

Practicumhandleiding vermogenselektronica II
DC-AC inverter

dr.ir. P.J. van Duijsen
ing. D.C. Zuidervliet

April 2021

First Edition 2017, First printing
Copyright 2017 by Peter van Duijsen, Simulation Research Press. All rights reserved.

Revision, April 2021, Diëgo Zuidervliet, THUAS.

Printed in The Netherlands. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

The sponsoring editor for this book was the Haagse Hogeschool
Printed and bound by [Haagse Hogeschool]
Cover design copyright 2017 Simulation Research Press

This book is intended to be used as a reference for information regarding Power Electronics systems. It is not intended to encourage or discourage any Power Electronics type, design, or process. Some of the configurations or processes described herein may be patented. It is the responsibility of the user of this information to determine if any infringement may occur as a result thereof.

Information contained in this work has been obtained by Simulation Research Press from sources believed to be reliable. However, neither Simulation Research Press nor its authors guarantee the accuracy or completeness of any information published herein, and neither Simulation Research Press nor its authors shall be responsible for any errors, omissions, or damages arising out of use of this information. This work is published with the understanding that Simulation Research Press and its authors are supplying information but are not attempting to render engineering or other professional services. If such services are required, the assistance of an appropriate professional should be sought.

Samenvatting

Deze handleiding beschrijft de basisschakelingen en bijbehorende opdrachten om een werkende enkelfase inverter met stroomsturing te maken. Als eerste worden met behulp van simulatiestudies de basiswerking van de enkelfase inverter gedemonstreerd. Vervolgens worden de schakelingen opgebouwd en afzonderlijk getest, alvorens de regellus gesloten wordt en de stroomsturing getest kan worden.

Educatieve doelstellingen

- Inzicht in de basiswerking en principes van de enkelfase inverter.
- Leren kennen van de verschillende modulatieprincipes van de enkelfase DC-AC inverter.
- Begrijpen hoe gatedrivers Mosfets moeten aansturen in een inverter.
- Opbouwen en metingen verrichten aan een inverter/pulsbreedte modulator en een analoge stroomsturing.
- In staat zijn om de berekeningen aan inverters uit te voeren.

Benodigde tijd

De benodigde tijd om de basisprincipes te leren en de schakelingen op te bouwen is sterk afhankelijk van uw kennis van elektronica en vaardigheid in het opbouwen van elektronische schakelingen. Om tot een succesvol werkende enkelfase inverter te komen zal ongeveer 4 lessen duren. Metingen verrichten en uitvoeren van de opdrachten vragen om een tijd van ongeveer 3 lessen.

Basiskennis

Een basiskennis van elektronica en vermogenselektronica I is aan te bevelen voordat je met dit practicum begint. Na het afronden van dit practicum, het bouwen van de inverter met regeling en het maken van de opdrachten, zal je beter begrijpen hoe een praktische inverter-schakeling is opgebouwd en hoe de regeling van een inverter werkt.

Simulatie Software

De simulatie opdrachten opgenomen in deze handleiding, werken alle met de laatste versie van het simulatieprogramma Caspoc. Er is geen installatie vereist. Na uitpakken van de software caspoc.zip, kunnen de opdrachten direct uitgevoerd worden.

Learning by doing

Leren door te doen is de beste manier om nieuwe technologieën te begrijpen. Het dictaat behorende bij het college Vermogenslektronika II geeft de theoretische achtergrond die nodig is voor het begrijpen van de inverter en de regeling. Hoewel lang niet altijd compleet, het geeft een helder overzicht van het vakgebied dat steeds belangrijker wordt.

Alphen aan den Rijn

Peter J. van Duijsen

Inhoudsopgave

I	Les 1	1
1	Simulatieopdrachten inverter	3
1.1	Opdracht 1	4
1.2	Oefening 2	6
1.3	Oefening 3 Blanking Time	7
1.4	Oefening 3 Bipolar Mosfet Currents	8
1.5	Oefening 3 Bipolar IGBT Currents	9
1.6	Oefening 3 Unipolar Mosfet Currents	10
1.7	Oefening 3 Unipolar IGBT Currents	11
1.8	Opdracht 4 Current control	12
1.9	Opdracht 5 Vermogen	13
II	Les 2	15
2	Schakelgedrag GateDriver en Mosfets	17
2.1	Opdracht 6 Charge pump	18
2.2	Opdracht 7 Uitgangsspanning	19
III	Les 3	21
3	Drie fasen inverter voor een elektrische auto	23
IV	Les 4	25
4	Thermische verliezen simuleren van de inverter	27
V	Les 5	29
5	Kennismaking The Universal Four Leg (U4L)	31
5.1	Voeding	32
5.2	Shoot through en Blanking Time	34
5.3	Mosfet en Gate driver	37
5.4	Meting uitgangsspanning	40
5.5	Meting Isense low side	41
5.6	Stroomversterker low side	43

5.7	Meting Isense high side	44
5.8	SD, Restart Delay, Overcurrent Detection	45
VI	Les 6	49
6	Inverter opbouwen met de U4L	51
VII	Les 7	53
7	Uitloop en/of verdiepende opdracht	55
VIII	Appendices	57
A	Quickstart	59
B	Schema Universal Four Leg	63
C	Datasheet	73

Lijst van figuren

1.1	Componenten voor opdracht 1.	4
1.2	Samengevoegde componenten van opdracht 1.	5
1.3	Oefening 2.	6
1.4	Blanking Time.	7
1.5	Oefening 3 Bipolar modulation with Mosfet.	8
1.6	Oefening 3 Bipolar modulation with IGBT.	9
1.7	Oefening 3 Unipolar modulation with Mosfet.	10
1.8	Oefening 3 Uniipolar modulation with IGBT.	11
1.9	Opdracht 4 Stroomregeling.	12
1.10	Opdracht 5 Stroomregeling.	14
2.1	Gatedriver met Bootstrap en Mosfets.	18
2.2	Vout.	19
5.1	De volledig geassembleerde Universal Four Leg (U4L).	31
5.2	Voeding voor de gatedriver en stuelelektronica.	32
5.3	Het voedingscircuit op de PCB van de U4L.	32
5.4	Voeding van 5 volt voor Arduino Nano en Logische 1.	33
5.5	Shoot-through protectie en blanking time.	34
5.6	Level shifter shoot-through and blanking time circuit.	34
5.7	Gatedriver en Mosfets.	37
5.8	Gatedriver en Mosfets op de PCB van de U4L.	37
5.9	Spanningsmeting.	40
5.10	De Output Voltage Sense op de PCB van de U4L.	40
5.11	Stroommeting shunt.	41
5.12	Stroommeting low-side shunt op de PCB van de U4L.	41
5.13	Versterking van de stroommeting.	43
5.14	Versterking van de stroommeting op de PCB van de U4L.	43
5.15	Stroommeting high side.	44
5.16	Shut down in geval van een overstroom.	45
5.17	Restart Delay	46
5.18	Restart Delay op de PCB van de U4L.	46
5.19	Overcurrent Detection die de Shut Down SD van de gate driver aanstuurt.	47
5.20	Overcurrent Detection op de PCB van de U4L.	47
B.1	Schema 1.Level shift, protection, gate driver and half-bridge	64
B.2	Schema 2.Sense circuits and overcurrent	65

B.3	Schema 3. Buck converter and LDO	66
B.4	Schema 4. Simplified Schematics Single Leg	67
B.5	Bomlijst 1.	68
B.6	Bomlijst 2.	69
B.7	Verbindingen tussen de inverter en de analoge regeling.	70
B.8	Single leg van de inverter.	71

Deel I

Les 1

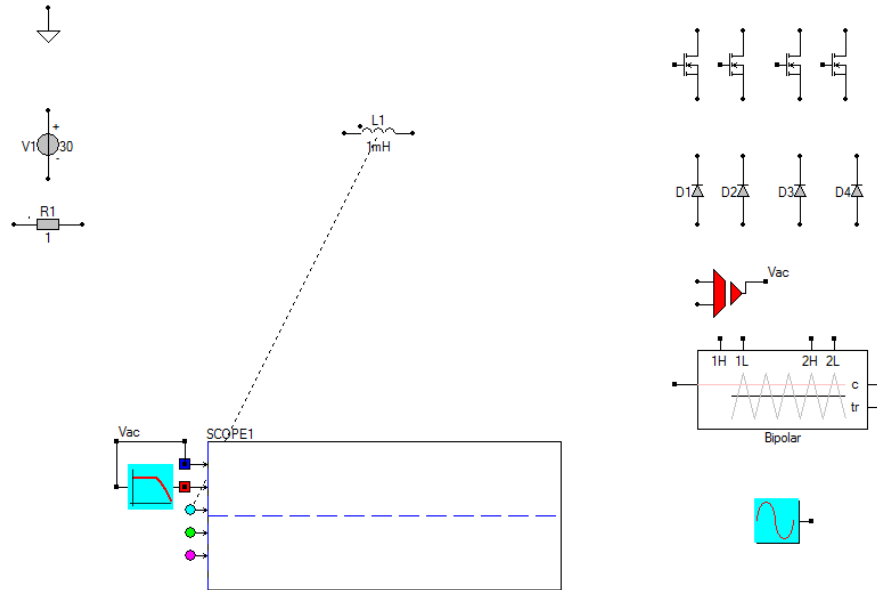
Hoofdstuk 1

Simulatieopdrachten inverter

In dit practicum gaan we een aan een 1-fase inverter simuleren. Download de zip file en uitpakken. Installeren hoeft niet. Bestand Caspoc2015.exe starten en in les1 staan de opdrachten/oefeningen. Het is in dit practicum belangrijk dat je de 1-fase inverter kan dimensioneren. In dit simulatiepracticum gaan we kijken wat de invloed vande schakelfrequentie en modulatie index is op de stroom in de belasting.

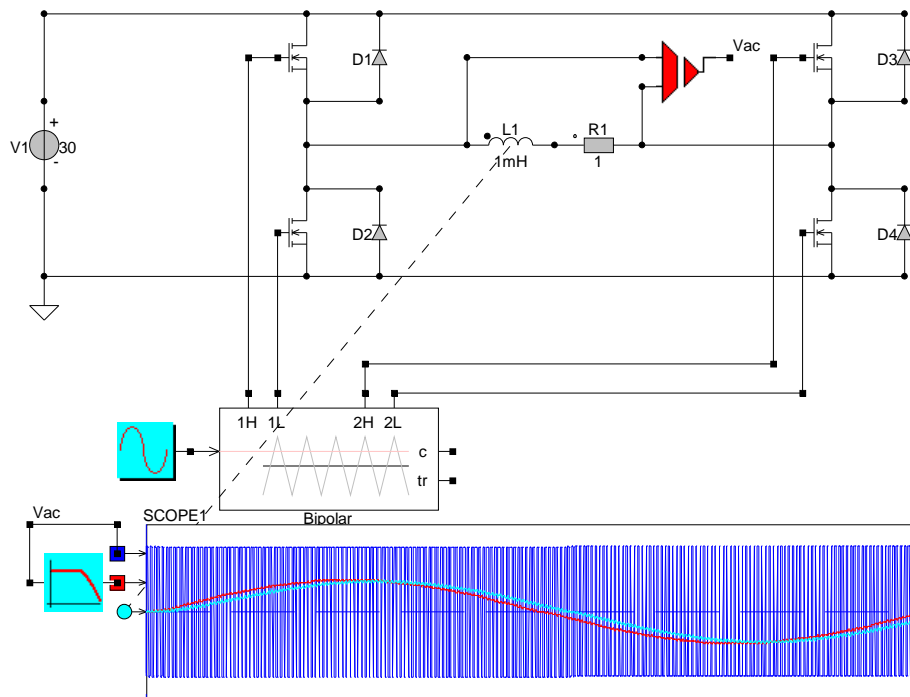
1.1 Opdracht 1

Open les1/Opdracht1.csi en probeer door verschuiven van de componenten en het maken van verbindingen een AC inverter te maken. De sinus referentie moet je aan de modulatie index ingang van de modulator aansluiten.



Figuur 1.1: Componenten voor opdracht 1.

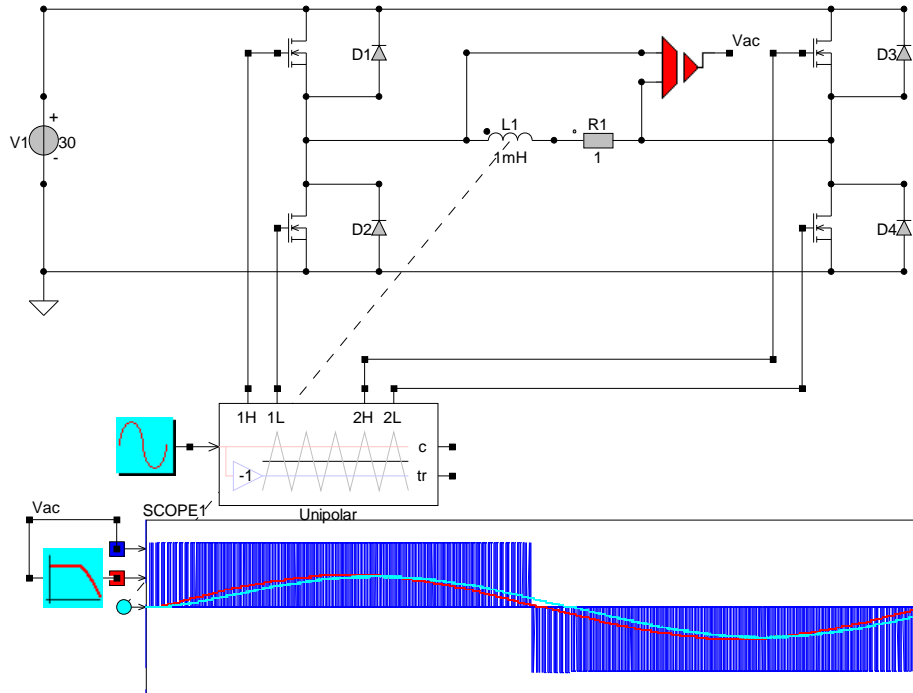
- Meet de spanning over de belasting voor een modulatie index $m_i=1$.
- Meet de stroom door de belasting, dit is de seriedeling van R1 en L1.
- Bereken de fase verschuiving tussen spanning en stroom van de R-L last en controleer dit met de metingen.



Figuur 1.2: Samengevoegde componenten van opdracht 1.

1.2 Oefening 2

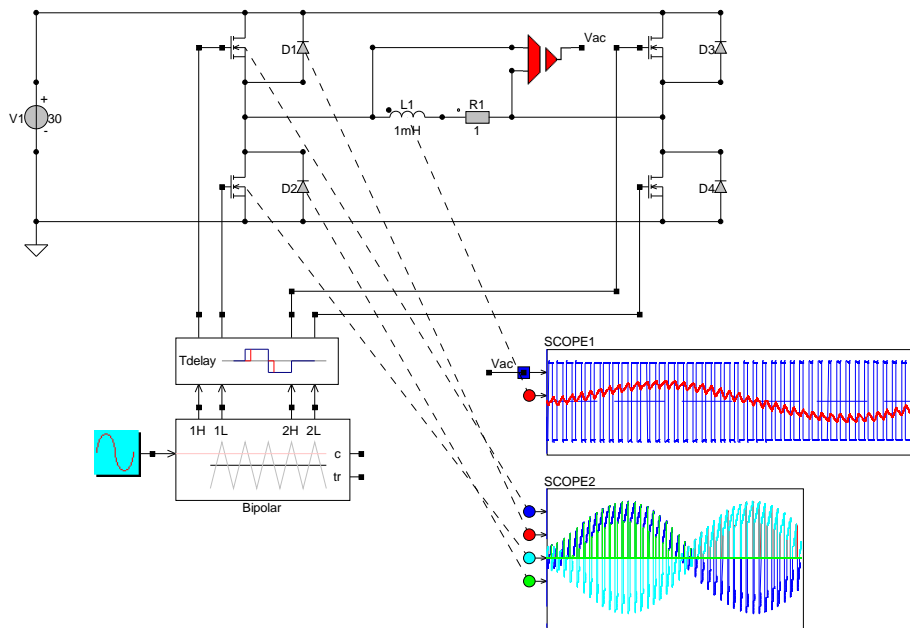
Open les1/Oefening2.csi en doe de meet nu opnieuw de spanning over en de stroom door de R-L belasting. Verklaar het verschil met de vorige meting.



Figuur 1.3: Oefening 2.

1.3 Oefening 3 Blanking Time

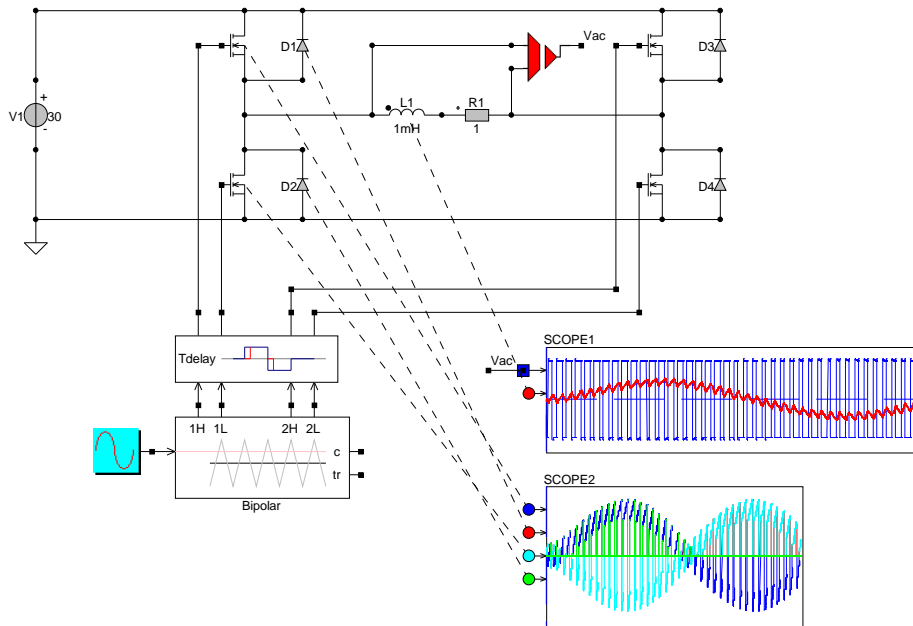
Open les1/Oefening3Bipolar.csi en beschrijf wat de invloed van het blok blanking time is. Vergelijk de stroomvorm voor het geval met en zonder blanking time. De blanking time kan je uitschakelen door deze op 100ns te zetten.



Figuur 1.4: Blanking Time.

1.4 Oefening 3 Bipolar Mosfet Currents

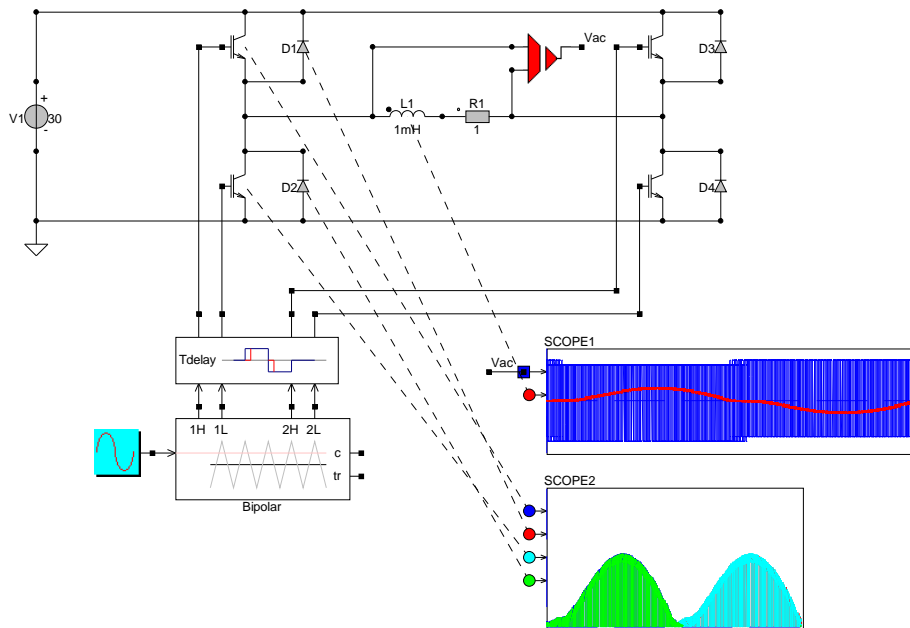
Open les1/Oefening3Bipolar.csi en meet de stroom door de Mosfets en dioden in de linker inverter-leg. Beschrijf wanneer er stroom door de Mosfets en door de dioden gaan. Let op dat de blanking time weer hetzelfde is als in de originele oefening. $T=5\text{s}$ en de schakelfrequentie is $F_s=2\text{kHz}$.



Figuur 1.5: Oefening 3 Bipolar modulation with Mosfet.

1.5 Oefening 3 Bipolar IGBT Currents

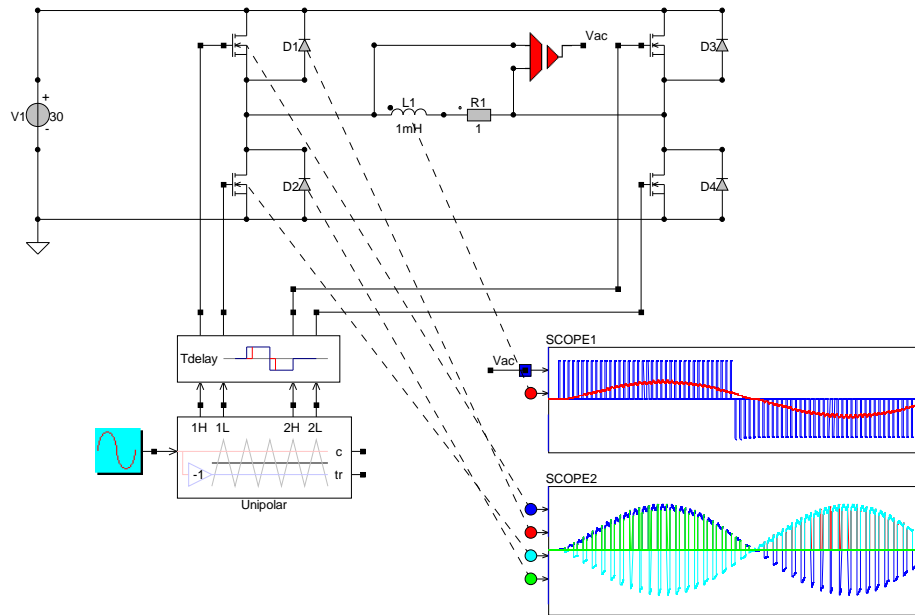
Open les1/Oefening3BipolarIGBT.csi en meet de stroom door de IGBTs en dioden in de linker inverter-leg. Beschrijf wanneer er stroom door de IGBTs en door de dioden gaan. Beschrijf het verschil met de vorige oefening(Mosfet Bipolar).



Figuur 1.6: Oefening 3 Bipolar modulation with IGBT.

1.6 Oefening 3 Unipolar Mosfet Currents

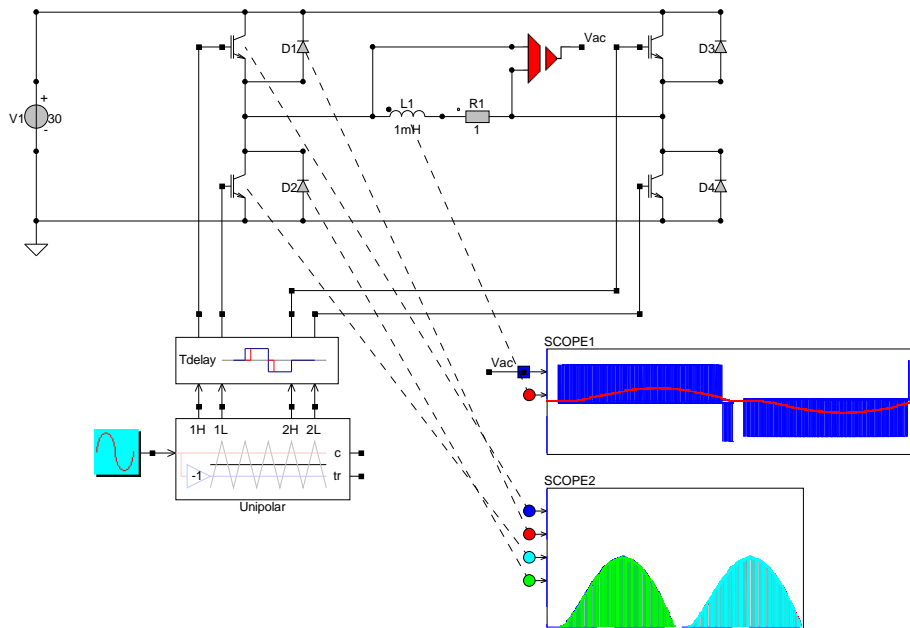
Open les1/Oefening3Unipolar.csi en meet de stroom door de Mosfets en dioden in de linker inverter-leg. Beschrijf wanneer er stroom door de Mosfets en door de dioden gaan. Beschrijf het verschil met de oefening van de Bipolare modulatie met Mosfets.



Figuur 1.7: Oefening 3 Unipolar modulation with Mosfet.

1.7 Oefening 3 Unipolar IGBT Currents

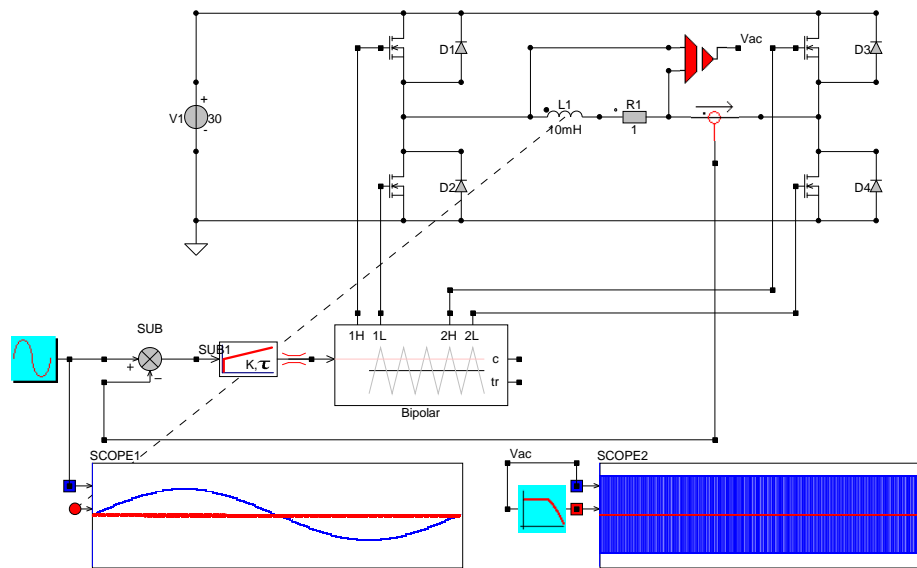
Open les1/Oefening3UnipolarIGBT.csi en meet de stroom door de IGBTs en dioden in de linker inverter-leg. Beschrijf wanneer er stroom door de IGBTs en door de dioden gaan. Beschrijf het verschil met de vorige oefening(Msofet Unipolar).



Figuur 1.8: Oefening 3 Uniipolar modulation with IGBT.

1.8 Opdracht 4 Current control

Open les1/Opdracht4.csi. Hier zie je een stroomregeling. We meten de stroom door de R-L last en vergelijken deze met een referentiestroom. Het verschil tussen de referentiestroom en de gemeten stroom is het errorsignaal dat de PI regeling moet minimaliseren. De uitgang van de PI regelaar is de modulatie index. Deze houden we in eerste instantie tussen +1 en -1. In de opdracht staan de waarden voor K_i en nog op $K_i=0$ en $=1$. Probeer deze twee parameters in te stellen, zodanig dat de stroom de referentiestroom gaat volgen. Beschrijf hoe je deze twee parameters hebt ingesteld.

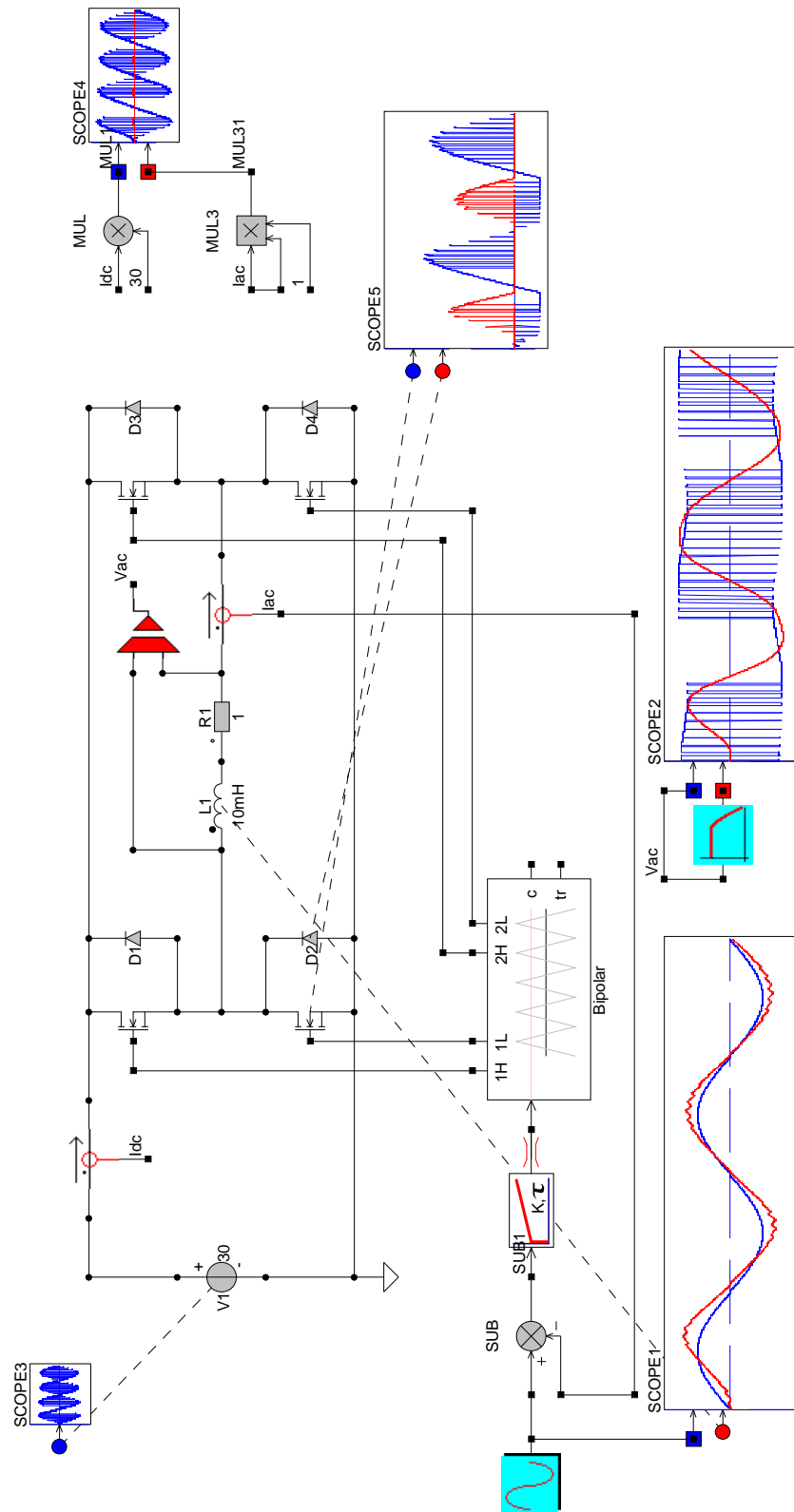


Figuur 1.9: Opdracht 4 Stroomregeling.

1.9 Opdracht 5 Vermogen

Open les1/Opdracht5.csi.

- Met de inverter gaan we een stroom maken met $F=400\text{Hz}$ en een amplitude van 1 Ampere.
- Zoek de doorlaatweerstand van de IRF610 op. Bij de mosfet heet deze parameter R_{dson}
- De belasting wordt 1 Ohm in serie met een spoel van 10mH.
- De schakelfrequentie wordt 10kHz.
- Simuleer met een stapgrootte van 1us
 - Bereken de benodigde spanning hiervoor die de inverter moet leveren.
 - Neem de bipolaire schakeling met Mosfets en stel de parameters in.
 - Kan je de AC referentiestroom maken?
- Selecteer een extra stroommeting uit Components/Library/sensor/current/i en meet hiermee de DC stroom in de DC link.
- Selecteer een MUL blokje uit Components/blocks/math/MUL
- Hiermee kan je de gemeten stroom met 30 vermenigvuldigen, om het DC ingangsvermogen te meten.
 - Meet het DC ingangsvermogen, in de scope kan je onderin aflezen wat het gemiddelde van een signaal is.
 - Bereken het gedissipeerde vermogen in de belastingsweerstand.
 - M.b.v. een MUL3 blokje kan je nu ook het gedissipeerde vermogen berekenen tijdens de simulatie.
 - Vergelijk het DC met het AC vermogen en bereken het verschil.
 - Bereken hoeveel doorlaatvermogen er in de Mosfets en diodes verloren gaat.



Figuur 1.10: Opdracht 5 Stroomregeling.

Deel II

Les 2

Hoofdstuk 2

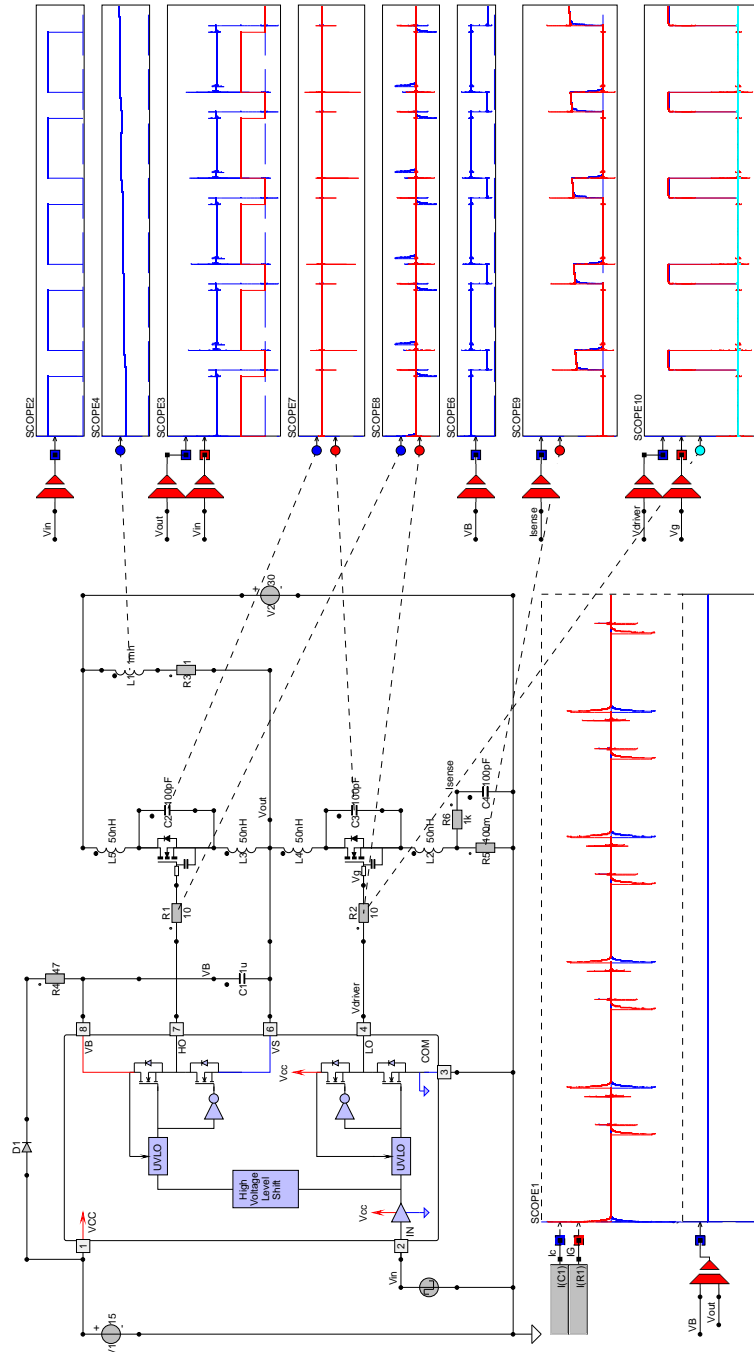
Schakelgedrag GateDriver en Mosfets

In deze opdracht gaan we bekijken wat de invloed van de parasitaire componenten rondom de Mosfet hebben en hoe de charge pump voor de High-side mosfet werkt. De schakeling is al voorbereid met scopes voor metingen en heet *les2/GateDriverIR2113Bootstrap.csi*

Er is een enkelzijdige belasting bestaande uit een serieschakeling van een R en L. De stroom door deze belasting heeft een initiële waarde van 1 Ampere en deze is in de spoel opgegeven.

2.1 Opdracht 6 Charge pump

Meet de amplitude van de stromen door D1, C1 ende beide gate weerstanden. Beschrijf wanneer welke stroom gaat lopen.



Figuur 2.1: Gatedriver met Bootstrap en Mosfets.

2.2 Opdracht 7 Uitgangsspanning

De uitgangsspanning heeft een verstoring tov het stuursignaal.

- Meet de uitgangsspanning.
- Waar worden de pieken op $7.004\mu s$, $10.49\mu s$, $10.758\mu s$ door veroorzaakt.
- Wat is de oorzaak van de kleine verhoging in V_{out} tussen $10.49\mu s$ en $10.758\mu s$ seconden.
- Geef aan waardoor de vertragingen tussen V_{in} en V_{out} ontstaan zijn.

In de Mosfet wordt lading opgeslagen in C_{ds}

- De capaciteiten C_{ds} van de Mosfet zijn extern gemodelleerd als $100pF$
- Meet de stromen in deze capaciteiten, wanneer treden ze op en waarom?

Bootstrap condensator spanning.

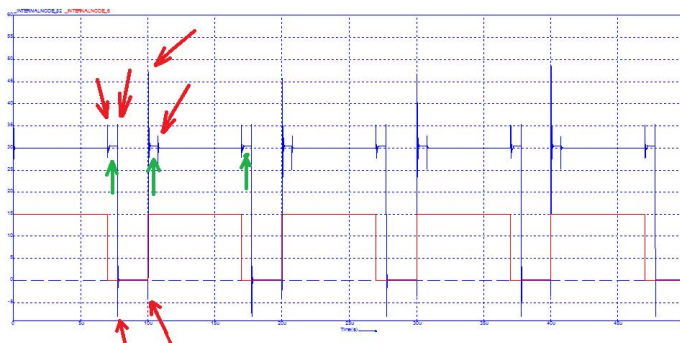
- Meet de spanning VB die op de high-side van de gate driver voedt. Vergelijk dit met de spanning die over de condensator C1 staat (scope5)
- Waar komen de pieken in de spanning op VB vandaan?

Stroommeting

- Meet de stroom door de low-side sense weerstand van $100m\Omega$
- Meet de spanning na het laagdoorlaatfilter bestaande uit R6 en C4
- Verklaar de pieken in de gemeten stroom.
- Wat is de functie van het laagdoorlaatfilter?

Gate spanning

- Meet V_{driver} en V_{gate} .
- Verklaar de pieken op V_{gate}



Figuur 2.2: V_{out} .

Deel III

Les 3

Hoofdstuk 3

Drie fasen inverter voor een elektrische auto

De instructies voor het maken van een drie fasen inverter voor een elektrische auto zijn online te vinden <http://dc-lab.org/hhs/ve2/>.

24HOOFDSTUK 3. DRIE FASEN INVERTER VOOR EEN ELEKTRISCHE AUTO

Deel IV

Les 4

Hoofdstuk 4

Thermische verliezen simuleren van de inverter

De instructies voor het simuleren van de inverter verliezen zijn online te vinden
<http://dc-lab.org/hhs/ve2/>.

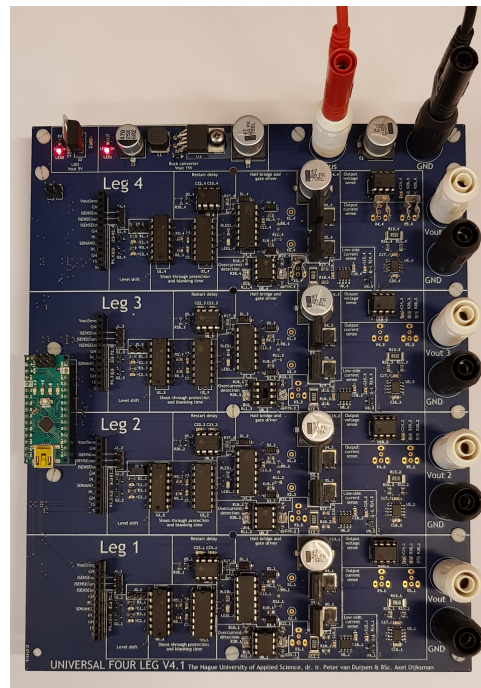
Deel V

Les 5

Hoofdstuk 5

Kennismaking The Universal Four Leg (U4L)

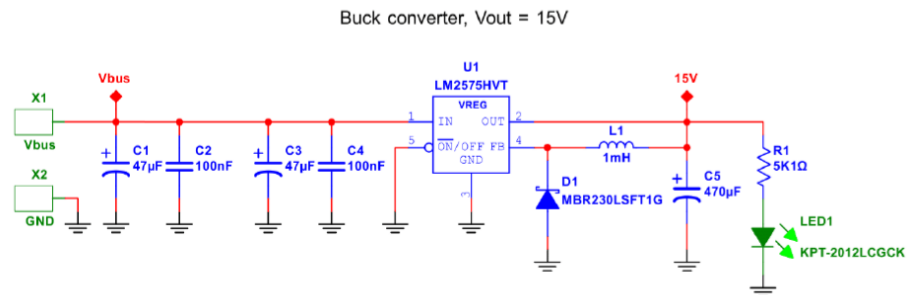
Er is nu voldoende kennis opgedaan om de werking van de inverter enigszins te begrijpen. In de volgende opdrachten gaan we de inverter opbouwen, waarbij je telkens een nieuw gebouwde circuit gaat testen, alvorens je de totale schakeling compleet hebt. Begin hierbij met de kleine SMD componenten en bouw zo door naar de grotere THT componenten. Elke deelschakeling is eenvoudig te testen door de gaten van de THT componenten of de IC houders te gebruiken als probe meetpunten. De U4L is ontworpen om maximaal 60V 10A aan te kunnen.



Figuur 5.1: De volledig geassembleerde Universal Four Leg (U4L).

5.1 Voeding

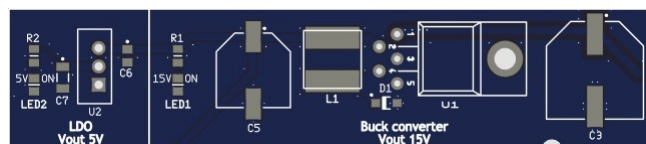
Voordat we met de opbouw en test van de inverter kunnen beginnen hebben we een stabiele voeding voor de gate driver nodig. Hiervoor gebruiken we een LM2575HVT. Deze kan van eeningangsspanning tot 60 volt, een constante uitgangsspanning van 15 volt maken. Dit is een buck converter, waarbij de regelaar en schakelaar in het IC geïntegreerd zijn.



Figuur 5.2: Voeding voor de gatedriver en sturelektronica.

Er hoeft alleen een inductiviteit, diode en uitgangscapacitor toegevoegd te worden. Omdat het IC geschikt is voor een uitgangsspanning van 15 volt, zijn er in de terugkoppeling geen extra weerstanden nodig.

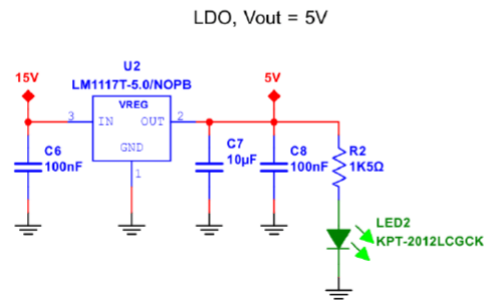
De maximale stroom die de voeding mag leveren is 1 Ampere. Andere varianten kunnen maximaal 0.5 of zelfs wel 3 Ampere leveren. De regeling is een eenvoudige hystereseregeling, dus de rimpel en ook de response op verandering is slecht, maar goed genoeg voor voeding van de regeling en aansturing van de inverter.



Figuur 5.3: Het voedingscircuit op de PCB van de U4L.

- Bouw de voeding rondom de LM2575HVT
- Sluit aan de uitgang de regelbare weerstand aan en stel m.b.v. de multimeter af op 150Ω, zorg dat deze weerstand deze energie kan dissiperen.
- Stel de labvoeding in op 30 volt en de stroombegrenzing op 0.5 Ampere.
- Aansluiten van de inverter op de labvoeding.
- Meet de uitgangsspanning en uitgangsstroom van de gebouwde voeding.
- Stel de lastweerstand in op 30Ω en meet de uitgangsspanning en uitgangsstroom door middel van een shunt.

Bouw gelijk de 5 Volt voeding, hiervoor gebruiken we de LM1117. Dit is een lineaire spanningsregelaar die 800mA kan leveren. Deze 5 Volt kunnen we gebruiken om later een Arduino Nano te kunnen voeden zonder gebruik te hoeven maken van een vermindering met de PC. De 5 Volt kan ook gebruikt worden om een logische '1' te maken.

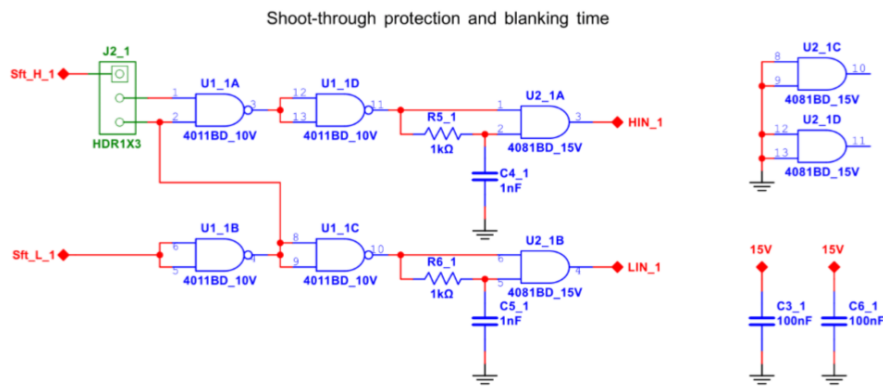


Figuur 5.4: Voeding van 5 volt voor Arduino Nano en Logische 1.

5.2 Shoot through en Blanking Time

We beginnen met een eenvoudige schakeling die ervoor moet zorgen dat de de ingangssignalen de Mosfets niet stuk kunnen maken, door ervoor te zorgen dat we ze nooit alle twee tegelijk aan kunnen zetten.

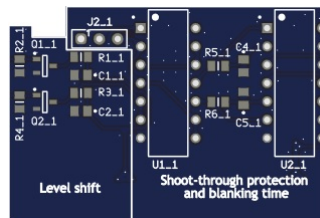
Als eerste zorgt het Shoot-through protection circuit gebouwd met 4 logische NOR's ervoor, dat in het geval dat beide Mosfets aangezet zouden worden, dit hier door het Shoot-through protection circuit verhinderd wordt. Als beide ingangen hoog worden, zal alleen de Low-side mosfet aan gaan en de High-side uit blijven.



Figuur 5.5: Shoot-through protectie en blanking time.

Als het stuursignaal voor de Low-side mosfet hoog is en de Low-side mosfet is in geleiding, dan mag de High-side mosfet niet aangezet worden. Het shoot-through protection circuit beschermd hier tegen en zal de High-side mosfet pas aanschakelen als het stuursignaal van de Low-side mosfet laag is.

Als tweede wordt er een blanking time circuit gemaakt met een logische AND en een RC vertragsingcircuit. In de datasheet staan het in- en uitschakel spanningsniveau van de AND. Mbv van het RC circuit wordt ongeveer een vertraging bij inschakelen van enkele 100..500ns verkregen. Dit is sterk afhankelijk van de gekozen R en C componenten, de voedingsspanning van de AND en de gekozen logische familie. Een CMOS zal anders schakelen dan een TTL.



Figuur 5.6: Level shifter shoot-through and blanking time circuit.

Om de schakeling te testen gaan we de ingangen van de logische poorten met een logische 0 en een logische 1 verbinden. De level shifter voor de logische poorten shift de spanning van 5V naar 15V. De logische 0 is een directe verbinding

met de de massa $0v$ van de inverter. De logische 1 verkrijg je door een extra labvoedingsspanning van 5 Volt of de 5 Volt van het voedingscircuit via een weerstand van $1k\Omega$ met de ingang van de logische poort te verbinden. Hiermee voorkom je dat je eventueel kortsluiting maakt of dat je een uitgang van een logische poort opblaast. Tip, gebruik de THT gaten van de GateDriver als testpunten nu deze nog niet gesoldeerd is.

- Bouw de schakeling
- Sluit de labvoeding aan en stel in op $30v$ met een stroombegrenzing van $100mA$.
- Test of de schakeling een stuursignaal kan doorgeven, van ingang naar uitgang. Doe dit eerst van de low side, daarna voor de high-side.
- Test of de shoot-through beveiliging werkt door beide ingangen aan te sturen.

In dit practicum gaan we mbv 1 stuursignaal de high- en lowside mosfet in de inverter sturen. Hiervoor moet een kleine draadbrug van de eerste NOR uitgang naar de ingang van de high side gemaakt worden. Nu is de high-side complementair met de low-side.

- Verstel de jumper J2_1.
- Sluit de labvoeding aan en stel in op $30v$ met een stroombegrenzing van $100mA$.
- Test of de schakeling een stuursignaal kan doorgeven, van low-side ingang naar low-side uitgang en naar high-side uitgang.

Vervolgens gaan we kijken of de schakeling goed werkt bij een hogere frequentie

- Stel op de signaalgenerator een blokgolf met een frequentie van $1kHz$ en een amplitude (Top-top) van $5v$ met een DC van $2.5v$. De blokgolf is dus tussen 0 en 5 volt.
- Test of de schakeling het stuursignaal van de signaalgenerator kan doorgeven, van low-side ingang naar low-side uitgang en naar high-side uitgang.

Een nog hogere frequentie

- Stel op de signaalgenerator een blokgolf met een frequentie van $45kHz$ en een amplitude (Top-top) van $5v$ met een DC van $2.5v$. De blokgolf is dus tussen 0 en 5 volt.
- Test of de schakeling het stuursignaal van de signaalgenerator kan doorgeven, van low-side ingang naar low-side uitgang en naar high-side uitgang.
- Meet de vertraging tijdens het in en uitschakelen van de van het stuursignaal.
 - Low-side inschakelvertraging:
 - Low-side uitschakelvertraging:

36HOOFDSTUK 5. KENNISMAKING THE UNIVERSAL FOUR LEG (U4L)

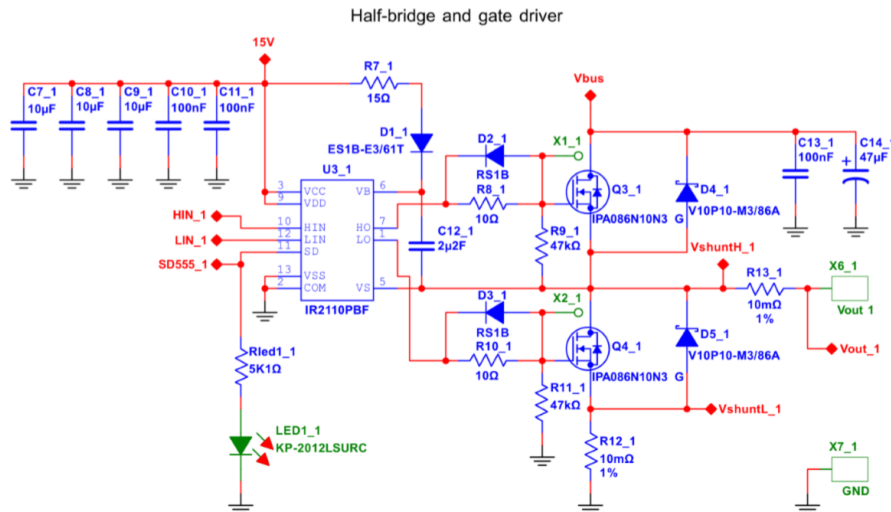
- High-side inschakelvertraging:
- High-side uitschakelvertraging:
- Beargumenteer dat je met deze vertragingen een blanking-time gerealiseerd hebt.

=====Aftekenen=====

Nu pas de Mosfets en GateDriver monteren.

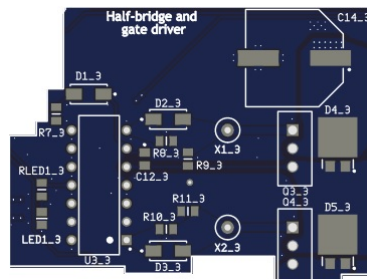
5.3 Mosfet en Gate driver

Als eerste gaan we de high-side en low-side mosfets monteren met de gate driver. Deze is dan aangesloten op de uitgangen van de AND gates die de blanking time maken. De charge pump om de high-side Mosfet gate driver van spanning te voorzien moet gemonteerd worden, evenals de stroom-sense weerstand met laagdoorlaatfilter en het laagdoorlaatfilter om de uitgangsspanning te meten.



Figuur 5.7: Gatedriver en Mosfets.

Als eerste monteren we het IC voetje van de gatedriver en de overige weerstanden, condensatoren, dioden en stroomsense draadbrug. Als de Mosfets gemonteerd moeten worden moet je opletten dat de spanning op de gate niet te hoog kan worden. Dit kan al gauw door statische elektriciteit gebeuren. Op de grond laten vallen en of met je vingers aanraken kan al fataal zijn. Het beste met een tangetje beetpakken en de pootjes mbv een krokodillenklemmetje kortsluiten, zodat in ieder geval V_{GS} gelijk aan 0 blijft en aard jezelf dan ook met een polsbandje. Vervolgens meteen op de pcb solderen, waar de discharge resistor van 47k de ontlading van V_{GS} kan overnemen.



Figuur 5.8: Gatedriver en Mosfets op de PCB van de U4L.

38HOOFDSTUK 5. KENNISMAKING THE UNIVERSAL FOUR LEG (U4L)

Vergeet niet de charge-pump te monteren voordat je spanning op de gate driver zet.

We gaan de uitgang van de inverter nu nog niet aansluiten, omdat we alleen spanning op de uitgang willen meten. Draag een veiligheidsbril voor je start met deze meting aangezien een fout tijdens het solderen er voor kan zorgen dat n van de componenten kan exploderen.

- Zorg ervoor dat er nog geen belasting op de uitgang van de inverter is.
- Stel op de signaalgenerator een blokgolf met een frequentie van $45kHz$ en een amplitude (Top-top) van $5v$ met een DC van $2.5v$. De blokgolf is dus tussen 0 en 5 volt.
- Stel de stroombegrenzer van de labvoeding op 300 mA.
- Test of de schakeling het stuursignaal van de signaalgenerator kan doorgeven, van low-side ingang naar low-side uitgang en naar high-side uitgang.
- Test of het stuursignaal wordt doorgegeven naar de ingangen Hin en Lin van de gate driver.

Als eerste gaan we meten of de uitgangsspanning het stuursignaal kan volgen.

- Meet de spanning op de uitgang van de inverter.
- Amplitude?
- Frequentie?
- Vergelijk de uitgangsspanning met het stuursignaal van de signaal generator

Meting van de blanking time direct op de uitgang als er geen belasting is, is erg lastig. Toch proberen we alvast vertraging in in de inverter te meten.

- Meet de spanning op de uitgang van de inverter en zoom in op het moment van schakelen.
- Meet het stuursignaal van de signaal generator, waarbij je de trigger op het stuursignaal zet.
- Meet de inschakelvertraging.
- Meet de uitschakelvertraging.

De vertraging die we zojuist gemeten hebben komt enerzijds van onze eigen blanking time, maar ook door het RC circuit bestaande uit R_{Gate} en C_{GS}

- Meet de spanning op de gate van de low side mosfet.
- Meet het stuursignaal van de signaal generator, waarbij je de trigger op het stuursignaal zet.
- Meet de inschakelvertraging.
- Meet de uitschakelvertraging.

- Meet de spanning op de gate van de low side mosfet.
- zet de trigger op de gate spanning.
- Meet de spanning op de uitgang van de inverter..
- Meet de inschakelvertraging.
- Meet de uitschakelvertraging.

Om er zeker van te zijn dat de charge pump voor de high-side gate driver voldoende spanning kan maken, gaan we deze spanning differentieel meten.

- Meet de spanning op de condensator die tussen V_s en V_b gemonteerd is.
- Laat de scope het verschil $V_b - V_s$ tussen de beide gemeten spanningen berekenen en weergeven.
- Is deze spanning gelijk aan ongeveer 15 volt en is deze constant?

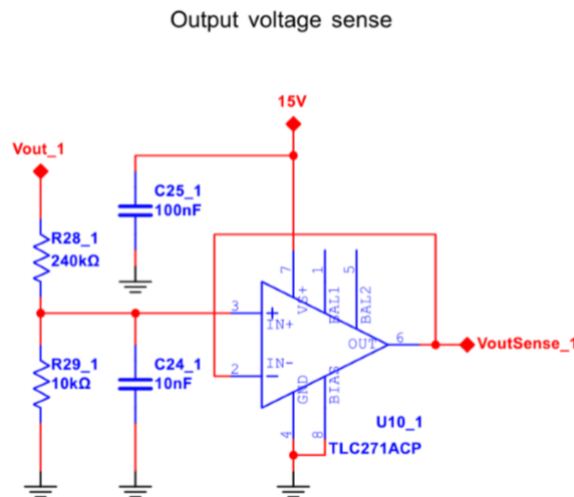
Iedere keer als de gatedriver de gate van de mosfet aanstuurd, loopt er een klein piekstroompje die C_{GS} snel kan opladen. Deze stroom gaan we als spanning over R_{Gate} meten.

- Meet de spanning over R_{Gate} .
- Laat de scope het verschil tussen de beide gemeten spanningen berekenen en weergeven.
- Wat is de piek waarde van deze stroom en hoe lang duurt het stroompulsje, voordat het minder dan 10% van zijn piekwaarde heeft.
- Bereken het oppervlak van het stroompulsje.(Stroom * tijd)

Het gemeten oppervlak van het stroompulsje is een maat voor de lading die in de gate van de Mosfet wordt opgeslagen. Zoek in de datasheet van de mosfet de grafiek voor Q_G en vergelijk het resultaat hiermee.

5.4 Meting uitgangsspanning

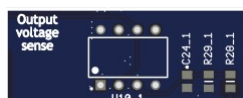
De uitgangsspanning van de inverter hebben we al verscheidene malen gemeten. Er zit echter ook een laagdoorlaatfilter op de pcb, waarmee de uitgangsspanning gefilterd wordt.



Figuur 5.9: Spanningsmeting.

Gebruik dezelfde instellingen en schakeling zoals in de vorige metingen, waarbij de belastingsstroom en spanning over de sense weerstand gemeten hebben.

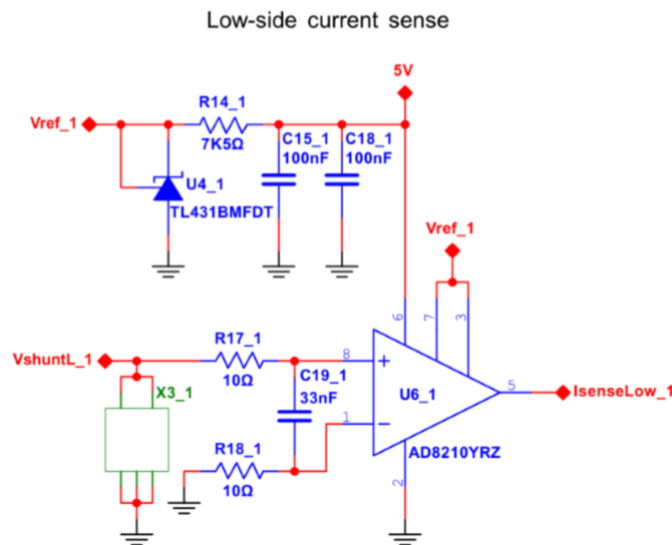
- Meet de spanning op de uitgang. Volgt deze het stuursignaal van de signaal generator?
- Bereken de gemiddelde spanning aan de uitgang en kijk in de scope of dit klopt.
- Meet met de tweede probe de spanning na het filter dat op de uitgang is aangesloten.
- Vergelijk de beide spanningen en verklaar. Klopt de gemeten spanning met de berekende gemiddelde spanning.
- Verander de dutycycle van het stuursignaal en meet op nieuwe de gemiddelde uitgangsspanning en de spanning na het filter. komen de gemiddelde waarden overeen?



Figuur 5.10: De Output Voltage Sense op de PCB van de U4L.

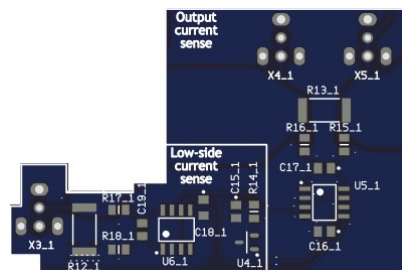
5.5 Meting Isense low side

De stroom door de belasting gaan we met een sense weerstand van $10m\Omega$ meten. De stroom door de belasting gaat ook door deze sense weerstand en kunnen we dus meten als spanning over deze sense weerstand. Omdat we de noise van het schakelen willen filteren, is er op de pcb al een RC filter met een tijdconstante van $1\mu s$ gemaakt en meten we dus eigenlijk al een gefilterde spanning over de sense weerstand. Let op, omdat de sense weerstand een waarde van $10m\Omega$ heeft, meten we de stroom dus met een verzwakking van een factor 100. Deze verzwakking gaan we vererop weer corrigeren met versterkerschakelingen.



Figuur 5.11: Stroommeting shunt.

Om een stroom door de belasting te krijgen, gaan we een grote weerstand als belasting aansluiten. En met grote bedoelen we dan dat de maximale stroom door deze belastingsweerstand ruim onder de maximale stroom in de inverter blijft, zodat er niets mis kan gaan tijdens het meten. De stroom moet ook weer niet te klein zijn, anders valt er niets te meten. We kiezen een weerstandswaarde van 100Ω tot 330Ω zodat de stroom ruim onder de $500mA$ blijft. Let op het vermogen dat in deze weerstand opgestookt wordt.



Figuur 5.12: Stroommeting low-side shunt op de PCB van de U4L.

42HOOFDSTUK 5. KENNISMAKING THE UNIVERSAL FOUR LEG (U4L)

Sluit de belastingsweerstand tussen de de uitgang en de positieve DC spanning aan. Als de low-side mosfet nu aangaat, zal er stroom door de belastingsweerstand en de sense weerstand vloeien.

- Stel de signaal generator in op een blokgolf met een frequentie van $50kHz$ en een dutycycle van 0.5.
- Stel de stroombegrenzing van de labvoeding op 1 Ampere in, zodat deze niet meteen afslaat.
- Meet de spanning op de uitgang. Volgt deze het stuursignaal van de signaal generator?
- Bereken de gemiddelde spanning aan de uitgang en kijk in de scope of dit klopt.
- Meet de spanning over de belastingsweerstand en bereken de gemiddelde stroom door de belastingsweerstand.
- Omdat de positieve DC spanning altijd constant is, kan je voor deze meting volstaan met het meten van alleen de uitgangsspanning. De stroom is dan $(V_{DC} - V_{out})/R_{last}$. Klopt dit met je verwachting als je het antwoord vergelijkt met de vorige meting?

Omdat we de stroom door de belasting met 1 probe kunnen meten, kunnen we de tweede probe gebruiken om de spanning over de sense weerstand te meten.

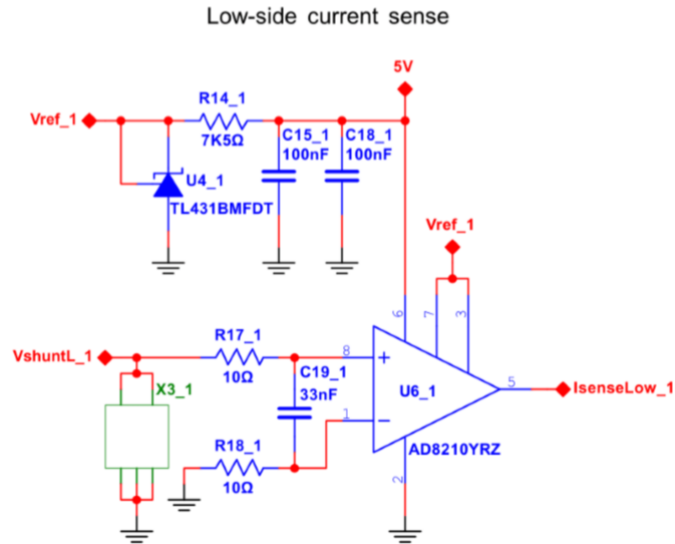
- Meet de spanning over de weerstand R_{sense} . Let op dat het lusje van de probe klein blijft, eventueel een pigtail op de probe maken.
- Vergelijk de spanning over de sense weerstand met de uitgangsspanning. Zie je afwijkingen in de signalen.

Uit de laatste meting wordt duidelijk dat er allerlei transiënten op de uitgangsspanning zitten ten gevolge van het schakelen. Ook de spanning over de sense weerstand is niet helemaal vrij van stoorpulsjes. Als we deze spanning zouden gebruiken in de regeling, zou dat de werking kunnen verstoren. Daarom gebruiken we een klein laagdoorlaatfilter, bestaande uit een weerstand met een ceramische condensator. Let op dat bij de metingen de loop van de ground connector klein is.

- Meet de spanning over de sense weerstand.
- Meet met de tweede probe de spanning na het filter.
- Vergelijk de beide spanningen en verklaar.

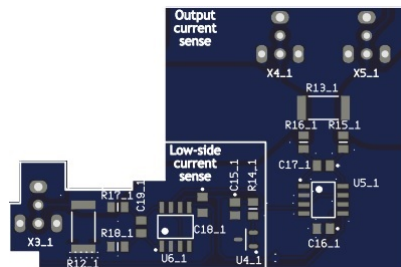
5.6 Stroomversterker low side

Monteer de Opamp van de stroomversterker en de weerstanden en condensatoren die hierbij horen.



Figuur 5.13: Versterking van de stroommeting.

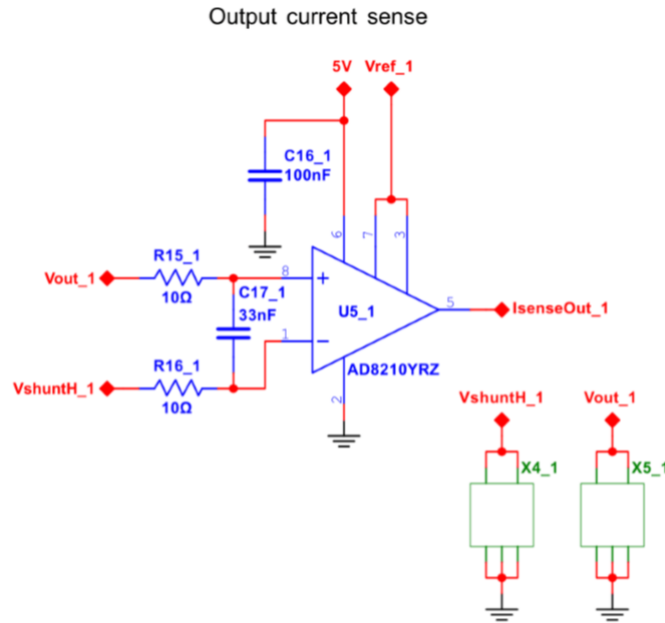
- Meet de spanning over de sense weerstand.
- Meet de spanning aan de uitgang van de stroomversterker.
- Verander de dutycycle van het stuursignaal en herhaal bovenstaande metingen.
- Verklaar de relatie tussen deze twee gemeten spanningen aan de hand van de schakeling rondom de opamp.
- Waarom deze schaling? Hint: Denk aan een digital regeling die hier eventueel achter zou kunnen komen.



Figuur 5.14: Versterking van de stroommeting op de PCB van de U4L.

5.7 Meting Isense high side

Er zit ook een sense weerstand tussen de mosfets en de output terminal. Hiermee kan de uitgangsstroom gemeten worden door het spannings verschil over deze weerstand te meten. De sense weerstand heeft een waarde van $10m\Omega$ wat resulteert in een verzwakking factor 100. Figuur 3.14 bevat ook de high-side shunt.



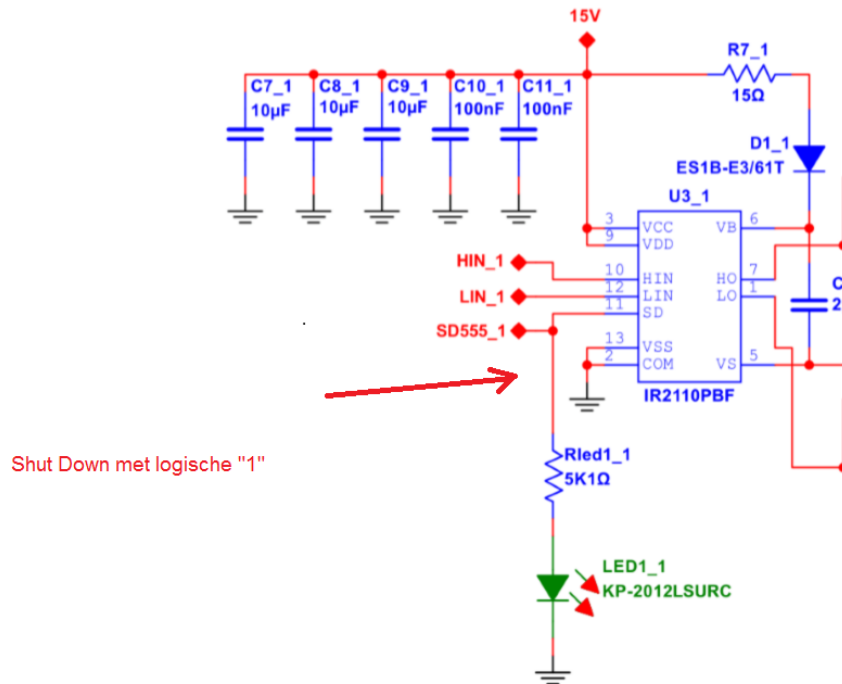
Figuur 5.15: Stroommeting high side.

Sluit de belastingsweerstand tussen de de uitgang en de positieve DC spanning aan. Als de low-side mosfet nu aangaat, zal er stroom door de belastingsweerstand en de sense weerstand vloeien.

- Meet de spanning over de sense weerstand met hulp van de math functie op de oscilloscoop.
- Wat maakt het lastig om deze stroom te meten?
- Meet de spanning aan de uitgang van de stroomversterker.
- Wat is het verschil tussen high-side current meeting en de low-side current meeting?

5.8 SD, Restart Delay, Overcurrent Detection

De gate driver heeft een Shut Down ingang (SD). Deze gaan we gebruiken om mbv een stroombegrenzer de inverter uit te kunnen zetten in geval van kortsluiting aan de uitgang, waardoor de belastingsstroom te hoog zou kunnen worden. Als de shutdown hoog is gaat de rode led branden.

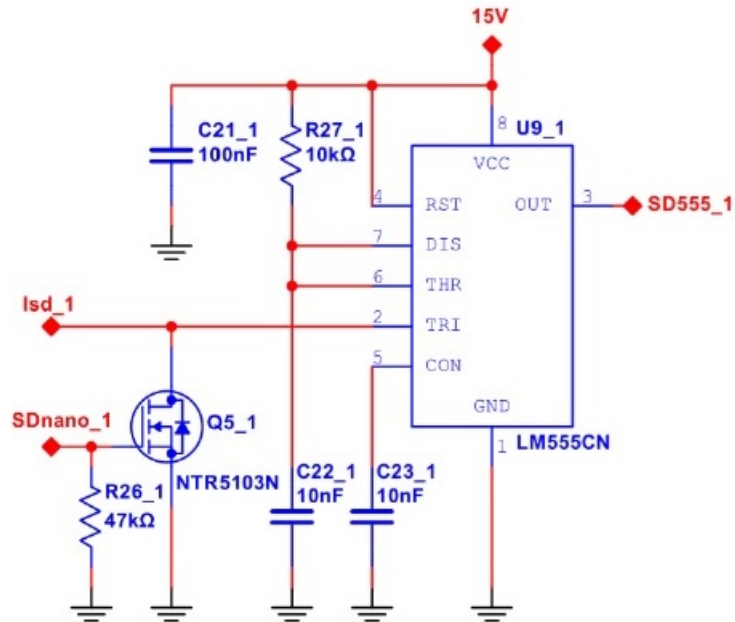


Figuur 5.16: Shut down in geval van een overstroom.

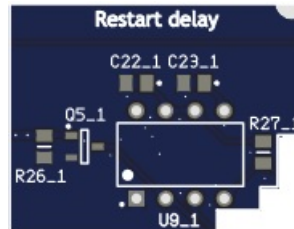
De shutdown staat in verbinding met de Restart Delay. Dit is een 555Timer die ook opgebouwd moet worden om dit gehele circuit te kunnen testen. Daarom springen we naar de deel schakeling om vervolgens de alle testen en metingen te kunnen uitvoeren. Als het goed is zal een volledige leg zijn opgebouwd bij het starten aan de bijbehorende opdrachten van dit hoofdstuk.

46HOOFDSTUK 5. KENNISMAKING THE UNIVERSAL FOUR LEG (U4L)

De timer in dit circuit zorgt voor de tijd vertraging. Dit zorgt er voor dat er bij een overcurrent het circuit niet gaat oscilleren. De 555Timer zal het inschakelen vertragen als de overstroom gezakt is onder de ingestelde waarde.



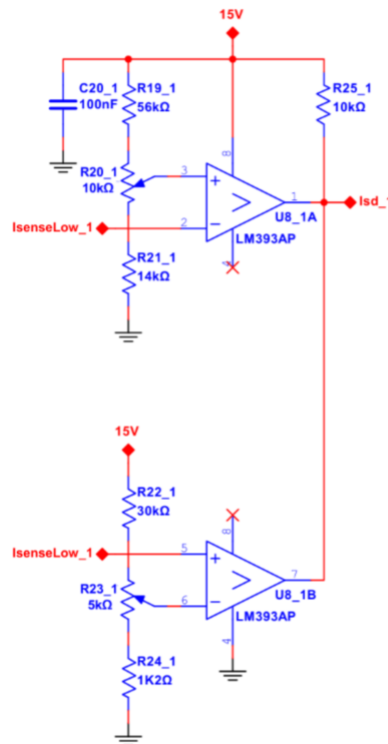
Figuur 5.17: Restart Delay



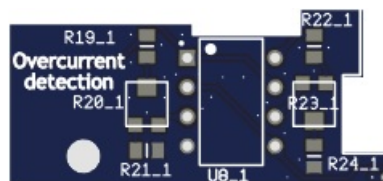
Figuur 5.18: Restart Delay op de PCB van de U4L.

Deze ingestelde waarde wordt bepaald door de Overcurrent Detection. Monteer nu alle componenten van het circuit en ga door naar het Overcurrent Detection circuit op de volgende pagina behandeld.

Monteer nu de laatste componenten voor de Overcurrent Detection. Een comparator LM393AP vergelijkt de gemeten versterkte stroom met een referentie drempelspanning die mbv een weerstandsdeling gemaakt is. Deze weerstandsdeling is aan te passen via de potentiometers R20.1 en R23.1. De comparator heeft een open collector uitgang, zodra een van de uitgangen laag is.



Figuur 5.19: Overcurrent Detection die de Shut Down SD van de gate driver aanstuurt.



Figuur 5.20: Overcurrent Detection op de PCB van de U4L.

48HOOFDSTUK 5. KENNISMAKING THE UNIVERSAL FOUR LEG (U4L)

Opdrachten Shutdown

- Meet de stroom door de sense weerstand door meting van de spanning over de sense weerstand.
- Maak nu een logische 1 (mbv een weerstand van $1k$ aangesloten op de $+5v$)
- Wat doet de stroom als SD hoog wordt?

Opdrachten Overcurrent Detection

- Meet de drempelspanning aan de ingang van de comperator.
- Bereken de grootte van de lasstroom die nodig is om boven de drempelspanning uit te komen.

Sluit een R-L last in de vorm van een grote schuifweerstand aan tussen $+V_{dc}$ en V_{out} . Een eventuele stroom door de last wordt nu direct door de senseweerstand gemeten.

- Stel de stroombegrenzing van de labvoeding op 5 Ampere.
- Pas indien nodig de potentiometers van de weerstanddeling aan om de stroombegrenzing op 3A in te stellen.
- Kies een lastweerstand die geschikt is voor de stroom die hierover gaat lopen.
- Sluit de signaal generator op de ingang van de inverter aan en stel een blokgolf met een frequentie van $50kHz$ in.
- Verklein de lastweerstand tot de stroom boven de maximale stroom uitkomt en de SD ingang van de Gate driver hoog wordt.
- Meet de minimale uit tijd als de maximale stroom overschreden wordt.

Deel VI

Les 6

Hoofdstuk 6

Inverter opbouwen met de U4L

Nu gaan we een digitale regeling toevoegen aan de Universal Four Leg. De digitale regeling zit in de Arduino Nano die past op de U4L. De opdracht is nog in ontwikkeling en zal tijdens de les worden toegelicht...

Deel VII

Les 7

Hoofdstuk 7

Uitloop en/of verdiepende opdracht

Ter verdieping gaan we nu de stroom met de stroomsensoren in de inverter zelf meten. Er zijn twee sensoren. De low side sense weerstand tussen de Source van de Mosfet en aarde en de sense weerstand aan de uitgang van de inverter. Daarnaast meten we de spanningsgolfvormen aan de uitgang van de inverter tijdens het schakelen. Hiervoor laten we op de scope zowel de gate spanning als de spanning V_{ds} van de low side alsmede de stroom door de uitgangs sense weerstand zien. Een 4-Kanaals scope is dus wat je nodig hebt! De opdracht is nog in ontwikkeling en zal tijdens de les worden toegelicht...

Deel VIII
Appendices

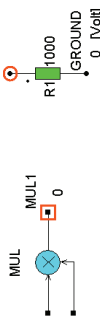
Bijlage A

Quickstart

QUICK HELP

Find more Help on www.simulation-research.com/help

Multilevel
Caspoc is a multilevel simulation and animation program. Therefore you can combine system and circuit components in one schematic. Circuit nodes are round and system nodes are square. Connect circuits and systems using controlled sources and sensors. Do not make a connection between circuit and system nodes



Select a component:

Move the mouse over the component on the left side, click and release the left mouse button over the component, drag the mouse and click the left mouse button again to place the component.

Move component:

Click the component with the left mouse button, drag the component and release the left mouse button to place the component.

Draw wire:

Click with the left mouse button on a node, drag the mouse and draw the wire by releasing the left mouse button.

Remove component/Wire:

Click the component/Wire with the left mouse button and press the [Delete] key on the keyboard

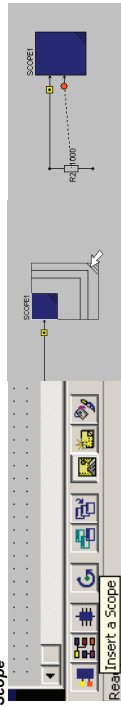
Edit component parameters:

Click the component with the right mouse button

Move selection:

Draw a rubber band around a group of components/wires, by keeping the left mouse button down during drawing the rubber band. Move the selection by dragging the selection with the left mouse button down.

Scope



Open a scope :

Click the right mouse button on the scope, use the arrow keys to step through the scope results

More scope inputs:

Drag the right bottom scope tip with the left mouse button

Measure voltage in scope

Connect the scope input to a node, by clicking, dragging and releasing the input of the scope over a node using the left mouse button

Measure current in scope

Connect the scope input to a component, by clicking, dragging and releasing the input of the scope over a component using the left mouse button.

Tscreen / dt

Tscreen is the length of you screen and dt is the step size for the simulation. For rectifiers choose Tscreen=100m and dt=100us, for a PWM power electronics choose, for example 20kHz, Tscreen 1ms dt=1us

Ground

After inserting the first component in the schematic, Caspoc asks you automatically insert a 'Ground' node. Always have at least one ground node in your electric circuit, which has 0 volt.

Where to find components

Power electronics

- Basic components in components/circuit R L C Mosfet Diode IGBT etc
- DC sources as well as AC sources are in components/circuit/sources
- Control sources in components/library/source/system SinWave SquareWave TriangleWave
- Control blocks for smps in components/library/control/smps
- PI controllers in components/library/control/continuousControllers
- Discrete PI controllers in components/library/control/DiscreteControllers
- Current and voltage measurement in components/library/sensors
- Sample & Hold and ADC are in components/library/controllers
- ADC are to be found as the FIX block in components/blocks/Nonlinear
- Average components for buck and boost are in components/library/powerconverters/averaged

Electric drives

- Electrical machines are in components/library/electricmachines
- Inverters and modulation are in components/library/powerconverters/inverters/3phase
- Mechanical loads are either in components/circuit/rotational for basic linear components like inertia, bearing and shaft deflection (spring), while more elaborate models are to be found in components/library/mechanical/rotational for gearbox, stick-slip and quadratic loads.
- Voltage and current measurement are in components/library/sensors
- Park and Clarke transformations are in components/library/electricmachines/transformation
- Interfacing from two signals (alpha, beta or dq) into one vector signal are in components/library/AED/Interface, use signal2vector to create the vector signal and use vector to signal to get back to two separate signals
- Vectorized mathematical operations are to be found in components/library/AED/math/vector
- Vectorized PI controllers are in components/library/AED/control/vector and in components/library/AED/Discrete/vector
- Vectorized limiter is in components/library/AED/NonLinear/vector
- Vectorized Ac source is in components/library/AED/source
- Vectorized as well as scalar park/clarke/polar transformations are in components/library/AED/Transformation/General

Solar

Solar cells, modules, arrays as well as MPP controllers are in components/library/GreenEnergy/solar

Wind Energy

Wind turbine, Cp and maximum power control are in components/library/greenenergy/wind

Grid Connection

See the section on electrical drives for three phase inverters and modulation as well as the section on power electronics for the control

Battery

Battery models are in components/library/electric/battery

Filters

Filters are available as continuous or in discrete for in components/library/filters

Transformers

Single and three phase transformers are in components/library/transformers

Power Systems

- Specialized components for power system modeling are in components/library/powersystems, such as power lines, distributed lines, PQ loads, switches and faults

- Converters for power system modeling are to be found in components/library/powerconverters/system

Sensors(Voltage/Current/Power/Speed/Torque)

Measuring Voltage, Current, Power, Power Factor as well as Angular Speed, Torque, Rotational Power, are in components/library/sensor

Start Simulation
Pressed: The simulation holds after Tscreen seconds, press [ENTER] to continue. Not pressed, the simulation keeps on running.

Enable the animation

100% or view all

Simulation Parameters
Tscreen = length of your screen
dT = simulation step size (= Tscreen/1000)

Search for components:
Enter a search term (for example: solar) and click the magnifier button, select a component from the list.

Open the scope with the right mouse button

Enter numerical value by clicking the node with your right mouse button

Freeze and Go-Back to replay the simulation

Insert as Scope

Insert a Note

Insert a UpDown

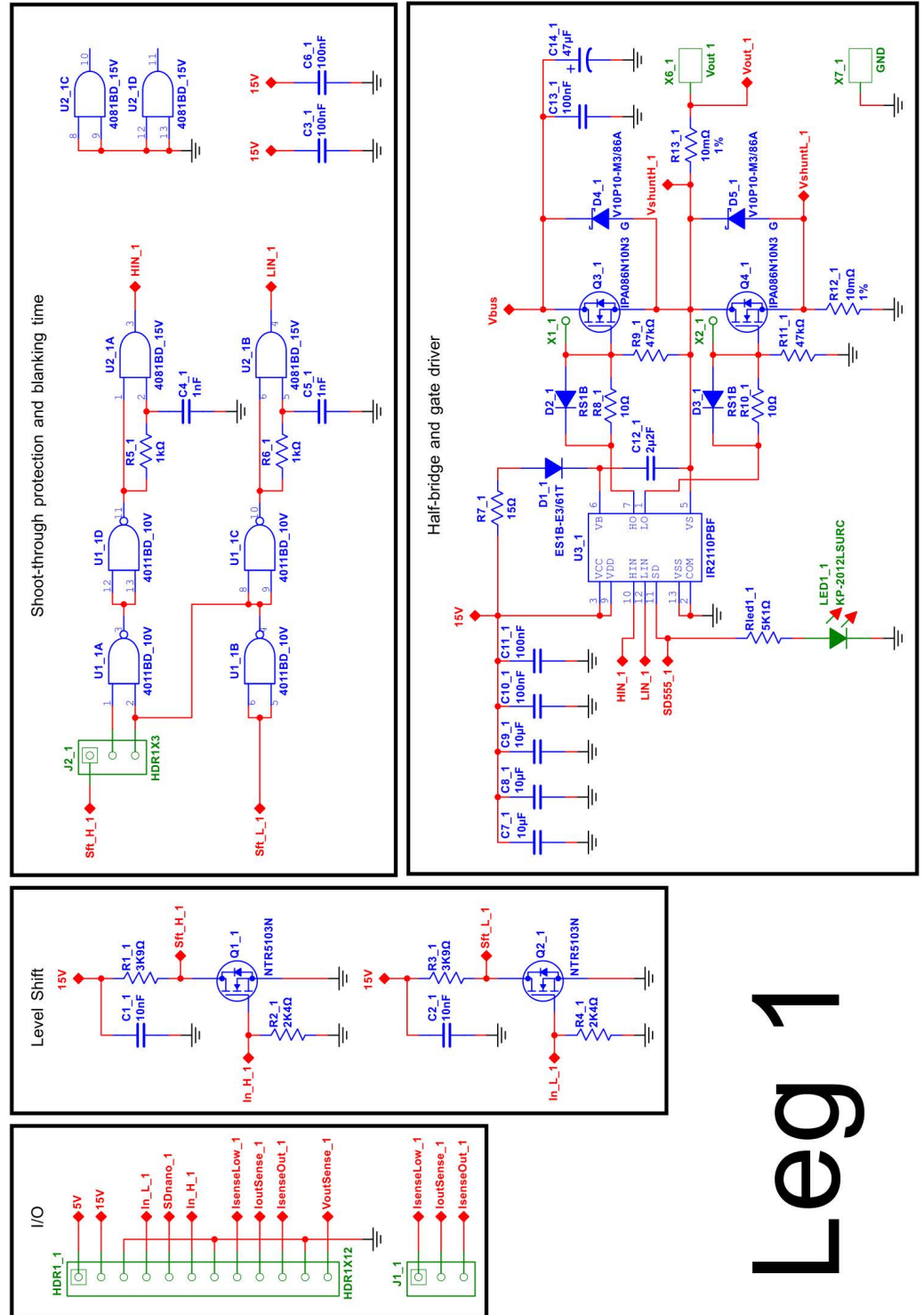
Move your mouse pointer over a component

T = 1e12
 G = 1e9
 MEG = 1e6
 K = 1e3
 M = 1e-3
 U = 1e-6
 N = 1e-9
 P = 1e-12
 F = 1e-15
 For example:
 R = 1Kohm
 C = 1uF
 L = 1mH

File	Viewing	Editing	Scrolling	Zooming
[Ctrl]+[O] Open	[F1] Online Help	[Esc] Cancel selection	[Ctrl]+[←] [↑] [↓] [→]	[+] Zoom in
[Ctrl]+[S] Save	[F5] Redraw scope	[Esc] Cancel drawing wires	[PgDn] [PgUp] [End] [Home]	[-] Zoom out
	[F7] Toggle Animation	[Delete] Selected Components/Wire	Scroll the schematic	Numerical Keypad

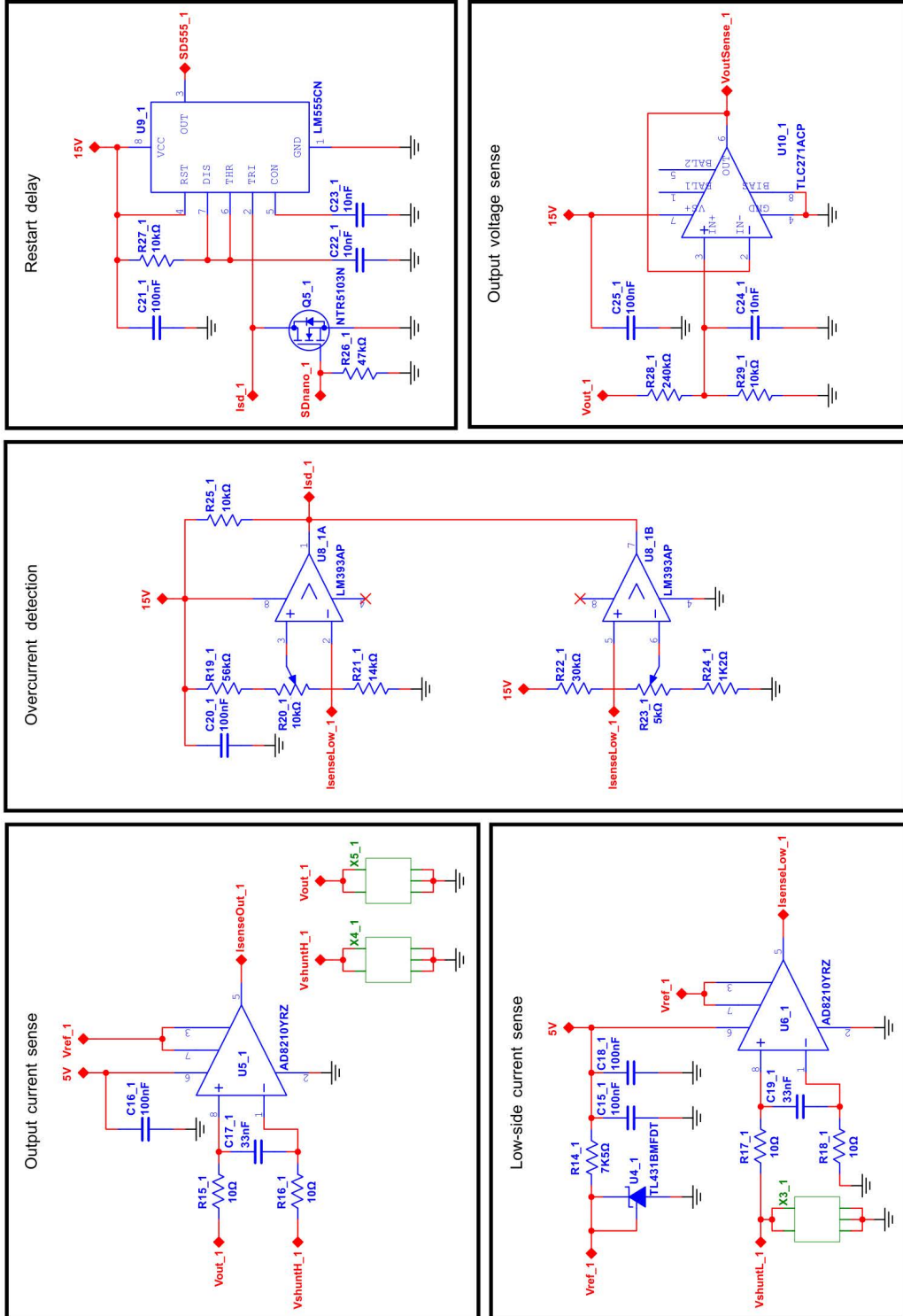
Bijlage B

Schema Universal Four Leg

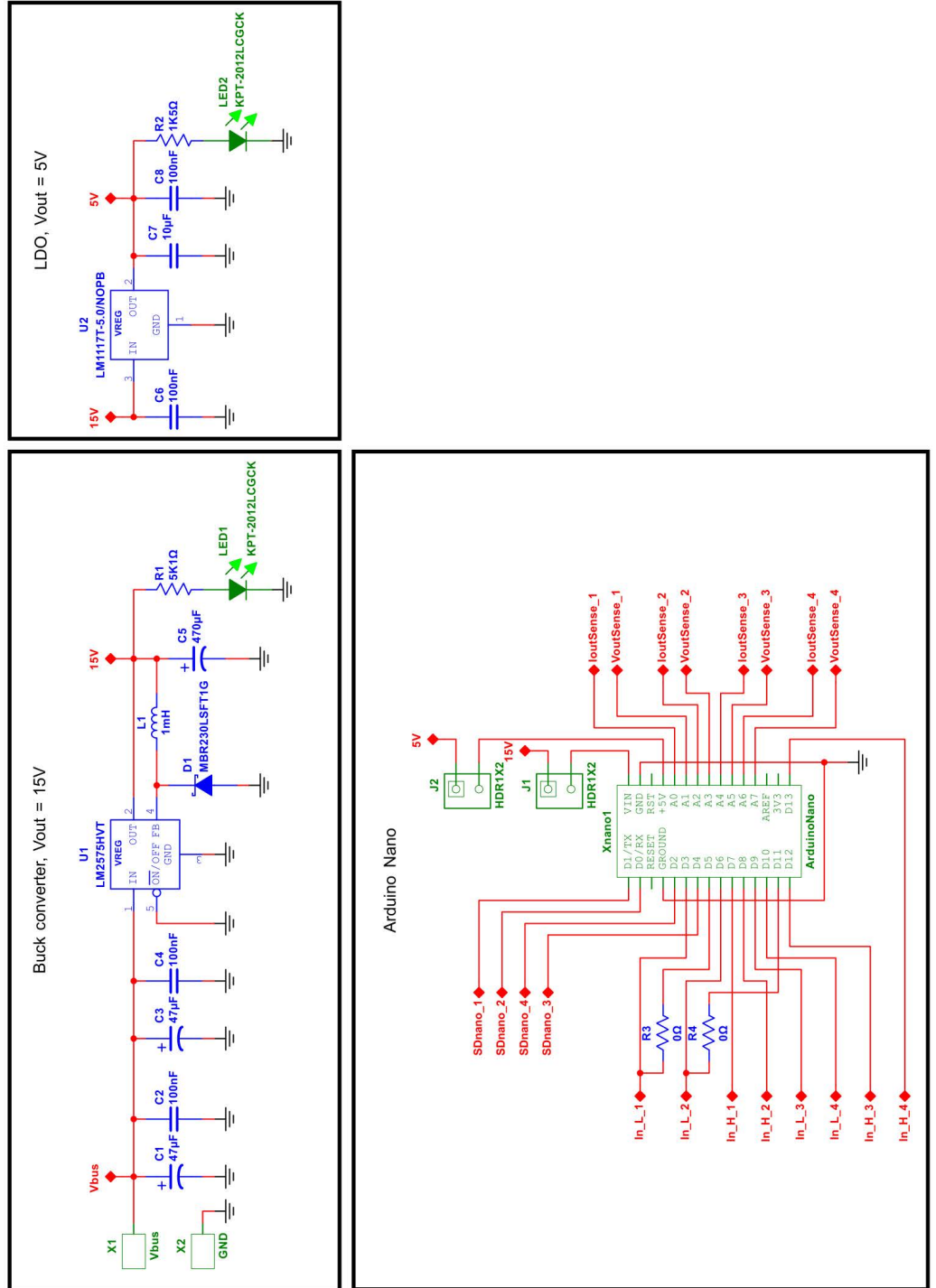


Leg 1

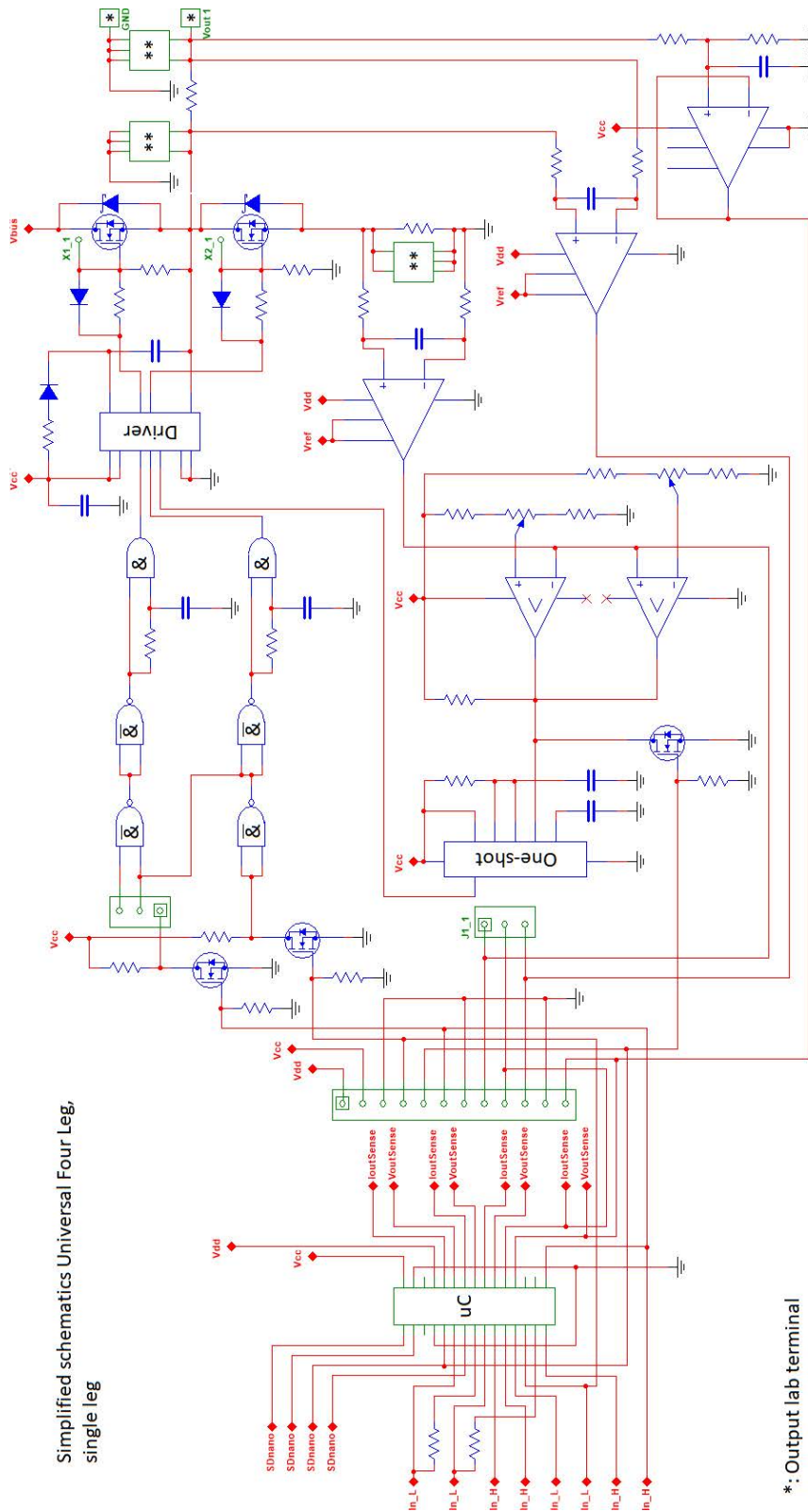
Figuur B.1: Schema 1.Level shift, protection, gate driver and half-bridge



Figur B.2: Schema 2.Sense circuits and overcurrent



Figuur B.3: Schema 3.Buck converter and LDO



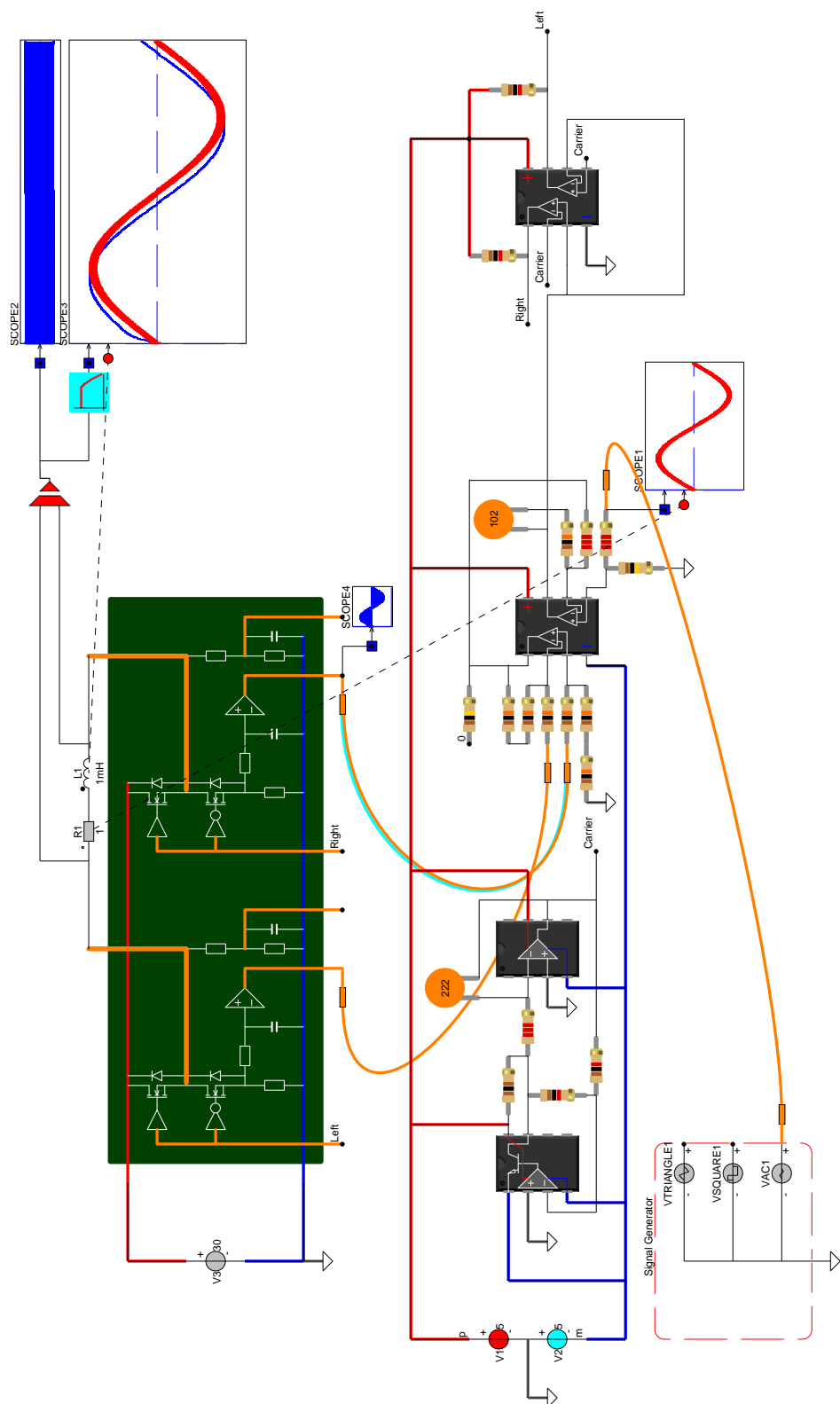
Figuur B.4: Schema 4. Simplified Schematics Single Leg.

##	Description	PCB Mounted Components		Farnell Order #
		Package	RefDes	
6	Al Electrolytic Capacitor, 47µF, 100V	AlumElec-CaseH13	C1, C3, C14_1, C14_2, C14_3, C14_4	9696148
20	Ceramic Capacitor, 10nF, 25V, 5%, X7R	Chip-C0805	C1_1, C1_2, C1_3, C1_4, C2_1, C2_2, C2_3, C2_4, C22_1, C22_2, C22_3, C22_4, C23_1, C23_2, C23_3, C23_4, C24_1, C24_2, C24_3, C24_4	2896555
	Ceramic Capacitor, 100nF, 100V, 10%, X7R	Chip-C0805	C2, C3_1, C3_2, C3_3, C3_4, C4, C6, C6_1, C6_2, C6_3, C6_4, C8, C10_1, C10_2, C10_3, C10_4, C11_1, C11_2, C11_3, C11_4, C13_1, C13_2, C13_3, C13_4, C15_1, C15_2, C15_3, C15_4, C16_1, C16_2, C16_3, C16_4, C18_1, C18_2, C18_3, C18_4, C20_1, C20_2, C20_3, C20_4, C21_1, C21_2, C21_3, C21_4, C25_1, C25_2, C25_3, C25_4	2896560
48				
8	Ceramic Capacitor, 1nF, 100V, 10%, X7R	Chip-C0805	C4_1, C4_2, C4_3, C4_4, C5_1, C5_2, C5_3, C5_4	2812430
1	Al Electrolytic Capacitor, 470µF, 25V	Can-SMD(G)	C5	2611316
13	Ceramic Capacitor, 10µF, 25V, 10%, X5R	Chip-C1206	C7, C7_1, C7_2, C7_3, C7_4, C8_1, C8_2, C8_3, C8_4, C9_1, C9_2, C9_3, C9_4	2320887
4	Ceramic Capacitor, 2µF, 25V, 10%, X7R	Chip-C0805	C12_1, C12_2, C12_3, C12_4	2495194
8	Ceramic Capacitor, 33nF, 50V, 5%, X7R	Chip-C0805	C17_1, C17_2, C17_3, C17_4, C19_1, C19_2, C19_3, C19_4	2896579
1	Schottky Rectifier, MBR230LSFT1G	SOD-123FL-2	D1	2317422
4	Fast/Ultrafast Diode, ES1B	DO-214AC	D1_1, D1_2, D1_3, D1_4	1611158
8	Fast Recovery Rectifier, RS1G	DO-214AC	D2_1, D2_2, D2_3, D2_4, D3_1, D3_2, D3_3, D3_4	2677340
8	Schottky Rectifier, V10P10-M3/86A	TO-277-3(TO-277A)	D4_1, D4_2, D4_3, D4_4, D5_1, D5_2, D5_3, D5_4	1736078
4	Board-To-Board Connector, 2.54 mm, 12 Contacts, Receptacle	HDR1X12	HDR1_1, HDR1_2, HDR1_3, HDR1_4	1593465
2	Board-To-Board Connector, 2.54 mm, 2 Contacts, Header	HDR1X2	J1, J2	1593411
8	Board-To-Board Connector, 2.54 mm, 3 Contacts, Header	HDR1X3	J1_1, J1_2, J1_3, J1_4, J2_1, J2_2, J2_3, J2_4	1593412
1	Shielded Power Inductor, 1mH, SMD, 480/650mA	8mm x 8mm x 6.5mm L1	L1	2749061
2	Low Power LED, Red, KP-2012LSGC	Chip-L0805	LED1, LED2	2468786
4	Low Power LED, Green, KP-2012LSURC	Chip-L0805	LED1_1, LED1_2, LED1_3, LED1_4	2468794
12	MOSFET, N-Channel, 260 mA, 60 V, 1 ohm, 10 V, 2.6 V, NTR5103NT1G	SOT-23-3	Q1_1, Q1_2, Q1_3, Q1_4, Q2_1, Q2_2, Q2_3, Q2_4, Q5_1, Q5_2, Q5_3, Q5_4	2724423
8	MOSFET, N Channel, 45 A, 100 V, 0.0075 ohm, 10 V, 2.7 V, IPA086N10N3 G	TO-220-3-FP	Q3_1, Q3_2, Q3_3, Q3_4, Q4_1, Q4_2, Q4_3, Q4_4	2480793
5	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 5.1 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R1, Rled1_1, Rled1_2, Rled1_3, Rled1_4	2073796
8	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 3.9 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R1_1, R1_2, R1_3, R1_4, R3_1, R3_2, R3_3, R3_4	2074455
1	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 1.5 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R2	1099801
8	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 2.4 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R2_1, R2_2, R2_3, R2_4, R4_1, R4_2, R4_3, R4_4	2447625
2	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 0 ohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R3, R4	2747563
8	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 1 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R5_1, R5_2, R5_3, R5_4, R6_1, R6_2, R6_3, R6_4	2447587
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 15 ohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R7_1, R7_2, R7_3, R7_4	2861500
	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 10 ohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R8_1, R8_2, R8_3, R8_4, R10_1, R10_2, R10_3, R10_4, R15_1, R15_2, R15_3, R15_4, R16_1, R16_2, R16_3, R16_4, R17_1, R17_2, R17_3, R17_4, R18_1, R18_2, R18_3, R18_4	2447556
24				

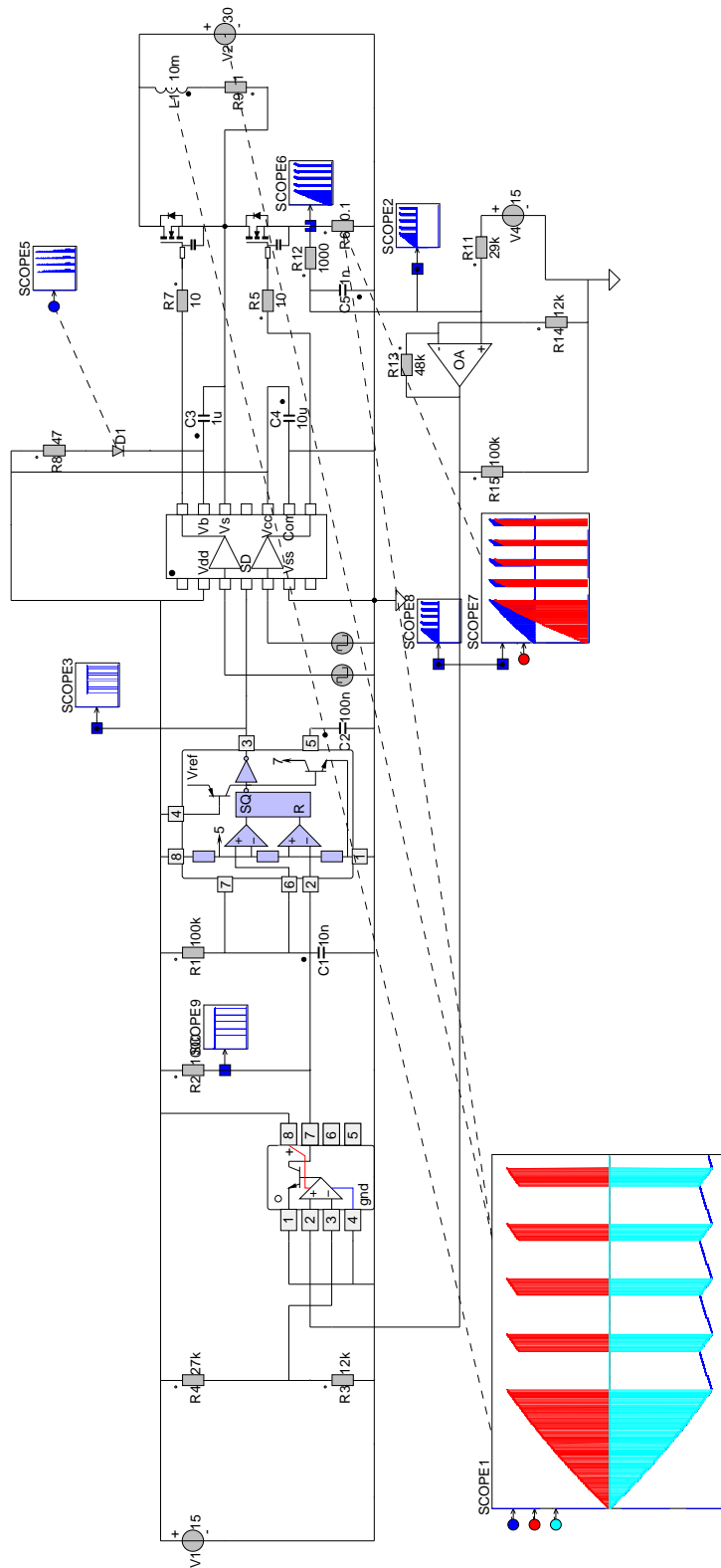
Figuur B.5: Bomlijst 1.

PCB Mounted Components			Farnell Order #
#	Description	Package	RefDes
12	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 47 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R9_1, R9_2, R9_3, R9_4, R11_1, R11_2, R11_3, R11_4, R26_1, R26_2, R26_3, R26_4
8	SMD Current Sense Resistor, 0.01 ohm, 2512 [6432 Metric], 2 W, ± 1%	Chip-R2512	R12_1, R12_2, R12_3, R12_4, R13_1, R13_2, R13_3, R13_4
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 7.5 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R14_1, R14_2, R14_3, R14_4
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 56 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R19_1, R19_2, R19_3, R19_4
4	TC33X-2-103E - Trimmer Pot-meter, 10 kohm, 1 Turn, SMD, 100 mW, ± 25%	TC33X-2	R20_1, R20_2, R20_3, R20_4
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 14 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R21_1, R21_2, R21_3, R21_4
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 30 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R22_1, R22_2, R22_3, R22_4
4	TC33X-2-502E - Trimmer Pot-meter, 5 kohm, 1 Turn, SMD, 100 mW, ± 25%	TC33X-2	R23_1, R23_2, R23_3, R23_4
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 1.2 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R24_1, R24_2, R24_3, R24_4
12	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 10 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R25_1, R25_2, R25_3, R25_4, R27_1, R27_2, R27_3, R27_4, R29_1, R29_2, R29_3, R29_4
4	SMD Chip Resistor, 0805 [2012 Metric], 240 kohm, 150 V, 125mW, 1%	Chip-R0805	R28_1, R28_2, R28_3, R28_4
1	LM2575HVT-15 - Buck Regulator, 4V-60V In, 15V And 1A Out	TO-220-5	U1
4	CD4011BE - Quad NAND Gate, CD4011, 2 Input, 6.8 mA, 3 V to 18 V	PDIP-14	U1_1, U1_2, U1_3, U1_4
1	LD1117V50 - LDO Regulator, 1.1V Dropout, 5Vout, 800mAout	TO-220-3(NDE)	U2
4	CD4081BE - Quad AND Gate, CD4081, 2 Input, 6.8 mA, 3 V to 18 V	PDIP-14	U2_1, U2_2, U2_3, U2_4
4	IRS2110PBF - Dual MOSFET Driver, High & Low Side, 2.5A Out, 120ns Delay	PDIP-14	U3_1, U3_2, U3_3, U3_4
4	TL431BMFDT - Voltage Reference, Precision, Shunt - Adjustable	SOT-23-3(DBZ)	U4_1, U4_2, U4_3, U4_4
8	AD8210VRZ - High Voltage, Current Sense Amplifier, Bidirectional	SOIC-N-8(R-8)	U5_1, U5_2, U5_3, U5_4, U6_1, U6_2, U6_3, U6_4
4	LM393AP - Dual Comparator, Rail to Rail, Differential, 300 ns, 2V to 36V	PDIP-8	U8_1, U8_2, U8_3, U8_4
4	NE555P - Single Precision Timer in DIP-8 Package	PDIP-8	U9_1, U9_2, U9_3, U9_4
4	TLC271ACP - Single Operational Amplifier, 1.7 MHz, 3.6 V/µs, 3V to 16V	PDIP-8	U10_1, U10_2, U10_3, U10_4
12	Fuseholder, PCB Mount, 10A, 5mm, Through Hole, Silver Plated	Probe-Clamp	X3_1, X3_2, X3_3, X3_4, X4_1, X4_2, X4_3, X4_4, X5_1, X5_2, X5_3, X5_4
2	Board-To-Board Connector, 2.54 mm, 15 Contacts, Receptacle	Arduino-Nano	Xnano
1	Arduino Nano, ATmega328 MCU, 14 3.3V I/O, 6 PWM Outputs, USB Mini B		
12	8 Contacts, DIP Socket, 2.54 mm, 7.62 mm, Phosphor Bronze		
12	14 Contacts, DIP Socket, 2.54 mm, 7.62 mm, Phosphor Bronze		
20	Serrated Washer, Shakeproof, 4.3 mm, 8 mm, Steel, Zinc		
			Confad Order #
1	Laboratoriumbus Bus, inbouw verticaal Stäubli XUB-G Stift-Ø:4 mm Rood	Lab_Terminal	X1
5	Laboratoriumbus Bus, inbouw verticaal Stäubli XUB-G Stift-Ø:4 mm Zwart	Lab_Terminal	X2, X7_1, X7_2, X7_3, X7_4
4	Laboratoriumbus Bus, inbouw verticaal Stäubli XUB-G Stift-Ø:4 mm Wit	Lab_Terminal	X6_1, X6_2, X6_3, X6_4
Other Components			
			Farnell Order #
17	Standoff, Nylon (Polyamide), M3, Round Female-Female, 20 mm		2691460
17	Machine Screw, M3, 6 mm, Nylon 6.6 (Polyamide 6.6), Cheese Head Slotted		7070585
10	Jumper, Board-to-Board Header Connectors, 1 Ways, 2.54 mm		2834675
			RS Order #
1	Heatsink, TO-220, 16.8°C/W, 19.05 x 24.89 x 11.18mm, PCB Through Hole		712-4207

Figuur B.6: Bomlijst 2.



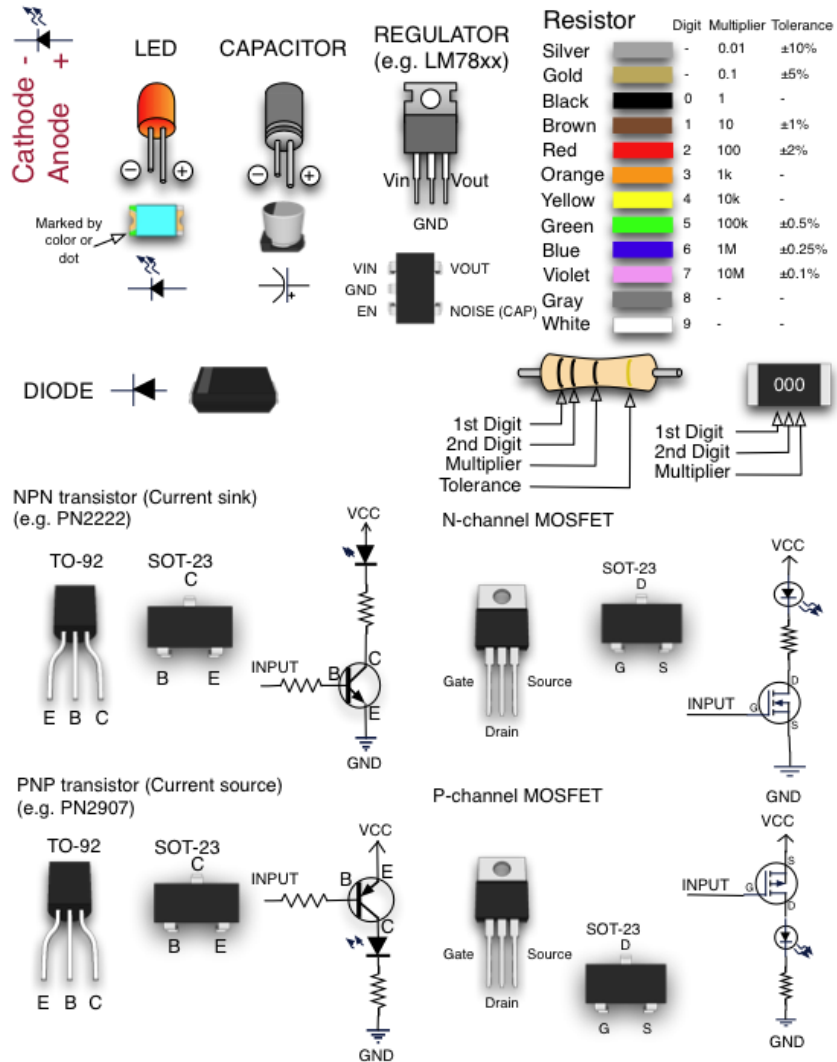
Figuur B.7: Verbindingen tussen de inverter en de analoge regeling.



Figuur B.8: Single leg van de inverter.

Bijlage C

Datasheet



* Please note that some components may have a different pinout than the one showed above, you should always check the data sheet before using a new component.

