuttama jännitehäviö on haluttu kompensoida käämimällä useampi kierros staattorille, jotta käämiin indusoituisi suurempi jännite. Kestomagneettien käämivuon suuruus on selitettävissä kahdella tapaa. Joko Shimano on pienentänyt ilmaväliä parempien laakereiden ansiosta, sillä dynamo kuuluu niin sanottuun Sport-sarjaan [27], tai sitten sillä, että dynamoon on laitet-



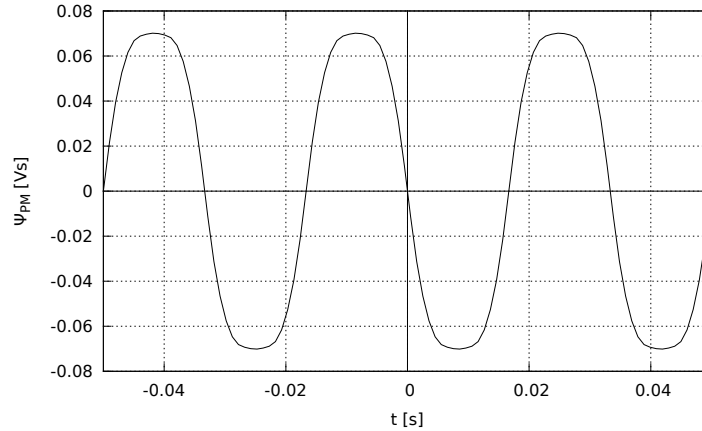
Kuva 34: Shimano DH3N72-dynamon tyhjäkäyntijännite  $U_5$ .



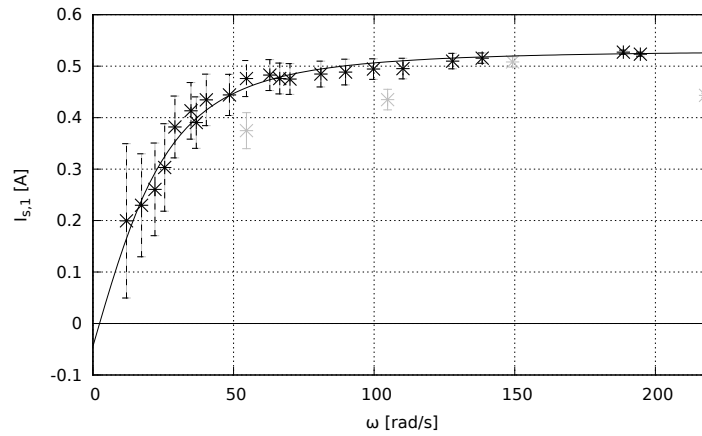
Kuva 35: Shimano DH3N72-dynamon laskettu tyhjäkäyntijännitteen käyrämuoto  $u_s = u_{s,1} + u_{s,3} + u_{s,5}$ ,  $\omega \approx 188$  rad/s.

tu voimakkaammat magneetit, joka on paljon todennäköisempää. Shimano NX30-dynamo on vanhentunut malli, jonka ovat korvanneet uudemmat DH3N7x-sarjan mallit. Mekaaniselta rakenteeltaan se muistuttaa uudempaa DH3N72:ta, mutta sähköisesti selkeästi edullisemmän DH3N30:n kaltainen resistanssia lukuun ottamatta. Lisäksi kun tarkastellaan taulukon 3 arvoja, niin on mielenkiintoista havaita, että edullisen hintaluokan laite (DH3N30) on sähköisiltä ominaisuuksiltaan jonkin verran parempi kuin kalliimpi Sport-sarjan laite (DH3N72), koska siinä on muun muassa pienemmät resessiiviset häviöt, pienempi yliaaltosisältö tyhjäkäyntijännitteessä ja suurempi oikosulkuvirta.

Oikosulkumittauksien mittaustarkkuus olisi voinut olla parempi ja siten induktanssin arvon olisi voinut saada tarkemmaksi pyörittämällä dynamoa hivenen suuremmalla kulmataajuudella ja ottamalla enemmän mittapisteitä, sillä kuten kuvista



Kuva 36: Shimano DH3N72-dynamon laskettu käämivuon käyrämuoto tyhjäkäynnissä,  $\omega \approx 188$  rad/s.



Kuva 37: Shimano DH3N72-dynamon oikosulkuvirta  $I_{s,1}$ .

30 ja 37 on nähtävissä, niin mittaussarja painottuu varsin pienille kulmanopeuksille vaikka yhtälön (24) perusteella dynamon pyörittäminen suurella kulmataajuudella olisi ollut kannattavaa. En kuitenkaan halunnut kuormittaa dynamo oikosulussa kohtuuttoman kauan, sillä mittaussarjan tekeminen vei varsin paljon aikaa.

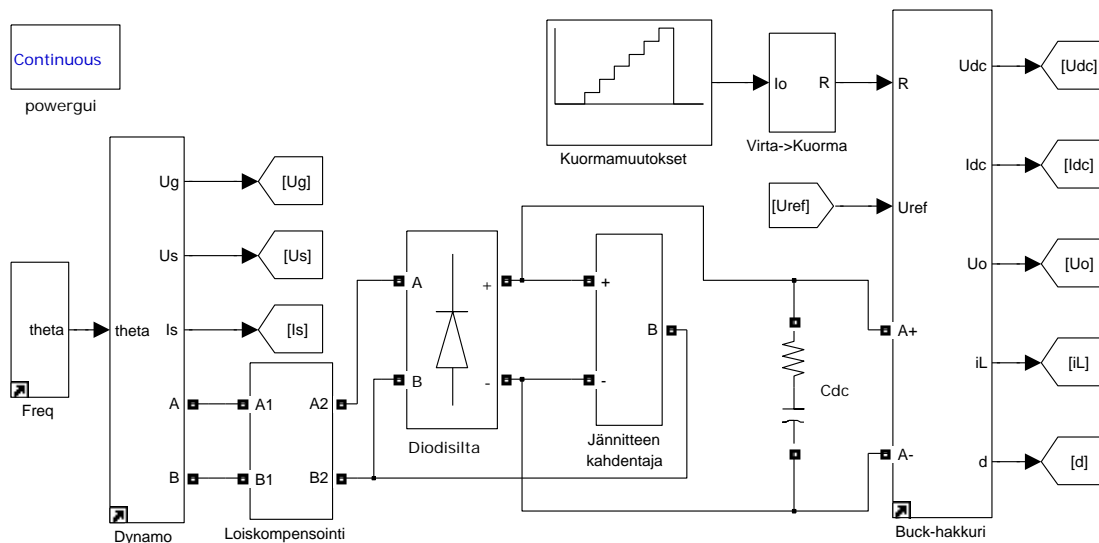
Taulukko 3: Shimano dynamojen vertailutaulukko.

	DH3N30	DH3N72	NX30 [15]
$R_s$ [ $\Omega$ ]	$2,2 \pm 0,02$	$4,1 \pm 0,02$	4
$L_s$ [mH]	$123 \pm 1,9$	$138 \pm 3,2$	120
$\Psi_{PM,1}$ [mVs/rad]	$73,0 \pm 0,054$	$79,3 \pm 0,085$	72,9
$\Psi_{PM,3}$ [mVs/rad]	$0,542 \pm 0,065$	$10,0 \pm 0,022$	12,2
$\Psi_{PM,5}$ [mVs/rad]	$0,246 \pm 0,015$	$0,922 \pm 0,034$	2,9
$I_{s,1}$ [mA]	$593 \pm 9,6$	$579 \pm 14$	608

## 6.2 Laturin simuloinnit

Dynamokäyttöisen USB-laturin toimintalogiikan ja eri piiritopologioiden tutkimiseksi muodostetaan koko systeemin laajuinen simulointimalli. Simulointi toteutetaan käyttäen Matlabin Simulink- ja SimPowerSystems Blocksetteja. Simulointimallin toiminnalliset lohkot muodostetaan kuvan 38 mukaisesti siten, että dynamo, loistehon kompensointi, tasasuuntaaja ja jännitteen kahdentaja mallinnetaan käyttäen SimPowerSystems Blocksettiä. Jänniteregulaattorina toimiva jännitettä laskevan hakkurin simulointimallina käytetään tilayhtälöitä (52)–(55) mukaista keskiarvostettua mallia. Hakkurin Simulink-malli liitetään SimPowerSystems-malliin virtakuormana. Simulointimallissa diodit on oletettu ideaalisiksi eli diodien jännitehäviö on nolla voltia.

Koska dynamo ei ole jäykkä jännitelähde suuren impedanssin takia, niin tasasuunnatun tasajännitteen vaihtelu kuormitusmuutoksissa ja eri toimintapisteissä on kiinnostava tarkastelun kohde. Kuormamuutosten vaikutusta tasajännitteeseen tutkitaan siten, että laturin referenssijännite asetetaan  $U_{o,ref} = 5 \text{ V}$  suuruiseksi ja kuormamuutokset tehdään siten, että hakkurin kuormana olevaa vastusta muutetaan askelmaisesti usean portaan verran. Simuloinneissa käytettyjen askelten pituudet ovat 2,5 s pituisia, jotta tasajännitteen hitaat muutosilmiöt ehtivät tasoittua ennen seuraavaa kuormitusaskelta. USB-laturikuormaa mallinnetaan käyttäen eri suuruisia resistansseja, joita kytetään päälle ja pois, jotta saadaan muodostettua halutut askelmuutokset kuormavirtaan. Resistanssien arvot on määritetty siten, että



Kuva 38: Dynamokäyttöisen USB-laturin Simulink-malli.

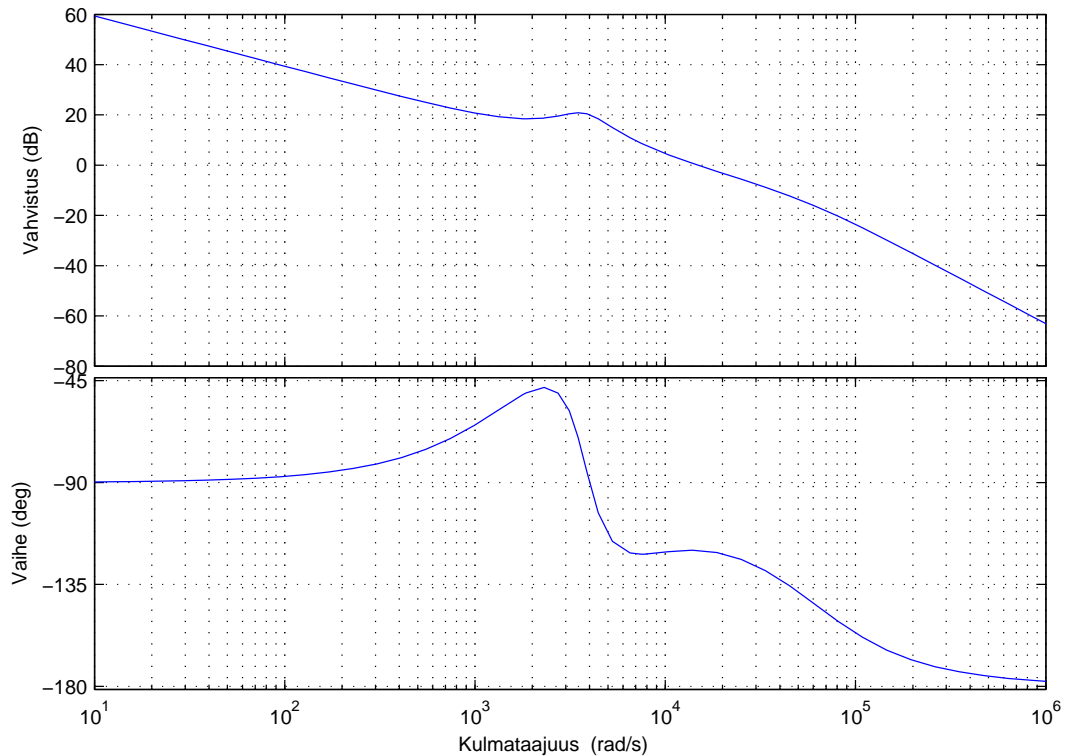
ne vastaavat tiettyjä kuormavirtojen arvoja. Askelmuutoksissa kuormavirrat muuttuvat 25 mA:sta 100 mA:n ja kasvavat tämän jälkeen 100 mA suuruisina askelina aina 600 mA:n asti, jonka jälkeen kuormitus pudotetaan takaisin 25 mA suuruiseksi. Laturin ohjausalgoritmi toteutetaan yksinkertaistetussa muodossa, eli laturin lähtö sammutetaan, jos tasajännite tasajännite  $u_{dc}$  laskee 5,5 V kynnyksjännitteen alapuolelle. Ohjausalgoritmi käynnistää ajastimen ja jännitereferenssi pidetään alhaalla vähintään 500 ms ajan. Jos minimiajan kuluttua tasajännite on noussut raja-arvon yläpuolelle, niin jännitereferenssi nostetaan takaisin nimelliseen arvoon  $U_{o,ref} = 5$  V, muutoin laturia pidetään sammutettuna.

Ennen kuin dynamokäyttöistä USB-laturia voidaan simuloida, niin simulointimallissa käytetyt piirikomponenttien arvot täytyy valita ja hakkurin säädin tulee viritellä. Simulointimallissa olevan dynamon parametrit saatiin dynamomittauksista. Tasajännitteen tasoituskondensaattorin kapasitanssi  $C_{dc} = 470 \mu\text{F}$  on valittu lähinnä kokeellisesti, kuten myös jännitteen kahdentajassa käytettyjen kondensaattorien  $C_{dbl} = 220 \mu\text{F}$  arvot. Loistehon kompensoinnissa käytetyn kondensaattorin arvona on käytetty viitteessä [15] laskettua arvoa  $C = 300 \mu\text{F}$ . Hakkurin parametreina käytetään  $L = 330 \mu\text{H}$ ,  $r_L = 520 \text{ m}\Omega$ ,  $C = 220 \mu\text{H}$  ja  $r_L = 46 \text{ m}\Omega$ . Säädin viritetään näiden parametrien perusteella.

### 6.2.1 Hakkurin säätimen parametrien valitseminen

Hakkurin säätimen parametriarvot riippuvat hakkurin piirikomponenttien arvoista. Mitoitetaan hakkurin säädin siten, että hakkuri toimii 2,5 W lähtöteholla ja syöttöjännite on  $U_{dc} = 20$  V, tällöin kuormaresistanssin arvo on  $R = 10 \Omega$ . Sijoittamalla parametriarvot siirtofunktion yhtälöön (68) ja piirtämällä vahvistus- ja vaihekäyrät, saadaan kuvan 21 mukaiset käyrät.

Käyttämällä edellisiä piirikomponenttien arvoja, voidaan yhtälön (35) mukainen LC-suodattimen resonanssitaajuus laskea  $\omega_0 \approx 3.711 \cdot 10^3$  rad/s. Valitaan ylimenokulmataajuus  $\omega_c$  siten, että se on hieman suurempi kuin hakkurin LC-suodattimen resonanssitaajuus  $\omega_c = 4\omega_0 \approx 1.485e \cdot 10^4$  rad/s. Säättämättömän hakkurin vaiheylimenokulmataajuudella saadaan kuvan 21 vaihekäyrästä  $\theta_1 \approx -162.6^\circ$ . Kyseisellä kulmataajuudella tarvittava vaiheenjohto voidaan laskea tällöin yhtälön (78) avulla  $\theta_{boost} \approx 132.6^\circ$ . Vaihevaraksi valitaan  $\theta_{PM} = 60^\circ$ , jolloin kertoimelle  $K$  saadaan arvo yhtälön (75) avulla  $K \approx 4.764$ . Nollat saadaan laskettua yhtälöstä (73)  $\omega_z \approx 3.117 \cdot 10^3$  rad/s ja navat yhtälöstä (74)  $\omega_p \approx 7.072 \cdot 10^4$  rad/s. Säättämättömän hakkurin vahvistus rajataajuudella  $\omega_c$  saadaan kuvan 21 vahvistuskäyrästä  $|G_m(s)G_1(s)|_{s=j\omega_c} \approx 1.331 = 2.48$  dB jolloin säätimen vahvistukselle saadaan las-



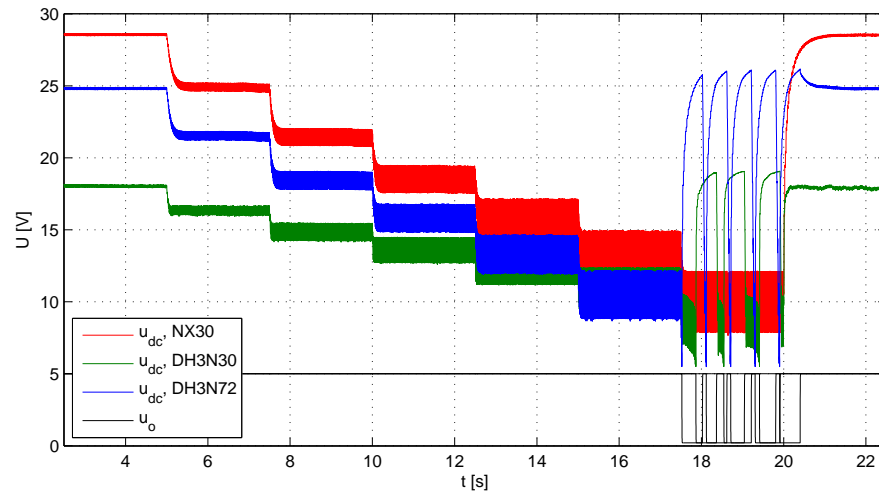
Kuva 39: Säädetyin buck-hakkurin avoimen silmukan vahvistus- ja vaihekäyrät.

kettua arvo yhtälöstä (79)  $k_c \approx 491.7$ .

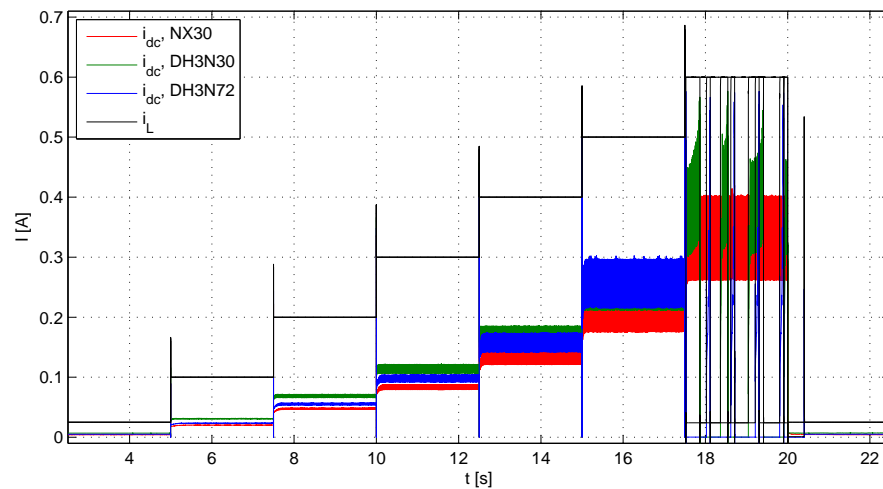
Parametrien perusteella säätäjän vahvistus- ja vaihekäyrä voidaan piirtää, ja ovat nähtävissä kuvassa 22. Säädetyin hakkurin avoimen silmukan siirtofunktion vahvistus- ja vaihekäyrät voidaan piirtää, jotka ovat nähtävissä kuvassa 39. Kuvasta on nähtävissä, että pienillä taajuuksilla säädetyin hakkurin avoimen silmukan siirtofunktion vahvistus on todella suuri, jolloin suljetun silmukan pysyvän tilan virhe menee nopeasti nolnaan.

### 6.2.2 Kuormamuutosten simulointi nimellispiistessä

Simuloidaan laturia nimellisessä toimintapiistessä, jolloin kulmataajuus on  $\omega = 185$  rad/s, joka vastaa 700C-kokoista pyörää käytettäessä noin 16 km/h ajonopeutta. Tällöin diodisiltaa käytettäessä kuormamuutokset aiheuttavat tasajännitteeseen  $u_{dc}$  muutoksia, jotka ovat nähtävissä kuvasta 40 ja kuormavirtojen  $i_o$  vaikutus induktanssin virtaan  $i_L$  ja tasavirtaan  $i_{dc}$  on nähtävissä kuvassa 41. Koska laturi on mallinnettu jännitettä laskevaa hakkuria käyttäen, niin induktanssin virta seuraa lähtövirtaa transientteja lukuun ottamatta. Voimakkaat muutokset induktanssin virrassa

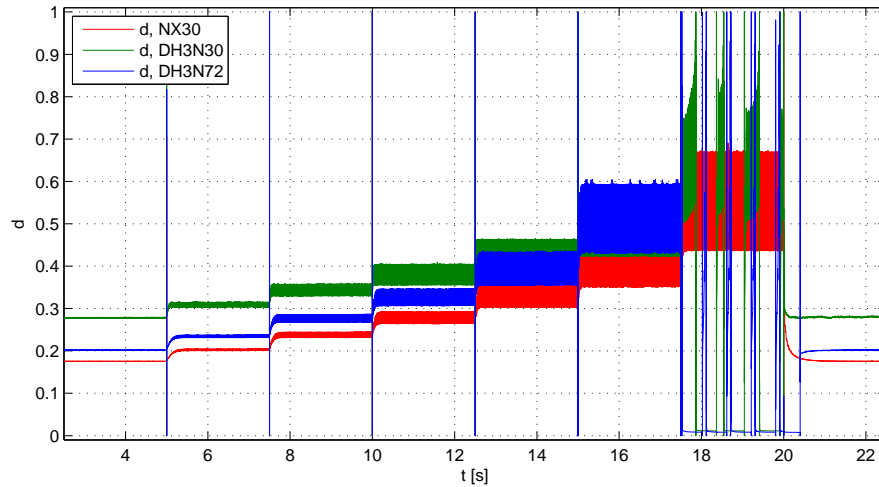


Kuva 40: Kuormamuutosten vaikutus diodisillan tasajännitteeseen nimellispisteessä, kun kulmataajuus  $\omega = 185$  rad/s. Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ , kun kuormavirroissa  $i_o$  tapahtuu askelmaisia muutoksia.



Kuva 41: Kuormamuutosten vaikutus laturin virtoihin nimellispisteessä, kun kulmataajuus  $\omega = 185$  rad/s ja käytössä on diodisilta. Kuvassa on nähtävissä tasavirta  $i_{dc}$  ja hakkurin induktanssin virta  $i_L$ .

aiheutuvat siitä, että hakkurin säätö on toteutettu jännitesäätönä. Nimellistä virtaa suurempi 600 mA kuormavirta aiheuttaa laturin sammumisen, sillä tasajännite laskee tällöin 5,5 V raja-arvon alle. Kuvassa 42 on nähtävissä hakkurin pulssisuhde  $d$  simuloinnin aikana. Pysyvässä tilassa pulssisuhde pysyttelee varsin pienellä vaihteluvälillä  $d \approx 0.19 \dots 0.60$ , mutta transienttien aikana sen vaihteluväli vaikuttaisi olevan  $d \approx 0 \dots 1$ .



Kuva 42: Kuormamuutosten vaikutus buck-hakkurin pulssisuhteeseen  $d$  nimellispisteessä, kun kulmataajuus  $\omega = 185$  rad/s ja käytössä on diodisilta.

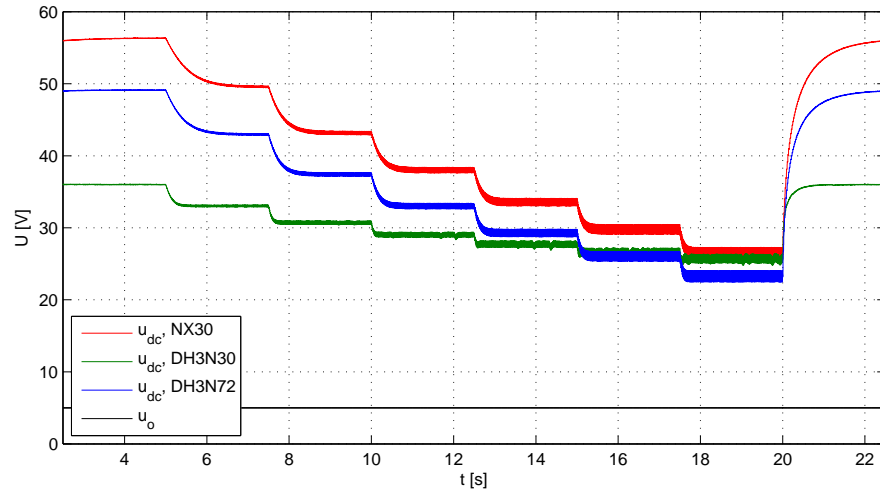
Jännitteen kahdentajaa käytettäessä kuormamuutosten aiheuttamat muutokset tasajännitteessä  $u_{dc}$  ovat nähtävissä kuvasta 43. Kuvassa 44 on nähtävissä hakkurin pulssisuhte  $d$  simuloinnin aikana. Pysyvässä tilassa pulssisuhte pysyttelee todella pienellä vaihteluvälillä  $d \approx 0.09 \dots 0.21$ , mutta transienttien aikana sen vaihteluväli on myöskin täydet  $d \approx 0 \dots 1$ . Aiemmasta diodisillasta poiketen jännitteen kahdennusta käyttävä laturi kykenee toimimaan myös 600 mA kuormavirralla ilman, että ohjauslogiikka sammuttaa laturia, sillä tasajännite  $u_{dc}$  pysyy tukevasti riittävän korkealla tasolla. Tasajännite  $u_{dc}$  nousee kuitenkin varsin korkeaksi nimellisen toimintapisteen läheisyydessä, jos dynamo kuormitetaan kevyellä kuormalla.

Loistehon kompensoinnin käyttäminen ei tuottanut juurikaan parempaa tulosta nimellispisteen läheisyydessä ja sen yläpuolella toimittaessa. Tosin tämä tulos oli odotettavissa, koska dynamo itsessään kykenee tuottamaan riittävästi tehoa laturille.

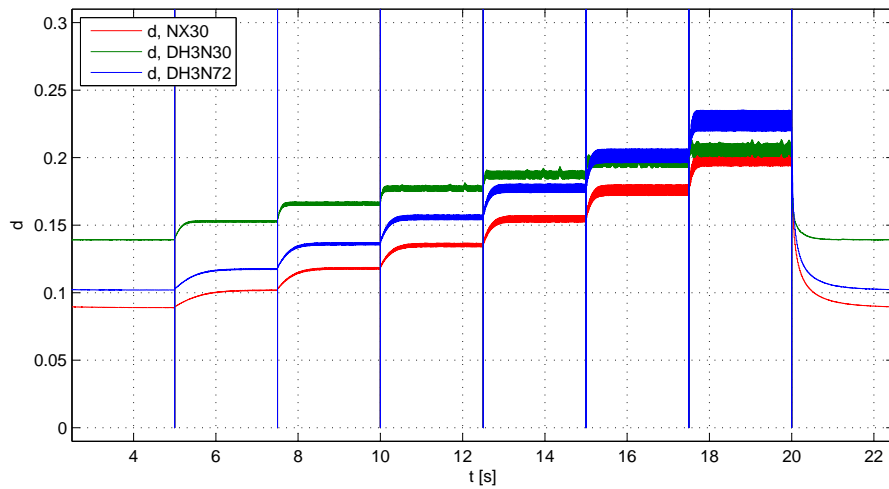
### 6.2.3 Kuormamuutosten simulointi nimellispisteen alapuolella

Tutkitaan kuormamuutosten vaikutusta tasajännitteeseen laturin toimiessa nimellisen toimintapisteen alapuolella. Kulmataajuuden ollessa huomattavasti pienempi  $\omega = 125$  rad/s, joka vastaa likimain 11 km/h ajonopeutta, nähdään kuvasta 45, että diodisiltaa käytettäessä tasajännite romahtaa, kun kuormitus kasvaa lähelle nimellistä kuormaa  $I_o = 500$  mA. Jotta laturi voisi toimia vaatimusten mukaisesti, laturilogiikka sammuttaa lähtöjännitteen asettamalla lähtöjännitteen referenssin ( $U_{o,ref} = 0.2$  V).



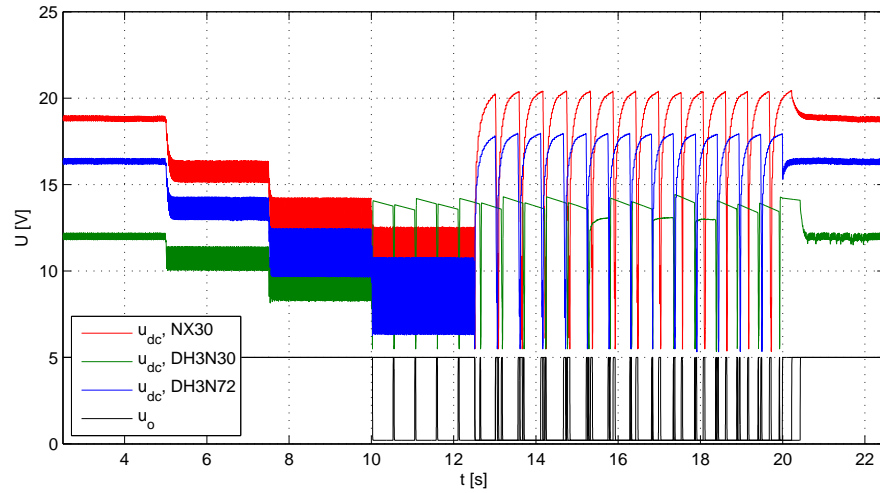


Kuva 43: Kuormamuutosten vaikutus kahdentajakytkennän tasajännitteeseen nimellispuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 185$  rad/s. Kuvassa on nähtävissä tasajännitte  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ .

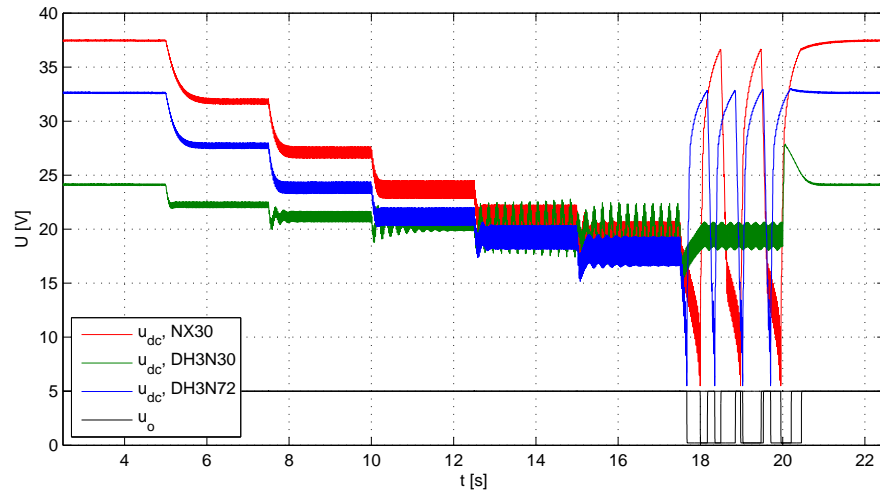


Kuva 44: Kuormamuutosten vaikutus buck-hakkurin pulssisuhteeseen  $d$  nimellispuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 185$  rad/s ja käytössä on kahdentajakytkentä.

Jännitteen kahdennuskytkentää käytettäessä laturi kykenee vielä toimimaan normaalisti nimellisellä virralla  $I_o = 500$  mA, vaikka laturia käytetään nimellisen toimintapisteensä alla puolella, kuten kuvasta 46 voidaan havaita. Kuitenkin kuormavirta  $I_o = 600$  mA on liian suuri kyseiselle toimintapisteelle ja laturin ohjausalgoritmi sammuttaa lähtöjännitteen. Kun simuloin laturia eri kulmataajuuksilla, niin havaitsin myös, että kulmataajuus  $\omega = 125$  rad/s on käytännössä minimikulmataajuus, jolla tasajännite  $u_{dc}$  pysyy sammutusraja-arvon yläpuolella tutkittavia dyna-



Kuva 45: Kuormamuutosten vaikutus diodisillan tasajännitteeseen nimellispisteen alapuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 125$  rad/s. Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ .

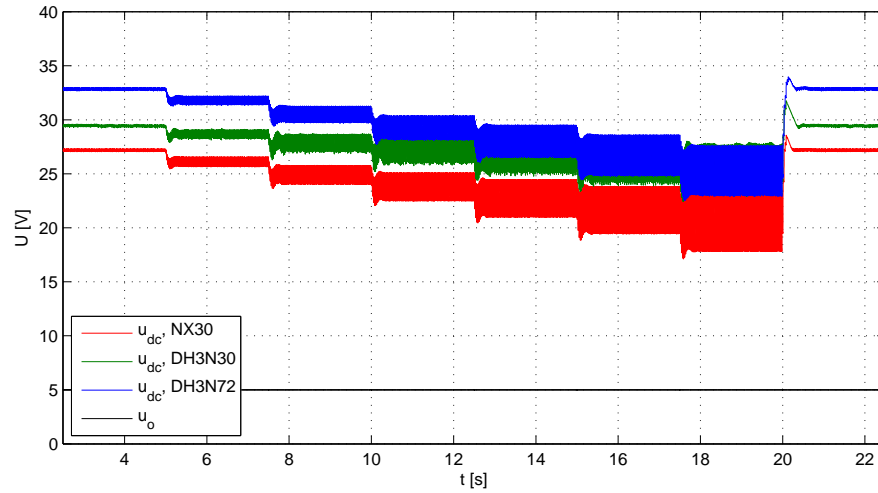


Kuva 46: Kuormamuutosten vaikutus tasajännitteeseen nimellispisteen alapuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 125$  rad/s ja käytössä on kahdennuskytkentä. Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ .

moja käytettäessä.

#### 6.2.4 Kuormamuutosten simulointi nimellispisteen alapuolella käytetäessä loistehon kompensointia

Laturin toimiessa nimellispisteen alapuolella huomasi, että loistehon kompensoinnista on jonkin verran hyötyä. Kuvassa 47 on nähtävissä diodisillan tasajännite

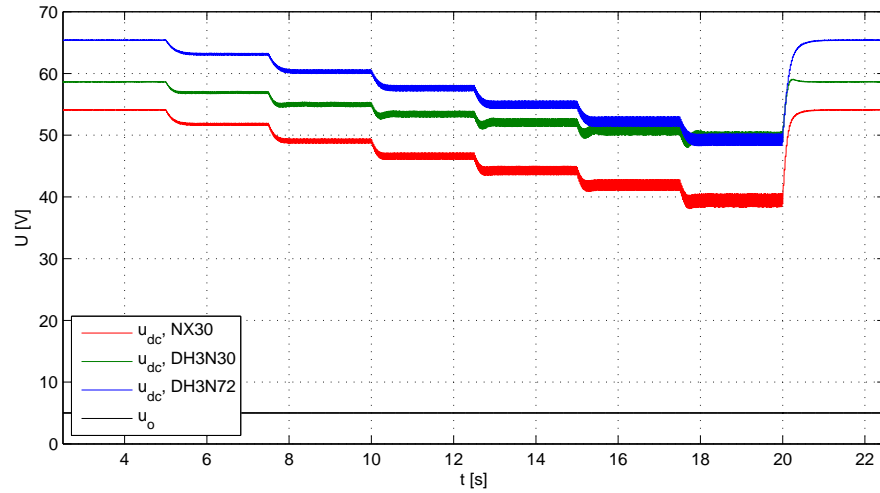


Kuva 47: Kuormamuutosten vaikutus tasajännitteeseen nimellispisteen alapuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 125$  rad/s, käytössä on diodisilta ja passiivinen rinnakkainen loistehon kompensointi. Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ . Loistehon kompensointikapasitanssin arvona on käytetty  $300 \mu\text{F}$ .

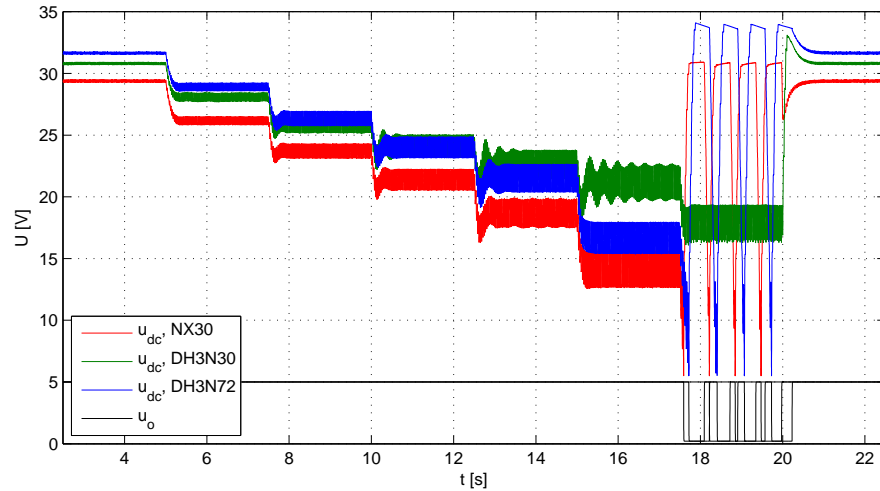
$u_{dc}$ , kun rinnakkainen loistehon kompensointi on käytössä ja kulmataajuus on  $\omega = 125$  rad/s. Kompensointikondensaattorin kapasitanssin arvona on käytetty kondensaattoria, jonka kapasitanssin arvo on  $C = 300 \mu\text{F}$ . Kuvasta nähdään, että rinnakkainen loistehon kompensointi kykenee kompensoimaan dynamon reaktanssin sen verran hyvin, että pelkällä diodisillalla tasasuunnattu tasajännite jaksaa pysytellä riittävän korkealla tasolla, jotta ohjausalgoritmi ei sammuta laturia. Kun diodisilta vaihdetaan jännitteen kahdennuskytkentään, niin tällöin on mahdollista saavuttaa vieläkin parempia tuloksia, kun toimitaan huomattavasti nimellispisteen alapuolella, kuten kuvista 48 ja 49 on nähtävissä. Kuvan 49 perusteella laturia voidaan kuormittaa nimellisellä virralla ( $I_o = 500$  mA) vielä niinkin alhaisella kulmataajuudella kuin  $\omega = 100$  rad/s, joka vastaa noin 9 km/h ajonopeutta eli reipasta kävelyvauhtia. On kuitenkin huomion arvoista havaita, että kulmataajuudella  $\omega = 125$  rad/s, jännitteen kahdennuskytkentää ja rinnakkaiskompensointia käytettäessä tasajännite nousee samalle tasolle, kuin ilman kompensointia toimittaessa kulmataajuudella  $\omega = 185$  rad/s.

### 6.2.5 Kuormamuutosten simulointi suurella kulmataajuudella

Tutkitaan kuormamuutosten vaikutusta dioditasasuuntaajalla tasasuunnattuun tasajännitteeseen laturin toimiessa huomattavasti nimellisen toimintapisteen yläpuolella, jolloin kulmataajuus on huomattavan suuri, esimerkiksi  $\omega = 600$  rad/s, joka

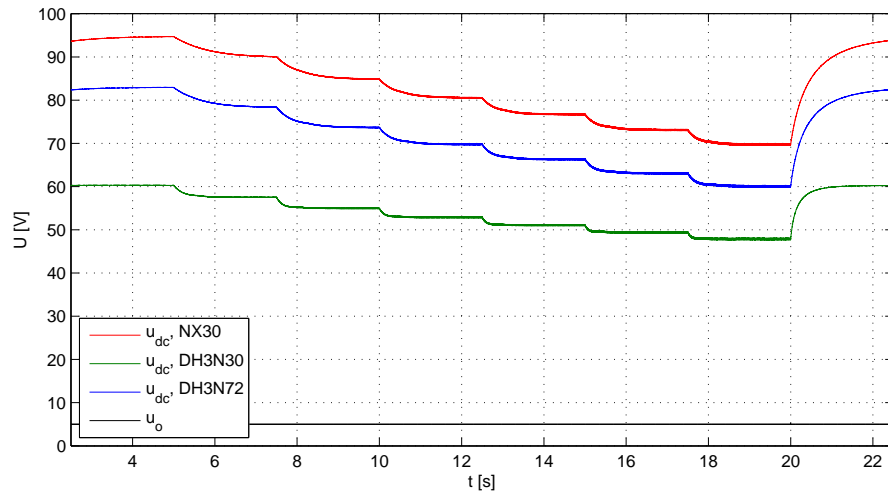


Kuva 48: Kuormamuutosten vaikutus tasajännitteeseen nimellispisteen alapuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 125$  rad/s, käytössä on jännitteen kahdentaja ja passiivinen rinnakkainen loistehon kompensointi. Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ . Loistehon kompensointikapasitanssin arvona on käytetty  $300 \mu\text{F}$ .

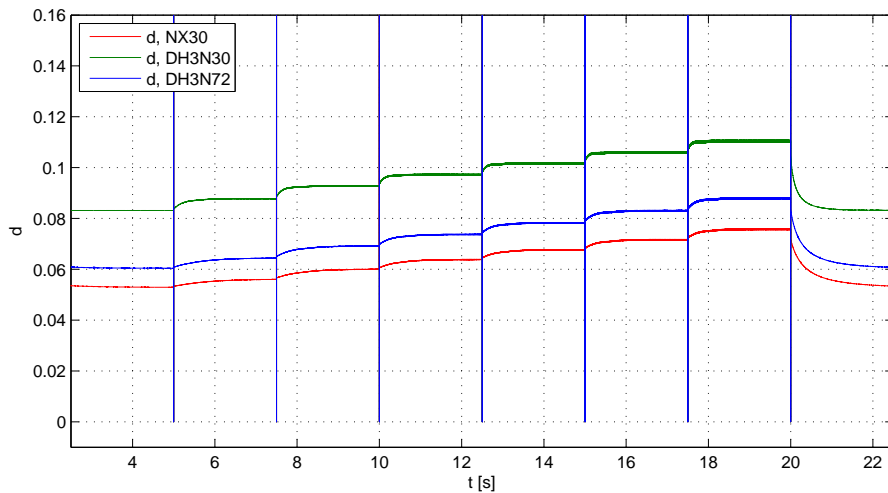


Kuva 49: Kuormamuutosten vaikutus tasajännitteeseen nimellispisteen alapuolella, kun kulmataajuus  $\omega = 100$  rad/s, käytössä on jännitteen kahdentaja ja passiivinen rinnakkainen loistehon kompensointi. Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ . Loistehon kompensointikapasitanssin arvona on käytetty  $300 \mu\text{F}$ .

vastaa noin 54 km/h ajonopeutta. Kuormamuutokset tehdään nytkin samoin kuin nimellisen toimintapisteen tapauksessa. Kuvasta 50 voidaan nähdä, että kuormittamattomana tasajännite nousee todella korkeaksi kaikilla simuloinneissa käytetyillä dynamoilla ja kuormitettaessakin jännite pysyttelee varsin korkealla tasolla nimellispisteeseen verrattuna. Kuvasta 51 nähdään, että nyt pulssisuhde on koko ajan



Kuva 50: Kuormamuutosten vaikutus diodisillan tasajännitteeseen suurella kulmataajuudella ( $\omega = 600 \text{ rad/s}$ ). Kuvassa on nähtävissä tasajännite  $u_{dc}$  ja lähtöjännite  $u_o$ .



Kuva 51: Kuormamuutosten vaikutus buck-hakkurin pulssisuhteeseen  $d$  suurella kulmataajuudella ( $\omega = 600 \text{ rad/s}$ ) ja käytössä on diodisilta.

todella pieni  $d \approx 0.05 \dots 0.12$  lukuun ottamatta transientteja.

### 6.2.6 Muita havaintoja

Dynamomittauksissa havaittiin, että Shimano DH3N30 vaikuttaisi olevan sähköisesti parempi kuin muut tarkastelussa olevat dynamot muun muassa suuremman kuormitettavuuden osalta, joka näkyy pienempinä resessiivisinä häviöinä ja suurempana oikosulkuvirtana pienemmän staattori-induktanssin takia. Simulointitulokset tuke-

vat myös tätä havaintoa siten, että USB-kuorman ollessa suurta tasajännite  $u_{dc}$  romahtaa voimakkaammin suuren sisäisen resistanssin omaavia dynamoja käytettäessä.

Simulointituloksia tulkitessa täytyy huomioida, että hakkuri on mallinnettu keskiarvostusmenetelmää käyttäen ja induktanssin virta on oletettu olevan koko ajan jatkuvaa. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole käytettäessä pieniä kuormavirtoja ja siten tuloksissa on hieman virhettä näissä tapauksissa.

## 7 Johtopäätökset

Tässä työssä esittelin, miten polkupyörän napadynamo voidaan mallintaa ja miten dynamon sijaiskytkennän parametrit voidaan määrittää kokeellisesti. Työn pääpaino on kuitenkin tehdä selvitys dynamokäyttöisen USB-laturin toiminnasta ja vaatimuksista. Simuloin laturin toimintaa eri toimintapisteissä ja tarkastelin, kuinka käyttökelpoisia eri laturitopologiat ovat ja mitä asioita tulisi ottaa huomioon suunnitellessa dynamokäyttöistä laturia.

Lisäksi tavoitteena oli tutkia polkupyörän dynamon ominaisuuksia energianlähteenä ja millaisia ongelmia dynamokäytössä voidaan kohdata. Alkuperäiset tavoitteet toteutuivat siten, pystyin määrittämään napadynamon sijaiskytkennälle parametrit, jotka mittaustulosten perusteella olivat samassa suuruusluokassa kirjallisuudesta löytyvien parametriarvojen kanssa. Ennakko-oletuksista poiketen dynamokäyttöisen laturin suunnittelu ei ollutkaan aivan niin yksinkertaista kuin oletin sen olevan. Dynamon laaja syöttöjännitealue ja suuret häviöt tekevät dynamokäytöstä erittäin haastavan pienitehoisen sähkökäytön. Nämä asiat selittävät jossain määrin sen, että kuluttajamarkkinoiden tarjonta on todella pientä, vaikka tällaisille laitteille olisi kysyntää. Alkuperäisistä tavoitteista poiketen laturin prototyyppiä ei toteutettu, vaan tyydyttiin tarkastelemaan laturin toimintaa simulointiympäristössä.

Simulointituloksien perusteella polkupyörän dynamoa voidaan käyttää USB-laturin energialähteenä ja laturi kykenee toimimaan USB-laturimääritelmän mukaisesti. Laturi on myös mahdollista saada toimimaan hyvin pienillä ajonopeuksilla, kun käytetään tilanteeseen sopivaa piiritopologiaa. Simulointituloksista käy myös ilmi erittäin hyvin ne vaikeudet, joita dynamokäyttöisen laturin suunnittelussa tullaan kohtaamaan. Simuloinneissa käsittelin eri piiritopologioita itsenäisinä kokonaisuuksina. Käytännön laitetta suunnitellessa täytyisi ottaa huomioon laitteen käyttäytyminen, kun piiritopologiaa vaihdetaan ohjausalgoritmin toimesta. Rajasin nämä tilanteet pois tämän työn aihepiiristä.

Simuloinneissa käytetty yksinkertaistettu laturin ohjausalgoritmi osoittautui toimivaksi, mutta varsin rajoittuneeksi. Algoritmi sammuttaa laturin, jos syöttöjännite laskee tietyn raja-arvon alapuolelle. Ratkaisu on kuitenkin perusteltavissa käytettäessä jännitettä laskevaa katkojaa, sillä muutoin laturi ei kykenisi enää tuolloin säätämään lähtöjännitettä ja jännite ajautuisi pois vaaditulta alueelta. Laturin toiminta-alue kuitenkin rajoittuu suurilla yli 500 mA virtakuormilla pienemmäksi kuin se voisi olla, sillä USB-laturimääritelmä sallii lähtöjännitteen laskea reilusti 5 V alapuolelle suuria kuormia käytettäessä. Käytännössä ohjausalgoritmi pitäisi siis toteuttaa siten, että yli 500 mA kuormilla laturissa ei tulisi käyttää jännitesäätöä vaan

sen sijaan esimerkiksi virtasäätöä, tai näiden yhdistelmää.

Tulosten perusteella en voi täysin tyrmätä tavanomaisen yksiasteisen jännitettä laskevan katkojan käyttökelpoisuutta dynamokäyttöisessä laturissa, sillä simuloinnit on tehty käyttäen keskiarvostusmenetelmää. Jos simulointi suoritettaisiin esimerkiksi pulssinleveysmodulaatiota käyttäen, voitaisiin tarkemmin analysoida hakkurin käyttökelpoisuutta etenkin suurilla syöttöjännitteillä, jolloin kytkimen minimijohtoaika voi rajoittaa syöttöjännitteen käyttökelpoista jännitealuetta. Simulointitulokset kuitenkin osoittavat, että hakkuria syöttävä tasajännite vaihtelee erittäin suurella jännitealueella kaikissa tarkastelluissa tapauksissa. Jos hyväksytään suuret häviöt suurilla ajonopeuksilla, niin tällöin jännitteen rajoittaminen dynaamisesti kuormitusta lisäämällä voi olla perusteltua.

Dynamomittausten tulokset antavat mielestäni aihetta paremman dynamon kehittämiseksi. Nykyiset dynamot on kehitetty siten, että niiden pääasiallinen kuorma on perinteinen hehku- tai halogeenivalaisin, eikä minkään muunlainen kuormitus. Lisäksi suurin osa dynamoista on yksivaiheisia. Hyvin pienellä vaivalla olisi mahdollista toteuttaa kolmivaiheinen dynamo, jonka lähtöteho on tasaisempaa verrattuna yksivaiheisen dynamon voimakkaasti sykkivään lähtötehoon. Tasainen lähtöteho voisi vähentää myös pyörällä ajajan tuntemaa mekaanista värähtelyä, joka aiheutuu dynamon sähköisen vääntömomentin vaikutuksesta. Jatkotutkimuksena voisi selvittää, miten laturi käyttäytyy, kun piiritopologiaa vaihdetaan käytön aikana. Lisäksi voisi tarkemmin tarkastella neliöllisen jännitettä laskevan hakkuritopologian soveltumista dynamokäyttöön. Jatkosuunnitelmissa on myös suunnitella ja toteuttaa laturin prototyyppi vähintäänkin henkilökohtaista käyttöä varten.

Vaikka tässä työssä rajoituttiin tarkastelemaan vain dynamokäyttöistä USB-laturia, niin työn tuloksia voitaisiin hyödyntää suunnitellessa erilaisia polkupyörän sähköjärjestelmiä ja niiden dynamokäyttöisiä sähkönsyöttöjä. Polkupyörän sähköjärjestelmiä voi olla esimerkiksi valaistus, latauslaitteet, sähköiset vaihtenvaihtajat, lukkiutumattomien jarrujen ohjausjärjestelmät tai erilaiset ajajan suorituskykyä mittaavat järjestelmät.



## Viitteet

- [1] C. C. Chiu and T. Hsien (TW). Permanent magnet generator for bicycle light operation. Patent, 03 2004. US 6703716.
- [2] K. Takamiya (JP) and R. Nishimura (JP). Built-in generator for bicycle. Patent, 05 1992. US 5115159.
- [3] T. Endo (JP) and T. Kanehisa (JP). Bicycle hub dynamo with a freewheel. Patent, 01 2006. US 6992413.
- [4] C. C. Hwang, P. L. Li, Y. C. Lai, and C. H. Liang. Design and construction of a claw-pole pm dynamo. *physica status solidi (c)*, 4(12):4639–4642, 2007.
- [5] J. Heine and A. Oehler. Testing the efficiency of generator hubs. *Vintage Bicycle Quarterly*, 3(4), 2005. Verkkodokumentti, Viitattu 8.11.2012. Saatavissa: <http://www.bikequarterly.com/VBQgenerator.pdf>.
- [6] T. Remple. Battery charging v1.1 spec and adopters agreement, 04 2009. Verkkodokumentti. Viitattu 21.1.2012. Saatavissa: [http://www.usb.org/developers/devclass\\_docs/batt\\_charging\\_1\\_1.zip](http://www.usb.org/developers/devclass_docs/batt_charging_1_1.zip).
- [7] Nokia Bicycle Charger DC-14 datalehti. Verkkodokumentti. Viitattu 18.1.2012. Saatavissa: <http://press.nokia.com/wp-content/uploads/mediaplugin/doc/nokia-bicycle-charger-kit-datasheet.pdf>.
- [8] Nokia Charger Adapter CA-146C tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 18.1.2012. Saatavissa: <http://europe.nokia.com/find-products/accessories/all-accessories/power/charger-adapters/nokia-charger-adapter-ca-146c>.
- [9] Peter White Cycles. Busch & Müller E-Werk tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 18.1.2012. Saatavissa: <http://www.peterwhitecycles.com/ewerk.asp>.
- [10] Peter White Cycles. *E-WERK – Bike-mobile hub dynamo powered supply unit for electronic devices – Instruction manual*. Viitattu 18.1.2012. Saatavissa: <http://www.peterwhitecycles.com/Downloads/Ewerkmanual.pdf>.
- [11] Bike2Power SpinPOWER S1 tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 18.1.2012. Saatavissa: <http://www.bike2power.com/smartphone-bicycle-charger-kit.html>.

- [12] Zzing USB charger tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 18.1.2012. Saatavissa: <http://zzing.de/index.php/en/product>.
- [13] ADA Bikeconverter tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 28.2.2013. Saatavilla: [http://ada-bikeconverter.de/?page\\_id=122](http://ada-bikeconverter.de/?page_id=122).
- [14] M. Hinkkanen. Draft: Modeling of BLDC machine. Jan. 2008.
- [15] C. Valerius, J. Krupar, and W. Schwarz. Electronic power management for bicycles. In *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, pages 10 pp. –P.10, 0-0 2005.
- [16] M. Schmitdt. Dynamo-powered led light circuits for bicycles. Verkkodokumentti. Viitattu 2.1.2012. Saatavissa: <http://pilom.com/BicycleElectronics/DynamoCircuits.htm>.
- [17] K.P. Louganski and Jih-Sheng Lai. A 20-kw, 10-khz, single-phase multilevel active-front-end converter with reactive power control. In *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, volume 2, pages 576–582, oct. 2006.
- [18] J. Kyyrä. *Hakkuriteholähteet – Kurssin S-81.3100 Hakkuriteholähteet luentomoniste*. Teknillinen korkeakoulu, 2007.
- [19] D. Giacomini. A novel high efficient approach to input bridges. *PCIM Europe*, 2008.
- [20] LM78XX/LM78XXA 3-terminal 1A positive voltage regulator. datalehti.
- [21] MIC29150/29300/29500/29750 high-current low-dropout regulators. datalehti.
- [22] D. Maksimovic and S. Cuk. Switching converters with wide dc conversion range. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 6(1):151–157, jan 1991.
- [23] E.E. Carbajal-Gutierrez, J.A. Morales-Saldana, and J. Leyva-Ramos. Average current-mode control for a quadratic buck converter. In *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, pages 2146–2150, june 2005.
- [24] N. Mohan. *Power Electronics: A First Course*. MNPERE, 2009.

- [25] Shimano DH3N30 tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 8.11.2012. Saatavilla: [http://bike.shimano.com/publish/content/global\\_cycle/en/sg/index/products/city\\_\\_\\_comfort\\_bike/inter-1\\_\\_hub\\_dynamo/product.-code-DH-3N30.-type-.html](http://bike.shimano.com/publish/content/global_cycle/en/sg/index/products/city___comfort_bike/inter-1__hub_dynamo/product.-code-DH-3N30.-type-.html).
- [26] Shimano DH3N72 tuotekuvaus. Verkkodokumentti. Viitattu 8.11.2012. Saatavilla: [http://cycle.shimano-eu.com/publish/content/global\\_cycle/en/nl/index/components/road/sports\\_hub\\_dynamo/product.-code-DH-3N72.-type-.hb\\_road.html](http://cycle.shimano-eu.com/publish/content/global_cycle/en/nl/index/components/road/sports_hub_dynamo/product.-code-DH-3N72.-type-.hb_road.html).
- [27] Shimano sport hub dynamos. Verkkodokumentti. Viitattu 8.11.2012. Saatavilla: [http://cycle.shimano-eu.com/publish/content/global\\_cycle/en/nl/index/components/road/sports\\_hub\\_dynamo.html](http://cycle.shimano-eu.com/publish/content/global_cycle/en/nl/index/components/road/sports_hub_dynamo.html).