

# Voedingen met digitale regeling

Biedt rendementsverbetering voor voedingen van gemiddeld tot hoog vermogen

De combinatie van de flexibiliteit van digitale vermogensregeling met het verbeterde rendement van spoel-spoel-condensator-resonantieomzetter (LLC), draagt bij om het eigen energieverbruik van voedingen van gemiddeld tot hoog vermogen te verlagen en om de bedrijfskosten voor het koelen van de apparatuur te verminderen in bijvoorbeeld de telecommunicatiesector.



Digitale regelingen bieden opmerkelijke ontwerpvoordelen, zoals een hoge mate van flexibiliteit, gekoppeld aan krachtige prestaties en hoge betrouwbaarheid. Hierbij verhogen LLC resonantieomzetter het rendement, omdat het vermogen dat door de MOSFET's binnen een gelijkspanningsvoeding wordt gedissipeerd, aantoonbaar wordt beperkt.

Samen kunnen deze technologieën bedrijven helpen om te voldoen aan de nieuwe rendementsdoelstellingen die zijn geformuleerd door het 'ENERGY STAR Data Center Energy Efficiency Initiative' en het '80 PLUS Initiative'. De eerstgenoemde organisatie richt zich op de apparatuur en infrastructuur van de informatietechnologie (de IT-sector), niet-onderbreekbare voedingen (UPS) en andere apparatuur die verantwoordelijk is voor een hoog energieverbruik.

De organisatie 80 PLUS richt zich op het feit dat veel voedingen een groot deel van de tijd werken op belastingen die ver beneden het niveau liggen waarop het hoogste rendement kan worden gehaald. Deze organisatie stelt als voorwaarde dat een rendement van 80% het minimum moet zijn voor een voeding van 115 V die werkt op 20%, 50% en 100% van de nominale belasting. Platina, goud, zilver en brons kan door de organisatie worden toegekend als een voeding beter presteert dan deze rendementsdoelstellingen. Om het predicaat 'brons' te verkrijgen, dient bijvoorbeeld een voeding op 230 V een rendement van 81% te behalen bij 20%

en 100% van zijn nominale belasting en een rendement van 85% bij een nominale belasting van 50%. Verdere stimulansen voor het verbeteren van het rendement komt van eindgebruikers die eisen dat de voedingen worden gecertificeerd door deze organisaties, hetgeen in de leveringscontracten wordt vastgelegd.

Voor de ontwerper kunnen energiebesparende voedingen worden gerealiseerd door het combineren van het rendement van een LLC resonantieomzetter met een geavanceerde digitale regeling via digitale signaalcontrollers (DSC's), zoals de serie dsPIC van Microchip Technology.

## Principes van een resonantieomzetter

Het toepassen van een omzetter in de resonantiemodus, op het punt waar de impedantie tussen de ingang en uitgang van de schakeling minimaal is, levert een hoger rendement op. Zo kan bijvoorbeeld het vermogen dat door de MOSFET's wordt gedissipeerd in een LLC resonantieomzetter belangrijk worden verlaagd door aan de MOSFET's een sinusvormige spanning of een sinusvormige stroom toe te voeren en zo dicht mogelijk in de buurt van de nuldoorgang van de sinusvormige spanning of stroom te schakelen. Het laten schakelen van de MOSFET als de drain-naar-source-spanning bijna nul is (hetgeen zero voltage switching (ZVS) wordt genoemd) en het laten overgaan van de ene MOSFET-toestand in de andere als de stroom door de schakelaar

nul is (hetgeen zero current switching (ZCS) wordt genoemd), minimaliseert de schakelverliezen van de MOSFET. Deze zacht-schakelende benadering reduceert tevens de ruis in het systeem en biedt betere elektromagnetische interferentie (EMI) prestaties. Voor voedingssystemen met een hoge spanning en een hoog uitgangsvermogen is ZVS de aanbevolen topologie.

In een resonantieschakelende omzetter wordt de sinusvormige spanning of stroom opgewekt door reactieve elementen, zoals condensatoren en spoelen. De drie hoofdklassen van resonantieomzetter zijn de serie resonantieomzetter (SRC), de parallelle resonantieomzetter (PRC) en een combinatie van beide systemen, de serie-parallelle-resonantieomzetter (SPRC). Het blok-schema van een resonantieomzetter met daarboven de drie typen resonantiefilters zijn weergegeven in figuur 1.

In de serie resonantieomzetter (SRC) wordt de belasting in serie met de spoel en condensator van het resonantiefilter opgenomen. De versterking van het resonantiefilter is  $\leq 1$ . Alhoewel de SRC onbelast kan werken, kan de uitgangsspanning niet worden gestabiliseerd. Voor de ZVS geldt dat de schakeling boven de resonantiefrequentie moet werken in het inductieve gebied. Bij een lage ingangsspanning werkt de SRC dicht bij de resonantiefrequentie. De in serie geschakelde spoel en condensator bieden bescherming tegen kortsluiting.

In de parallelle resonantieomzetter (PRC) wordt de belasting parallel aan de resonantiecondensator aangesloten. De PRC kan zonder belasting van de uitgang werken en in tegenstelling tot de SRC kan de uitgangsspanning in onbelaste toestand wel worden gestabiliseerd. Voor ZVS dient de PRC eveneens te werken boven de resonantiefrequentie in het inductieve gebied. Net als bij de SRC geldt dat de PRC bij een lage ingangsspanning dicht in de buurt van de resonantiefrequentie werkt, maar het verschil is dat de PRC hoge circulatiestromen heeft. De in serie geschakelde spoel en de parallel geschakelde condensator bieden geen beveiliging tegen kortsluiting.

In een SPRC bestaat het filter uit een combinatie van de serie- en parallelomzetter en dit kan zowel een LCC- of een LLC-configuratie zijn. Net als bij de SRC en de PRC kan een ontwerp met SPRC-LCC niet worden geoptimaliseerd voor een hoge ingangsspanning. De conclusie is dat het aanbevolen alternatief voor veel toepassingen een LLC is, zoals is aangegeven in figuur 1 rechtsboven.

De LLC-omzetter kan bij de nominale ingangsspanning werken op de resonantiefrequentie en is in staat om ook onbelast te werken. Bovendien kan dit filter voor een groot ingangsspanningsbereik worden ontworpen. Zowel schakelen op de nuldoorgangsspanning als nuldoorgangsstroom is mogelijk over het volledige werkbereik.

Het gedrag van een resonantieomzetter wordt aangegeven door verschillende parameters. De kwaliteitsfactor (Q) van een resonantieomzetter is een dimensieloze parameter die de mate van demping in het circuit aangeeft. De Q-factor wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het opgeslagen vermogen en het gedissipeerde vermogen in het circuit. Een hogere Q-factor geeft aan dat de bandbreedte van het resonantiefilter smaller is.

Kwaliteit is een van de belangrijkste factoren voor de versterking van het filter, hetgeen ook wel de spanningsomzettingsverhouding of M wordt genoemd. Door de M-krommen te bestuderen die worden gegenereerd bij het wijzigen van  $\lambda$ , de genormaliseerde frequentie, of Q, is het mogelijk om een indruk te krijgen van de prestaties van de resonantieomzetter voordat alle parameters zijn berekend. M wordt gedefinieerd als:

$$M(f_{sw}) = f(\lambda, Q)$$

Hierbij geldt dat:  
 $M(f_{sw})$  = de schakelfrequentie  
 $f_n$  = de genormaliseerde frequentie  $f/f_r$ ,  
 $\lambda$  = de inductieverhouding,  $L_r/L_m$   
 $Q$  = kwaliteit, een functie van de uitgangsimpedantie

Zoals weergegeven in figuur 2 heeft het LLC-circuit voor Q als parameter twee resonantiefrequenties: de ene als gevolg van de aanwezigheid van  $L_r$  en  $C_r$ , de seriespoel en de condensator bij punt 0.5 en de tweede als gevolg van de parallelle spoel  $L_m$ . Daarbij hebben  $L_r$  en  $C_r$  een resonantiefrequentie bij  $f_n = 1$  ( $f_r$ ) en  $L_m+L_r$  en  $C_r$  hebben een resonantiefrequentie op het punt  $f_n \sim 0.5$ .

De verschillende werkmodi van de LLC zijn: op de resonantiefrequentie, beneden de resonantiefrequentie of boven de resonantiefrequentie. Bij resonantie worden de MOSFET's geschakeld op de resonantiefrequentie binnen een zeer nauw tijdsvenster om de verliezen zo laag mogelijk te houden, hetgeen wordt bepaald door de gekozen componenten.

Beneden resonantie komt het gedrag van de schakeling overeen met dat bij resonantie, maar de filterstroom wordt voor een deel van de cyclus begrensd door de magnetiseringsstroom. Als er aan de secundaire kant MOSFET's worden gebruikt voor synchrone gelijkrichting in plaats van dioden, dan moeten de poorten op het juiste moment wor-

den uitgeschakeld. Dit vereist meestal een techniek om de stroom te meten, bijvoorbeeld door de spanningsval over de MOSFET's te bepalen. Boven resonantie zal de filterstroom hoger zijn dan de magnetiseringsstroom in plaats van hierdoor te worden begrensd. In dit gebied kunnen de synchrone schakelaars op hetzelfde moment worden in- en uitgeschakeld als de primaire schakelaars om de regeling te vereenvoudigen. Omdat er gebruik wordt gemaakt van schakelen door de nuldoorgang (ZVS), hebben LLC-resonantievoedingen een overeenkomstig lage elektromagnetische interferentie.

## Digitale regeltopologie voor een hoger rendement

Een volledig digitale regeling van de vermogenomzettingen en systeembeheerfuncties van de LLC resonantieomzetter kan eenvoudig worden geïmplementeerd door gebruik te maken van de laatste generatie DSC's.

Als aanvulling op de componenten en secties die in figuur 1 zijn afgebeeld, bestaat een LLC-schakeling uit een ingangsfiler waaraan de ingangsgelijkspanning wordt toegevoerd, een schakelnetwerk, het LLC-resonantiefilter, transformator, gelijkrichter, filter en belasting. Een digitaal geregelde terugkoppellus voor een LLC-resonantieomzetter, gebruikt in een telecommunicatietoepassing, is weergegeven in figuur 3. In de telecommunicatiesector wordt de LLC-omzetter veelvuldig toegepast als gelijkspanningsomzetter (DC/DC-converter) achter de schakeling voor arbeidsfactorcorrectie (PFC) in een AC/DC-systeem. De gebruikelijke PFC-uitgangsspanning van circa 400 V kan rechtstreeks worden toegevoerd aan de LLC-omzetter. Het brede ingangsbereik staat het toepassen van kleinere buffercondensatoren toe. De ontwerpspecificaties zijn samengevat in tabel 1.

Met een verwerkingskracht van 40 MIPS en intelligente voedingsperiferie levert een dsPIC33FJ GS de digitale rekenkracht voor een resonantieomzetter. De periferie bevat een snelle 16-bit PWM met eigenschappen als een perioderesolutie van 1 ns en uitgangen met faseverschuiving.

Het schakelcircuit van het referentie-ontwerp maakt gebruik van een halve-brug topologie, waardoor de halve-brug spanning varieert tussen 0 V en  $V_d$  van 400 VDC nominaal. Het resonantiefilter bestaat uit een condensator, spoel en de magnetiseringsinductantie van de isolatietransformator om de systeemkosten te verlagen door het weglaten van een externe spoel. Bij dit ontwerp kan eveneens gebruik worden gemaakt van de lekinductantie van de transformator als tweede spoel, waardoor nog een externe spoel kan vervallen als extra kostenbesparing.

Als het resonantiefilter correct is afgeregeld op de schakelfrequentie, biedt dit filter een eindige impedantie op de fundamentele frequentie en een zeer hoge impedantie voor alle andere harmonischen. De impedantie van het resonantiefilter veroorzaakt een faseverschuiving tussen de spanning en de stroom, waardoor van ZVS gebruik kan worden gemaakt. Het schakelen op de nuldoorgang (ZVS) van de MOSFET's aan de primaire zijde is weergegeven in afbeelding 1.

Aan de secundaire zijde wordt gebruik gemaakt van een synchrone gelijkrichter in plaats van dioden voor het verlagen van de geleidingsverliezen aan de secundaire zijde. Dit vermindert zowel de geleidingsweerstand ( $R_f$ ; forward resistance) als de verliezen ten gevolge van de voorwaartsspanning over de diode. De schakelende golfvorm van de synchrone gelijkrichter is weergegeven in afbeelding 2. Voor synchrone gelijkrichting leidt de digitale regeling het schakelen van de FET's in zonder dat stroomtoegang aan de secundaire zijde nodig is. Dit levert een beter rendement op en beperkt de kosten ten opzichte van een ontwerp met een volledige bruggelijkrichter. In figuur 4 is het rendement over het belastingsstroombereik weergegeven. Het rendement van de LLC bij twee verschillende ingangswerkspanningen toont aan dat deze ongevoelig is voor de ingangsspanning. Een rendement van meer dan 80% wordt gehaald bij een uitgangsbelaastingstroom onder de 2 A, terwijl bij hogere belastingen het maximale rendement 95% bedraagt en extreem vlak verloopt van 7...17 A. Een bijkomend voordeel is de grotere flexibiliteit van het compensatorontwerp door gebruik te maken van de DSC voor het implementeren van een zachte start voor het regelen van de impuls/pauze-verhouding.

Omdat het regelen van de vermogensomzetting wordt geïmplementeerd met eenvoudig opnieuw te programmeren software, kunnen ontwerpers hun ontwerp gemakkelijk modificeren of aanpassen, of aanvullen met nieuwe, kostenbesparende en waardedoelende functies. De nauwkeurigheid van de digitale regeling verbetert bovendien de betrouwbaarheid van de voeding.

## Conclusie

De gecombineerde voordelen van LLC-resonantieomzetter met digitale regeling via DSC's stellen ontwerpers in staat om het vermogenrendement van gelijkspanningsomzetter voor telecommunicatievoedingen en andere toepassingen van gemiddeld tot hoog vermogen te verbeteren. Terwijl de LLC-resonantieomzetter de vermogenverliezen kunnen verlagen, verhoogt digitale regeling de onlosmakelijk hieraan verbonden flexibiliteit en betrouwbaarheid van de omzetter. Het voorgestelde referentieontwerp, zie afbeelding 3, dient als uitgangspunt waarmee ontwerpers voedingen met een hoger rendement kunnen realiseren en hun producten daarvoor sneller op de markt kunnen brengen.

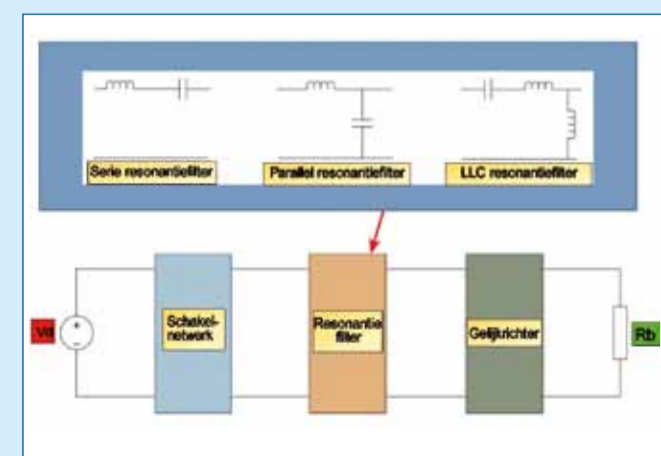
## Aanvullende informatie

Een meer gedetailleerde beschrijving van het referentieontwerp, waarbij gebruik wordt gemaakt van de dsPIC digitale signaalcontroller (DSC), staat in het toepassingsbericht AN1336 van Microchip Technology met als titel: DC/DC LLC resonant converter reference design.

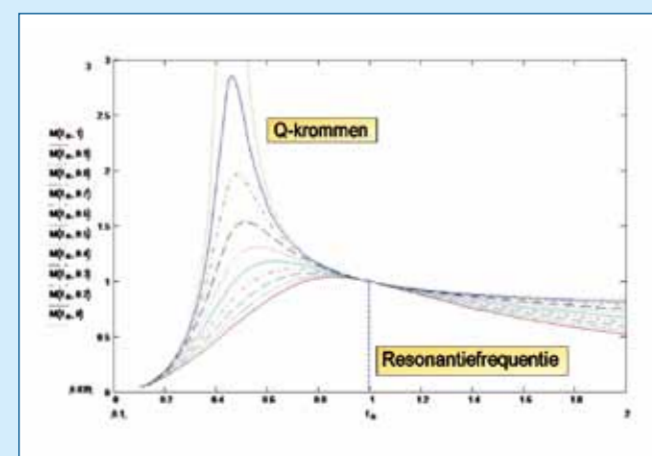
Voor meer informatie [www.etotaal.nl/achtergrond](http://www.etotaal.nl/achtergrond). Artikel "Voedingen met digitale regeling".

Alex Dumais van Microchip Technology Inc.

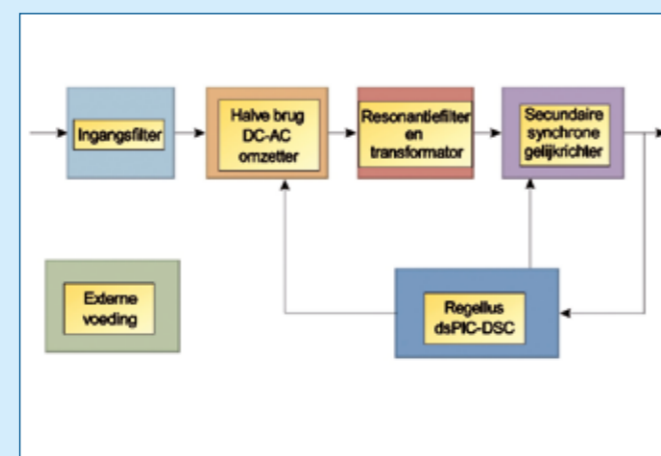
Vertaling/bewerking: Johan Smilde, Copytronics



Figuur 1. Principe van een resonantieomzetter met de mogelijke resonantiefilters.



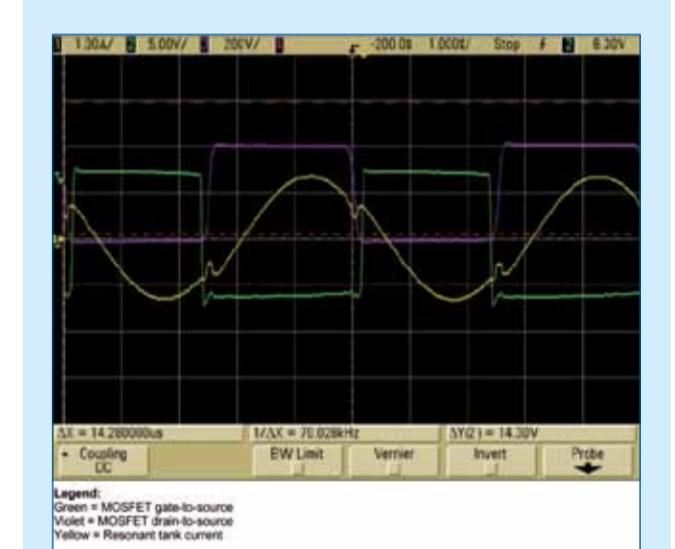
Figuur 2. De kwaliteitsfactor (Q) beïnvloedt de versterking van het filter (M) dat langs de Y-as is aangegeven. Alle Q-krommen vallen samen op de resonantiefrequentie ( $f_n = 1$ ).



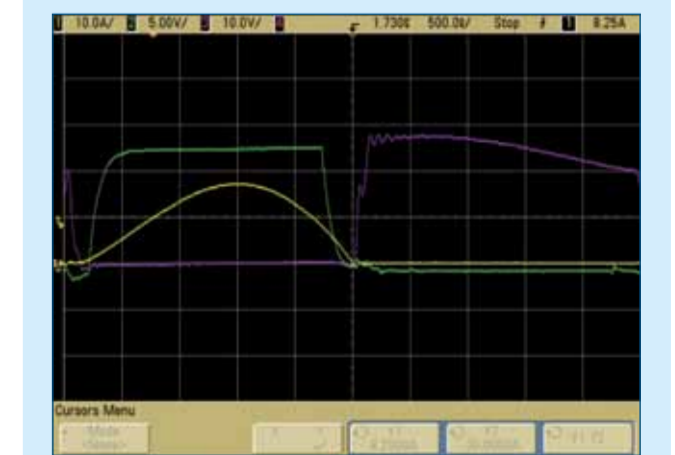
Figuur 3. Digitaal geregelde terugkoppellus voor een LLC-resonantieomzetter.



Figuur 4. Rendement over het belastingsstroombereik.



Afbeelding 1: Schakelen op de nuldoorgang (ZVS) van de MOSFET's aan de primaire zijde.



Afbeelding 2: Schakelende golfvorm van de synchrone gelijkrichter.



Afbeelding 3: Referentieontwerp van een gelijkspanningsvoeding met LLC resonantieomzetter.