

Een gedetailleerd onderzoek naar nettransformatoren

In- en uitschakelgedrag

Dipl.-Ing. (FH) Andreas R. Fecht (Duitsland)

Als een netspanningstransformator wordt ingeschakeld, gaat er een inschakelstroom lopen die afhankelijk is van de fasehoek van de netspanning op het moment van inschakelen.



De inschakelstroom is ook afhankelijk van de fasehoek op het moment dat de transformator voor het laatst is uitgeschakeld. We gaan in dit artikel geen extra schakeling bouwen om de inschakelstroom te voorkomen, maar we gaan het verschijnsel in detail onderzoeken. We konden in de literatuur maar erg weinig vinden over dit onderwerp, en daarom hebben we dit onderzoek opgezet, zodat we er in de toekomst beter op voorbereid zijn.

Er zijn wel theoretische overwegingen over hoe transformatoren zich gedragen vanwege het remanente magnetisme in de ijzerkern. Of die theorie ook overeenkomt met de werkelijkheid, kunnen we alleen weten door het te proberen. We gaan ook in op de vraag of ringkerntransformatoren zich anders gedragen dan normale transformatoren met een E-I-kern.

Bouw van een testopstelling

We hebben een speciale schakeling gebouwd om de transformatorstromen te bestuderen. U ziet het blokschema in **figuur 1**. De belangrijkste onderdelen zijn een microcontroller en een MOSFET, die als schakelaar dient.

De meetelektronica en de microcontroller worden gevoed met 3,3 V. De driver voor de gate van de MOSFET bestaat uit een optocoupler met een galvanisch gescheiden 12 V-voeding.

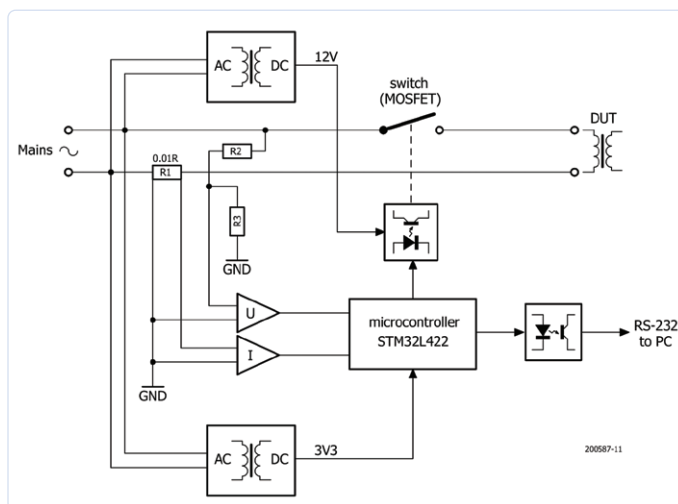
De meetelektronica bestaat uit twee rail-to-rail-opamps met voldoende bandbreedte. De netspanning wordt met een spanningsdeler binnen het meetbereik gebracht en de stroom wordt gemeten met een shuntweerstand met een waarde waarmee ± 75 A is te meten. De microcontroller meet deze twee signalen tegelijk met een samplefrequentie van ca. 20-50 kHz en een resolutie van 12 bits. De microcontroller is via vier optocouplers verbonden met de PC voor de overdracht van de gemeten waarden.

Het detailschema

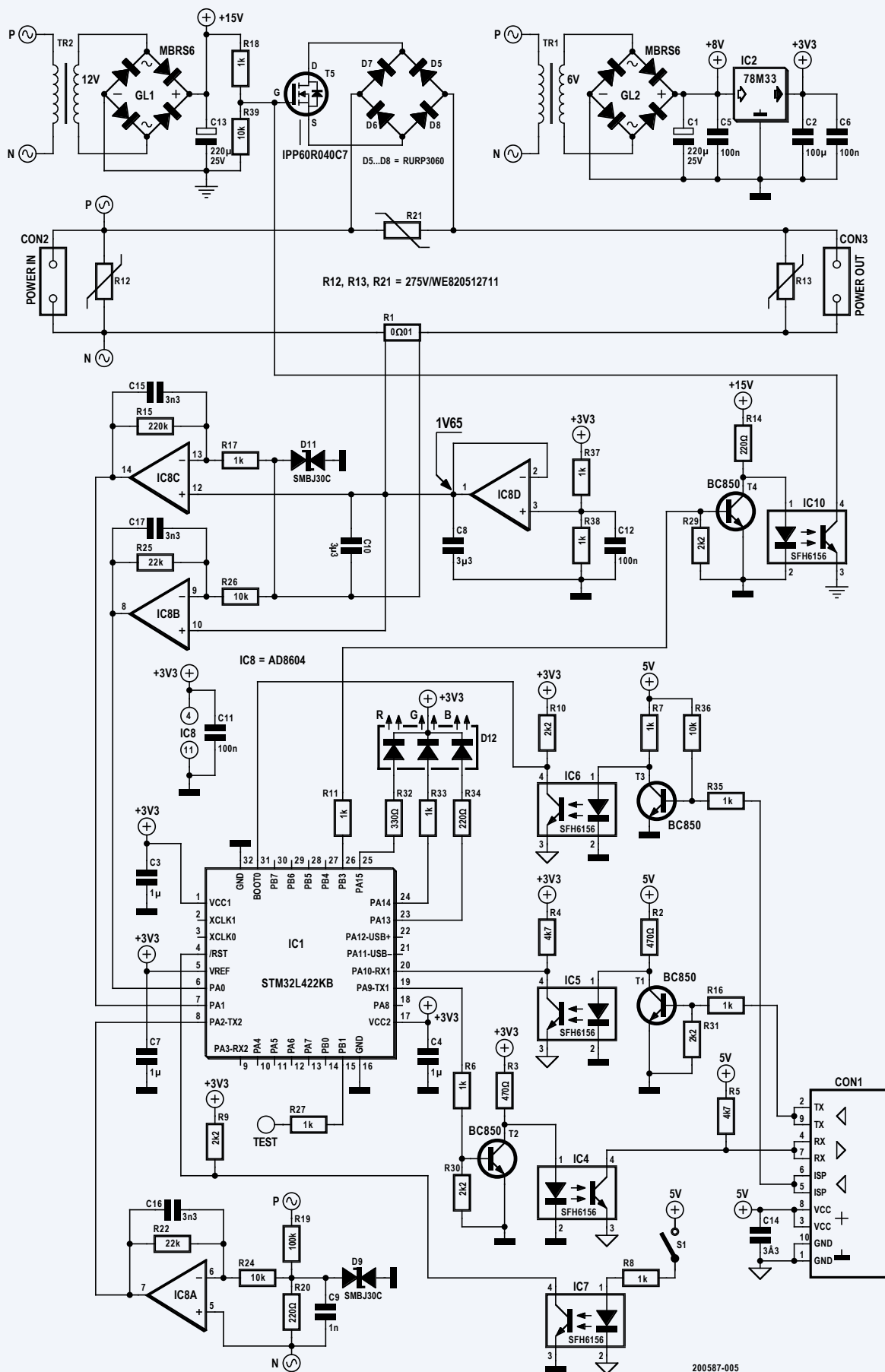
Het schema van de testopstelling is te zien in **figuur 2**. Voor de voeding waren drie galvanisch gescheiden spanningen nodig.

De voeding voor het meetcircuit komt uit een transformator van 6 V / 1 W met een gelijkrichter, een elektrolytische condensator en een 3,3 V-spanningsregelaar.

De gate-driver wordt gevoed met een transformator van 12 V / 1 W met gelijkrichter en afvlakelco, die een niet-gestabiliseerde gelijkspanning produceert van ongeveer 15 V.



Figuur 1: Blokschema van de testopstelling.



Figuur 2: Het schema van de testopstelling ziet er gecompliceerd uit vanwege de optocouplers die zorgen voor galvanische scheiding.

Developer's zone

tips & trucs, vakkunstigheden en andere nuttige informatie

Tabel 1: Contactweerstand, gemeten bij verschillende stromen.

Stroom [A]	Weerstand van de gesloten schakelaar [Ω]
1	1,5
2	0,85
5	0,4 (100 m Ω differentieel)
10	0,24 (80 m Ω differentieel)

De PC-kant van de RS232-interface wordt rechtstreeks gevoed uit een 5 V USB/RS232-converter.

Aan/uit schakelaar

Als aan/uit schakelaar wordt een MOSFET (T5) met een brugge-lijkrichter (D5...D8) gebruikt. In tegenstelling tot een thyristor of een triac kan een MOSFET op elk gewenst moment worden uitgeschakeld. De geselecteerde MOSFET is geschikt voor een continue stroom van 73 A en een piekstroom van 211 A. De diodes van de bruggelijkrichter ondersteunen continue stromen van 30 A en piekstromen tot 70 A. Drie varistors met een doorslagspanning van 430 V zorgen voor bescherming tegen geïnduceerde spanningen. De MOSFET wordt aangestuurd via een optocoupler. De gemeten stijgtijd is 20 μ s wat meer dan voldoende is voor dit soort metingen. De contactweerstand bij de aansluitingen van de schakeling voor verschillende stroomwaarden zijn weergegeven in **tabel 1** (gemeten) en **tabel 2** (geëxtrapoleerd).

Metingen uitvoeren

De gekozen microcontroller, de STM32L422KB, bevat twee onafhankelijke 12-bit analoog-naar-digitaal-converters. Hiermee werden de spanning en de stroom simultaan gemeten.

Omdat we zowel positieve als negatieve waarden wilden meten, hebben we met behulp van IC8D een virtueel aardpunt gecreëerd op de helft van de voedingsspanning (1,65 V). Die spanning dient als referentiepunt voor de andere versterkers. Voor de spanningsversterker IC8A wordt de netspanning eerst door 455 gedeeld met R19/R20. Deze versterker heeft versterking van 2,2 en schuift de spanning ook nog 1,65 V omhoog. Zodoende is het ingangsspanningsbereik $\pm 341,6$ V. De stroomversterker, IC8B, versterkt de spanning over de shuntweerstand met een factor 2,2 en schuift de versterkte spanning 1,65 V omhoog. Dat levert een stroombereik op van ± 75 A met een resolutie van ongeveer 36 mA. Met behulp van IC8C kunnen kleine stromen wat nauwkeuriger gemeten worden. Hij versterkt de spanning over de shuntweerstand met een factor 220. Zijn uitgang is gekoppeld met een andere ADC-input van de MCU. Hiermee kunnen we stromen meten tot $\pm 0,75$ A met een resolutie van ongeveer 0,37 mA. Het kleinste detecteerbare piekvermogen bij 230 VAC is dus ongeveer 0,1 W.

PC-interface

De PC-interface bestaat uit twee optocouplers voor de TX- en RX-lijnen van een RS232-poort. De twee andere optocouplers

Tabel 2: Contactweerstand, geëxtrapoleerd voor verschillende stromen.

Stroom [A]	Weerstand van de gesloten schakelaar [Ω]
20	140 (40 m Ω differentieel)
50	68 (20 m Ω differentieel)
100	40 (12 m Ω differentieel)



Figuur 3: De PC-software toont de netspanning (groen) en de stroom (rood). Hier is de spanning ingeschakeld tijdens een nuldoorgang (linker verticale grijze lijn) en negen nuldoorgangen later uitgeschakeld (rechter verticale grijze lijn).

besturen de ISP-pen van de MCU (In-System Programming) en de resetlijn (RST). De gebruikte optocouplers zijn geschikt voor een maximale baudrate van 19.200 Baud.

De print

De complete schakeling is opgebouwd op een dubbelzijdige printplaat. De sporen die veel stroom moeten voeren, zijn aan de onderkant versterkt met koperdraad van 1,5 mm². De weerstand van het circuit is ongeveer 11 m Ω voor het stroommeetpad en ca. 240 m Ω bij 10 A tussen de aansluitingen van de schakelaar. De differentiële weerstand tussen de aansluitingen van de schakelaar is ongeveer 80 m Ω bij 10 A.

Software

De software voor de transformatorexperimenten bestaat uit de firmware voor de MCU voor het opnemen van de onbewerkte data en PC-software voor de analyse van de resultaten.

De firmware voor de MCU is gemaakt met STM32Cube van STMicroelectronics. Als programmeertaal is C99 gebruikt. De ontwikkelomgeving STM32Cube is een afgeleide van Eclipse en werkt met de GCC-toolchain. De PC-software (**figuur 3**) is gemaakt met Delphi en dus geschreven in Pascal.

De data van de MCU wordt overgedragen via RS232. Een moderne PC kan daarmee werken met behulp van een USB/RS232-converter. Voor elke individuele meting wordt het verloop van spanning en

stroom weergegeven. Het spanningstriggerniveau dat de meting start, wordt iets onder nul ingesteld, zodat we zeker weten, dat we de eerste nuldoorgang van de spanning vastleggen.

Metingen

Voor alle metingen werd de transformator in- en uitgeschakeld bij verschillende fasehoeken van de netspanning. De volgende parameters zijn gebruikt:

- Fasehoekresolutie: 5°
- De transformator blijft minimaal 25 perioden ingeschakeld (0,5 s)
- Pauze tussen twee metingen: 0,5 s
- Bemonsteringsfrequentie: 20 kHz

De stroom wordt geregistreerd over twee complete perioden van de netspanning. Na elke meting worden de maximale positieve en negatieve waarden bepaald en de grootste van de twee wordt vastgelegd als resultaat. De eerste drie metingen van elke run worden weggegooid om de eerdere magnetiseringstoestand van de kern uit te sluiten.

Elke run voor dezelfde eindfasehoek wordt door de PC-software opgeslagen in een HTML-bestand in een tabel met 72 rijen, die gemakkelijk te importeren is in een spreadsheet. Met een hoekresolutie van 5° ontstaat er zo een tabel met $72 \times 72 = 5184$ punten, die wordt weergegeven als een 3D-plot.

Voorbeeld: één meting

We zien hier één enkele meting zonder belasting bij de sterkste stroompuls (**figuur 3**). Bij dit worst-case-scenario werd de spanning bij het begin van de curve ingeschakeld op een nuldoorgang (bij de verticale grijze lijn links) en vier en een halve periode later weer op een nuldoorgang uitgeschakeld (bij de verticale grijze lijn rechts).

We zien dat de sterkste stroompuls optreedt bij de eerstvolgende nuldoorgang. Maar deze puls is niet voldoende om de magnetisatie, die al in de kern aanwezig was, op te heffen. Pas na meerdere nuldoorgangen verdwijnen de stroompulsen geleidelijk. Dit effect is duidelijk hoorbaar, want bij het inschakelen is gedurende ongeveer een halve seconde een brommend geluid te horen.

Ringkerntransformator van ELNA met een ohmse belasting

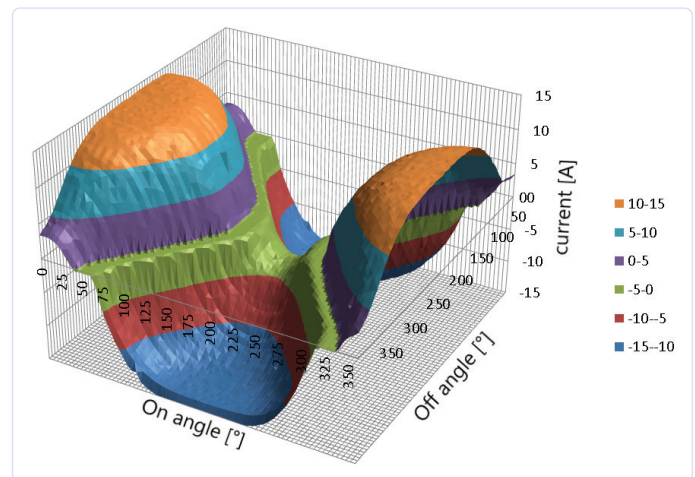
Bij deze test werd een ringkerntransformator van 100 VA met twee secundaire wikkelingen van 24 V gebruikt (**figuur 4**). Met beide secundaire wikkelingen werd een weerstand van 10 Ω, 50 W verbonden als ohmse belasting. De weerstanden waren op een aluminiumplaat gemonteerd om de warmte beter af te kunnen voeren. De totale belasting is ongeveer 115 W, dus de transformator werd een beetje overbelast. De resultaten zijn weergegeven als 3D-grafiek in **figuur 5** (zonder belasting) en **figuur 6** (met belasting).

Normale transformator met ohmse belasting

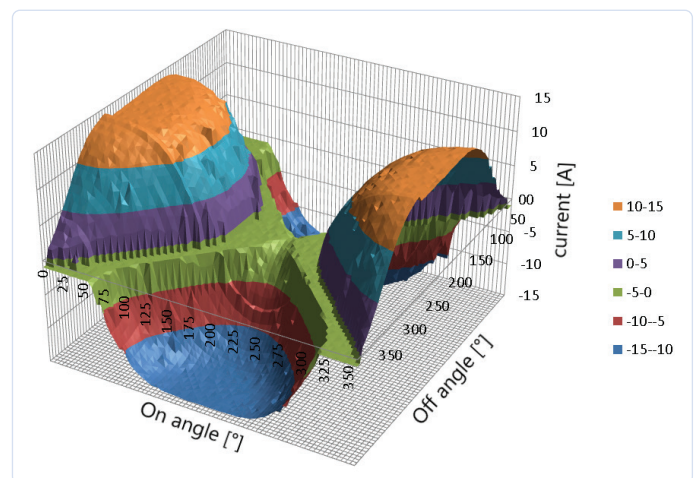
We hebben dezelfde test uitgevoerd met een transformator van 120VA met een E-I-kern van de fabrikant Block (**figuur 7**). Hij heeft een primaire winding voor 230 V en twee secundaire van 15 V, die in meerdere secties zijn verdeeld. Op elke secundaire winding



Figuur 4: De 100 W-ringkerntransformator die is gebruikt voor de experimenten.

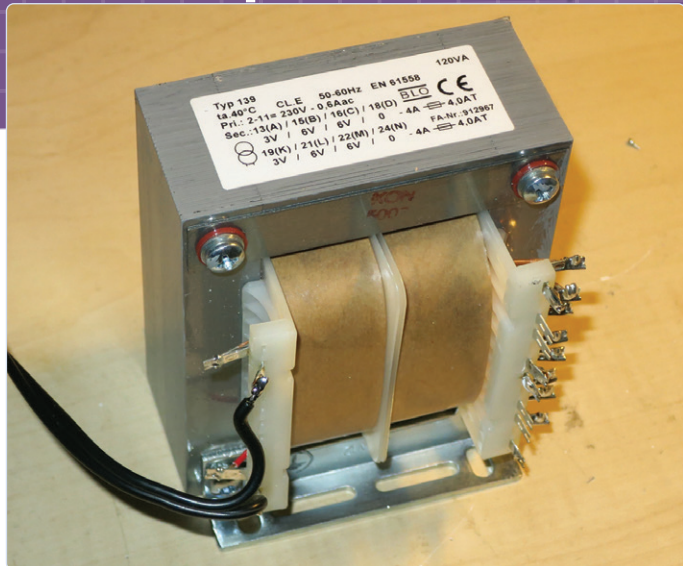


Figuur 5: De 3D fase/stroom-plot voor de ringkerntransformator zonder belasting.



Figuur 6: Met een ohmse belasting. Let op de discontinuïteit bij de uitschakelhoek van ca. 300°. De zekering was doorgeslagen en het experiment lag even stil. Toen we even later weer verder gingen, was de transformator iets afgekoeld en bleek er een iets grotere stroom te lopen. Misschien had het te maken met de temperatuur-afhankelijke weerstand van het koper van de primaire winding.

Developer's zone



Figuur 7: Gedraagt deze 120 W-transformator met E-I-kern zich anders dan de ringkerntransformator?

sloten we twee weerstanden van 10Ω / 50 W parallel aan (dus 5Ω aan elke wikkeling). Ook nu hadden we ze op een aluminium koelplaat gemonteerd. De totale belasting is ongeveer 90 W, dus de transformator is niet volledig belast. Zie **figuur 8** (onbelast) en **figuur 9** (belast) voor de resultaten.

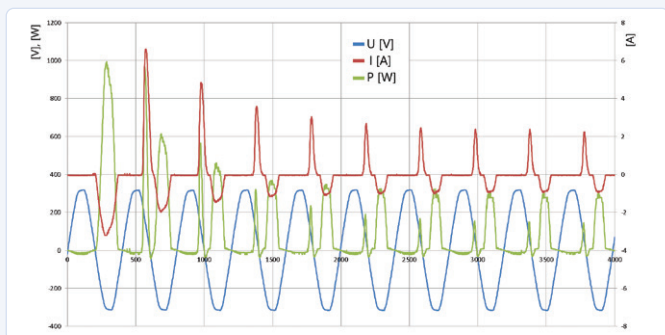
Twee halve golfgelijkrichters tegelijk

Alle andere experimenten in dit artikel werden alleen uitgevoerd met een ringkerntransformator.

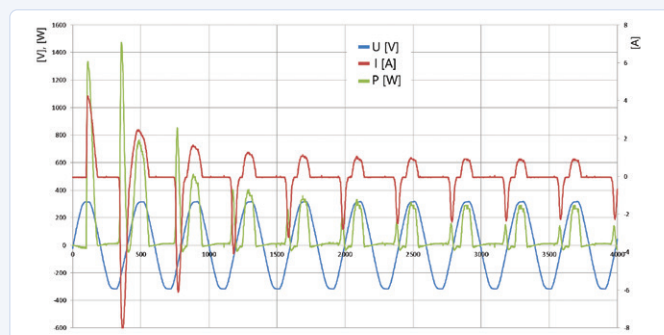
Op beide secundaire wikkelingen werd een enkelzijdige gelijkrichter aangesloten. De tweede wikkeling werd andersom aangesloten als de eerste, zodat de magnetische belasting op de transformator vergelijkbaar was met die bij een bruggelijkrichter. Beide dioden werden verbonden met een weerstand van 20Ω / 100 W, parallel aan een elco van $10.000 \mu\text{F}$ (**figuur 10**).

ASYMMETRISCHE BELASTING

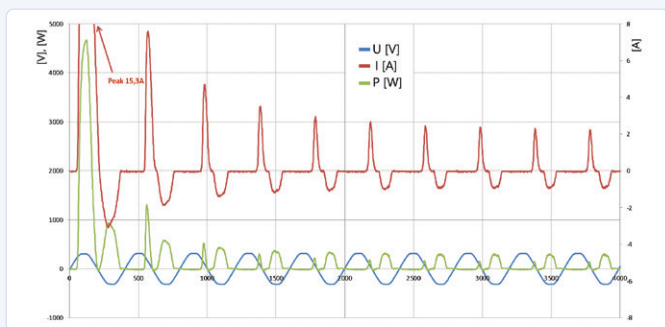
De volgende experimenten werken met de schakeling van figuur 10, maar dan met slechts één secundaire wikkeling belast. Ieder experiment werd twee keer uitgevoerd, één keer met de belasting op S1 ('A') en één keer met de belasting op S2 ('B'). De startvoorwaarden waren hetzelfde als bij de overeenkomende experimenten met symmetrische belasting.



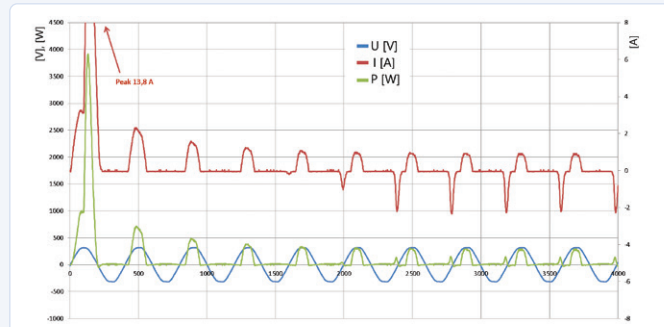
Best case A. Alleen de energie van de negatieve stroompulsen loopt door de belasting. De positieve stroompulsen zakken niet na enige tijd naar nul, maar stabiliseren zich bij een waarde van ongeveer 2 A. De remanentie van de transformator kern raakt wat verstoord door de asymmetrische belasting op de secundaire kant. De energie die wordt getransporteerd door de positieve stroompulsen is niet negatief, d.w.z. dat die als actief vermogen wordt gedissipeerd in de transformator en niet in de belasting.



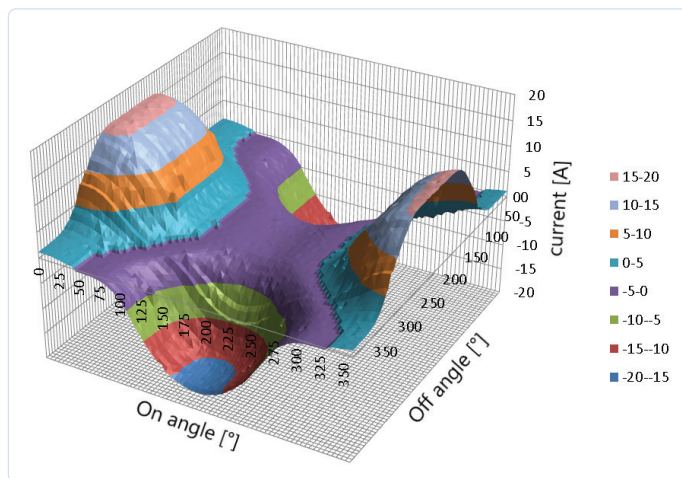
Best Case B. De grootste stroompuls treedt op tijdens de tweede halve golf. De energie van de eerste piek vloeit naar de belasting, de energie van de tweede piek naar de transformator. Ook hier nemen de stroompulsen niet na enige tijd af naar nul, maar stabiliseren ze bij ongeveer 2 A.



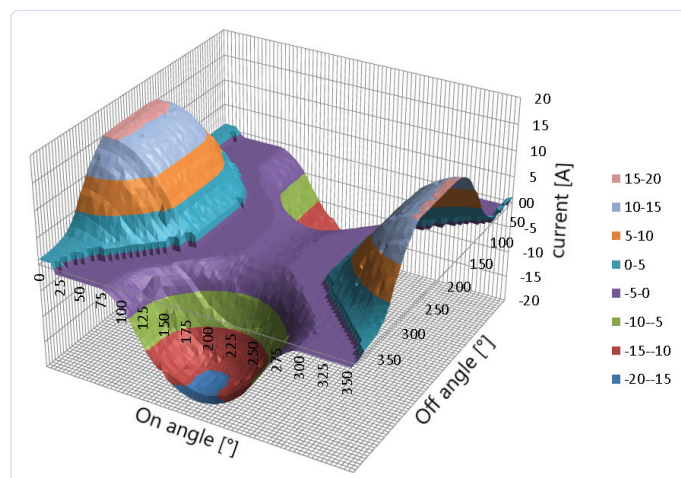
Worst case A. Ook hier is de inschakelpiek vergelijkbaar met die in de onbelaste situatie. Na enige tijd ontstaat hetzelfde gedrag als bij de best case.



Worst Case B. Dit scenario produceert niet de grootste stroompuls. Waarschijnlijk komt dat, doordat de asymmetrische belasting aan de secundaire kant een beetje kan compenseren voor de remanentie die gedurende enkele perioden in de kern is opgeslagen. Maar na een stuk of vijf perioden gedraagt de schakeling zich precies hetzelfde als eerder.



Figuur 8: 3D-plot voor de onbelaste E-I-kerntransformator.



Figuur 9: E-I-kerntransformator met een ohmse belasting van 90 W.

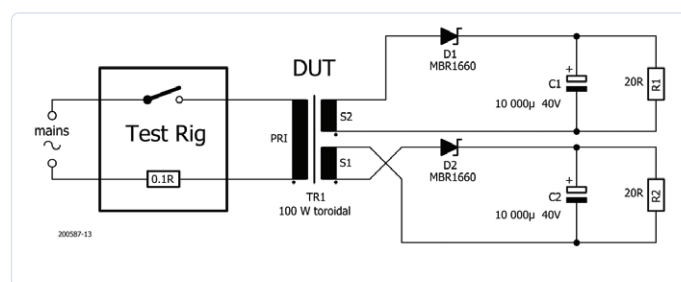
Het gunstigste geval: schakelhoeken 90°/90°

De transformator werd ingeschakeld bij het eerste spanningsmaximum nadat hij eerder ook was uitgeschakeld bij een maximum. Dat komt overeen met het gunstigste geval, waarbij geen extra magnetische effecten zouden moeten optreden.

De resultaten (figuur 11) waren zoals verwacht. De grootste stroom (voor het bijladen van de condensator) valt samen met de maxima van de spanning. De eerste puls is het grootst, omdat de condensator op dat moment nog leeg is. De stroompulsen nemen langzaam af naar een waarde van over 0,9 A (ongeveer tweemaal de nominale vollaststroom). De vermogenscurve (groen) wordt nergens negatief. Er wordt vrijwel geen reactief vermogen omgezet.

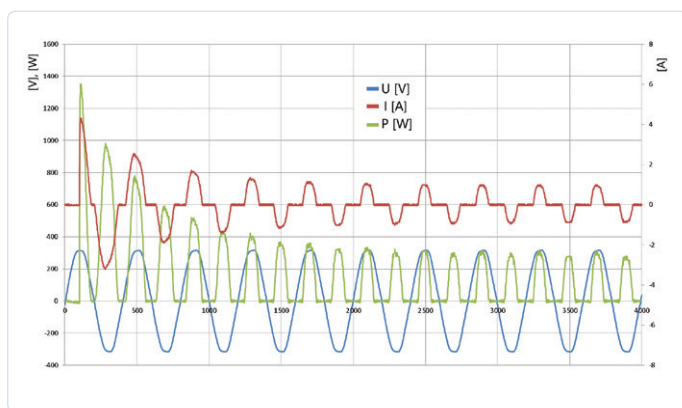
Het ongunstigste geval: schakelhoeken 0°/180°

De transformator werd ingeschakeld bij de eerste nuldoorgang, nadat hij eerder ook was uitgeschakeld bij een nuldoorgang. Dit is

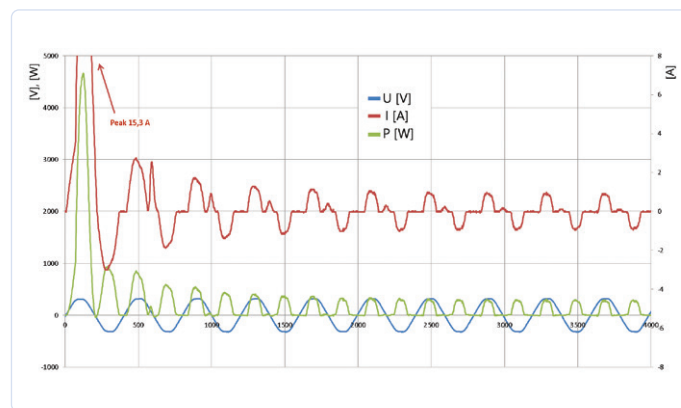


Figuur 10: Schema voor de experimenten met een symmetrische belasting. Bij de experimenten met asymmetrische belasting werd maar één secundaire spoel tegelijk belast.

het ongunstigste geval, waarbij de sterkste magnetische remanentie-effecten te verwachten zijn. De stroompiek van 15,3 A bij het inschakelen (figuur 12) is vergelijkbaar met de onbelaste situatie.



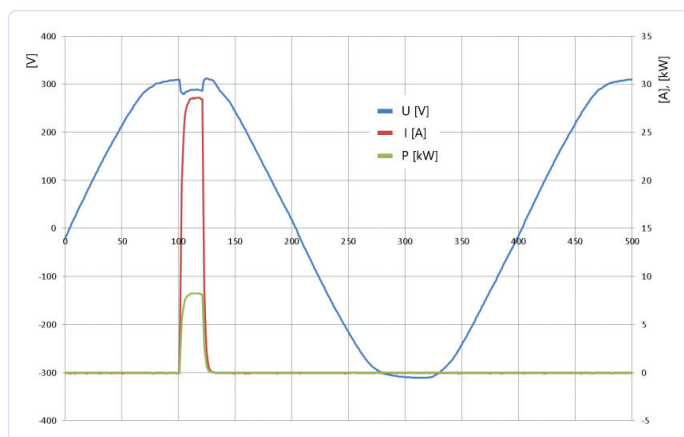
Figuur 11: Beste geval met symmetrische belasting. De vermogenscurve (groen) wordt nergens negatief. Er wordt vrijwel geen reactief vermogen omgezet.



Figuur 12: Ongunstigste geval met symmetrische belasting. Er zit opmerkelijk veel vermogen in de eerste piek, bijna 4,65 kW (!), en dat in een kleine 100 W-transformator. De waarde is positief, het gaat dus om puur, actief vermogen.

Developer's zone

tips & trucs, vakkunstigheden en
andere nuttige informatie



Figuur 13: Voor de impedantie van het lichtnet werd een waarde van ongeveer 640 mΩ gevonden.

De volgende pieken lijken daar ook op en verdwijnen na 10 tot 20 perioden. Er wordt vrijwel geen reactief vermogen omgezet.

De impedantie van het lichtnet

Om de impedantie van het lichtnet te meten, werd een weerstand van 10 Ω / 50 W gedurende 1 ms ingeschakeld tijdens het spanningsmaximum van de netspanning. Uit de dip in de netspanning kunnen we de impedantie van het net bepalen, zie **figuur 13**.

De topspanning op het net vlak vóór het inschakelen was 310 V en ongeveer 0,5 ms na het inschakelen was hij 289 V. De stroom die dan loopt is 28,5 A (piekvermogen 8,25 kW). De impedantie is dus $(310 - 289) / 28,5 = 740 \text{ m}\Omega$. Het circuit zelf heeft een contactweerstand van ongeveer 100 mΩ bij deze stroom. Dus de impedantie van het net is ongeveer 640 mΩ.

Wat hebben we geleerd?

Op basis van de resultaten kunnen we de volgende conclusies trekken:

- De inschakelstroom is sterk afhankelijk van de fasehoek waarbij de spanning eerder is uitgeschakeld.
- Schakelen bij een spanningsmaximum (of -minimum) is altijd goed, ongeacht het transformatortype. Maar dat

moet wel hetzelfde maximum (of minimum) zijn als bij het uitschakelen. Het gedrag bij het tegengestelde maximum is nog net te tolereren (ongeveer 5× de normale laststroom). Ringkerntransformatoren gedragen zich iets agressiever.

- Inschakelen tijdens een nuldoorgang is niet aan te raden. Uitschakelen in de tegengestelde nuldoorgang produceert de grootste stroompuls (ongeveer 30× de normale stroom bij vollast). Uitschakelen bij dezelfde nuldoorgang is minder gevaarlijk (ongeveer 10× de normale stroom bij vollast).
- Onbelaste transformatoren reageren met veel sterkere stroompulsen dan belaste. De tolerantie voor schakelen bij een verkeerde fasehoek is onder belasting aanzienlijk groter.
- Transformatoren gedragen zich hetzelfde bij puur ohmse belastingen als bij belasting met een gelijkrichter en een condensator.

Als u meer wilt weten over deze experimenten: alle testresultaten zijn te downloaden, samen met de ontwerpfiles van de opstelling en de software [1].

200587-03

Vragen of opmerkingen?

Als u technische vragen of opmerkingen hebt over dit artikel, email dan de auteur via elektor@aftec.de of de redacteur via clemens.valens@elektor.com.

Een bijdrage van:

Idee, ontwerp, tekst en illustraties: **Andreas R. Fecht**

Redactie en illustraties: **Clemens Valens**

Schema: **Patrick Wielders**

Lay-out: **Giel Dols**

Vertaling: **Evelien Snel**

WEBLINK

- [1] Testdata, ontwerpfiles en software:
www.elektormagazine.nl/200587-01



Gerelateerde producten

- **Boek: Advanced Programming with STM32 Microcontrollers (SKU 19520)**
www.elektor.nl/19520

