



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jukka Syrjämäki

**KAIKKIIN MOOTTOREIHIN SOPIVA 5V**

**ULOSTULO**

ABB Oy, Motors & Generators

Tekniikka  
2021

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jukka Syrjämäki
Opinnäytetyön nimi	Kaikkiin moottoreihin sopiva 5V ulostulo
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	60 + 4 liitettä
Ohjaaja	Marko Iskala

---

Opinnäytetyön aihe on rakentaa kaikkiin moottoreihin sopiva 5 V 1 A ulostulo. Työn toimeksiantaja on ABB:n Vaasan tehtaan Motors & Generators-osaston R&D-yksikkö. Keskeisimpänä tavoitteena on löytää keino muuntaa taajuusmuuttajan ulostulo halutun suuruiseksi ja tasaiseksi DC-jännitteeksi, tai kerätä energiaa muusta lähteestä sähköenergiaksi, kuten tärinästä tai magneettikentästä.

Ratkaisukeinojen tutkinnan jälkeen tarkempaan tarkasteluun valitaan lupaavimmalta vaikuttava vaihtoehto. Tämän vaihtoehdon toteutusta tutkitaan simuloimalla PSCAD-ohjelmistolla erilaisia käyttötilanteita ja vertailemalla näitä toisiinsa. Simuloinnin jälkeen ratkaisua testataan koekentällä suunnitellussa käyttötilanteessa ja vertaillaan todellista käyttäytymistä simulaation tuloksiin.

Työn lopuksi arvioidaan kyseisen ratkaisun toimintaa testien perusteella, sekä tämän soveltuvuutta kyseiseen käyttötarkoitukseen. Lisäksi työlle esitetään kehitysideoita, sekä vaihtoehtoja, miten projektia voisi jatkaa pidemmälle. Kehitysideoista yhdestä vaihtoehdosta rakennetaan myös prototyyppi, jolle tehdään lyhyesti samat testit kuin alkuperäiselle laitteelle.

## ABSTRACT

Author	Jukka Syrjämäki
Title	5V Power Supply Suitable for All Motors
Year	2021
Language	Finnish
Pages	60 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Marko Iskala

---

The topic of this thesis was to build a 5 V power supply suitable for all motors. This thesis was made for the R&D department of ABB Motors & Generators in Vaasa. The main aim was to find a way to transform frequency converter output voltage into a clean DC voltage of desired amplitude, or harvest energy from another source, such as vibration or magnetic fields into electrical energy.

After reviewing the feeding solutions, the most promising option was selected for closer examination. The implementation of this solution was examined by simulating different operating situations with PSCAD and comparing the results. After the simulation phase, the solution was tested in the testing field and the actual behaviour of the device was compared with the simulated results.

Finally, the operation of this solution was evaluated based on tests, as well as its suitability for the intended use. A prototype of one development idea was also built and briefly tested the same way as the original device. Additionally, development ideas and options on how to proceed with the project are presented in the thesis.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

SANASTO

1	JOHDANTO.....	12
2	ABB OY.....	13
3	SYÖTTÖTAPOJEN VAIHTOEHTOJA .....	14
	3.1 Pietsosähköinen energiankeräys .....	14
	3.2 Virtamuuntajalla toteutettu energian keräys.....	17
	3.3 Kapasitiivisesti kytketty jännitemuuntaja (CVT) .....	20
	3.4 Valmis tehonlähde (Mean Well WDR-60-5) .....	21
4	SIMULOINTI .....	24
	4.1 Taajuusmuuttaja .....	24
	4.2 NTC-termistori .....	26
	4.3 Moottori.....	28
	4.4 Tehonlähteen simulaatiomalli .....	29
	4.5 WDR-60-5 Sini -jännitteellä.....	29
	4.6 WDR-60-5 Taajuusmuuttajalla syötettynä.....	31
	4.7 WDR-60-5 Moottorin rinnalla .....	33
5	TESTAAMINEN .....	38
6	ANALYYSI .....	44
	6.1 Skalaarisäädön tulokset .....	44
	6.2 DTC:n tulokset.....	45
	6.3 Loppupäätelmät.....	47
7	KEHITYSIDEOITA.....	48
	7.1 Suodatuspiirin uudelleenmitoitus korkeille taajuuksille .....	48

7.2 Sisääntulopiirin tasasuuntaajan muokkaus kolmivaiheiseksi.....	51
7.3 Toisen tehonlähteen käyttö.....	52
7.4 Taajuusmuuttajan simulaatiomallin paranteleminen .....	53
8 YHTEENVETO .....	58
LÄHTEET .....	59
LIITTEET .....	61

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Uusiutuvien sekä litiumionisähkönsyöttöjärjestelmien tehon tiheyksiä jännitteen funktiona. /5/ .....	15
<b>Kuva 2.</b> Esimerkki pietsokeraamisen levyn rakenteesta sekä tämän tuottama jännite ja virta ohutkalvoakkua ladataessa. /5/ .....	15
<b>Kuva 3.</b> Pietsosähköisen joustavan laminaatin rakenne. /6/ .....	16
<b>Kuva 4.</b> 267 mm pituisen pietsosähköisen laminaatin tuottama jännite silytsraudan sähköjohdon ympärillä (120 V, 60 Hz). /6/ .....	16
<b>Kuva 5.</b> Ideaalisen virtamuuntajan sijaiskytkentä. /7/ .....	18
<b>Kuva 6.</b> Virtamuuntaja asennettuna moottorin vaihejohtimen ympärille. /7/....	18
<b>Kuva 7.</b> Virtamuuntajalla toteutetun syötön arvioidut tehon tiheydet ensiövirran funktiona. Kuvaajat kolmelle muuntajakoolle, jossa D on muuntajan halkaisijan pituus keskustasta keskustaan. /7/ .....	19
<b>Kuva 8.</b> Korkeimmat saavutetut ulostulotehot ensiövirran RMS-arvon funktiona. /7/.....	19
<b>Kuva 9.</b> Yksinkertaisen kapasitiivisesti kytketyn jännitemuuntajan (CVT) kytkentäkuva. /8/ .....	20
<b>Kuva 10.</b> Mean Well WDR-60-5-tehonlähteen lohkoakaavio.....	22
<b>Kuva 11.</b> Sisääntulopiirin kytkentäkaavio sekä piirikortti. /11/.....	23
<b>Kuva 12.</b> Taajuusmuuttajan simulaatiomalli. ....	24
<b>Kuva 13.</b> PWM-jännitteen generointilogiikka.....	25
<b>Kuva 14.</b> PWM-generointilogiikan ja ulostulon aaltomuodot. ....	26
<b>Kuva 15.</b> NTC-termistorin resistanssin laskentalogiikka.....	28
<b>Kuva 16.</b> Simulaatiossa käytetty sähkömoottori. ....	28
<b>Kuva 17.</b> WDR-60-5:n sisääntulopiirin simulaatiomalli. ....	29
<b>Kuva 18.</b> Tehonlähteen ottama virta normaalissa käyttötilassa. ....	30
<b>Kuva 19.</b> Sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta normaalissa käyttötilassa. .	30
<b>Kuva 20.</b> Tehonlähteen ottama virta taajuusmuuttajalla syötettynä. ....	31
<b>Kuva 21.</b> Sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta taajuusmuuttajalla syötettynä. ....	32

<b>Kuva 22.</b> Moottorikaapelia kuvaava simulaatiomalli.....	35
<b>Kuva 23.</b> Kaapelien likimääräisiä impedansseja johdinlämpötilassa 80 °C ( $\Omega/\text{km}$ ). /15/.....	35
<b>Kuva 24.</b> Sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta taajuusmuuttajalla syötettynä, moottorin rinnalla ja moottorikaapeli simuloituna. ....	36
<b>Kuva 25.</b> ABB ACS880-01 -taajuusmuuttaja .....	38
<b>Kuva 26.</b> Taajuusmuuttajan ja moottorin kytkentä.....	39
<b>Kuva 27.</b> Tehonlähteen kytkentä ensimmäisessä taajuusmuuttajalla syötetyssä testissä.....	40
<b>Kuva 28.</b> Muokatun tehonlähteen testauksen kytkentäkuva (Sisääntulopiirin DC- puolen testaus. Simulaatiomallia vastaava kytkentä). ....	42
<b>Kuva 29.</b> Testeissä käytettyjen ulkoisten sulakkeiden sulamisajat. /16/ .....	43
<b>Kuva 30.</b> Skalaarisäädöllä syötetyn WDR-60-5:n sisääntulovirta (keltainen, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, C2) 500 ms ajalta. ....	44
<b>Kuva 31.</b> DTC:llä syötetyn WDR-60-5:n sisääntulovirta (keltainen, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, C2) 100 ms ajalta. ....	46
<b>Kuva 32.</b> DTC:llä syötetyn WDR-60-5:n sisääntulovirta (keltainen, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, C2) 1 ms ajalta. Käynnistysvirtasysäys.....	47
<b>Kuva 33.</b> Muokatun tehonlähteen simulaatiokuva. ....	49
<b>Kuva 34.</b> Muokatun tehonlähteen ottama virta taajuusmuuttajalla syötettynä. ....	49
<b>Kuva 35.</b> Muokatun tehonlähteen sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta taajuusmuuttajalla syötettynä.....	50
<b>Kuva 36.</b> ABB ACS255 -taajuusmuuttaja.....	51
<b>Kuva 37.</b> Kolmivaiheiseksi muokattavan tehonlähteen esimerkkikuva. ....	52
<b>Kuva 38.</b> LT8316:lla toteutetun tehonlähteen kytkentäkuva. /17/.....	53
<b>Kuva 39.</b> Uuden taajuusmuuttajan moduuli sekä tämän syöttö.....	54
<b>Kuva 40.</b> Uuden taajuusmuuttajan simulaatiomalli. ....	55
<b>Kuva 41.</b> Kiihdytysrampin ohjelmointi.....	55

<b>Kuva 42.</b> Kiihdytysrampin ohjelmoinnissa käytetty kolmioaalto sekä taajuusohjeen kerroin.....	56
<b>Kuva 43.</b> Uuden taajuusmuuttajamallin ulostulojännite ja kiihdytysrampin vaikutus (ei V/f-säätöä).....	57

## **TAULUKKOLUETTELO**

<b>Taulukko 1.</b> Mean Well WDR-60-5-tehonlähteen tekniset tiedot. ....	21
<b>Taulukko 2.</b> Simuloidun moottorin parametrit. ....	29
<b>Taulukko 3.</b> Normaalin käyttötilanteen ja PWM-syötetyn tilanteen mittaustulokset ja vertailu. ....	32
<b>Taulukko 4.</b> PWM-syötetyn tehonlähteen mittaustulokset moottorin rinnalla ilman moottorikaapelia ja moottorikaapelin kanssa. ....	37
<b>Taulukko 5.</b> Testeissä käytetyn taajuusmuuttajan tekniset tiedot. ....	38
<b>Taulukko 6.</b> Muokatun tehonlähteen testeissä käytettyjen taajuusmuuttajien tekniset tiedot. ....	51



## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** WDR-60-5-tehonlähde syötettynä sinimuotoisella jännitteellä.

**LIITE 2.** WDR-60-5-tehonlähde taajuusmuuttajalla syötettynä.

**LIITE 3.** WDR-60-5-tehonlähde taajuusmuuttajalla syötettynä, moottorin rinnalla.

**LIITE 4.** Parannellun taajuusmuuttajamallin simuloitu kytkentälogiikka.

## SANASTO

R&D	Research & Development
CVT	Capacitor voltage transformer, kapasitiivisesti kytketty jännitemuuntaja
AC	Vaihtovirta
DC	Tasavirta
$I_p$	Ensiövirta
$I_s$	Toisiovirta
$N_s$	Toision kierrosluku
$I_{m,s}$	Magnetointivirta toisiossa
$I_L$	Kuorman ottama virta
$U_s$	Toisiojännite
$R_L$	Kuorman resistanssi
$L_{m,s}$	Magnetointi-induktanssi toisiossa
$\omega$	Kulmataajuus ( $2\pi f$ )
$P_L$	Kuorman teho
$\mu_0$	Tyhjiön permeabiliteetti
$\mu_r$	Suhteellinen permeabiliteetti
$A_e$	Rautasydämen pinta-ala
D	Halkaisija
EMI	Electro-Magnetic Interference
V	Voltti
A	Ampeeri

W	Watti
PWM	Pulse Width Modulation
DTC	Direct Torque Control
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
R1	NTC-termistorin resistanssi lämpötilassa T1
R2	NTC-termistorin resistanssi lämpötilassa T2
T1	Ensimmäinen lämpötila, NTC-termistorin tietolomakkeesta /13/
T2	Toinen lämpötila, NTC-termistorin tietolomakkeesta /13/
$\beta$	NTC-termistorin lämpötilakerroin
Hz	Hertsi
NTC	Negative Temperature Coefficient
Vp-p	Voltage peak to peak, jännite huipusta huippuun (hetkellisarvon max – min vaihteluväli)
mAp-p	Milliamperes peak to peak, milliampeeria huipusta huippuun (hetkellisarvon max – min vaihteluväli)
Pn	Nimellisteho
U1	Sisääntulojännite
U2	Ulostulojännite
I1	Sisääntulovirta
I2	Ulostulovirta
f1	Sisääntulotaajuus
f2	Ulostulotaajuus

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ABB Motors & Generators-osaston R&D-yksikölle. Työn tavoitteena on rakentaa kaikkiin moottoreihin sopiva 5 V 1 A tasajännite ulostulo. Työssä tutkitaan vaihtoehtoisia ratkaisuja toteuttaa kyseinen laite, jonka jälkeen sähkötekniisiä tutkimuksia jatketaan simuloimalla käyttötilanteita. Laitetta testataan testikentällä sen jälkeen, kun simulaatioilla on saatu käsitys ratkaisun toiminnasta.

Sähkömoottoreihin sopivan 5 V ulostulolaitteen ideana on, että mahdollisille oheislaitteille saisi sähkönsyötön suoraan moottorilta, eikä näin ollen erillistä syöttöä tarvitsisi. Yksi esimerkki tällaisista oheislaitteista on ABB Ability Smart Sensor, jonka avulla voidaan monitoroida moottorin kuntoa ja havaita mahdolliset ongelmat ennen kuin nämä aiheuttavat suurempaa vahinkoa. Samalla tämä tarjoaisi valmiuden syöttää myös kolmannen osapuolen laitteita.

Vaatimuksena laitteelle on laaja jännitealue syötölle, pitää toimia myös taajuusmuuttajalla syötetyissä moottoreissa sekä laitteen tulisi olla mahdollisimman pieni ja kompakti. Laaja jännitealue takaa sen, että laite toimii missä tahansa moottoria käytetään ja kytkennästä riippumatta. Laitteen valmius toimimaan taajuusmuuttajalla syötettynä varmistaa myös sitä tavoitetta, että se toimisi kaikissa moottoreissa. Laitteen fyysisen koon taas olisi hyvä olla pieni siitä syystä, että sen saisi järkevästi lisättyä pieniinkin moottoreihin esimerkiksi erilliseen kytkentäkoteloon.

## 2 ABB OY

ABB Oy on globaali robotiikan, automaatiotekniikan ja sähkövoimatekniikan teknologiayritys. ABB Oy syntyi vuonna 1988, kun ruotsalainen vuonna 1883 perustettu ASEA ja vuonna 1891 perustettu sveitsiläinen Brown, Boveri & Cie yhdistyivät. ASEAn tuotantoalaa olivat tuolloin sähkölamput ja generaattorit, kun taas Brown, Boveri & Cie valmisti AC- ja DC moottoreita, generaattoreita, höyryturbiineita ja muuntajia. Nykyään Björn Rosengrenin johtama ABB on jakautunut neljään toimialaan: Electrification, Process Automation, Motion ja Robotics & Discrete Automation. Näistä aloista Electrification sisältää muun muassa älykkäitä teollisuuden, asumisen ja sähkönjakelun sähköistysvaihtoehtoja. Process automation tarjoaa ratkaisuja mittaus- ja analytiikkajärjestelmiin, ohjausjärjestelmiä sekä ohjelmoitavia logiikkaohjaimia. Motion sisältää taajuusmuuttajat, moottorit, generaattorit sekä mekaaniset vaihteet. Robotics & Discrete Automation taas tarjoaa ratkaisuja robotiikassa sekä kone- ja tehdasautomaatiikassa /1,2/.

Suomessa ABB:n asema perustuu Gottfrid Strömbergin vuonna 1889 perustamaan sähkötekniikan alan yhtiöön Oy Strömberg Ab, joka siirtyi ASEAn omistukseen 1987. Gottfrid valmisti vuonna 1880 Suomen ensimmäisen tasavirtakoneen, valmistui Polyteknisestä opistosta vuonna 1885, ja oli perehtynyt sähkötekniikkaan Berliinin kuninkaallisessa teknisessä korkeakoulussa ja Hannoverin teknisessä korkeakoulussa. Oy Strömberg Ab aloitti toimintansa Helsingin Kampissa vuonna 1891 perustamassaan dynamotehtaassa, ja vuoteen 1917 mennessä valmistusohjelmaan kuului jo dynamoiden lisäksi tasavirtageneraattorit, vaihtovirtakoneet, muuntajat, kojekaapit, erilaiset katkaisijat, kytkimet, sulakkeet, jännitteensäätäjät sekä kokonaiset kojetaulut. Helmikuussa 1944 Oy Strömberg Ab aloitti toiminnan myös Vaasassa, jonne siirrettiin tuotantoa toisen maailmansodan ja jatkosodan aikaisten Helsingin pommitusten vuoksi /3,4/.

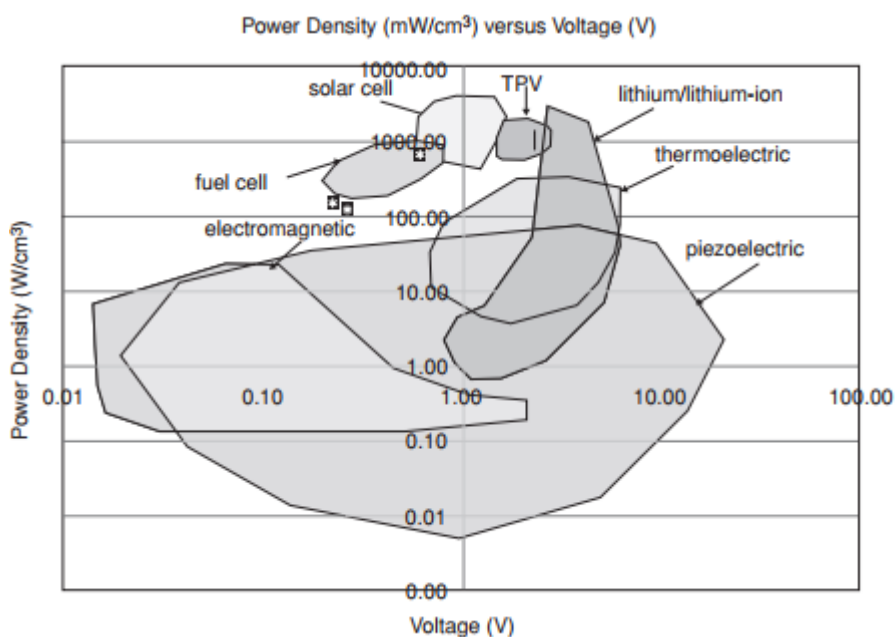
### 3 SYÖTTÖTAPOJEN VAIHTOEHTOJA

Ulostulopiirin sähkönsyöttöä suunnitellessa tutkittiin ensin energiankeräyskeinoja. Työtä varten tutkittuja energiankeräystapoja ovat mekaaniseen värinään perustuva pietsosähköinen energiankeräys ja virtamuuntajalla toteutettu energiankeräys. Näiden lisäksi tutkittiin vielä suoraan moottorin terminaaleihin kytkettäviä järjestelmiä. Seuraavissa kappaleissa esitetään tutkinnan tuloksia ja teoriaa edellä mainituista energiankeräyskeinoista.

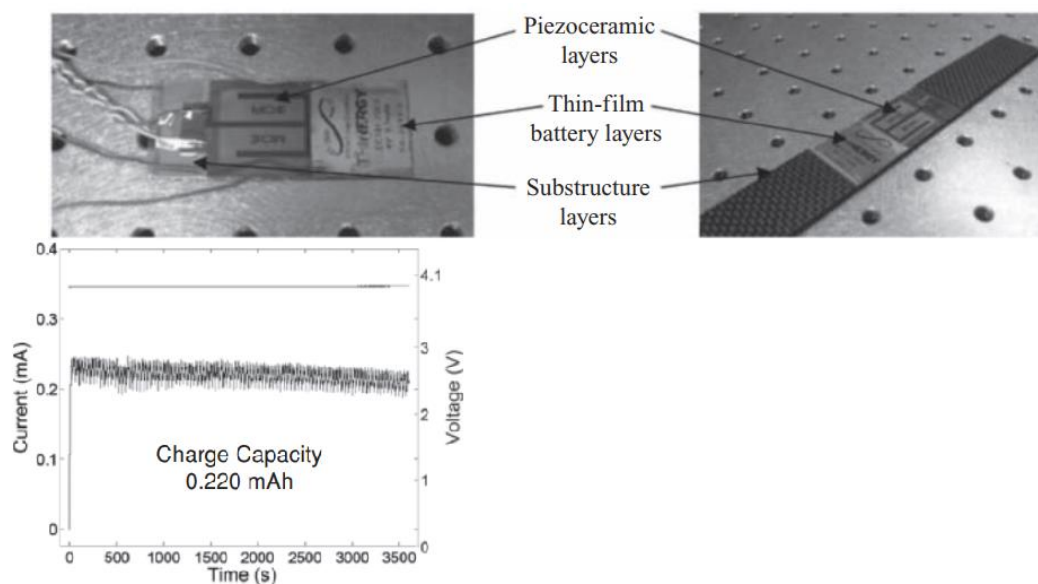
#### 3.1 Pietsosähköinen energiankeräys

Pietsosähköisessä energiankeräyksessä mekaaninen värinä muutetaan sähköiseksi energiaksi. Pietsoihin perustuvina syöttötapoina harkitaan kytkentälaatikoon asennettavia pietsokeraamisia levyjä tai moottorin syöttökaapeleiden ympärille asetettavia pietsosähköisiä laminaatteja.

KytKentälaatikon sisään asennettavan pietsokeramiikan toimintaideana on synnyttää sähköenergiaa moottorin värinästä. Kuvassa 1 on esitetty vertailua pietsosähköisten sekä joidenkin vaihtoehtoisten energiankeräyskeinojen tehosiheyksiä jännitteen funktiona. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki eräästä ohutkalvoakkua lataavasta pietsokeraamisesta levystä, sekä tämän tuottamasta akkua lataavasta jännitteestä ja virrasta. Tämän energiankeräysvaihtoehdon keskeinen kysymys ulostulopiirin soveltuvuuteen on: Riittääkö IEC- standardin sallimat moottorin värinätasot synnyttämään ulostuloon halutun jännitteen moottoriin sopivan kokoisella pietsokeramiikalla?



**Kuva 1.** Uusiutuvien sekä litiumionisähkönsyöttöjärjestelmien tehon tiheyksiä jännitteen funktiona. /5/



**Kuva 2.** Esimerkki pietsokeraamisen levyn rakenteesta sekä tämän tuottama jännite ja virta ohutkalvoakkua ladatessa. /5/

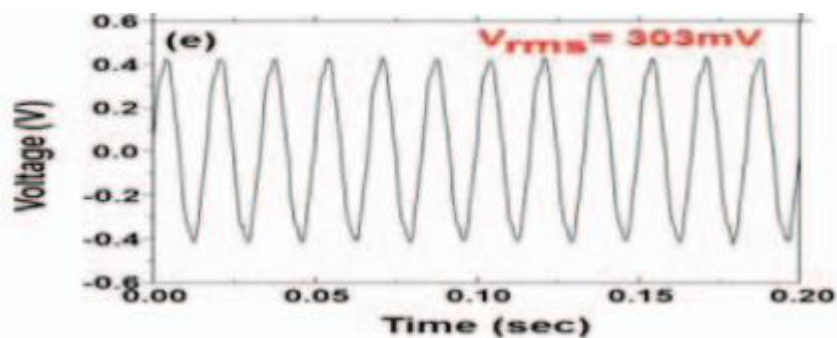
Kuvassa 1 sähkönsyöttöjärjestelmällä mahdollinen saavutettava jännite on esitetty vaaka-akselilla ja tehon tiheys milliwatteina kuutiosenttimetriä kohti esitetty pystyakselilla. Pietsosähköisten järjestelmien huomataan pystyvän saavuttamaan

esitetystä vaihtoehdoista kaikista laajimman alueen tehonsyötön. Kuvan perusteella 5 V tuottavalla pietsosähköisellä järjestelmällä voitaisiin saavuttaa vähän alle 90 mW tehoa yhdellä kuutiosenttimetrillä pietsosähköistä materiaalia. Tämä tarkoittaa, että ulostulolle tavoiteltu 5 W voitaisiin saavuttaa vähintään 11 cm<sup>3</sup>:lla pietsosähköistä materiaalia.

Toisena pietsosähköisenä vaihtoehtona tutkittiin syöttökaapelin ympärille kierretävää joustavaa laminaattia, joka synnyttää sähköenergiaa johtimien magneettikentästä. Laminaatti koostuu kuvan 3 mukaisesti kahdesta pietsosähköisestä kerroksesta, joiden välissä on magnetrostriktiivinen kerros. Tätä menetelmää on testattu lähteen tutkimuksessa silityksraudan sähköjohtolla Amerikassa, eli 60 Hz taajuudella ja 120 V jännitteellä. Tässä testissä 267 mm pitkän pietsosähköisen laminaatin tuottama jännite 200 ms aikana on esitetty kuvassa 4. /6/



**Kuva 3.** Pietsosähköisen joustavan laminaatin rakenne. /6/



**Kuva 4.** 267 mm pituisen pietsosähköisen laminaatin tuottama jännite silityksraudan sähköjohtoon ympärillä (120 V, 60 Hz). /6/

Pietsosähköisten järjestelmien tarkempi tutkiminen lopetettiin tässä vaiheessa projektia, sillä ne todettiin kuvien 2 ja 4 mukaan riittämättömiksi synnyttämään tarpeeksi tehoa tämän projektin tarpeeseen.



### 3.2 Virtamuuntajalla toteutettu energian keräys

Tässä vaihtoehdossa moottorin syöttökaapeleissa esiintyvä magneettikenttä muunnetaan sähköenergiaksi virtamuuntajaan pohjautuvalla ratkaisulla. Virtamuuntajan rautasydän koostuu kahdesta U:n muotoisesta kappaleesta muodostaen rengaskelan. Virtamuuntajan ensiönä toimii moottorin syöttökaapeli, joka vie suoraan rautasydämen läpi, sekä toisiosta, joka on kierretty sydämen toiselle puolelle. Tällöin virtamuuntajan virroille pätee seuraava yhtälö:

$$I_p = N_s * I_s \quad (1)$$

Jossa  $I_p$  on ensiövirta,  $N_s$  on toision kierrosluku ja  $I_s$  on toision virta. Ensiön kierrosluku on tässä aina 1, sillä moottorin syöttökaapelia ei kierretä virtamuuntajan rautasydämen ympäri. Virtamuuntajan toisiovirran arvo voidaan laskea myös seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$I_s = \sqrt{I_{m,s}^2 + I_L^2} \quad (2)$$

Jossa  $I_{m,s}$  on magnetointivirta ja  $I_L$  on kuorman ottama virta. Toisiojännitteen kaava perustuu kytkennän sijaispiiriin, joka on esitetty kuvassa 5. Toisiojännitteen  $U_s$  yhtälö voidaan tällöin kirjoittaa seuraavaan muotoon:

$$U_s = R_L I_L = \omega L_{m,s} I_{m,s} \quad (3)$$

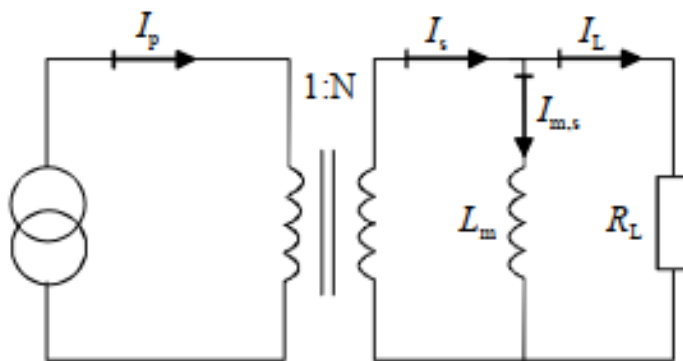
Jossa  $R_L$  on kuorman resistanssi,  $L_{m,s}$  on magnetointi-induktanssi virtamuuntajan toisiossa ja  $\omega$  on kulmataajuus. Kuormalle tulevan tehon  $P_L$  yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$P_L = U_s I_L = \omega L_{m,s} I_{m,s} I_L \quad (4)$$

Magnetointi-induktanssi määritellään suunnitteluvaiheessa, ja se riippuu tekijöistä kuten rautasydämen mitoista, sydämen materiaalin magneettisista ominaisuuksista, vuon tiheydestä sekä toisiokierrosten lukumäärästä. Ilmavälittömän rengaskelan tapauksessa magnetointi-induktanssille pätee seuraava yhtälö:

$$L_{m,s} = \frac{\mu_0 \mu_r A_e N_s^2}{\pi D} \quad (5)$$

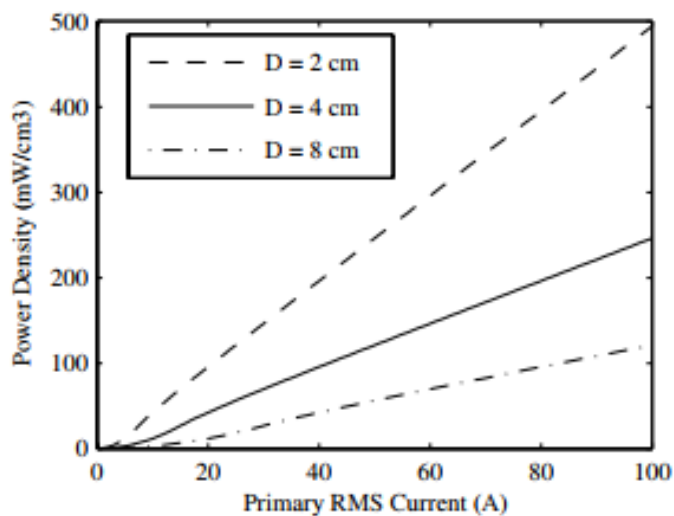
Jossa  $\mu_0$  ja  $\mu_r$  ovat tyhjiön permeabiliteetti ja muuntajan sydänmateriaalin suhteellinen permeabiliteetti,  $A_e$  on sydämen pinta-ala ja  $D$  on halkaisija sydämen rakenteen keskipisteestä vastakkaiselle puolelle rakenteen keskipisteeseen. Kuvassa 6 on esitetty esimerkkiprototyyppi rakennettavasta virtamuuntajasta tehonlähteenä, sekä tälle arvioidut tehon tiheydet ensiövirran tehollisarvon funktiona kuvassa 7. Korkeimmat saavutetut ulostulotehot ensiövirran RMS-arvon funktiona on esitetty kuvassa 8. /7/



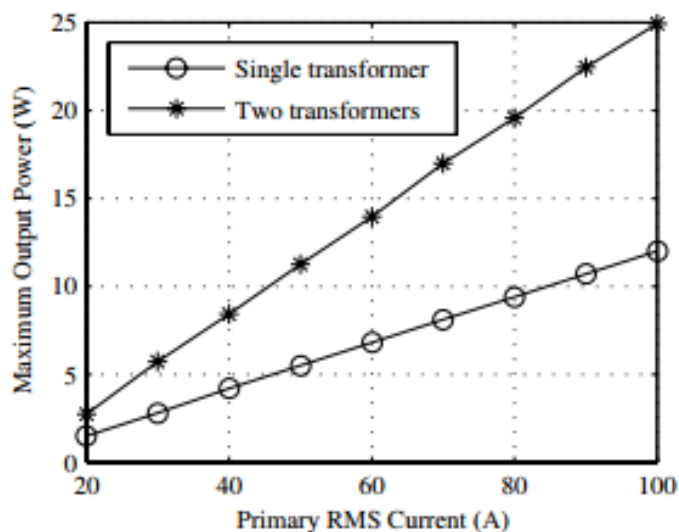
**Kuva 5.** Ideaalisen virtamuuntajan sijaiskytkentä. /7/



**Kuva 6.** Virtamuuntaja asennettuna moottorin vaihejohtimen ympärille. /7/



**Kuva 7.** Virtamuuntajalla toteutetun syötön arvioidut tehon tiheydet ensiövirran funktiona. Kuvaajat kolmelle muuntajakoolle, jossa D on muuntajan halkaisijan pituus keskustasta keskustaan. /7/



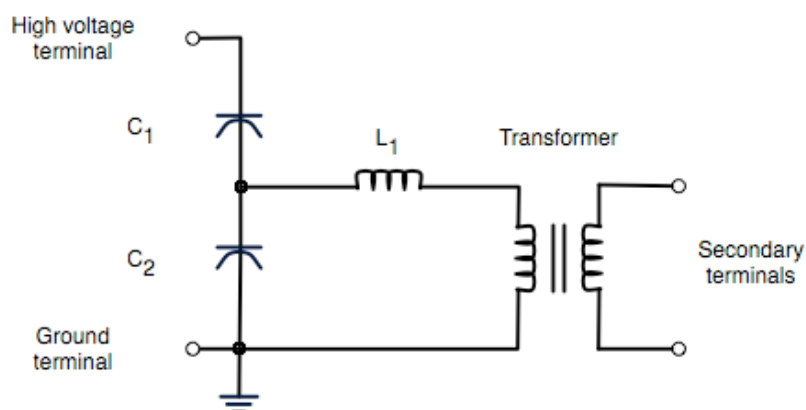
**Kuva 8.** Korkeimmat saavutetut ulostulotehot ensiövirran RMS-arvon funktiona. /7/

Virtamuuntajiin pohjautuvien järjestelmien tarkempi tutkiminen lopetettiin tässä vaiheessa projektia, sillä ne todettiin riittämättömiksi synnyttämään tarpeeksi tehoa kohtuullisilla ensiövirroilla. Kuvan 8 perusteella projektiin tavoiteltu 5 W ulostulo voitaisiin saavuttaa joko noin 50 A ensiövirralla, tai 25 A ensiövirralla, kun käy-

tetään kahta virtamuuntajaa. Virtamuuntajiin pohjautuvat järjestelmät eivät näiden tulosten mukaan sovellu varsinkaan pienempiin moottoreihin, jotka ottavat paljon tätä vähemmän virtaa.

### 3.3 Kapasitiivisesti kytketty jännitemuuntaja (CVT)

Tässä ratkaisussa ulostulopiiriin syöttö tuodaan suoraan moottorin terminaaleilta. CVT:ssä ensimmäisenä on kondensaattoreilla toteutettu jännitteen jakaja, josta tuodaan jännite vielä muuntajalle edelleen pienennettäväksi. Tavalliseen muuntajaan verrattuna CVT tulee halvemmaksi ja vaatii yleensä vähemmän tilaa pienemmän muuntajakoon ansiosta /8/. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaisen CVT:n kytkentäkuva.



**Kuva 9.** Yksinkertaisen kapasitiivisesti kytketyn jännitemuuntajan (CVT) kytkentäkuva. /8/

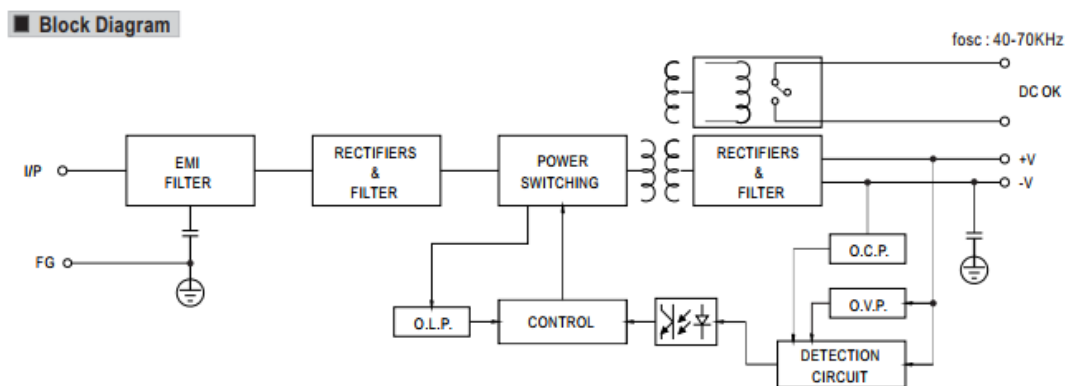
Tämän syöttötavan tapauksessa valittaisiin ensin sopiva muuntaja ja mitoitettaisiin tälle kuvassa 5 näkyvät kondensaattorit C1 ja C2, sekä kela L1, jolla kompensoidaan kondensaattorien reaktanssia. Näiden jälkeen muuntajan toisiopuolelle tulisi suunnitella häiriönsuodatuspiirit, tasasuuntaus sekä regulointi USB-standardin vaatimalle 4,75 V – 5,25 V välille /9/.

### 3.4 Valmis tehonlähde (Mean Well WDR-60-5)

Vaihtoehto, joka valittiin tarkempaan tutkintaan projektissa, oli valmiin tehonlähteen sovittaminen moottorin rinnalle. Tehonlähteeksi valittiin Mean Well WDR-60-5, koska sillä voidaan saavuttaa haluttu ulostulo, sekä tämän sisääntulon jännitealue on hyvin lähellä projektille suunniteltua jännitealuetta. Tässä vaihtoehdossa, kun jännitteen muuntopiiri on rakennettu valmiiksi, täytyy vielä tutkia WDR-60-5:n toimivuutta taajuusmuuttajan ulostuloon kytkettynä. Toimivuutta tullaan tarkastelemaan simuloimalla tehonlähteen rakennetta normaalissa toimintatilanteessa ja taajuusmuuttajan ulostulojännitteellä, sekä vertailemalla näiden tuloksia. Ote työhön valitun tehonlähteen teknisistä tiedoista on esitetty taulukossa 1, sekä laitteen lohkoakaavio kuvassa 10. /10/

**Taulukko 1.** Mean Well WDR-60-5-tehonlähteen tekniset tiedot.

WDR-60-5		
Ulostulo	DC jännite	5 V
	Nimellisvirta	10 A
	Virran säätöalue	0 – 10 A
	Nimellisteho	50 W
	Jännitteen säätöalue	5 – 6 V
Sisääntulo	Jännitealue	180 – 550 Vac / 254 – 780 Vdc
	Taajuusalue	47 – 63 Hz
	Hyötysuhde	83,5% / 400 Vac
	AC virta	0,4A/400 Vac   0,7A/230 Vac
	Sysäysvirta (max)	KYLMÄKÄYNNISTYS 50 A/400 Vac   30 A/230 Vac



**Kuva 10.** Mean Well WDR-60-5-tehonlähteen lohkokaavio.

Mean well WDR-60-5-tehonlähteen soveltuvuutta taajuusmuuttajakäytössä moottorin rinnalla tutkitaan simuloimalla ennen varsinaisia testejä. Simuloinnissa tarkasteluun otetaan laitteen sisääntulopiiri, eli lohkokaaavion osoittamat osuudet "EMI FILTER" sekä "RECTIFIERS & FILTER". Tätä osuutta simuloidaan tavallisella sinimuotoisella jännitteellä, jolla saadaan kuva siitä, miten laite toimii normaalisti, sekä taajuusmuuttajan antamalla PWM-ulostulolla. Laitteen sisääntulopiirin rakenne on saatu selville purkamalla laite ja tarkastelemalla piirilevyä. Luonnos sisääntulopiirin kytkentäkuvasta riittävässä osin, sekä tämän piirikortti on esitetty kuvassa 11.

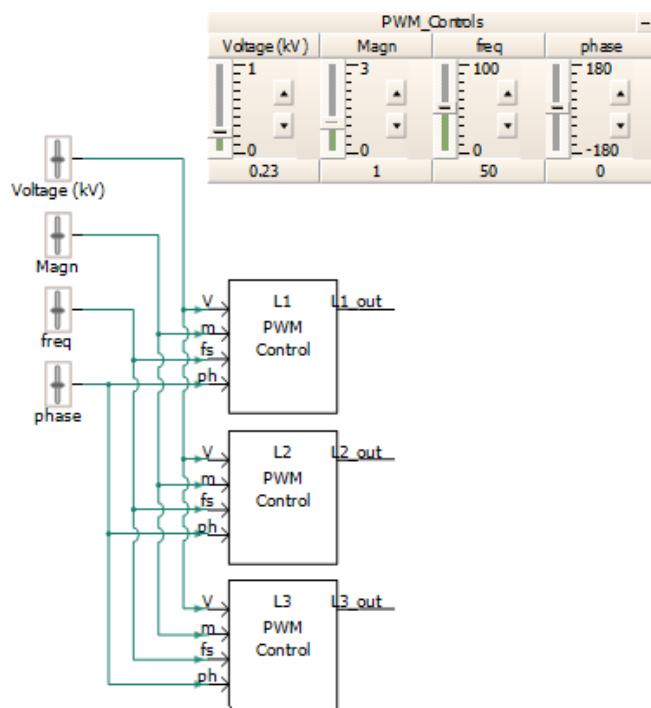


## 4 SIMULOINTI

Sähköjärjestelmän simulointiin käytetään PSCAD 5.0.0-ohjelmistoa, johon saatiin opiskelijalisenssin kokeiluversio työn ajaksi. PSCAD on vuonna 1961 perustetun kanadalaisen Manitoba Hydron kehittämä sähköjärjestelmien simulointityökalu /12/. Seuraavissa kappaleissa esitellään projektissa käytettyjä simulaatiomalleja, niiden toimintaa, sekä saatuja tuloksia.

### 4.1 Taajuusmuuttaja

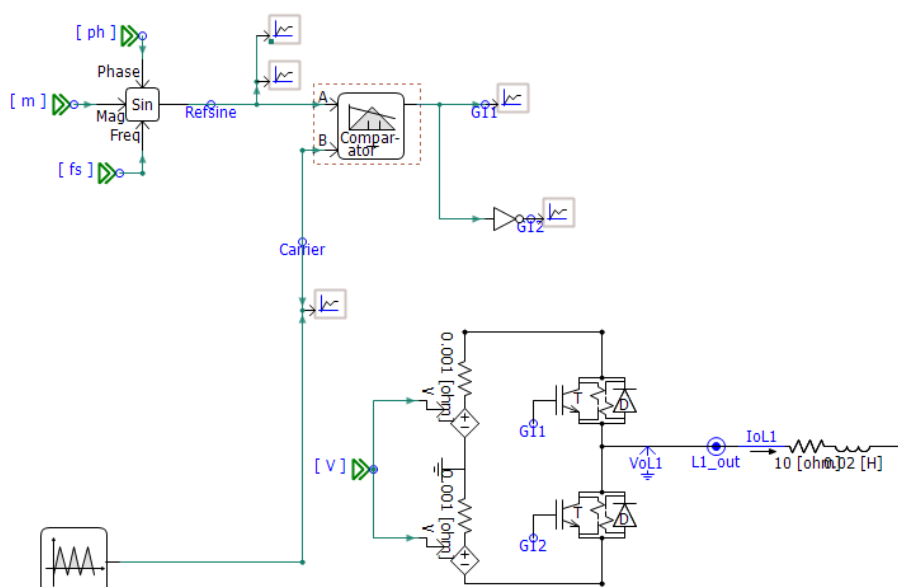
Taajuusmuuttajan ulostulo on simuloitu kolmella PWM-jännitteen ohjausmoduulilla, joita ohjataan yhtä aikaa samoilla säätökomponenteilla. PWM-moduulien säätökomponenteilla ohjataan ulostulojännitettä, sekä kytkentätaajuuden referenssiniaallon suuruutta, taajuutta ja vaihekulmaa. Työssä ei ole simuloitu DTC-signaalia erikseen. Kuvassa 12 on esitetty taajuusmuuttajan simulaatiomalli vaihejännitteiden generointimoduuleilla, sekä näiden säätökomponentit.



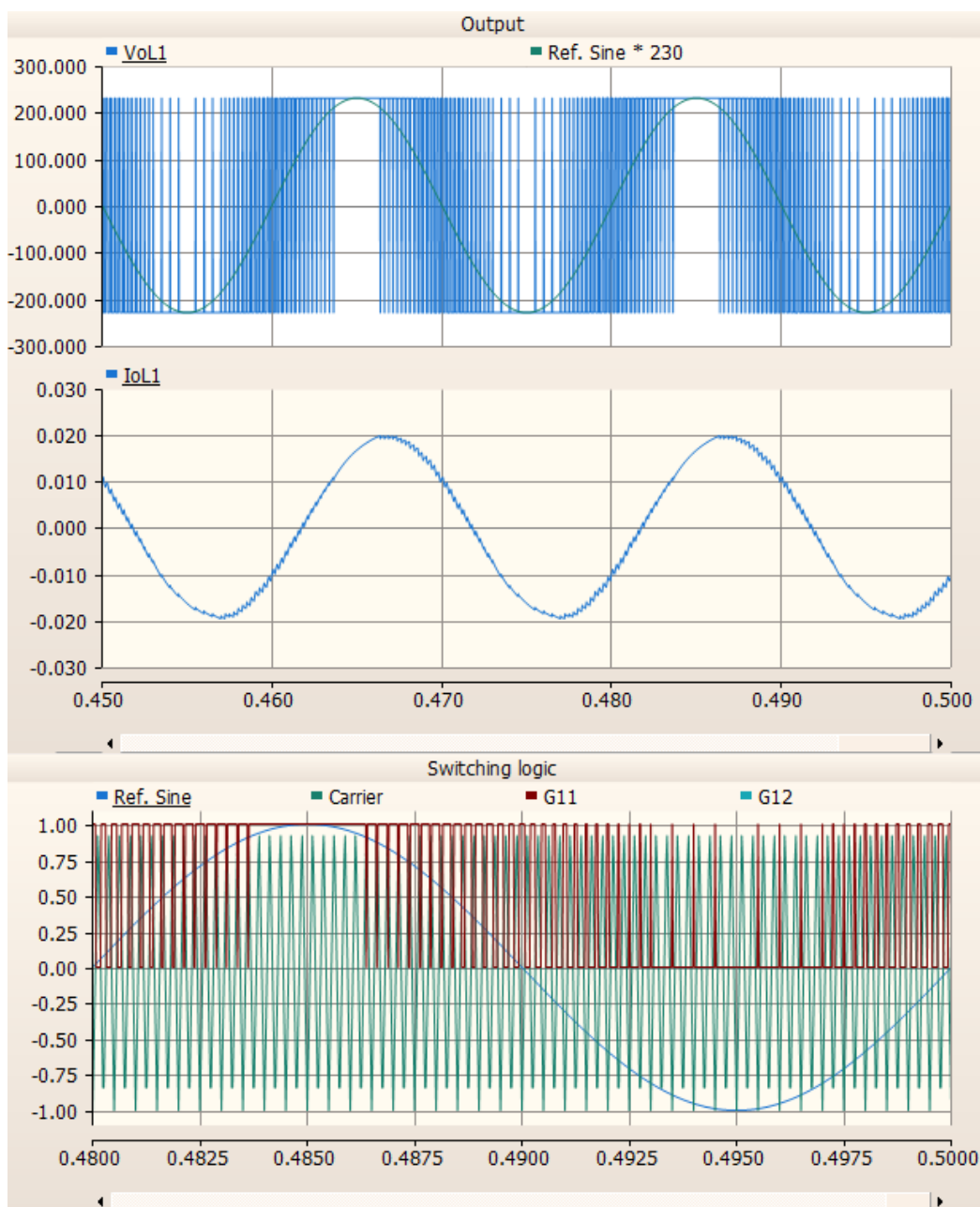
**Kuva 12.** Taajuusmuuttajan simulaatiomalli.



Vaihejännitteiden moduulit koostuvat tasajännitepiiristä, sekä tätä ohjaavasta kytkentälogiikasta, jotka on esitetty kuvassa 13. Kyseinen simulaatio toistuu jokaisessa moduulissa sillä erolla, että jokaisen moduulin referenssiniaalto on  $120^\circ$ :n vaihekulmassa toisiinsa nähden. Kytkentätaajuus ja pulssien leveys saadaan simuloitua 4000 Hz kolmioaallon muotoisella kanta-aallolla, jota vertaillaan referenssiniaaltoon. Kytkentätaajuudeksi valittiin 4000 Hz, koska tällä signaalin aaltomuodot pysyvät vielä suhteellisen selkeinä tarkastella riittävän pitkiä aikavälejä kerrallaan simulaatioissa. Moduulien logiikkaosuus ohjaa tasajännitepiirin transistoreita siten, että ulostulo antaa negatiivisia jännitepulsseja referenssiniaallon arvon ollessa kanta-aaltoa pienempi, ja positiivisia jännitepulsseja referenssiniaallon arvon ollessa kanta-aaltoa suurempi. Kuvan 13 esimerkissä transistori G11 kytkee positiivisia pulsseja ja G12 negatiivisia pulsseja. Transistorit eivät ole milloinkaan molemmat yhtä aikaa johtavassa tilassa, koska tällöin ulostulon jännite olisi 0V. Kuvassa 14 on esitetty tämän mallin tuottama ulostulojännite 230 V pulseina verrattuna saman amplitudin siniaaltoon ja ulostulovirta, sekä logiikassa käytetty 50Hz referenssiniaalto, 4000 Hz kanta-aalto ja G11 -transistorin ohjaussignaali. G12 -transistorin ohjaussignaali on G11 invertoituna.



**Kuva 13.** PWM-jännitteen generointilogiikka.



**Kuva 14.** PWM-generointilogiikan ja ulostulon aaltomuodot.

## 4.2 NTC-termistori

Tehonlähteen sisällä käytetään suodatuspiirissä SCK204R7 -NTC-termistoria alkukäynnistysvirran pienentämiseen. NTC-termistorin resistanssi kasvaa lämpötilan pienentyessä. Tämän simuloimalla pystytään tarkastelemaan NTC:n vaikutusta käynnistysvirtaan eri lämpötiloissa ja resistanssin arvoissa. Resistanssien suhteille pätee seuraava kaava:

$$\frac{R1}{R2} = e^{\beta\left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2}\right)} \quad (6)$$

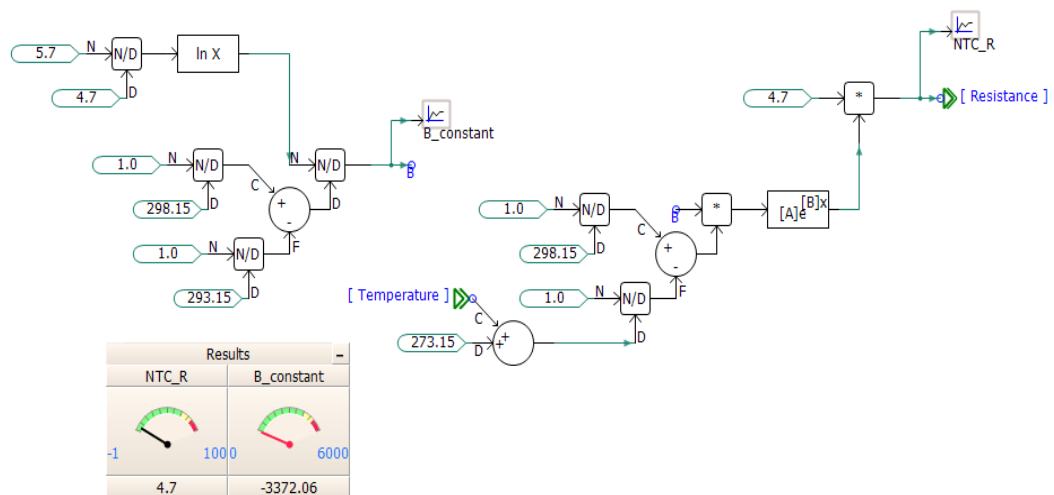
Jossa R1 on resistanssi lämpötilassa T1, R2 on resistanssi lämpötilassa T2 ja  $\beta$  on lämpötilakerroin, joka on NTC-termistorilla negatiivinen. Lämpötilat merkitään laskussa kelvineinä /13/. Kaavasta 6 saadaan johdettua seuraavat kaavat simulaatioon NTC-termistorin resistanssin laskentaan simulaatiossa määritellyssä lämpötilassa.

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R2}{R1}\right)}{\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2}} \quad (7)$$

Jossa R1:n arvona käytetään termistorin kylmän tilan ( $T1=25^{\circ}\text{C}$ ) resistanssia 4,7  $\Omega$ . Termistorin tietolomakkeesta katsotaan R2:n arvo valitussa lämpötilassa T2, joka tässä tapauksessa on noin 5,7  $\Omega$  lämpötilassa 20  $^{\circ}\text{C}$  /14/. Kaavalla 7 lasketaan termistorin lämpötilakerroin, joka tarvitaan kaavassa 8 resistanssin laskentaan annetussa lämpötilassa.

$$R2 = R1 * e^{\beta\left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2}\right)} \quad (8)$$

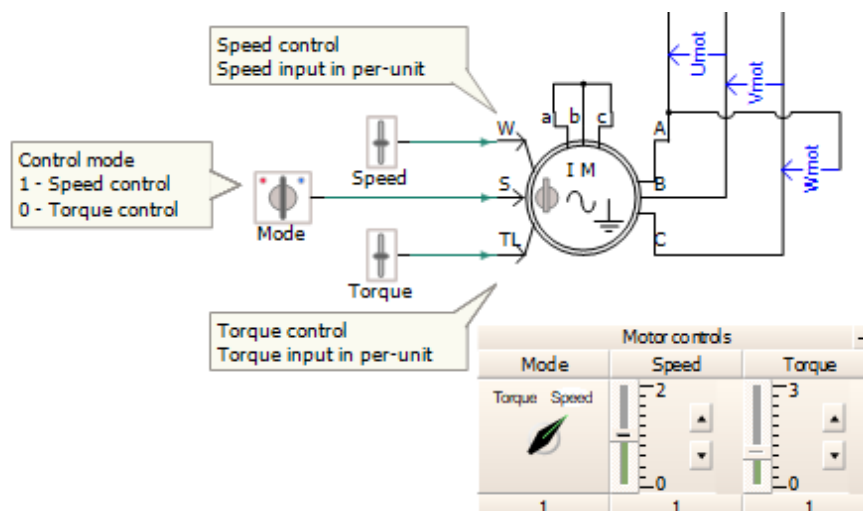
Jossa T2 kuvaa lämpötilaa, jossa termistorin resistanssin arvo halutaan selvittää. Termistorin laskettu resistanssi R2 syötetään simulaatiossa suoraan piiriin säätövastuksen arvoon. Näin laskettuna saadaan NTC:n toiminta-alueelle -40 ..200  $^{\circ}\text{C}$  resistanssin arvot 110,02 ..0,07  $\Omega$ . Resistanssin laskentalogiikka simulaatiossa on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. NTC-termistorin resistanssin laskentalogiikka.

### 4.3 Moottori

Simulaatiossa ja testeissä käytetään tähteen kytkettyä epätahtimoottoria, jota syötetään taajuusmuuttajalla. Simulaation moottori on parametroitu vastaamaan testeissä käytetyn moottorin nimellisarvoja tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi. Kuvassa 16 on esitetty moottori simulaattorissa, sekä tämän ohjaukset ja jännitemittaukset moottorin pääjännitteistä. Taulukossa 2 on esitetty simulaation moottorin parametrit.



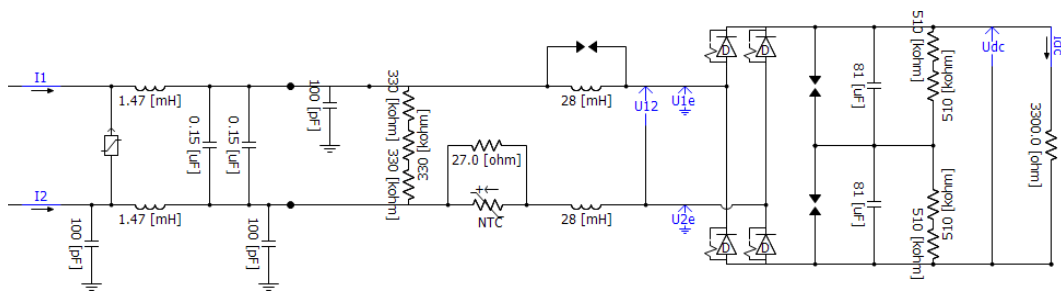
Kuva 16. Simulaatiossa käytetty sähkömoottori.

**Taulukko 2.** Simuloidun moottorin parametrit.

Teho	11kVA
Jännite	690V
Kytkentä	Y
Kulmataajuus	307.67 rad/s

#### 4.4 Tehonlähteen simulaatiomalli

Tehonlähteen sisääntulopiiriä simuloidaan kuvan 17 mukaisesti. Kuvasta nähdään laitteen ottamien virtojen I1 ja I2, pääjännitteen U12, väyläjännitteiden U1e ja U2e, sekä DC-puolen jännitteen Udc ja virran Idc mittausspaikat. Lisäksi piirissä on I1 mittausspaikan kohdalla 4 A:n lasiputkisulake. Piiri on päätetty kytkemällä 3300  $\Omega$  vastus kuormaksi tämän osuuden tarkastelua varten. Vastus on valittu siten, että tasasuuntaajan lopussa teho olisi lähes sama kuin normaalissa käyttötilanteessa tehonlähteen ulostulolla.

**Kuva 17.** WDR-60-5:n sisääntulopiirin simulaatiomalli.

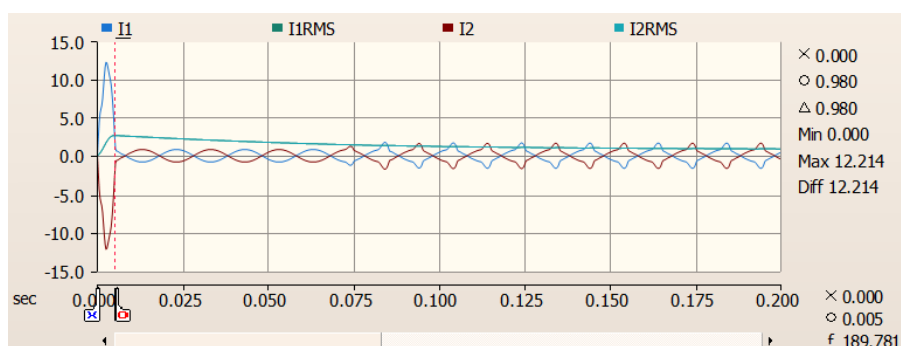
#### 4.5 WDR-60-5 Sini -jännitteellä

Liitteessä (Liite 1) on esitetty sinimuotoisella 400 V pääjännitteellä syötetty tehonlähteen simulaatiokuva. Kuvasta nähdään jännitteiden ja virtojen käyttäytymistä normaalissa toimintatilassa. Näistä voidaan tehdä seuraavia keskeisiä havaintoja:

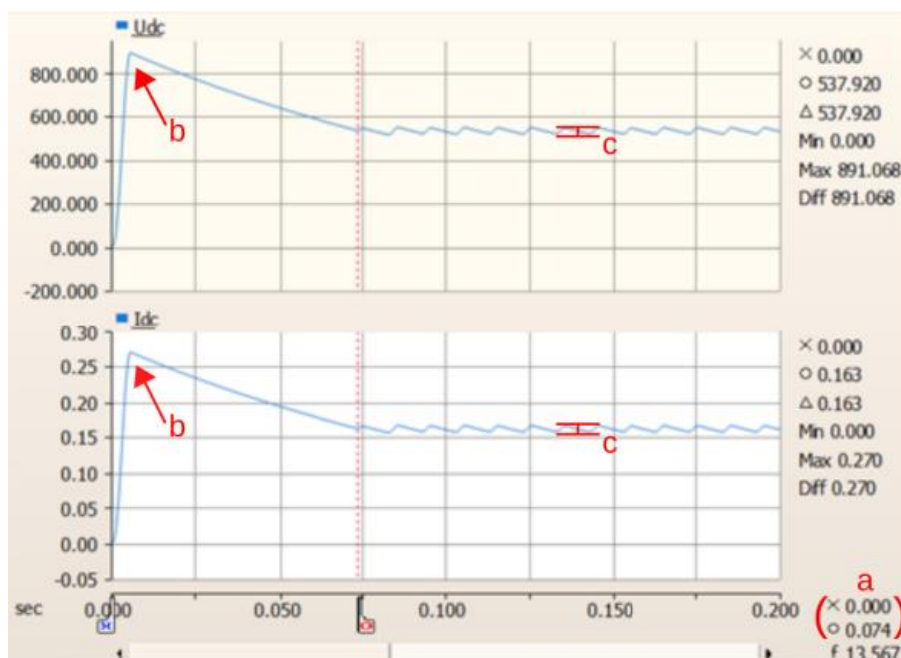
1. Laite ottaa käynnistyessään noin 5 ms kestoisen virtapiikin, jonka huippuarvo on 12,21 A. Tämän jälkeen virran tehollisarvo tasoittuu noin 0,85 A:n suuruiseksi. Laitteen ottama virtapiikki johtuu suodatuspiirin kondensaat-

toreista, joiden latausaikana piirin virta pääsee nousemaan käynnistyksessä korkeammaksi kuin virran tasaannuttua. Tämä on esitetty tarkemmin kuvassa 18.

2. DC-puolella jännitteessä ja virrassa syntyy noin 74 ms kestoinen piikki (a), joiden huippuarvot ovat 891,1 V ja 270 mA (b). Tämän jälkeen jännite ja virta tasaantuvat noin 533 V:n ja 162 mA:n suuruisiksi. Jännitteen ja virran ripplet ovat 29,8 Vp-p ja 9 mA-p (c). Tämä on esitetty tarkemmin kuvassa 19.



Kuva 18. Tehonlähteen ottama virta normaalissa käyttötilassa.

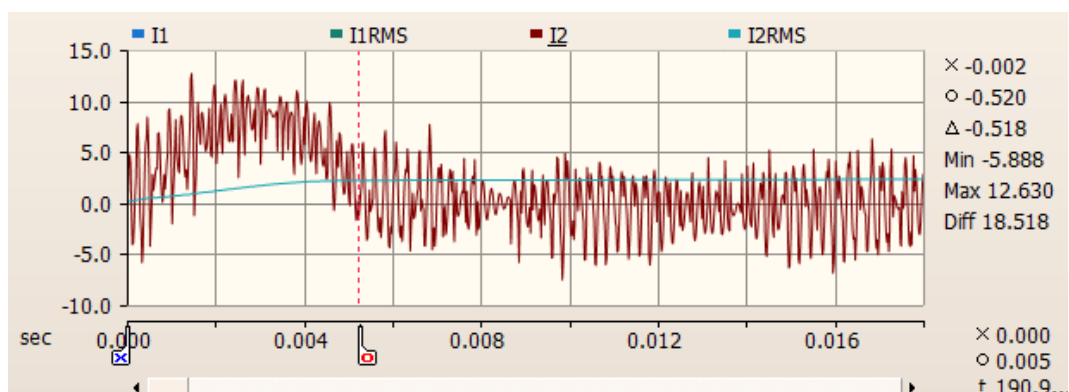


Kuva 19. Sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta normaalissa käyttötilassa.

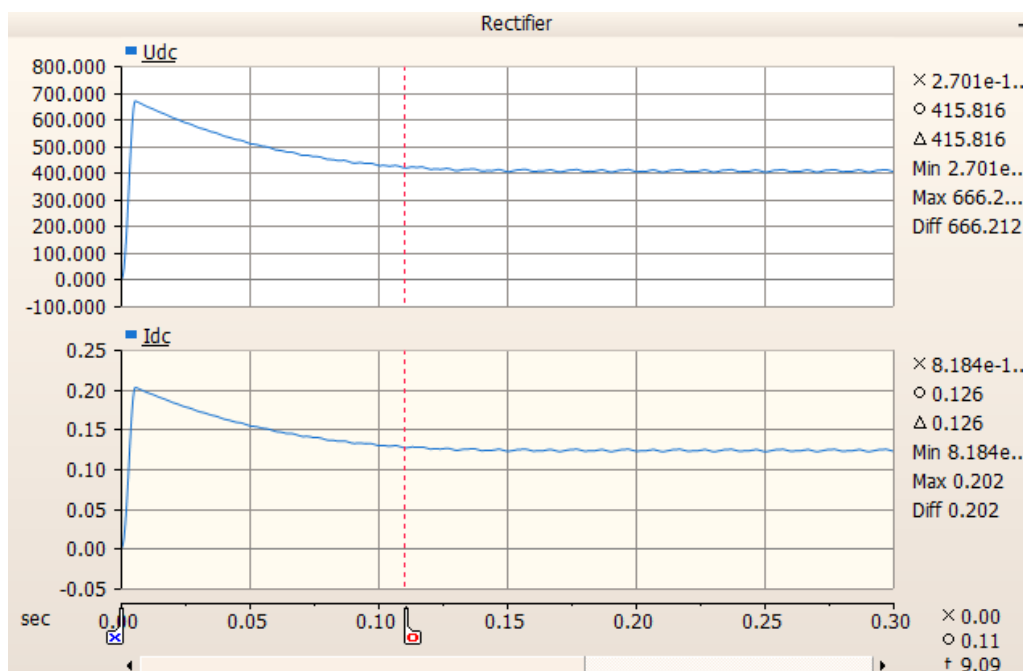
#### 4.6 WDR-60-5 Taajuusmuuttajalla syötettynä

Liitteessä (Liite 2) on esitetty taajuusmuuttajalla syötetyn tehonlähteen simulaatiokuva. Kuvasta nähdään jännitteiden ja virtojen käyttäytymistä PWM-signaalilla. Näistä voidaan tehdä seuraavia havaintoja:

1. Laite ottaa käynnistyessään noin 5 ms kestoisen virtapiikin, jonka huippuarvo on 12,63 A. Tämän jälkeen virran tehollisarvo tasoittuu noin 2,45 A:n suuruiseksi. Virran aaltomuoto pysyy hyvin piikikkäänä. Piikikkyys johtuu PWM-aallon kytkentätaajuudesta, joka on paljon suurempi kuin taajuus jolle suodatuspiiri on mitoitettu. Käynnistysvirran jälkeen virran suurimmat hetkellisarvot ovat noin 0,16 ms pituisia 6,9 A piikkejä. Tämä on esitetty tarkemmin kuvassa 20.
2. DC-puolella jännitteessä ja virrassa syntyy noin 110 ms kestoinen piikki, joiden huippuarvot ovat 666,2 V ja 202 mA. Tämän jälkeen jännite ja virta tasaantuvat noin 405 V:n ja 122 mA:n suuruiseksi. Jännitteen ja virran rippelit ovat 10,0 Vp-p ja 3 mAp-p. Tämä on esitetty tarkemmin kuvassa 21.



**Kuva 20.** Tehonlähteen ottama virta taajuusmuuttajalla syötettynä.



**Kuva 21.** Sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta taajuusmuuttajalla syötettynä.

Tuloksista huomataan, että normaalikäyttötilanteeseen verrattuna laitteen ottama käynnistysvirta ei ole paljon suurempi, mutta tämän jälkeen virta on PWM-syötöllä melkein kolminkertainen. Käynnistystilanteen virtapiikki on molemmissa tapauksissa yhtä pitkä. DC-puolella käynnistyspiikki ottaa enemmän aikaa tasaantua PWM-syötöllä, kuin normaalissa käyttötilanteessa sini -jännitteellä. DC-puolen jännitteet ja virrat ovat PWM-syötöllä vähän pienempiä kuin normaalissa käyttötilanteessa. Ongelmaksi WDR-60-5:lle taajuusmuuttajakäytössä tulevat suuret käynnistysvirrat, joiden syystä pienempien taajuusmuuttajien suojausfunktiot laukeavat. Tästä syystä laitetta pystytään testaamaan alkuperäisessä kunnossa vain isommilla taajuusmuuttajilla, jotka pystyvät syöttämään myös laitteen ottamaa käynnistysvirtaa. Tämä ongelma on syytä ratkaista projektia kehittäessä. Näiden käyttötilanteiden tulokset sekä vertailu on koottu taulukkoon 3.

**Taulukko 3.** Normaalin käyttötilanteen ja PWM-syötetyn tilanteen mittaustulokset ja vertailu.

		Normaali käyttötilanne	PWM-syöttö	Muutos
	Käynnistysvirran kesto	5 ms	5 ms	±0 ms



Sisääntulo- virta	Käynnistysvirran huippuarvo	12,21 A	12,63 A	+0,42 A
	Tasoittunut virta (RMS)	0,85 A	2,45 A	+1,6 A
DC-puoli	Käynnistyspiikin kesto	74 ms	110 ms	+36 ms
	Jännitteen huippuarvo	891,1 V	666,2 V	-224.9 V
	Tasoittunut jännite	533 V	405 V	-128 V
	Jännitteen ripple	29,8 Vp-p	10 Vp-p	-19,8 Vp-p
	Virran huippuarvo	270 mA	202 mA	-68 mA
	Tasoittunut virta	162 mA	122 mA	-40 mA
	Virran ripple	9 mAp-p	3 mAp-p	-6 mAp-p

#### 4.7 WDR-60-5 Moottorin rinnalla

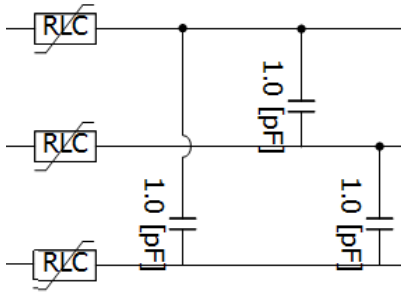
Liitteessä (Liite 3) on esitetty tehonlähteen simulaatiokuva taajuusmuuttajalla syötettynä, moottorin rinnalla. Kuvasta nähdään jännitteiden ja virtojen käyttäytymistä PWM-signaalilla, kun laite on kytkettynä moottorin rinnalle. Näistä voidaan tehdä seuraavia havaintoja:

1. Laite ottaa käynnistyessään noin 5 ms kestoisen virtapiikin, jonka huippuarvo on 12,62 A. Tämän jälkeen virran tehollisarvo tasoittuu noin 2,45 A:n suuruiseksi. Virran aaltomuoto pysyy hyvin piikikkäänä. Käynnistysvirran jälkeen virran suurimmat hetkellisarvot ovat noin 0,16 ms pituisia 6,7 A piikkejä. Tulokset ovat lähes samat kuin ilman rinnalla olevaa moottoria.
2. DC-puolella jännitteessä ja virrassa syntyy noin 110 ms kestoisen piikki, joiden huippuarvot ovat 665,9 V ja 202 mA. Tämän jälkeen jännite ja virta tasaantuvat noin 403 V:n ja 123 mA:n suuruiseksi. Jännitteen ja virran ripplet ovat 10,1 Vp-p ja 3 mAp-p. Tulokset ovat lähes samat kuin ilman rinnalla olevaa moottoria.

Tässä simulaatiossa tarkastellaan vielä moottorikaapelin vaikutusta tuloksiin lisäämällä taajuusmuuttajan ja moottorin välille RLC-komponentteja. Näiden komponenttien arvot ovat arvioituja summia kymmenen metrin pituiselle kaapelille. Moottorikaapeli on simuloitu kuvan 22 mukaisesti. Simulaatiomallissa johtimen resistanssina on käytetty 87,7 mΩ, induktanssina 0,35 mΩ ja johtimien välisinä kapasitansseina 1 pF. Nämä arvot perustuvat kuvassa 23 esitetyn taulukon arvoihin

4x2,5 kokoisille kuparijohtimille. Moottorikaapelin vaikutuksena tehonlähteessä mitattuihin suureisiin huomataan seuraavat muutokset:

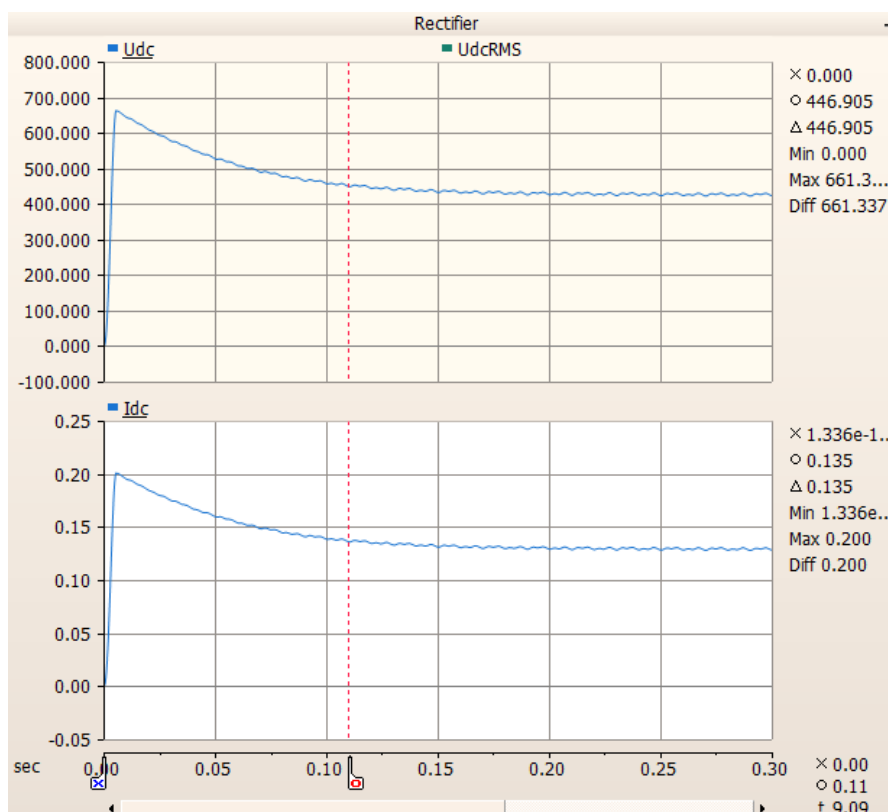
1. Laite ottaa nyt käynnistyessä 12,03 A virtapiikin. Tämän jälkeen virran tehollisarvo tasoittuu 2,69 A:n suuruiseksi. Käynnistysvirran jälkeen suurimmat virtapiikit ovat noin 7,7 A.
2. DC-puolella jännitteessä ja virrassa syntyy noin 150 ms kestoinen piikki, joiden huippuarvot ovat 661,3 V ja 200 mA. Tämän jälkeen jännite ja virta tasoittuvat noin 423 V:n ja 128 mA:n suuruiseksi. Jännitteen ja virran ripplet ovat 8,4 V<sub>p-p</sub> ja 3 mA<sub>p-p</sub>. Tämä on esitetty tarkemmin kuvassa 24.



**Kuva 22.** Moottorikaapelia kuvaava simulaatiomalli.

Johtimien poikkipinta A/mm <sup>2</sup>	Kupari			Alumiini		
	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z
4 × 1,5	14,620	0,115	14,620			
4 × 2,5	8,770	0,110	8,770			
4 × 4	5,480	0,107	5,480			
4 × 6	3,660	0,100	3,660			
4 × 10	2,244	0,094	2,246			
4 × 16	1,415	0,090	1,418	2,324	0,090	2,326
4 × 25	0,898	0,086	0,902	1,489	0,086	1,492
4 × 35	0,652	0,083	0,657	1,086	0,083	1,089
4 × 50	0,482	0,083	0,489	0,796	0,083	0,800
4 × 70	0,336	0,082	0,346	0,551	0,082	0,557
4 × 95	0,244	0,082	0,257	0,398	0,082	0,406
4 × 120	0,195	0,080	0,211	0,316	0,080	0,326
4 × 150	0,155	0,080	0,174	0,258	0,080	0,270
4 × 185	0,125	0,080	0,148	0,207	0,080	0,222
4 × 240	0,095	0,079	0,124	0,162	0,079	0,180
4 × 300	0,078	0,079	0,111	0,133	0,079	0,155

**Kuva 23.** Kaapelien likimääräisiä impedansseja johdinlämpötilassa 80 °C (Ω/km).  
/15/



**Kuva 24.** Sisääntulopiirin DC-puolen jännite ja virta taajuusmuuttajalla syötettynä, moottorin rinnalla ja moottorikaapeli simuloituna.

Tuloksista huomataan, että moottorin lisäys simulaatioon tehonlähteen rinnalle ei juurikaan vaikuta tehonlähteessä mitattuihin suureisiin. Moottorikaapelin simulointi taas synnyttää tuloksiin pieniä muutoksia. Moottorikaapelin lisäys muun muassa pienentää vähän laitteen ottamaa käynnistysvirtaa, joka on odotettua, sillä laitteen eteen tulee uusia impedansseja. Samasta syystä DC-puolella käynnistyspiikit ovat vähän pienemmät kuin ilman simuloitua moottorikaapelia. Johtimien väliset kapasitanssit taas pidentävät DC-puolella käynnistyspiikkien tasoittumisaikaa. Taulukkoon 4 on koottu mittaustulokset moottorin rinnalle kytketystä PWM-jännitteellä syötetystä tehonlähteestä ilman moottorikaapelia ja moottorikaapelin kanssa, sekä vertailua näiden tapauksien välillä.

**Taulukko 4.** PWM-syötetyn tehonlähteen mittaustulokset moottorin rinnalla ilman moottorikaapelia ja moottorikaapelin kanssa.

		Ilman moottorikaapelia	Moottorikaapelilla	Muutos
Sisääntulovirta	Käynnistysvirran kesto	5 ms	5 ms	±0 ms
	Käynnistysvirran huippuarvo	12,62 A	12,03 A	-0,59 A
	Tasoittunut virta (RMS)	2,45 A	2,69 A	+0,24 A
DC-puoli	Käynnistyspiikin kesto	110 ms	150 ms	+40 ms
	Jännitteen huippuarvo	665,9 V	661,3 V	-4,6 V
	Tasoittunut jännite	403 V	423 V	+20 V
	Jännitteen ripple	10,1 Vp-p	8,4 Vp-p	-1,7 Vp-p
	Virran huippuarvo	202 mA	200 mA	-2 mA
	Tasoittunut virta	123 mA	128 mA	-5 mA
	Virran ripple	3 mAp-p	3 mAp-p	±0 mAp-p

## 5 TESTAAMINEN

Testaamisvaiheessa tehtiin simulaatioiden mukaiset kytkennät Vaasan ABB:n moottoritehtaan testikentällä, ja tarkasteltiin laitteen toimintaa. Testeissä käytettiin kahta tehonlähdettä, joista toinen oli täysin tehdaskunnossa, ja toisessa oli tuotu johtimet ulos sisääntulopiirin tasasuuntaajalta. Jälkimmäisellä tehonlähteellä oli tarkoitus varmistaa simulaatiomallilla saatujen DC-puolen tulosten oikeellisuus. Testeissä käytetty taajuusmuuttaja oli ABB:n ACS880-01 (29 kVA), jolla syötettiin tähteen kytkettyä moottoria skalaarisäädöllä. Taajuusmuuttajan tekniset tiedot on esitetty taulukossa 5, sekä taajuusmuuttaja kuvassa 25.

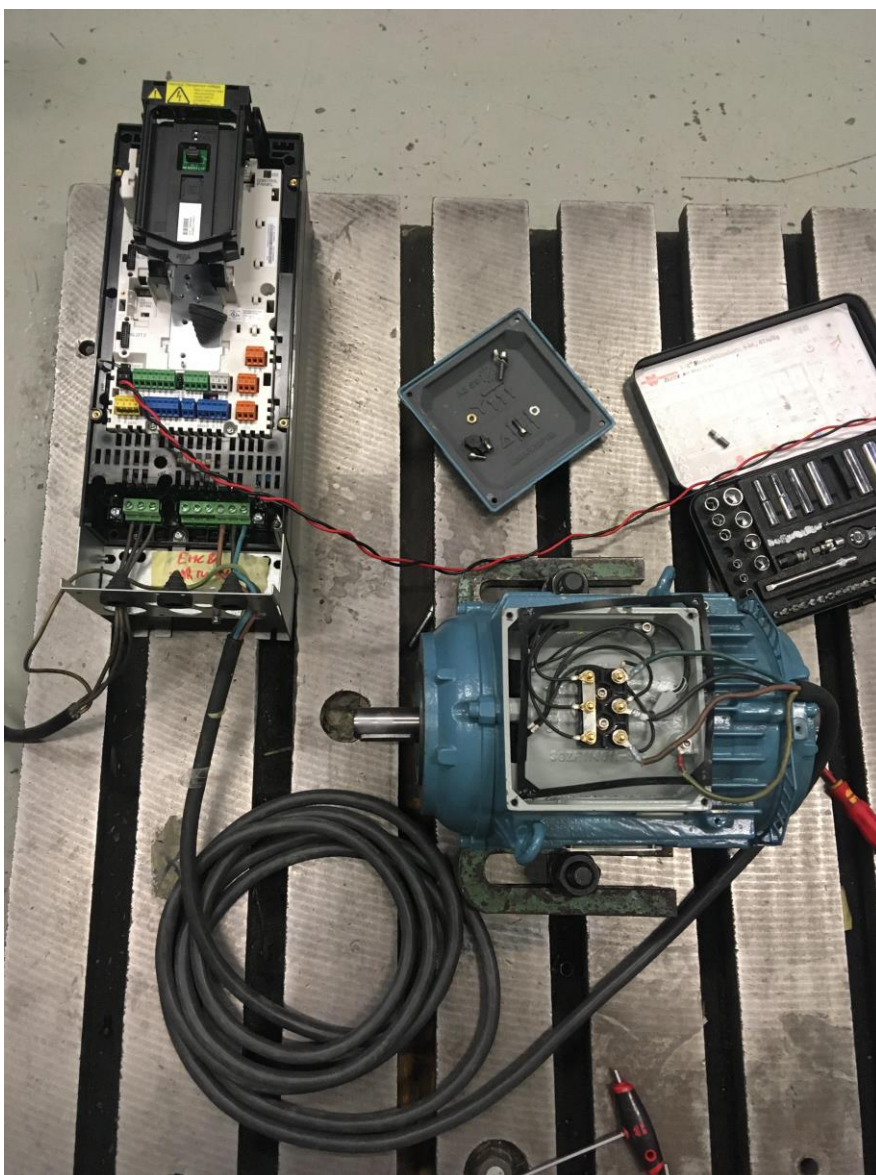
**Taulukko 5.** Testeissä käytetyn taajuusmuuttajan tekniset tiedot.

		ABB ACS880
Pn		18,5 kW
Sisääntulo	U1	400 V
	I1	34 A
	f1	50 / 60 Hz
Ulostulo	U2	3~ 0...U1
	I2	34 A
	f2	0-500 Hz



**Kuva 25.** ABB ACS880-01 -taajuusmuuttaja

Ensimmäisessä testissä laitteen normaali toiminta varmistettiin kytkemällä se tavalliseen yksivaiheiseen pistorasiaan. Tämän jälkeen tehonlähdeä testattiin taajuusmuuttajalla syötettynä moottorin rinnalla. Taajuusmuuttajalla syötettynä tehonlähteen eteen lisättiin vielä sulakkeet suojaamaan laitteen sisäistä sulaketta. Tehonlähteen ulostuloon kytkettiin 3300  $\Omega$  vastus, jonka yli mitattiin jännitettä. Taajuusmuuttajan ja moottorin kytkennät on esitetty kuvassa 26, sekä tehonlähteen kytkentä ensimmäisessä taajuusmuuttajalla syötetyssä testissä kuvassa 27.



**Kuva 26.** Taajuusmuuttajan ja moottorin kytkentä.



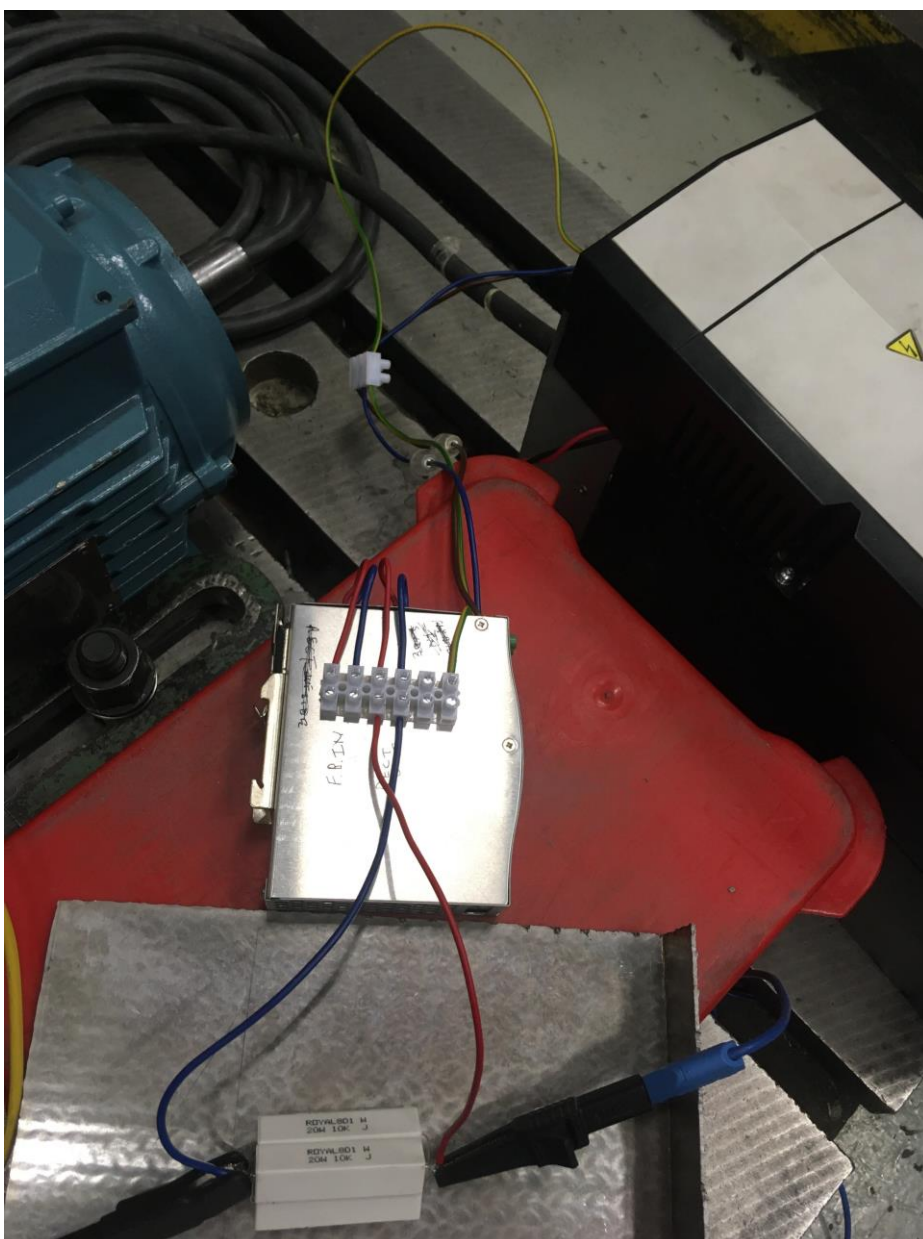
**Kuva 27.** Tehonlähteen kytkentä ensimmäisessä taajuusmuuttajalla syötetyssä testissä.

Tässä testissä tehonlähteen edessä käytettiin automaattisulaketta. Tehonlähteen sisäinen sulake paloi heti, ja automaattisulakkeesta alkoi nousemaan savua. Automaattisulakkeen palamiselle todennäköisin syy on se, että se valittiin laitteen ottaman virran tasaisen tilan tehollisarvojen mukaan huomioimatta tarkemmin huippuarvoja. Normaalisissa käyttötilanteissa laitteen ottaman virran suurimmat huippuarvot ovat noin 1,6 A, kun taas taajuusmuuttajasignaalilla 7,7 A, mutta paljon lyhyempikestoisina. Tämän jälkeen tehonlähteeseen vaihdettiin sulake, sekä



automaattisulake vaihdettiin moottorinkäynnistimeen, sillä oletuksella, että se kestäisi taajuusmuuttajan signaalia paremmin. Testin tuloksena laite antoi 5 V ulostuloa noin kolmen sekunnin ajan, ennen kuin moottorinkäynnistin katkaisi syötön. Tämä johtuu todennäköisesti samasta syystä, miksi myöskään automaattisulake ei toiminut, vaikka tässä tapauksessa moottorinkäynnistin käsitteli PWM-jännitettä automaattisulaketta paremmin.

Viimeisissä testeissä tehonlähdettä syötettiin suoraan taajuusmuuttajalla, käyttäen tehonlähteen edessä keraamisia 4 A sulakkeita kummallekin syöttökaapelille. Tässä testissä käytettiin tehonlähdettä, jonka sisääntulopiirin DC-puolelta oli tuotu johtimet ulos laitteesta sisääntulopiirin mittaustulosten tarkastelua varten. Tästä kytkennästä mitataan oskilloskoopilla sisääntulovirta (simulaatiomallin merkinnoista I1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite ( $U_{dc}$ ). Kuvassa 28 on esitetty tämä kytkentä ilman oskilloskoopin mitta-antureita.



**Kuva 28.** Muokatun tehonlähteen testauksen kytkentäkuva (Sisääntulopiirin DC-puolen testaus. Simulaatiomallia vastaava kytkentä).

Kuvassa kytkentärیمان kytkentä on toteutettu siten, että sisääntulopiirin DC-puolta voidaan tarkastella kuvan mukaisessa tilanteessa, tai sisääntulopiiri voidaan kytkeä takaisin laitteen muuhun piiriin kytkemällä johtimet viereisiin liittimiin. DC-puolen testeissä saatiin mitattua yleismittarilla 534 V jännitettä käynnis-

tyksen yhteydessä ennen kuin laitteen ulkoinen sulake paloi. Koko laitteen testeissä keraamisilla sulakkeilla laite antoi taas hyvin lyhyen ajan 5 V ulostulossa, mutta poltti sitten ulkoisen sulakkeen.

Ulkoisen sulakkeen palamiselle voidaan tässä hakea selitystä käytettyjen sulakkeiden tietolehdistä. Kuvassa 29 on esitetty taulukoituna sulakevalmistajan ilmoittamat sulamisajat nimellisvirran eri kertoimilla. Simulaation antamien tuloksien perusteella 5 ms kestoisen käynnistyksen 12 A virtapiikki ei pitäisi vielä polttaa sulaketta, mutta tätä seuraavat virtapiikit ovat voineet tämän aiheuttaa. Simulaatiotulosten mukaan käynnistysvirtapiikin jälkeiset virran huippuarvot asettuvat sulakkeen nimellisvirran kertoimien 1,5 ja 2 välille.

**$I_N$  - t Verhalten /  $I_N$  - t characteristics:**

Bemessungsstrom-Faktor / Rated current factor	Schmelzzeit / Melting time:	
	100 mA — 25 A	20 A — 25 A
$1,15 \cdot I_N$	$t_{\text{min}}$	80 min
	$t_{\text{max}}$	-
$1,5 \cdot I_N$	$t_{\text{min}}$	0
	$t_{\text{max}}$	30 min
$2 \cdot I_N$	$t_{\text{min}}$	0
	$t_{\text{max}}$	3 s
$10 \cdot I_N$	$t_{\text{min}}$	0
	$t_{\text{max}}$	15 ms

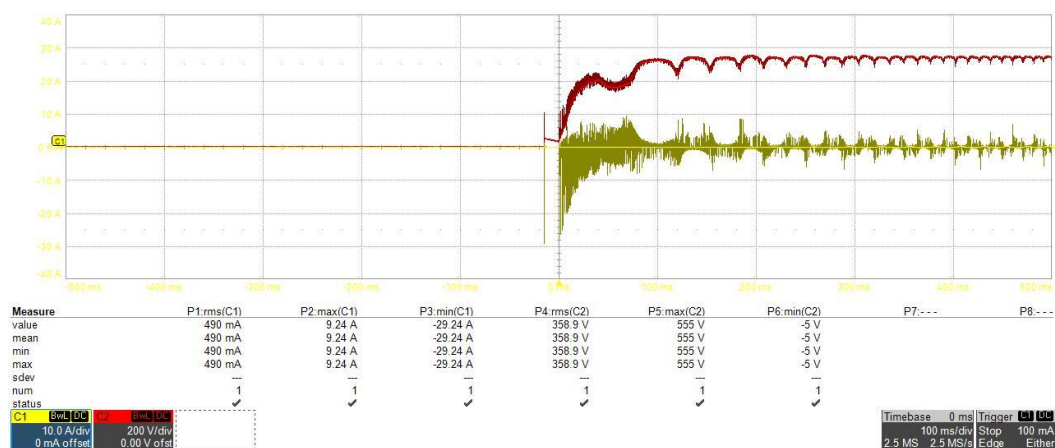
**Kuva 29.** Testeissä käytettyjen ulkoisten sulakkeiden sulamisajat. /16/

## 6 ANALYYSI

Tässä luvussa tarkastellaan oskilloskoopin mittaustuloksia ja verrataan niitä simuloituihin tuloksiin. Mittauksilla perustellaan myös todellisen laitteen käyttäytymistä testien aikana. Testeissä on käytetty Teledyne Lecroy HDO6054 -oskilloskooppia.

### 6.1 Skalaarisäädön tulokset

Oskilloskooppi kuvissa on mitattu WDR-60-5:n ottama virta (keltainen, I1, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, Udc, C2). Tarkastellaan ensin kuvassa 30 esitettyä mittausta 500 ms aikajaksolta.



**Kuva 30.** Skalaarisäädöllä syötetyn WDR-60-5:n sisääntulovirta (keltainen, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, C2) 500 ms ajalta.

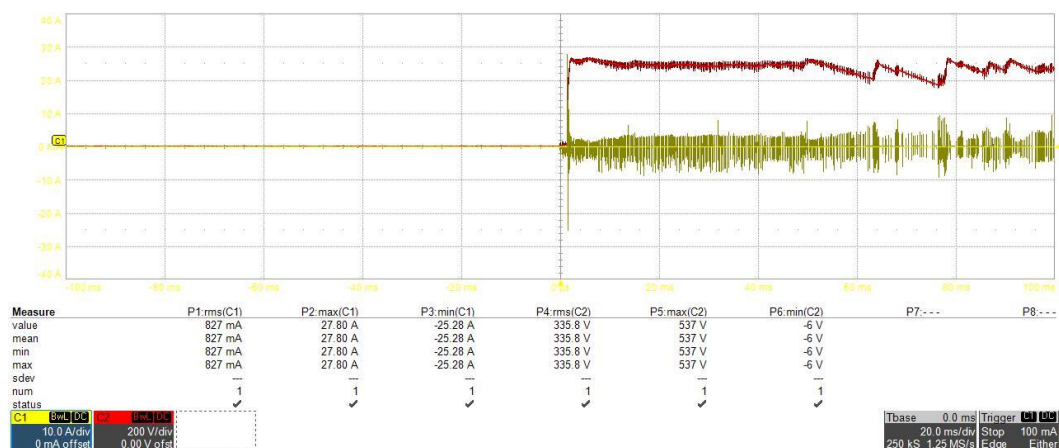
Kuvassa 30 ajan resoluutio on 100 ms / ruutu, jännitteellä 200 V / ruutu ja virralla 10 A / ruutu. Mittauksien aikaisissa testeissä on käytetty 4500 Hz kyntätaajuutta. Tässä testissä taajuusmuuttajalla käytettiin 0,5 s kiihdytsramppia, josta johtuu ensimmäisen jännitejakson pitkä muoto, sekä muodon hiljattainen pienentyminen. Simulaatioon verraten tästä mittauksesta puuttuu jännitteen piikki käynnistyessä. Tämä johtuu luultavasti siitä, että simulaatiossa ei ole huomioitu kiihdytsramppia, vaan piirille on syötetty heti täyttä signaalia. Mittauksissa arvo, johon jännite hiljalleen tasaantuu, on 555 V, joka on kyseisen tilanteen simulaatiotulok-

sia noin 130 V suurempi, mutta samassa suuruusluokassa kuin normaalilla käyttötilanteella. Tämän perusteella voidaan päätellä, että jännite on kunnossa tässä kohtaa piiriä.

Tehonlähteen ottama virta on mitattu simulaatiokuvasta nähden I1:n mittauskohdasta. Otetaan huomioon, että työssä esitetyt virtojen kuvaajat ovat I2:n kuvaajia, joka on simulaation mukaan lähes sama kuin I1 invertoituna. Tämän mittauksen mukaan käynnistysvirtasysäyksen suurin arvo on noin 29,2A, joka on yli kaksinkertainen simulaation esittämään kytkentävirtaan verrattuna. Tämä selittää, miksi pienemmät taajuusmuuttajat laukaisivat muissa testeissä suojauksen heti käynnistyksessä. Aikajakson loppupuolella nähdään tasaantuneempaa virtaa, jonka huomataan olevan piikikästä kuten simulaatiossakin. Tasaantuneen virran aaltomuoto ja suurimmat piikit näyttävät olevan hyvin lähellä simulaation tuloksia.

## **6.2 DTC:n tulokset**

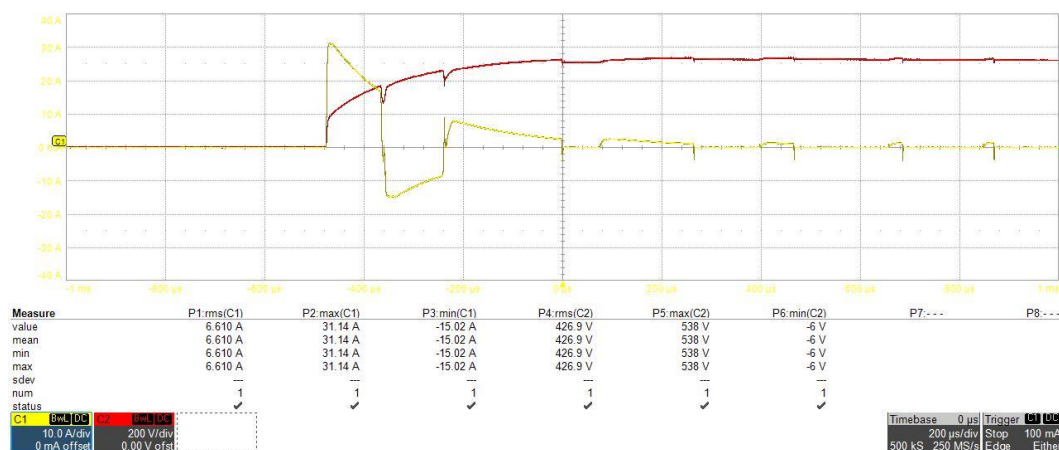
Toistetaan samat mittaukset DTC-säädöllä. Kuvassa 31 on esitetty DTC:llä syötetyn tehonlähteen sisääntulovirta ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite samalla tavalla kuin aiemmassa kappaleessa. Tällä kertaa kuvassa ajan resoluutio on 20 ms / ruutu.



**Kuva 31.** DTC:llä syötetyn WDR-60-5:n sisääntulovirta (keltainen, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, C2) 100 ms ajalta.

DTC:llä huomataan sisääntulopiirin DC-puolen jännitteen nousevan nyt paljon nopeammin oloarvoonsa, jossa se myös pysyy melko tasaisesti. Aikajakson loppupuolella havaittavat jännitteen muutokset johtuvat luultavasti aktiivisen kytkentäkombinaation muutoksista moottoria kiihdyttäessä. Kiihdytysrampin aika on tässäkin tapauksessa sama 0,5 s. DC-puolen jännite poikkeaa taas vähän PWM-signaalilla simuloituista tuloksista, mutta on hyvin lähellä normaalin käyttötilanteen simulaatiota sekä skalaarisäädöllä mitattuja tuloksia. Näillä perusteilla voitaisiin olettaa jännitteen olevan kunnossa tässä kohtaa piiriä.

Tehonlähteen ottama virta tasoittuu myös DTC:llä paljon nopeammin, kuin skalaarisäädön tuloksissa. Sisääntulovirrassa nähdään ihan alussa lyhyitä korkeita, noin 27,8 A piikkejä, mutta nämä tasaantuvat tasaiseen tilaan nopeasti. Mittauksissa tasaantuneen tilan virrat ovat suurimmaksi osaksi alle 5 A, mutta suurimmat piikit ovat lähes 10 A. Kuvassa 32 on esitetty DTC-säädöllä mitattu WDR-60-5:n ottama käynnistysvirta, tarkennettuna ensimmäisiin pulsseihin. Ajan resoluutio on 200  $\mu$ s / ruutu. Tästä huomataan, että DTC:llä ja lyhyellä kiihdytysrampilla WDR-60-5 ottaa suuria virtoja vain kahden 120  $\mu$ s pituisen pulssin verran. Tämän mittauksen mukaan käynnistysvirran huippuarvo on noin 31,1 A, ja toisen pulssin huippuarvo on noin 15 A.



**Kuva 32.** DTC:llä syötetyn WDR-60-5:n sisääntulovirta (keltainen, C1) ja sisääntulopiirin DC-puolen jännite (punainen, C2) 1 ms ajalta. Käynnistysvirtasysäys.

### 6.3 Loppupäätelmät

Mittauksista huomataan molemmilla säädöillä sisääntulopiirin DC-puolen jännitteen asettuvan samoihin arvoihin, kuin normaalissa käyttötilanteessa. Tästä voidaan päätellä, että jännitteen puolesta WDR-60-5 voisi toimia taajuusmuuttajakäytöllä. Oletus on, että jos tässä kohtaa signaali näyttää samalta taajuusmuuttajasyötöllä kuin normaalissa käyttötilanteessakin, pitäisi tehonlähteen toimia tarkoituksen mukaisesti kytkettäessä se tarkastelu osuudelta takaisin muuhun piiriin.

Tämänhetkisessä tilassa WDR-60-5:n ongelma moottoriin kytkettävänä 5 V tehonlähteenä on sen ottamat suuret sisääntulovirrat. Varsinkin tässä nähtyjen 30 A käynnistysvirtapiikkien takia alkuperäisessä kunnossa ei ole mitään mahdollisuutta käyttää tätä tehonlähdettä pienemmissä taajuusmuuttajissa. Taajuusmuuttajien suojauskien lisäksi tosin nämä virrat polttavat myös WDR-60-5:n sisäisen sulakkeen. Jotta WDR-60-5:n saisi toimimaan kaikkiin moottoreihin sopivana 5 V ulostulona, täytyisi tämän sisääntulopiiri suunnitella uudelleen siten, että se ottaisi vähemmän virtaa korkeataajuisella syötöllä. Tätä aihetta käsitellään enemmän kehitysideoissa.

## 7 KEHITYSIDEOITA

Tässä luvussa käydään läpi vaihtoehtoja projektin jatkamiselle ja kehittämiseksi. Ideat käsittelevät joko tässä käytetyn tehonlähteen muokkaamista, tai vaihtoehdoisen tehonlähteen tutkimista ja testaamista. Tehonlähteen muokkaaminen vaatisi todennäköisesti yhteistyötä laitteen valmistajan kanssa, jossa laitteen valmistajaa pyydetäisiin valmistamaan laitetta uudella sisääntulopiirillä, jonka jälkeen tämä voitaisiin tilata ja tehdä testit uudelleen. Kokonaan toisen tehonlähteen tapauksessa tämän opinnäytetyön kaltaiset simulaatiot sekä testit tulisi toistaa toisella laitteella. Seuraavissa kappaleissa käydään näitä vaihtoehtoja tarkemmin läpi.

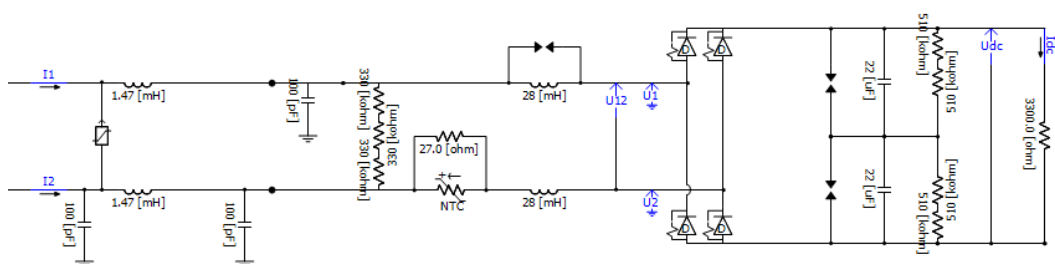
### 7.1 Suodatuspiirin uudelleenmitoitus korkeille taajuuksille

Jotta työssä käytettyä tehonlähdettä voitaisiin käyttää taajuusmuuttajan syötöllä, tulisi siihen suunnitella suodatuspiiri uudelleen korkeille taajuuksille. Laitteen tutkinta aloitettiin sillä oletuksella, että sitä voitaisiin syöttää taajuusmuuttajalla, kun sen ulostulo simuloi 50 Hz sinimuotoista jännitettä. Testien jälkeen kuitenkin todettiin, että tämän sijasta laitteen syöttötaajuutena toimii taajuusmuuttajan kytkentätaajuus, joka on tyypillisesti laitteesta riippuen 1 kHz-16 kHz. Sisääntulopiirin uudelleenmitoituksessa suurimman vaikutuksen tuloksiin antaa kondensaattorit. Myös NTC-termistorin vastusarvon muuttamisen huomattiin pienentävän käynnistysvirtaa melko hyvin.

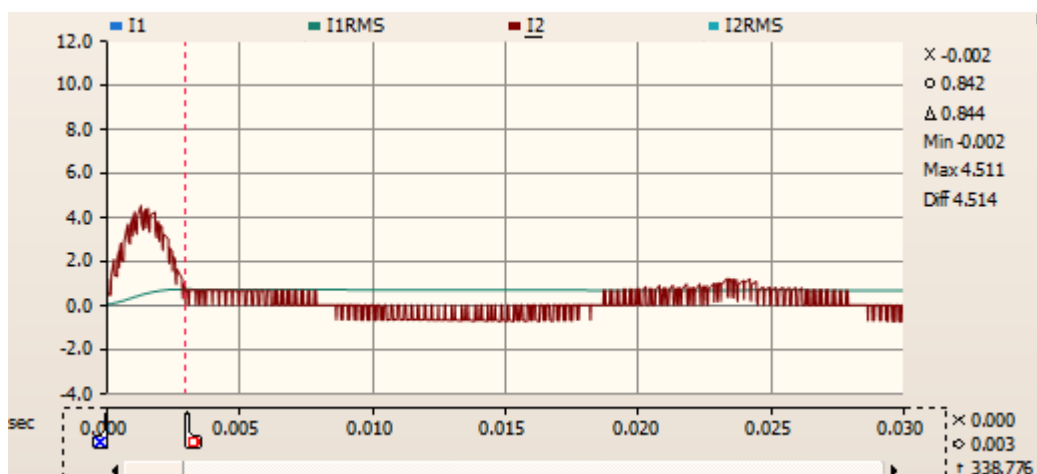
Simuloidaan esimerkkitapauksena tehonlähdettä muokatulla sisääntulopiirillä, jossa väylien väliset 0,15  $\mu\text{F}$  kondensaattorit on poistettu, sekä tasasuuntaajassa alkuperäiset 81  $\mu\text{F}$  kondensaattorit on vaihdettu 22  $\mu\text{F}$  kondensaattoreiksi. Kyseiset muutokset ovat arvioita komponenttien arvoista, joilla laite saataisiin toimimaan paremmin taajuusmuuttajalla syötettynä. Tarkemmat arvot sisääntulopiirille sekä mahdolliset rakenteen muutokset pitää tutkia erikseen. Muokatun tehonlähteen simulaatiomalli on esitetty kuvassa 33. Kun tätä simuloidaan PWM-jännitteellä, huomataan seuraavat erot alkuperäiseen laitteeseen:



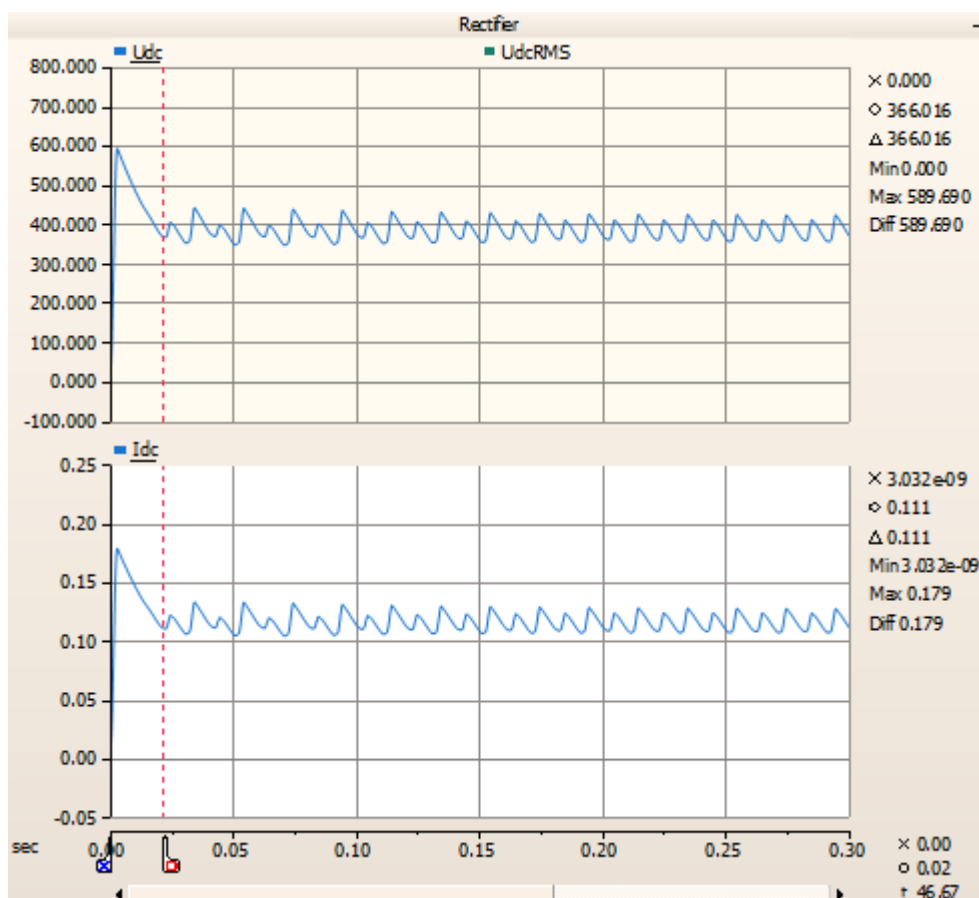
1. Laitteen ottama käynnistysvirta on nyt vain 4,5 A, joka kestää 3 ms. Tasaisen tilan virta on paljon tasaisempaa, eikä nouse suuriin huippuarvoihin. Tasaisen tilan virran tehollisarvo on 0,65 A ja korkeimmat virtapiikit ovat 1,4 A. Virran suuruus tasaisessa tilassa on hyvin lähellä normaalin käyttötilanteen sisääntulovirtaa, sekä tarpeeksi pieni pitämään sisääntulopiirin su-lakkeen ehjänä. Nämä on esitetty kuvassa 34.
2. DC-puolella jännitteen ja virran käynnistyspiikit ovat paljon lyhyempiä ja pienempiä, mutta ripple on suurempi. Nämä on esitetty kuvassa 35.



**Kuva 33.** Muokatun tehonlähteen simulaatiokuva.



**Kuva 34.** Muokatun tehonlähteen ottama virta taajuusmuuttajalla syötettynä.



**Kuva 35.** Muokatun tehonlähteen sisääntulopiiriin DC-puolen jännite ja virta taajuusmuuttajalla syötettynä.

Laitteen ottama virta on hyvin lähellä normaalin käyttötilanteen sisääntulovirtaa, sekä sisääntulopiiriin sulakkeen kestämissä rajoissa. Toiselle testeissä käytetyistä tehonlähteistä tehtiin yllä mainitut muutokset, jonka jälkeen laite tuntui toimivan vähän paremmin taajuusmuuttajalla syötettynä. Muokatun tehonlähteen testeissä taajuusmuuttajat ABB ACS880-01 (2,2 kW) ja Vacon NXS (2,2 kW) katkaisivat heti syötön. ACS255 (1,5 kW) taajuusmuuttajalla testatessa tehonlähde toimii, pysyy päällä ja antaa tasaista 5 V DC-jännitettä ulostulossa. Näiden taajuusmuuttajien tekniset tiedot on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** Muokatun tehonlähteen testeissä käytettyjen taajuusmuuttajien tekniset tiedot.

		ABB ACS225	ABB ACS880	Vacon NXS
	P <sub>n</sub>	1,5 kW	2,2 kW	2,2 kW
Sisääntulo	U <sub>1</sub>	1~ 200-240 V	3~ 400 V	3~ 380-500 V
	I <sub>1</sub>	12,9 A	5,6 A	5,6 A
	f <sub>1</sub>	48...62 Hz	50 / 60 Hz	45...66 Hz
Ulostulo	U <sub>2</sub>	3~ 0-250 V	3~ 0...U <sub>1</sub>	3~ 0-U <sub>1</sub>
	I <sub>2</sub>	7,0 A	4.8 A	4.3 A
	f <sub>2</sub>	0-500 Hz	0-500 Hz	0-320 Hz

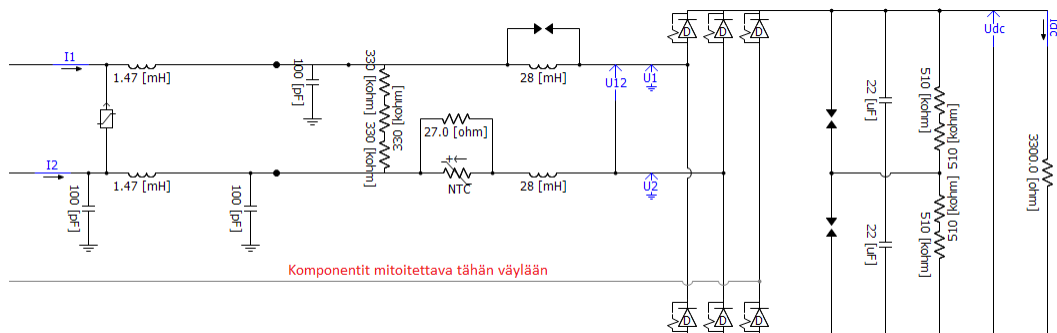


**Kuva 36.** ABB ACS255 -taajuusmuuttaja.

## 7.2 Sisääntulopiirin tasasuuntaajan muokkaus kolmivaiheiseksi

Tätä voidaan ajatella jatkokehitysvaiheena edelliselle kappaleelle. Tehonlähteen muokkaaminen kolmivaiheiseksi kaksivaiheisen ratkaisun sijaan tasoittaisi taajuusmuuttajan kuormaa. Tässä tapauksessa tarvitaan taas uusi mitoitus häiriönsuodatuspiirille, sillä sisääntulopiiriin tuodaan yksi vaihe lisää. Tätä ratkaisua

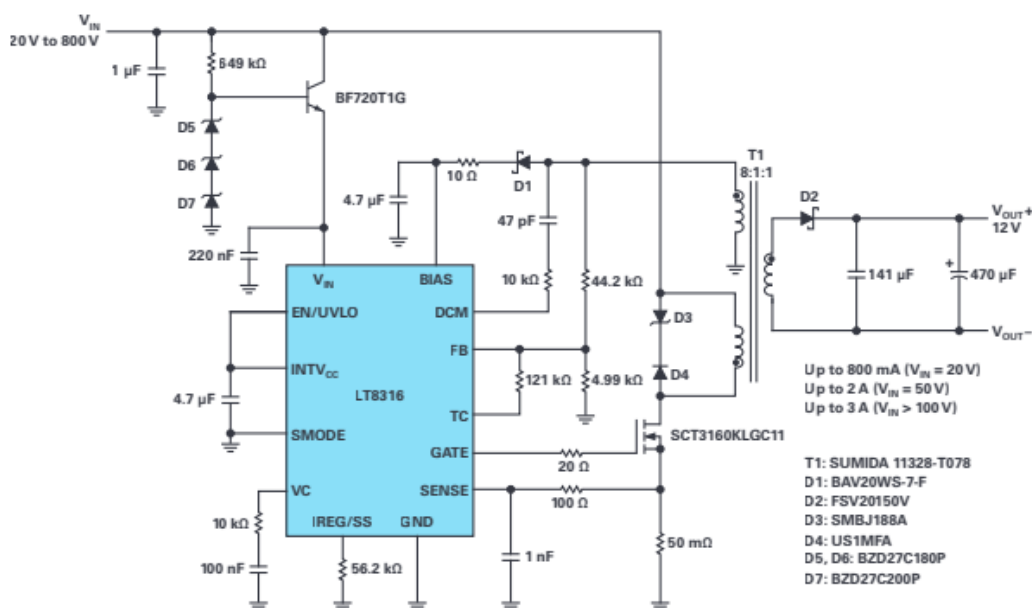
ei testattu käytännössä opinnäytetyön aikana, koska muutokset ovat liian isoja tehtäväksi alkuperäisille piirilevyille ja mahtuakseen laitteen alkuperäiseen kotelointiin. Tässä tapauksessa kolmivaiheiseksi muokattava tehonlähde olisi kuvan 37 kaltainen.



**Kuva 37.** Kolmivaiheiseksi muokattavan tehonlähteen esimerkkikuva.

### 7.3 Toisen tehonlähteen käyttö

Vaihtoehtona Mean Well WDR-60-5:n käyttämiselle voitaisiin tämän sijasta käyttää toista laitetta. Yksi vaihtoehto tähän voisi olla epäsuoraan tehonsiirtoon perustuvalla tasasähköohjaimella (flyback controller) LT8316 toteutettu tehonlähde. Kuvassa 38 on esitetty yksi kytkentä tälle ohjaimelle, joka mahdollistaa ohjaimelle laajan sisääntulojännitteen alueen 20 – 800 V.

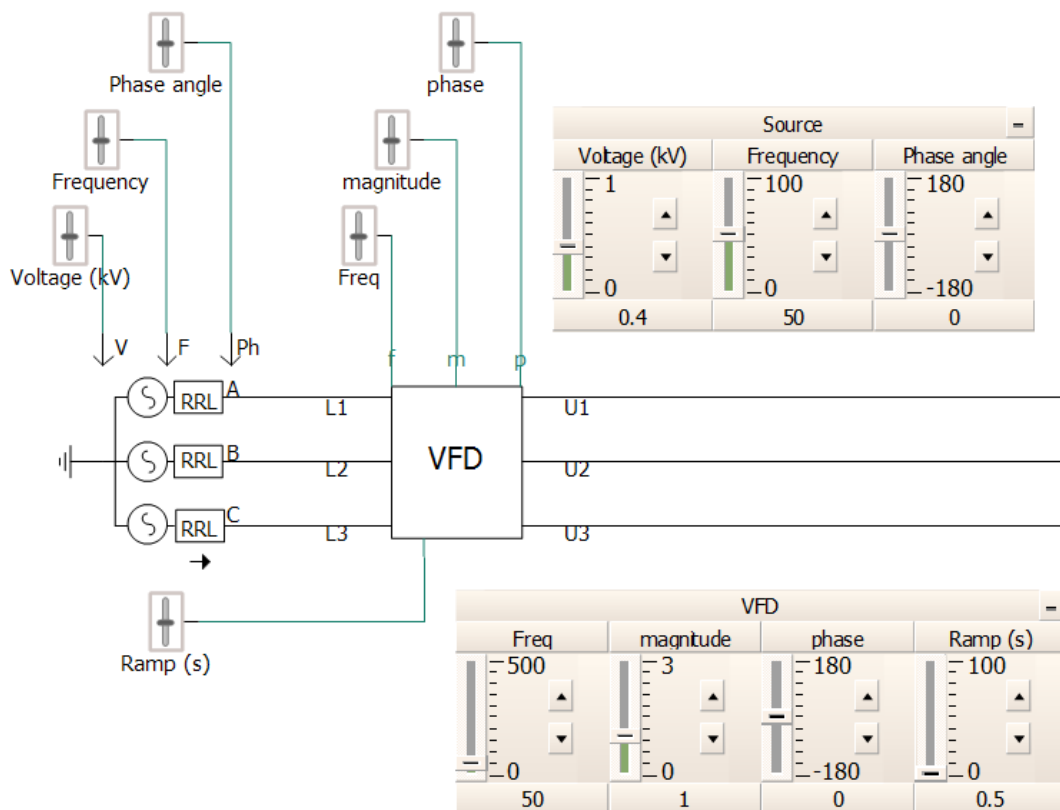


**Kuva 38.** LT8316:lla toteutetun tehonlähteen kytkentäkuva. /17/

Tämän vaihtoehdon tutkinnassa ensimmäisenä tulisi tarkastella, saako tätä toimimaan PWM-syötöllä. Simuloinnin kannalta tämän tarkastelun mahdollisuus riippuu siitä, löytyykö simulointiohjelmalle valmiina tätä kyseistä ohjauspiiriä. Toisena asiana tätä ratkaisua soveltaessa tähän käyttötarkoitukseen tulisi piirin muuntaja vaihtaa pienempään, sillä kytkentäkuvasa esitetään 12 V DC-ulostuloa.

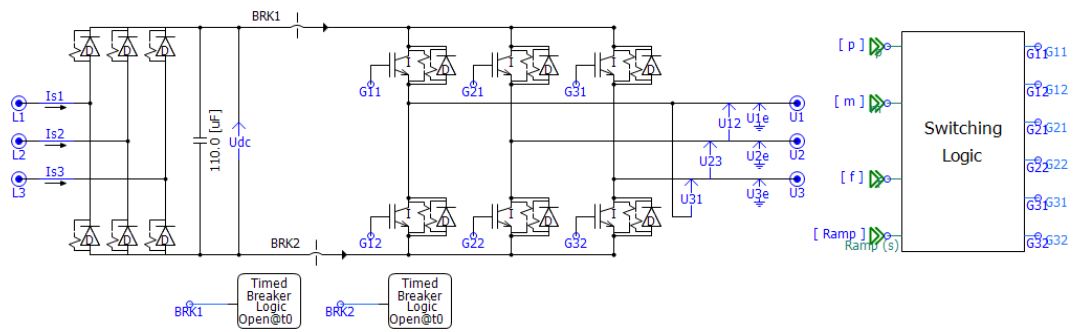
#### 7.4 Taajuusmuuttajan simulaatiomallin paranteleminen

Opinnäytetyössä käytetty taajuusmuuttajamalli ei täysin vastaa realistista taajuusmuuttajan ulostuloa, vaan sitä voisi ennemminkin ajatella hyvin teoreettisena PWM-generaattorina. Todellisen taajuusmuuttajan ulostulosignaali ei ole aivan yhtä tasaista kuin työssä esitetty signaali, eikä tässä ole myöskään otettu huomioon muita taajuusmuuttajan asetuksia kuten kiihdytysrampin simulointia. Seuraavia simulointeja varten olisi hyödyllistä rakentaa uusi taajuusmuuttajamalli, jossa on huomioituna muitakin taajuusmuuttajassa käytettyjä ominaisuuksia. Tässä kappaleessa esitellään luonnosta uudesta simulaatiomallista.



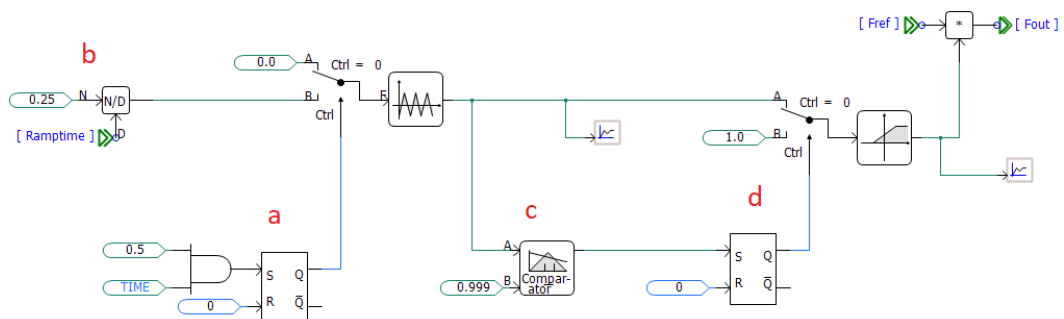
**Kuva 39.** Uuden taajuusmuuttajan moduuli sekä tämän syöttö.

Taajuusmuuttajan uusi simulaatiomalli on rakennettu todellisen taajuusmuuttajan kytkentäpiirin mukaisesti. Kytkentäpiiri on esitetty kuvassa 40. Taajuusmuuttajaa syötetään kolmivaiheisella verkkovirralla, joka tasasuunnataan kuusipulssisuuntaajalla. Simulaatiossa DC-välipiiri on lähtötilanteessa auki puolen sekunnin ajan, jonka jälkeen ajastetut katkaisijat sulkeutuvat ja käynnistävät ulostulon. Tämä mahdollistaa DC-välipiirin kondensaattorin latautumisen ennen ulostulon kytkemistä. DC-välipiirin jälkeen kytkennässä on PWM-jännitteen luova IGBT-kytkentä, sekä tätä ohjaavan kytkentälogiikan ohjausmoduuli. Tässä versiossa kytkentälogiikka on käytännössä sama kuin aiemmassa mallissa niillä eroilla, että nyt jokaisen vaiheen kytkentälogiikat ovat yhdellä sivulla ja taajuusohjeeseen on lisätty kiihdytysramppi. Uusi kytkentälogiikka on esitetty liitteessä (Liite 4).

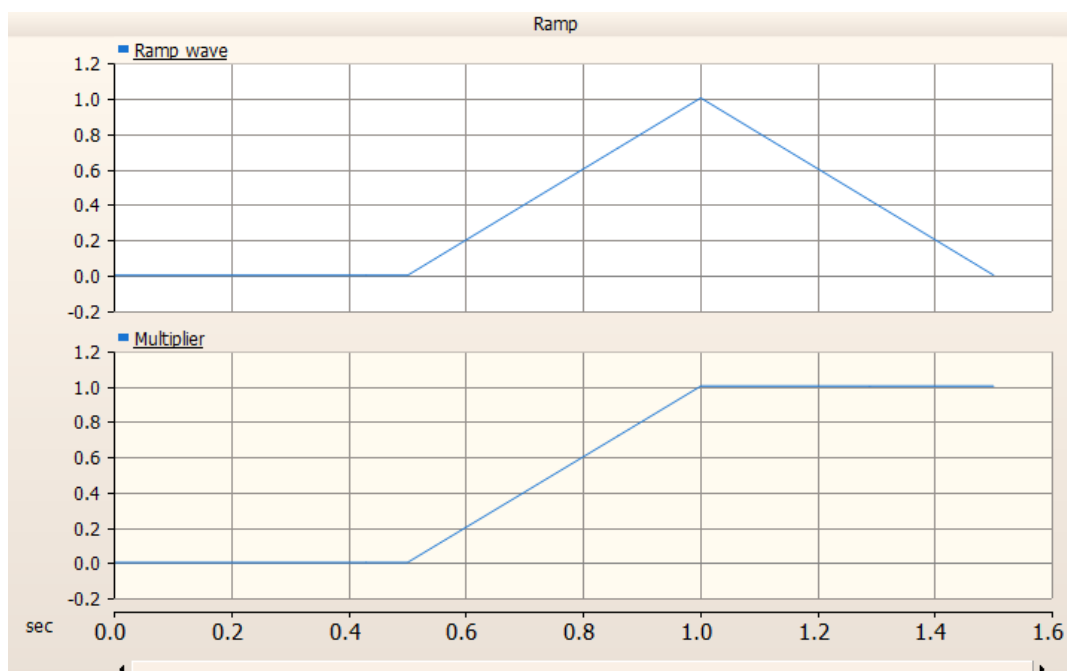


**Kuva 40.** Uuden taajuusmuuttajan simulaatiomalli.

Kiihdytysramppi on toteutettu tässä simulaatiossa kuvan 41 mukaisesti. Ramppi käynnistyy samaan aikaan kuin piirin ajastetut katkaisijat sulkeutuvat (a) ja toimii taajuuden ohjearvon kertoimena välillä 0–1. Lineaarinen kiihdytysramppi simuloidaan antamalla kolmioaalto taajuus, jolla se saavuttaa ensimmäisen neljänneksen jaksostaan (positiivisen huipun) rampin määrittelemässä ajassa (b). Tämän jälkeen odotetaan, kunnes kolmioaalto pääsee tarpeeksi lähelle huippuansa (c), jotta taajuusohjeen kertoimen arvoksi voidaan lukita 1 (d). Näin saadaan kuvan 42 mukainen kolmioaalto ja taajuusohjeen kerroin.



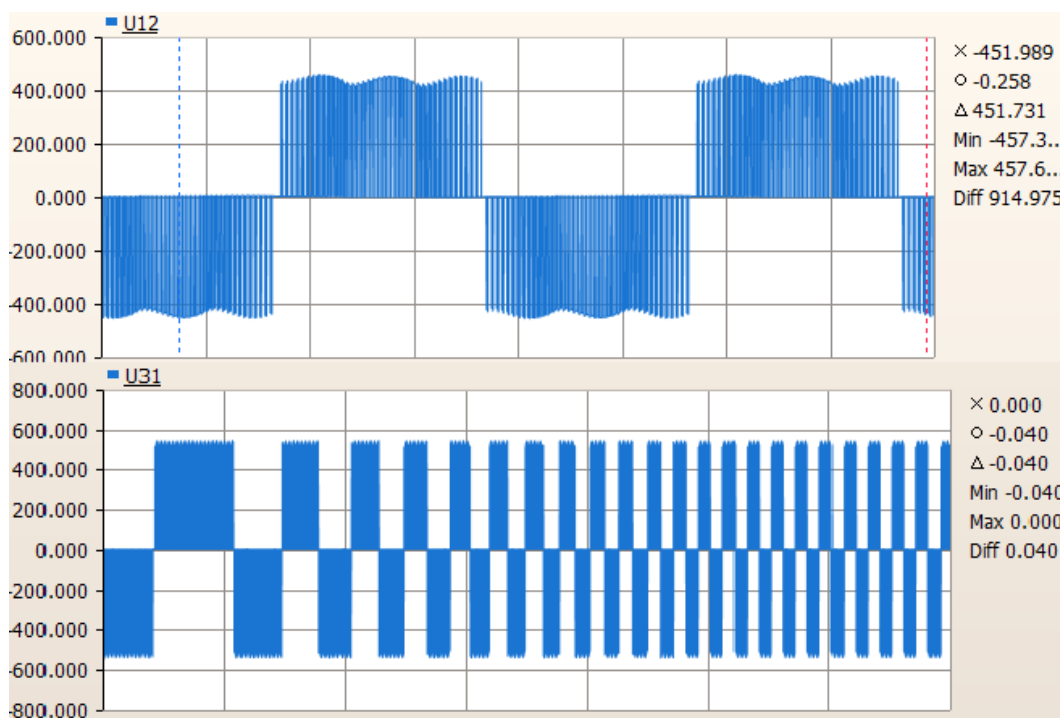
**Kuva 41.** Kiihdytysrampin ohjelmointi.



**Kuva 42.** Kiihdytysrampin ohjelmoinnissa käytetty kolmioaalto sekä taajuusohjeen kerroin.

Kiihdytysrampin lisäksi taajuusmuuttajamalliin olisi hyvä lisätä vielä ainakin  $V/f$ -säätö, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimman todenmukaisia.  $V/f$ -säädöllä taajuusmuuttaja syöttää pienempää jännitettä taajuuden ollessa pieni kiihdytysrampin aikana. Jännitteen ja taajuuden suhde säädössä on lineaarinen. Tämänhetkellä taajuusmuuttajamallilla ulostulojännite kahden vaiheen välillä sekä kiihdytysrampin vaikutus ulostuloon ovat esitetty kuvassa 43.





**Kuva 43.** Uuden taajuusmuuttajamallin ulostulojännite ja kiihdytysrampin vaikutus (ei V/f-säätöä).

Tällä taajuusmuuttajamallilla kokeiltiin lyhyesti simuloida myös WDR-60-5:n malleja. Ilman simuloitua rampia WDR-60-5:n ottama virta ja DC-puolen jännite olivat hyvin samanlaiset kuin työssä käytetyllä PWM-jännitteellä. Kiihdytysrampia käyttäessä näihin suureisiin tuli suuri transientti rampin lopussa. Tämä saattaisi korjaantua V/f-säädön lisäämällä ja mallia kehittämällä entisestään.

## 8 YHTEENVETO

Työn yhteenvetona voidaan todeta, että tämä lähestymistapa valitulla laitteella ei suoraan toimi. Työssä opittiin, että taajuusmuuttajan ulostuloon kytkettyjen laitteiden mitoituksessa ei voida käyttää taajuutta, jota taajuusmuuttajan ulostulo simuloi. Sen sijaan mitoitus tulee tehdä taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden mukaan. Työssä käytetyn tehonlähteen voi olla mahdollista saada toimimaan moottoriin kytkettynä, mutta tämä vaatii sisääntulopiirin uudelleenmitoittamista taajuusalueen 47 Hz – 63 Hz sijasta esimerkiksi 1 kHz – 16 kHz alueelle.

Opinnäytetyössä on esitetty suuntaa antavia ajatuksia sisääntulopiirin uudelleenmitoitukseen ja kehittämiseen. Uuden sisääntulopiirin suunnittelun jälkeen täytyisi tässä työssä esitetyt simulaatiot ja testit toistaa uudistetulla laitteella. Vaihtoehtoisesti WDR-60-5:n tilalla voisi käyttää toista tehonlähdettä, tai suunnitella täysin uusi laite toisella syöttötavalla. Lisäksi työssä on esitelty jatkotutkimuksia varten paranneltua ja realistisempaa taajuusmuuttajamallia.

## LÄHTEET

- /1/ History of ABB. ABB websites. Viitattu 13.04.2021. <https://global.abb/group/en/about/history>
- /2/ Our Businesses. ABB websites. Viitattu 13.04.2021. [https://new.abb.com/about/our-businesses?\\_ga=2.93562909.1247014836.1618245516-1637760202.1615463045](https://new.abb.com/about/our-businesses?_ga=2.93562909.1247014836.1618245516-1637760202.1615463045)
- /3/ Suomalaiset juuret. ABB lyhyesti. ABB:n verkkosivut. Viitattu 13.04.2021. <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>
- /4/ Strömberg (yritys). Wikipedia. Viitattu 13.04.2021. [https://fi.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mberg\\_\(yritys\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mberg_(yritys))
- /5/ Erturk, A. & Inman, D.J. 2011. Piezoelectric Energy Harvesting. John Wiley & Sons, Incorporated. s1-7.
- /6/ Song, M-E., Yan, Y., Gollapudi, S., Bichurin, M., Petrov, V., Sanghadasa, M. & Priya, S. 2016. Design of Metglas/Polyvinylidene Fluoride Magnetolectric Laminates for Energy Harvesting from Power Cords. IEEE. Viitattu 02.04.2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7808818>
- /7/ Ahola, J., Ahonen, T., Särkimäki, V., Kosonen, A., Tamminen, J., Tiainen, R. & Lindh, T. 2008. Design Considerations for Current Transformer Based Energy Harvesting for Electronics Attached to Electric Motor. IEEE. Viitattu 03.04.2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4581191>
- /8/ Voltage transformer. Wikipedia. Viitattu 05.04.2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage\\_transformer#Types\\_of\\_Voltage\\_Transformers](https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_transformer#Types_of_Voltage_Transformers)
- /9/ Universal Serial Bus Specification. Revision 2.0. USB.org. 2000. s175. <https://usb.org/document-library/usb-20-specification>

/10/ Tuotekuvaus. Mean Well websites. Viitattu 10.04.2021. <https://www.meanwell-web.com/en-gb/ac-dc-industrial-din-rail-power-supply-output-5vdc-wdr--60--5>

/11/ Danci, A. ABB, Motors & Generators.

/12/ Manitoba Hydro. Wikipedia. Viitattu 10.04.2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Manitoba\\_Hydro](https://en.wikipedia.org/wiki/Manitoba_Hydro)

/13/ NTC-termistori. Wikipedia. Viitattu 12.04.2021. <https://fi.wikipedia.org/wiki/NTC-termistori>

/14/ NTC Thermistor Catalogue. THINKING ELECTRONIC INDUSTRIAL CO., LTD. Viitattu 12.04.2021. <https://www.thinking.com.tw/upload/product/files/NTC%20Thermistor-SCK%20Series.pdf>

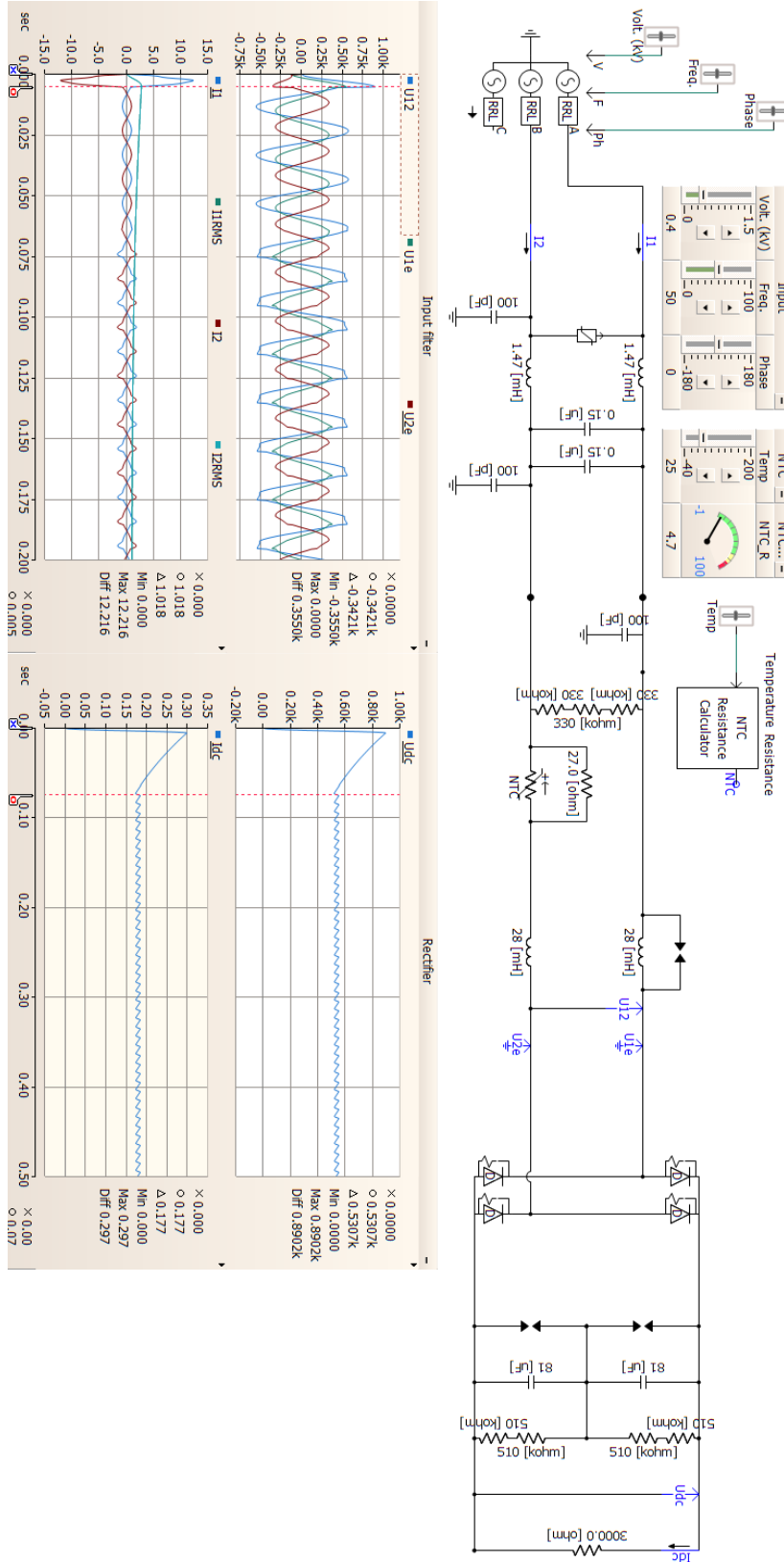
/15/ Sähköinfo Oy. 2017. D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Taulukko 41.6. s96.

/16/ Sulakelinkit. ESKA Erich Schweizer GmbH. Viitattu 28.04.2021. <https://www.starelec.fi/UserFiles/File/PDF-liitteet2/ESKA-520-500.pdf>

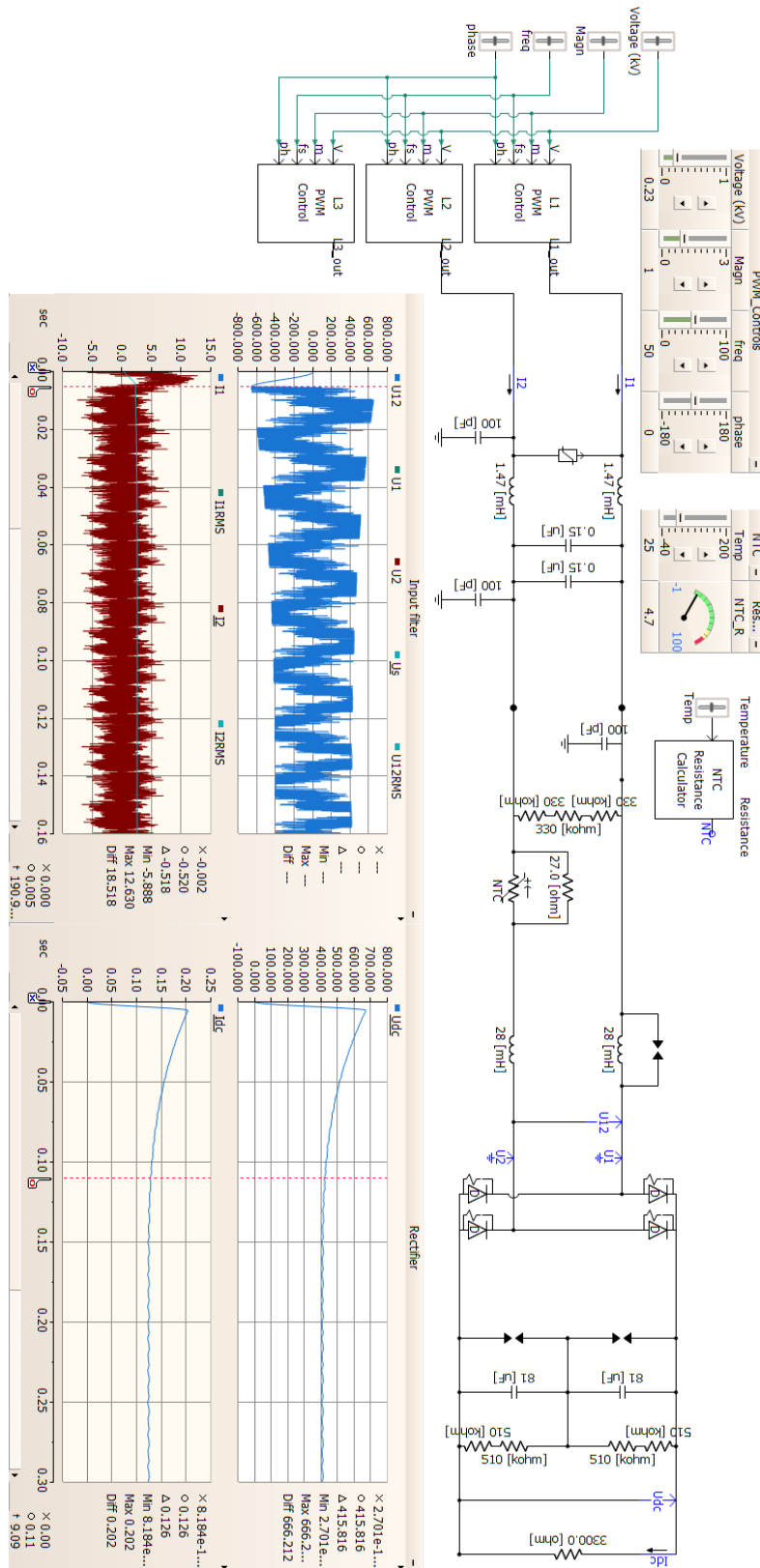
/17/ Yang, Y. & Xiong, W. 2021. Extending the Supply Voltage of a 600V Input, No-Optocoupler Isolated Flyback Controller to 800V or Higher. Analog Devices websites. Viitattu 01.05.2021. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/design-notes/extending-supply-voltage-600-v-input-no-optocoupler.pdf>

# LIITTEET

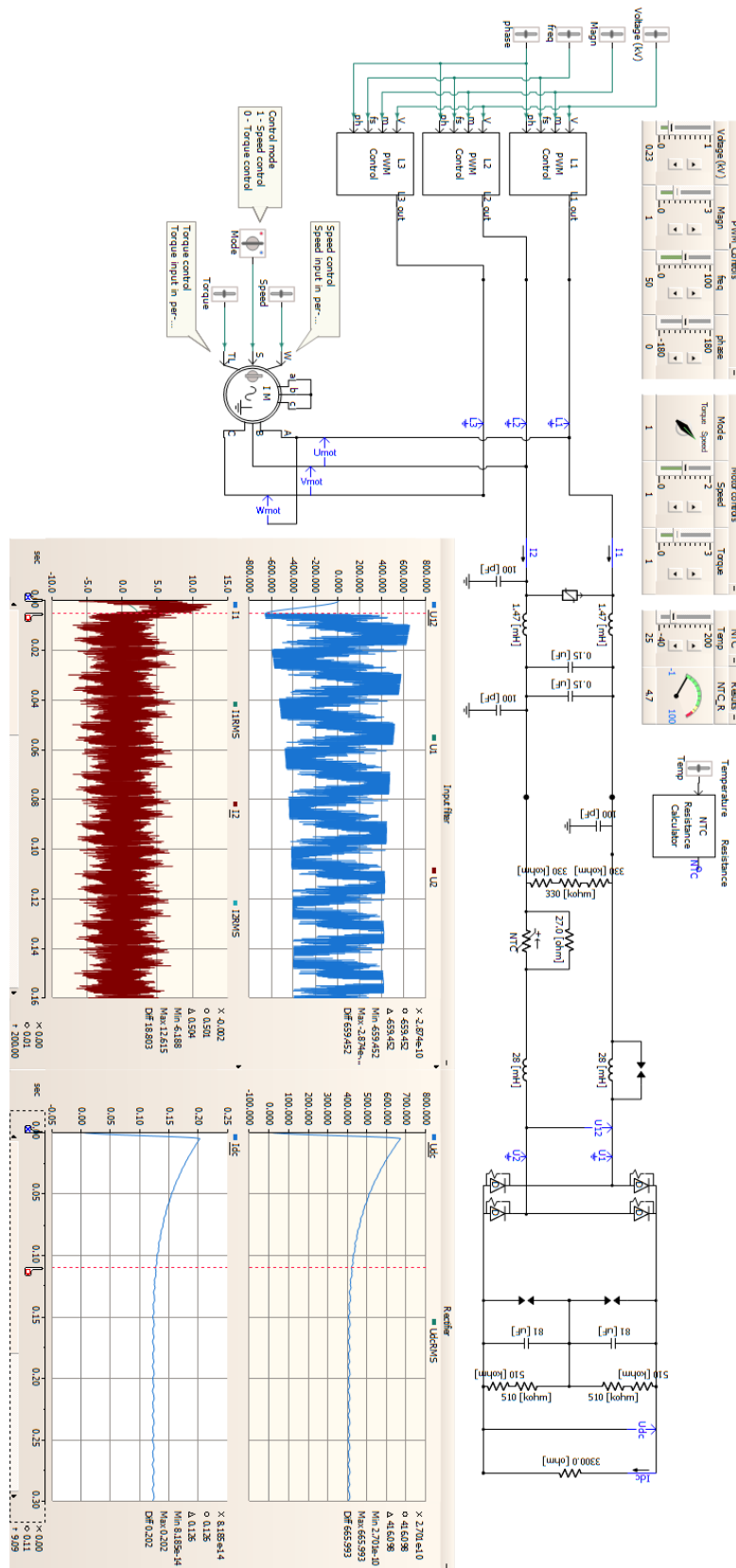
LIITE 1. WDR-60-5 tehonlähte syötettynä sinimuotoisella jännitteellä.



LIITE 2. WDR-60-5- tehonlähde taajuusmuuttajalla syötettynä.



LIITE 3. WDR-60-5-tehonlähte taajuusmuuttajalla syötettynä, moottorin rinnalla.



LIITE 4. Parannellun taajuusmuuttajamallin simuloitu kytkentälogiikka.

