

+300 en -200V (25W) zelfbouw voeding

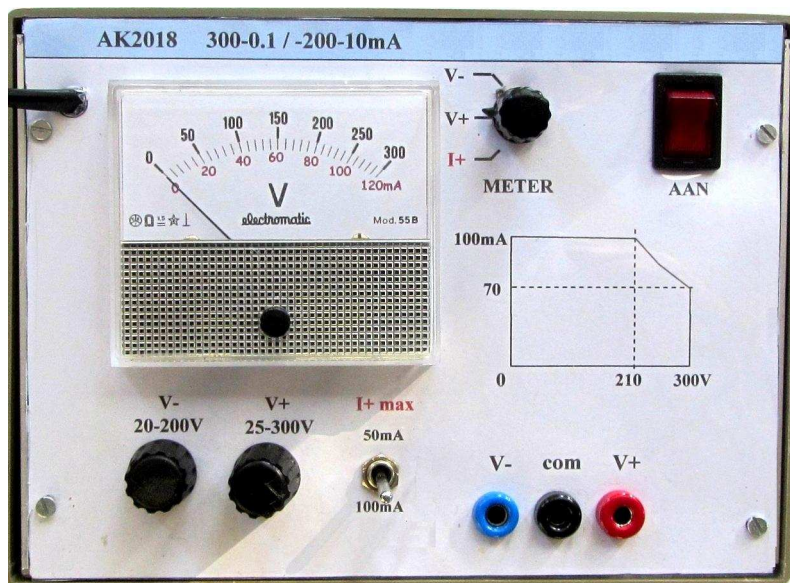
sept 2017- dec 2018 kb

Voor de test van buizen- elektronica wilde ik een compact voedingsapparaatje ontwerpen dat past in mijn standaard dichte kunststof bakjes van 17 x 12 x 7 cm . Gezien dit compacte formaat is minimale warmteproductie vereist, dus worden het schakelende halfgeleiders.

Een instelbare spanning van 20-300V lijkt handig, bij minstens 70mA, tot 210V zelfs tot 100mA, begrensd op 50 of 100mA; en een tweede uitgang instelbaar van -2 tot -200V, begrensd op 10mA.

De rimpel op beide uitgangen moet liefst minder dan 0.2V top-top zijn.

Zo mogelijk een derde uitgang voor gloeidraden, 6.3V~ / 3A



De meter kan 3 grootheden tonen, gekozen met de draaischakelaar rechts naast de meter:

De middelste stand is het 300V bereik. Vanhier kun je omlaag naar de "plus" stroom of omhoog naar de "min"spanning, ook op de 300V schaal.

- Spanning op blauwe V- uitgang 0 tot *min* 200V (bovenste schaal, 10V/div)
- Spanning op rode V+ uitgang 0 - +300V (ook bovenste schaal)
- Stroom uit rode V+ uitgang 0 - 120 mA (onderste schaal, 4mA/div)

Met de knoppen onder de meter stel je V+ en V- in.

Om de voeding kortsluitvast te maken hebben beide uitgangen stroombegrenzing en wel op 50 of 100mA voor V+ resp. 10mA voor de V- uitgang.

Het ontwerp was een uitdaging om deze eisen in een dergelijk klein kastje te realiseren. Ik had een nettrafo voor galvanische scheiding, en gekozen voor een chopper naar de plus uitgang en een serietransistor voor de min uitgang.

De beschikbare trafo was de beperkende factor met een 250V wikkeling die maar 85mA (opdruk) mag. Dit komt overeen met een gelijkstroom van maximaal 60mA, aangezien de stroom in de transformator niet-sinusvormig is wegens de diodebrug.

Simulatie leert dat bij 5k belasting (300V-60mA) de trafo stroom 106mA is, dus al enige over belasting. Maar het valt mee: Op basis van de koperweerstand mag de wikkeling veel meer. De stroom die 10% spanningsdaling geeft is $10\% \times 270V / 170\Omega = 159 \text{ mA}$. Primair is er ook geen probleem, de 6.3V wikkeling wordt niet gebruikt.

De ontwikkeling duurde meer dan een jaar. In het begin de mechanische zaken, daarna de warmte huishouding, en tenslotte de emc aspecten ,vooral de rimpel op de uitgangsspanningen.

Specificaties

Ingang 230V ac 50Hz Max 25VA

Uitgang 1: +15 ... 300V, 100mA max , 21W max
Rimpel *) < 0.2Vpp, 60 mV rms (100Hz, 300Hz en 28 kHz)

Uitgang 2: - 2 ... - 200V, 10mA max
Rimpel *) < 0.2Vpp, 60mV rms (100Hz en 28 kHz)
Bij inschakelen komt de "min" uitgang als eerste op.

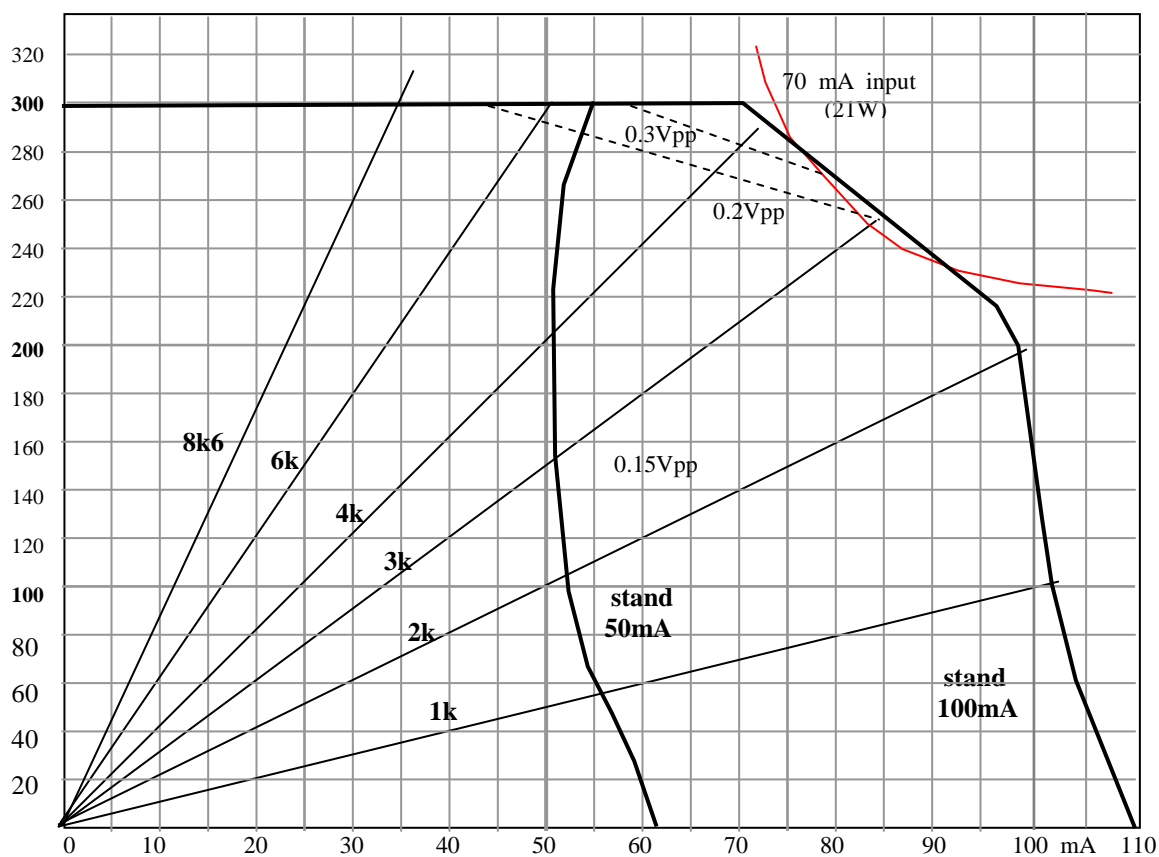
Gewicht 2.2 kg

Afmeting 17 x 12,5 x 7 cm

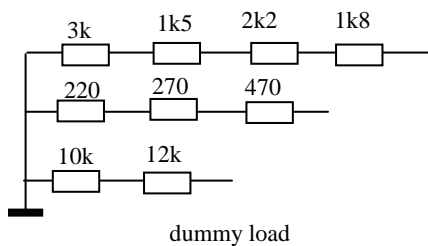
*) Alleen bij de hoogste spanning en belasting is de rimpel groter, zie diagram hier onder.

Het V-I gebied van belastingen is voor uitgang2 vierkant.

Het V-I gebied van belastingen is voor uitgang1 als onderstaand.



Stand 10 dec 2018



Werking

1. Vermogens deel

Een gewone 50Hz trafo verzorgt de scheiding tussen net en uitgangen. Deze trafo heeft een secundaire 270V wikkeling met opdruk 250V (belast), 85mA. (60mA gelijkgericht)

Hierna zit een schakelende regelaar voor de plus uitgang, en een lineaire regelaar voor de min uitgang. De schakelende regelaar maakt meer dan 60mA aan de uitgang mogelijk.

Plus regelaar

Hoewel een downchopper met één fet mogelijk is, werd hier gekozen voor twee fets zodat ook kleine stroom en lage spanning lineair gemaakt kan worden.

De ruwe dc spanning is 350V, en de schakelfrequentie is 28 kHz. (35µs periode duur)

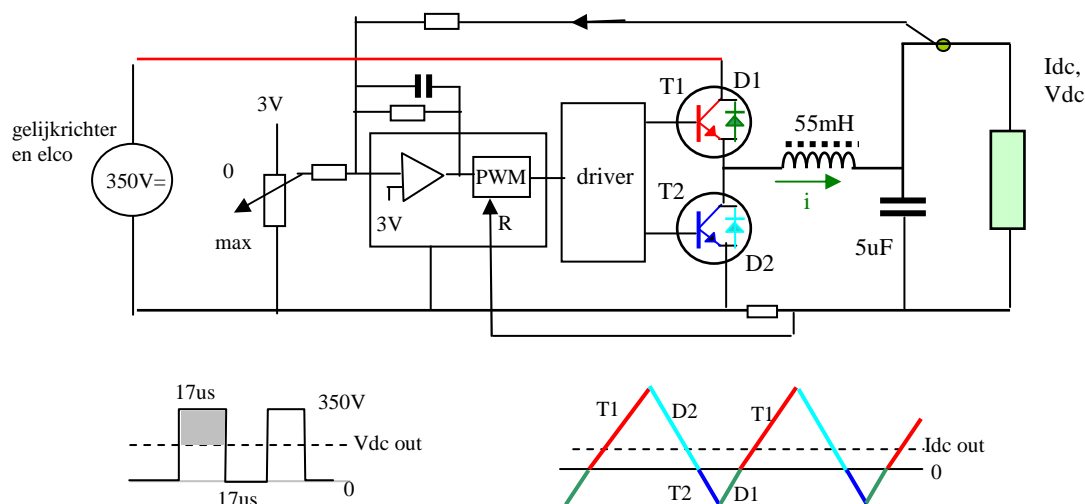
De stroomrimpel als functie van de uitgangsspanning is $I_{pp} = (V_{dc} - V_{dc}^2/350) \times 17\mu s / 55mH$

Dit is maximaal bij halve uitsturing (grijze vlakje): $17\mu s \times 175V / 55mH = 54mA_{pp}$

De onderste FET doet dus alleen mee bij minder dan 27mA belasting.

Het (schakel) verlies in de fets, en het verlies in de spoel door de rimpelstroom die er altijd is, bedraagt ca 2W.

Onderstaand de golfvorm van de spanning tussen de fets, en de stroom in de smoorspoel. Bij lage belasting wordt de stroom in de spoel steeds even negatief.



De rimpelspanning aan de uitgang is vrijwel sinusvormig. Bij halve uitsturing is deze het grootst, en aannemend dat de (driehoek) stroom veel op een sinus lijkt is de rimpelspanning dan $54mA_{pp} / (2\pi 28kHz \times 5 \mu F) = 61mV_{pp}$. In de praktijk hoger wegens de ca 2Ω ESR van de elco. Overigens zijn de 100Hz en 300Hz rimpelcomponenten veel groter dan deze 28kHz rimpel.

Er worden twee IC's gebruikt: de eerste bevat een opamp, een pulsbreedte generator, en levert een stabiele referentie spanning. Het tweede circuit verzorgt de aansturing van de FETs. De bovenste FET wordt "zwevend" aangestuurd, gate en source staan steeds even op +350V. Het zwevende deel van deze chip wordt gevoed door een bootstrap schakeling. Dit vereist dat de onderste FET steeds even (minstens 1µs) aan staat, dus de dutycycle is maximaal $(1-1\mu s/35\mu s) = 97\%$. De ruwe voeding moet minstens 310V leveren wil je 300V output halen. Met deze trafo kwamen de "dalen" van de 100Hz rimpelspanning van de ruwe DC spanning hier onder, zodat extra afvlakking nodig was.

2. Detail beschrijving schakeling "plus" regelaar

Gelijkrichter

Dit is een conventionele diodebrug met 100uF afvlak elco. Wegens de bootstrap schakeling moeten ook de dalen van de rimpelspanning bij max. stroom > 312V zijn. Hiervoor bleek extra afvlakking nodig in de vorm van een RC filter.

Regeling "plus" kant, de NE5561

Ik heb de NE5561 gekozen omdat ik er nog 20 had. Dit 8-pens IC bevat een opamp, een pulsbreedte generator, en levert een stabiele referentie spanning. Van dit IC zijn na 20 jaar geen specificaties of appl notes meer te vinden, zodat gegevens ontbreken over belastbaarheid van de ref uitgang etc.

Dankzij de +3.5V op de + ingang van de opamp is het mogelijk een regelaar te maken zonder negatieve hulpvoeding. De potmeter levert van +3.5V tot 0 ; de hoogspanning gaat dan van 0 tot $(1M/10k) \times 3.5 = 350V$. De opamp is een klassieke PI regelaar met uitsturing begrenzing. De lus bandbreedte is ca 1kHz. Terugkoppeling vanuit de dc uitgang lukt niet stabiel omdat het LC filter dan in de lus zit, en sterk afhankelijk is van elco's in de belasting. Gekozen is een terugkoppeling via een RC filter **direct** vanuit de PWM spanning tussen de FETs. Dit maakt de regeling sneller en geheel onafhankelijk van de belasting. De pwm index begrenzing wordt voor stroombegrenzing gebruikt. Om slingering na laststappen te vermijden heeft het filter een RC demptak.

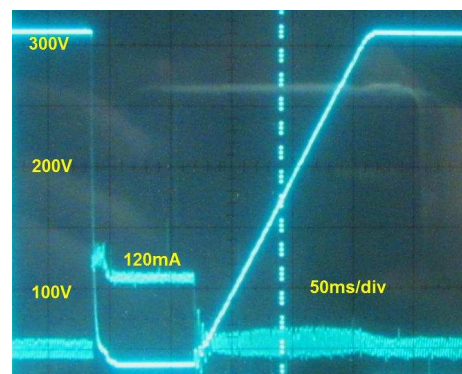
De NE5561 heeft een open-collector uitgang, de geleidende stand is de actieve stand, dus laag. Het driver IC verwacht juist een hoge ingang om de bovenste FET aan te sturen. Er is dus een **omkeer** trapje nodig tussen pwm chip en driver. En een extra pull-up weerstand om de uitgang van de PWM chip *snel* hoog te trekken, anders verdwijnt de kortste "hoog" puls die minstens 1us moet zijn om de bootstrap elco voor de bovenste FET te laden, hierover later meer.

Stroombegrenzing

Dit is een twee-traps regeling. Enerzijds als analoge begrenzing op de pwm index bij overstroom (of kortsluiting) anderzijds digitaal door pulsdropping via een ingang van de NE5561.

De stroom in de smoorspoel loopt door de afvlak-C en de belasting, en dus ook door de shunt in de min leiding. Dit is de dc stroom gesuperponeerd op een 28kHz (scheve) driehoek.

Als de spanning over de shunt 0.5V bereikt, dan gaat een transistor de PWM index begrenzen, wat een langzame stroombegrenzing geeft. Bij meer dan 0.8V over de shunt wordt ook de PWM cyclus afgebroken, T1 dooft en D2 of T2 gaat aan. Op de foto is dit goed te zien bij een bijna kortsluiting. (5Ω shunt) De stroombegrenzing is iets spanningsafhankelijk: 110mA bij 0V en 300V output (pure dc), maar bij 175V is het maar $110 - 17 = 93mA$ wegens de grotere rimpelstroom.



Als de ingestelde spanning meer dan 200V is zal de *ingangs* stroom meer dan 70mA worden, wat teveel lijkt voor de trafo. Er is dan ook een extra terugkoppeling van de spanning naar de stroom begrenzing gebruikt om dit te voorkomen. Dit is een 200V zener diode in serie met een weerstand. De weerstand is zodanig gekozen dat bij 300Vdc de ingang stroom wordt begrensd tot ca 70mA. Er wordt dan 0.18V toegevoegd aan de spanning over de shunt t.g.v de spanning die achter de zenerdiode overblijft, dus $100V \times (2k7/1M5) = 0.18V$. Bij de "50mA" stand van de stroombegrenzing is deze begrenzing afgeschakeld.

Kortsluiting De uitgangsspanning kan normaal terug geregeld worden tot 25V. Bij een volle kortsluiting moet echter nul volt aan de uitgang geleverd worden. Dit gaat hikkend.

Rimpel op de plus uitgang.

Bij maximale spanning en stroom komt een deel van de 100Hz rimpel uit de gelijkrichter in de uitgang omdat dan de regelaar "uitgeregeld" is. In de plus voeding is daarom een RC filter aangebracht van 470Ω en 33uF. Hiermee wordt de ruwe rimpel (4Vpp bij 21W) meer dan 10x verzwakt.

De **100 Hz** (zaagtand) komt uit de gelijkrichter.

De (onverzadigde) regelaar kan dit wegwerken.

De **300 Hz** component is de eigenfrequentie van het LC filter. De regellus ziet deze rimpel niet.

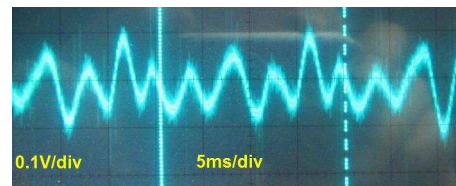
Met een RC dempsectie is deze rimpel bijna weg.

De **28 kHz** component is het restant van de PWM golf, en is

het grootst bij halve spanning (170V). Deze is verkleind met een extra zuigkring , 100uH en 0.33uF.

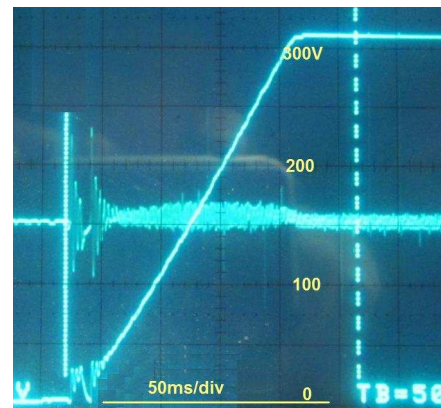
Een **30MHz** component (haren), ontstaat door capaciteef overgedragen haren van FETs naar heatsink.

Met een C van heatsink naar nul en een CM spoel zijn de haren op de uitgangen weg.



Inschakelgedrag

Als de voeding wordt ingeschakeld, gaan de ruwe ingangs spanningen naar +360V, -337V en +12V. Dat duurt even, waarbij de negatieve spanning eerder moet komen dan de positieve zodat radiobuizen "uit" beginnen. Dit bepaalt de maximale elco in de min voeding. De uitgangs spanningen moeten ook niet even boven de ingestelde waarde komen.



Uitschakelen.

Na een halve seconde stopt de PWM, en blijft de onderste FET aan. In nullast is de uitgangs elco dan nog tot 200V geladen, en deze ontladtd zich nu via de spoel. Dit levert een resonante slinger op, waarbij de uitgangsspanning in 1.5ms naar -150V gaat. Een vrijloopdiode op de uitgang voorkomt dit.

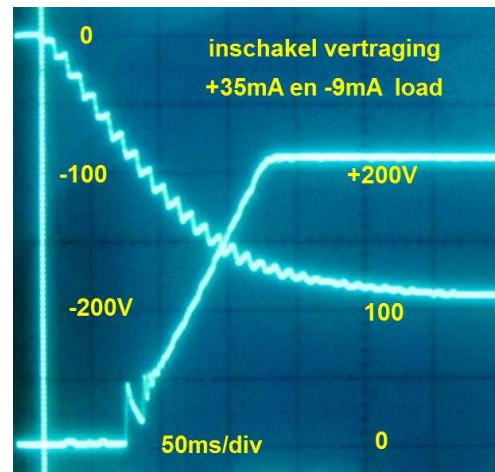
3. Het min 200V deel

Gelijkrichter. De voedingstrafo heeft maar één wikkeling, die gebruikt wordt voor de +300V uitgang via een diodebrug. Met twee 1uF condensatoren wordt een *virtuele tweede* wikkeling gemaakt, die na gelijkrichting -337V maakt met een inwendige weerstand van **10k**. (in vollast dus min 230V)

De stijgtijd is $10k \times 10uF = 100ms$ tot 200V

Na uitschakelen blijven de 1uF C's geladen (330V) zodat een 3M3 bleeder weerstandje nodig was. Als je de 10uF elco kortsluit, loopt er 37mA dc, een back-up begrenzing door 2x 1uF in serie. ($270 \times 0.5uF \times 2\pi 50 = 43mA$ rms)

Foto: belast inschakelen met +200V en -200V ingesteld. Dit is OK voor buizen apparatuur.



De ruwe spanning op de 10uF buffer elco is:

Situatie	Vdc	rimpel(100Hz)
Onbelast	-337V	3Vpp alleen regelaar (2mA) en voorbelasting (1mA)
Vollast	-238V	7Vpp last @ -200V / 22k = 9mA, + regelaar. (+ uitgang onbelast)
idem	-216V	10 Vpp zelfde 9mA, echter plus uitgang ook volbelast.
worst case:	-216V met 10mA resp 70mA belast,	10Vpp op ruwe min, 5Vpp op uitgang (-160V)

Regeling.

V1 is de enige versterker, en levert een collector spanning die evenredig is met zijn basis spanning.
V2 is een emitter volger.

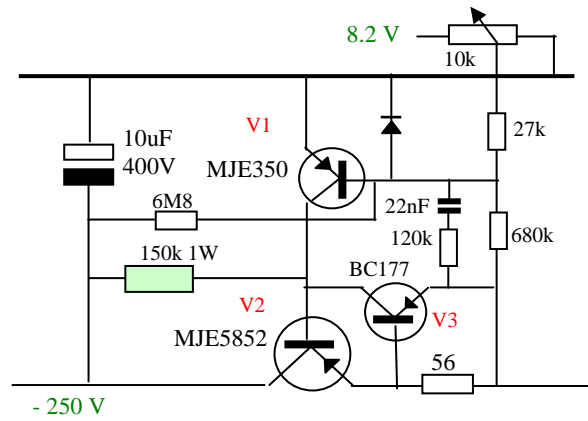
De *maximum* uitgangsspanning is

$$8.2V \times (680k/27k) = 206V.$$

De *minimum* uitgangsspanning is 0V (V1 vol aan (2mA), V2 uit), dankzij de 6M8 die V1 basistroom geeft als $V_{uit}=0$.

Het instelbereik is -1 ... -200V.

Zonder deze weerstand is de min. spanning -40V.



De 100Hz rimpel op de bufferspanning (tot 6Vpp) wordt weggeregeld door het RC lid over de terugkoppelweerstand. Deze verkleint de 100Hz rimpel op de uitgang met een factor 5.

Stroombegrenzing. Bij meer dan 10mA gaat V3 aan, en knijpt de sturing van V2. De 1uF condensatoren voor de gelijkrichter fungeren als back-up stroombegrenzing. Zelfs als alle transistoren vol geleiden is de dc stroom hooguit 37mA.

Rimpel op min uitgang

Over het hele gebied is de rimpel kleiner dan 0.15V top-top (60mV rms), meest 28kHz overspraak uit de plus voeding. Bij stroombegrenzing, en boven 190V neemt de 100Hz rimpel op de uitgang snel toe, zeker als de plus uitgang ook belast is.

De afvlak elco op de ruwe min is maar 10uF, anders is de min uitgang later aanwezig dan de plus uitgang bij inschakelen. Er is op de 10uF elco wel een grote 100Hz rimpel, tot 6Vtt.

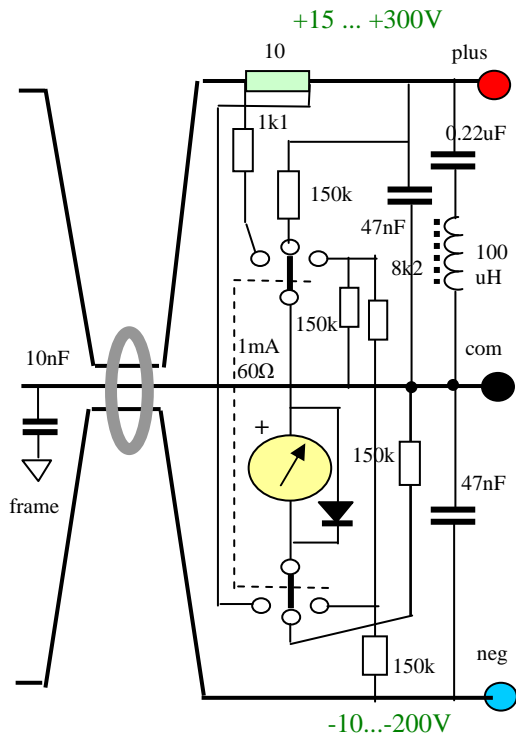
De ruwe -300V zakt dan behoorlijk, van -335V als alles onbelast is, tot -216V met 10mA resp 70mA belasting. De rimpel is dan 10Vpp op ruwe min, 5Vpp op de "min"uitgang (-160V)

4. Meter circuit

Er is slechts één meter waarmee drie dingen gemeten kunnen worden, te kiezen met de draaischakelaar rechts naast de meter: De middelste stand is het +300V bereik. Vanhier kun je omhoog naar de "min" spanning, ook met 300V schaal, of omlaag naar de "plus" stroom met eigen rode schaal. De "min" stroom is niet te meten.

- Spanning op blauwe V- uitgang 0 tot *min* 200V (bovenste schaal)
- Spanning op rode V+ uitgang 0 - +300V (ook bovenste schaal)
- Stroom uit rode V+ uitgang 0 - 120 mA (onderste rode schaal)

De kale draaispoel meter is 107Ω , ca 0.6mA. Intern is de draaispoel geshunt met 150Ω .



De gevoeligheid van de meter wordt ingesteld met twee wigvormige stukjes metaal over de luchtspleet van de magneet. Als beide op elkaar liggen met het smalste stuk over de luchtspleet is de gevoeligheid 1mA.

Voor de 300V bereiken is $300 \text{ k}\Omega$ serie weerstand nodig; voor het 120mA bereik is er een 10Ω shunt waarover 1.2V valt bij volle stroom. Hier is een $1\text{k}14$ weerstand gebruikt in serie met de (60Ω) meter.

Bij het verdraaien van de schakelaar mag de voeding niet even kortgesloten worden. Hiertoe zijn de serie weerstanden in tweeën geknipt, dus $2 \times 150\text{k}$

Verder moet de "min" belasting op de voeding niet veranderen als de schakelaar wordt verdraaid. Hiertoe is de $8\text{k}2$ weerstand toegevoegd die de meter vervangt, deze fungeert tevens als **voorbelaasting**.

Bij een volle sluiting op de uitgang zal even de volle 300V over de shunt staan. Dit kan de draaispoel beschadigen, zodat daar over een **diode** geplaatst is.

EMC De FETs schakelen in 100 ns, en geven capacitef veel storing door aan het frame, wel 4Vpp haren op elke uitgang in de vorm van een gedempte 30 MHz slinger. Om deze common-mode storing uit de FETs te verminderen zijn een 3-draads smoorspoel op een ringkerntje, een 10nF condensator van de min naar frame, en de 47nF condensator van plus naar com toegevoegd. De beide condensatoren hebben korte draden en zijn 400V typen.

Het spoeltje is trifilair op een poederijzer kerntje gewikkeld. (8 windingen)

De 28kHz "driehoek" rimpel uit het PWM filter wordt verzwakt met de LC zuigkring op deze frequentie, van 1Vpp naar 0.1Vpp.

De 300Hz en 100Hz rimpel zijn hier niet mee te verkleinen, dit moet de regelaar doen.

Alle bovenstaande componenten zijn compact gebouwd op een print rond de meterschakelaar.

5 Divers

Bleeders

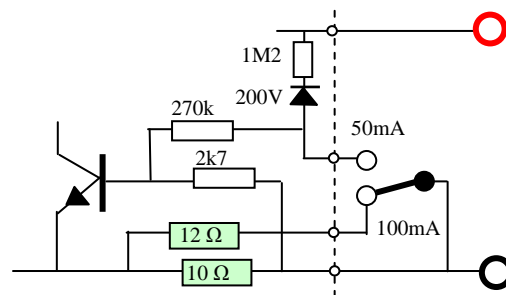
Alle elco's moeten ontladen na uitschakeling . Hiertoe zit 270k over de hoofd elco van 100uF, plus nog 1M voor de vrijgave schakeling. De bleeder werkt ook zonder zekering. De 2x 1uF folie C's worden met 3M3 ontladen. De 10uF elco van de -200V wordt met 270k//150k ontladen.

12V hulpvoeding

De 12V rail levert tussen 22 en 27mA, afhankelijk van de uitgangsspanning en de belasting. Met een spannings-verdubbelaar vanuit de 6.3V trafo wikkeling lukt dit met grote elco's. Voor extern gebruik van de 6.3V~ moet één kant van de 6.3Vac wikkeling met de "COM" klem worden verbonden, maar dan lopen de 120mA pieken rimpelstroom door de meetshunt van de 300V regelaar . Voorlopig de 6.3V wikkeling maar niet op een uitgaande klem zetten, dan kan de hulpvoeding gewoon aan de interne nul zitten. Een aparte 12V~ wikkeling was beter geweest.

Load-line begrenzing

De load-line begrenzing is alleen nodig bij meer dan 60mA, dus alleen in het 100mA bereik. Met een enkelpolige omschakelaar is dit gerealiseerd. In de stand "100mA" zoals getekend staan beide shunts parallel , samen 5.5Ω, en boven 200V wordt de stroom geknepen. In de stand "50mA" werkt alleen de 10Ω shunt, en is de invloed van de load-line zener onderbroken.



Component gegevens

Trafo

Primair 220V 50VA 48Ω Kern sectie $3 \times 3 \text{ cm} = 9 \text{ cm}^2 \times 0.64 = 57 \text{ VA}^?$

Secundair1 250 / 300V (belast) 85 mA (opdruk) , 170 / 200Ω **Onbelast 270 / 350V !**

Op basis van de koperweerstand mag de wikkeling $10\% \times 270V / 170\Omega = 159 \text{ mA}$

Secundair2 0- 4- 6.3V / 3A Alleen gebruikt voor hulpvoeding.

Meter

Kale meter 107 Ω, 0.61 mA fsd, met *beide* magnetische shunts **vol** over luchtspleet

Ingebouwde shunt van 150 Ω levert fsd = 1.08 mA

Met beide shunts op smalste plek over de spleet wordt dit precies 1.0 mA

Wijzerplaat 0 - 50 - 100 - 150 - 200 - 250 - **300 V** (10V/div)

en daar onder 0 - 20 - 40 - 60 - 80 - 100 - **120 mA** (4mA/div, beetje ongelukkig)

Gemeten lineariteit ca 2%

Spoel

Gemaakt met 2x **ETD29** kerntje, materiaal N87, met als gap DYMO tape, ca 0.2 mm in midden,- en beide buiten poten, dus $g = 0.4 \text{ mm}$.

Gewikkeld met **450 windingen** in 10 lagen. Draad: 0.35mm koper, Ø 0.4mm incl lak.

Per laag 45 windingen is 18 mm spoelhoogte

Zelfinductie **55 mH**, weerstand 4.5Ω $AL = 55\text{mH} / (450^2) = 271 \text{ nH}$ (klopt met $g=0.4$)

Eigen frequentie 89 kHz, 45pF parallel capaciteit.

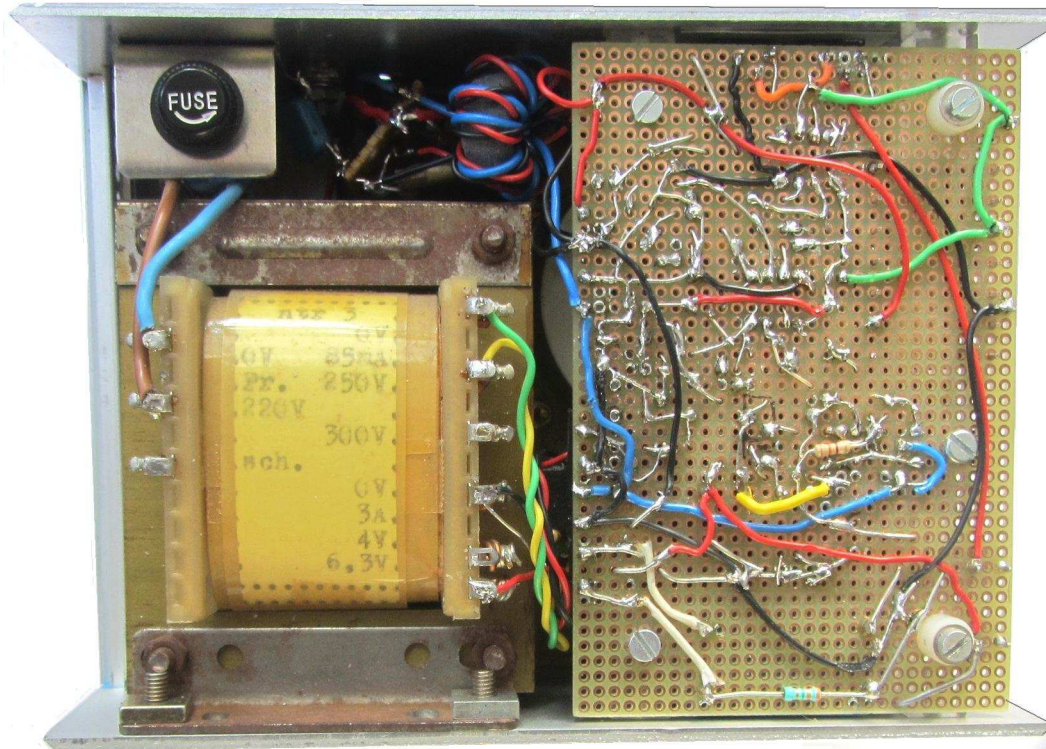
Stand:

Op 22 november 2018 ontwikkeling afgesloten. De voeding werkt helemaal, is korstluitvast, HF rimpel is klein door CM spoel en extra C's.

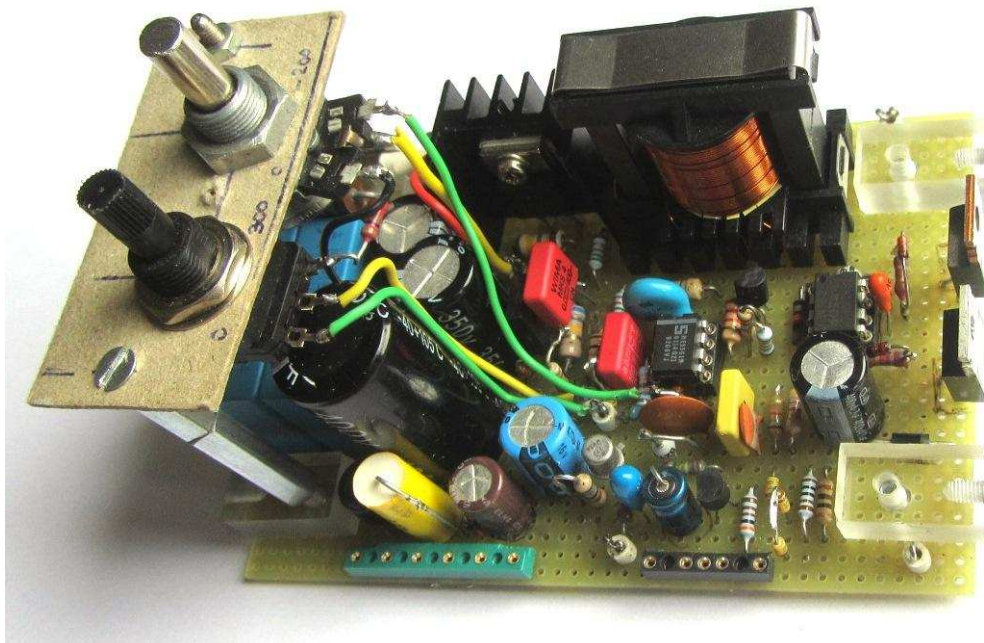
Op 11 dec load line stroombegrenzing in 50mA stand vermeden.

Mechanische opbouw

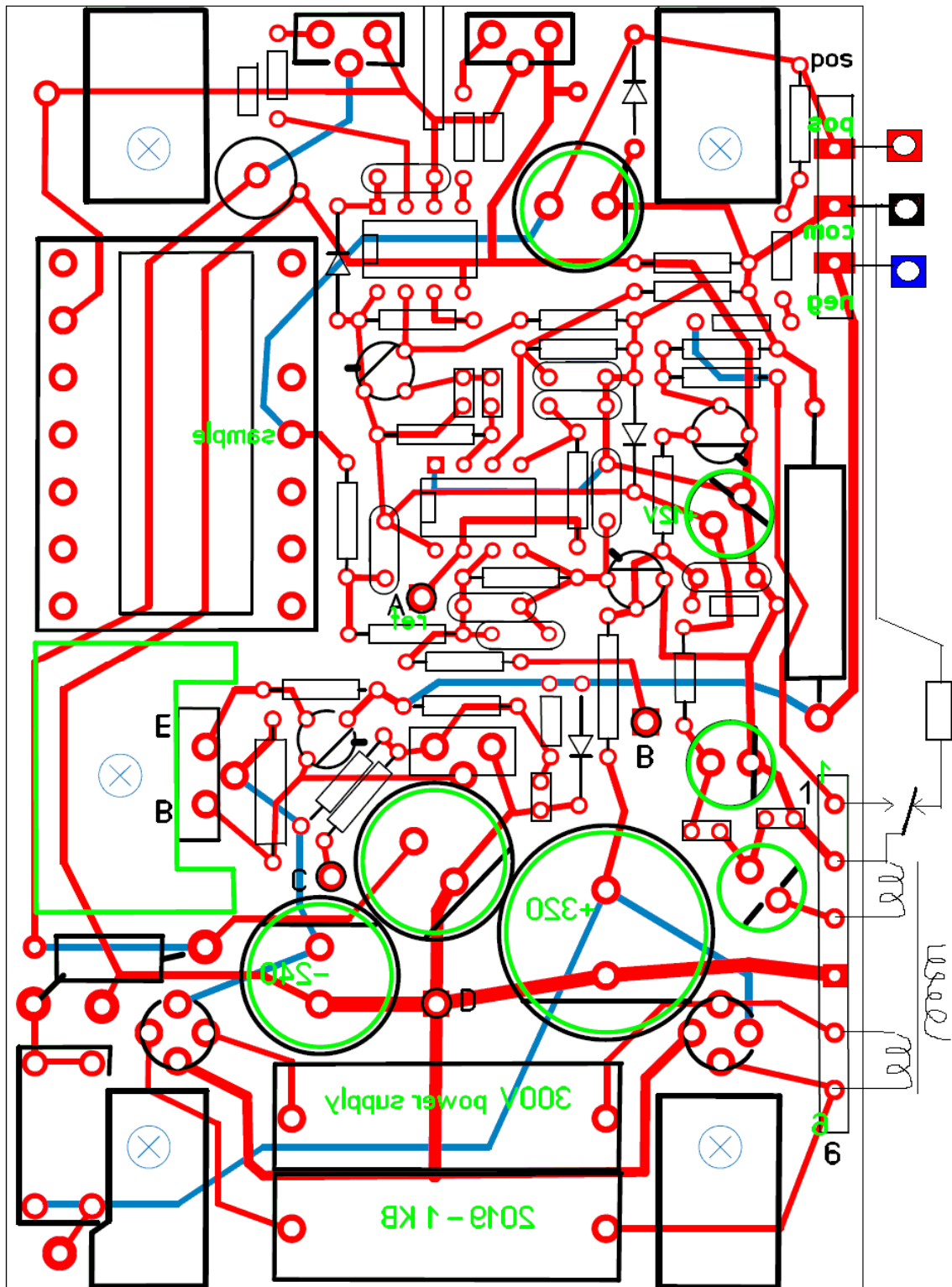
De alu bovenplaat is de heatsink voor de +300V/ 65mA chopper transistoren. De plaat wordt nauwelijks warm. De min kant serie transistor dissipeert maximaal $10\text{mA} \times 200\text{V} = 2\text{W}$ en wordt dan vrij warm in de gesloten behuizing.



Het electronica module :

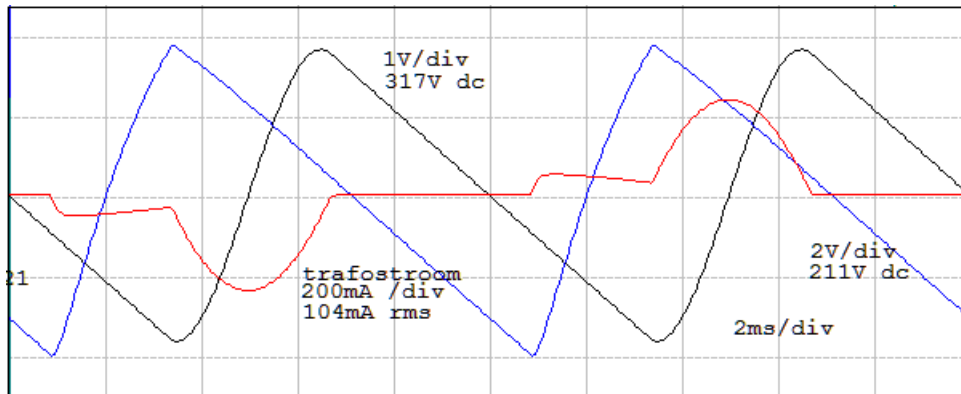
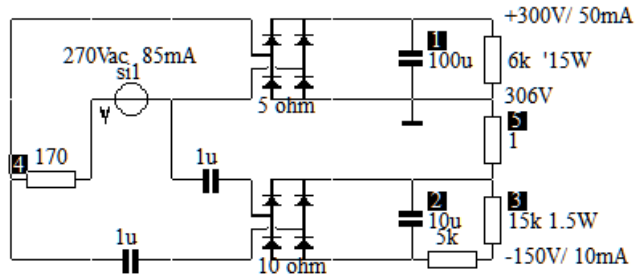


Layout 15 jan 2019 Board 3000 x 4500 mil = 7.62 x 11.43 cm



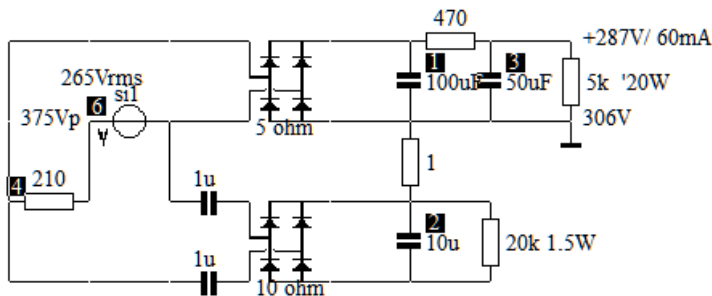
Simulatie

De trafo heeft bij 230V netspanning een secundaire nullast spanning van 270Vac, en secundaire koperweerstand is 170 Ω. Daar komt de primaire koperweerstand (48Ω) nog bij. De topwaarde van de secundaire sinus is 370Vp in nullast

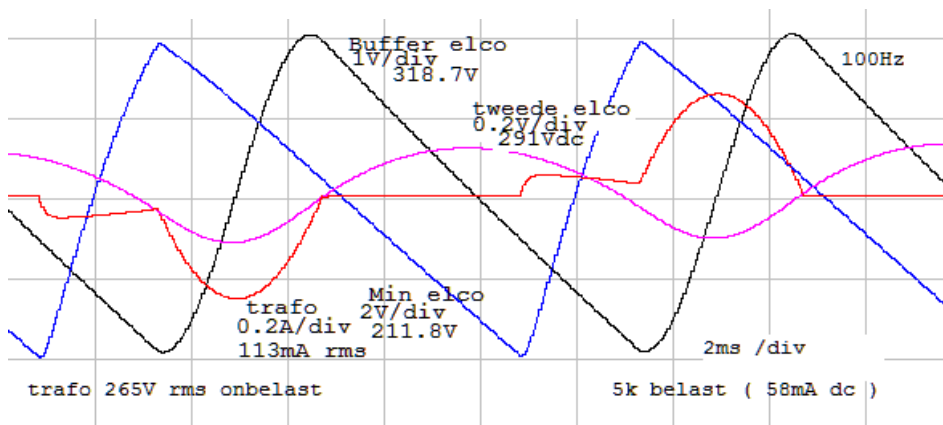


Bij een belasting van 50mA aan de chopper is de bufferspanning al gezakt tot 306V, met een rimpel van bijna 4Vpp. De min kant is met 10mA belast en gezakt tot 203V dc, met 7Vpp rimpel.. Beide zijn 100Hz rimpels, die aan de minkant loopt 3ms voor op de pluskant rimpel.

Met een CRC filter gaat het beter.

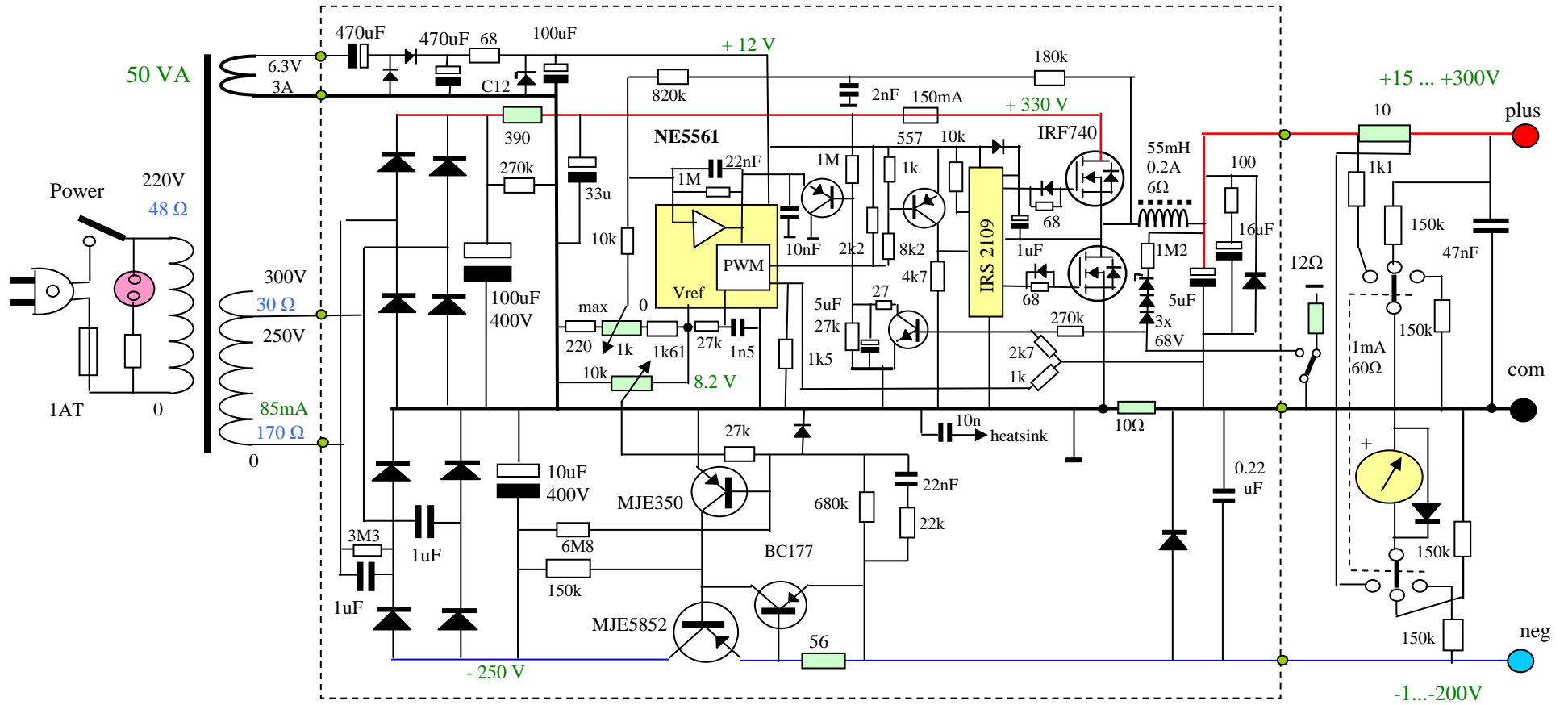


De 100Hz rimpel wordt 20x zo klein, gaat van bijna 4Vpp naar 0.2Vpp. De serie weerstand veroorzaakt wel wat spanningsverlaging. Vdc bij 60mA belasting is nog maar 291V, en daar gaat nog 20V vanaf voor de chopper bij 95% duty cycle.



De trafostroom wordt wel knap hoog, 113mA rms. Op basis van de koperweerstand zou dit nog moeten kunnen.

Schema



Regelbare voeding 300V 25W
 11 dec 2018 Zelfbouw