

Hybride monolithische integratie van hoogvermogen-DC-DC-convertoren
in een hoogspanningstechnologie

Hybrid Monolithic Integration of High-Power DC-DC Converters
in a High-Voltage Technology

Jindrich Windels

Promotoren: prof. dr. ir. J. Doutreloigne, dr. ir. A. Monté
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen: Elektrotechniek

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Voorzitter: prof. dr. ir. J. Van Campenhout
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013 - 2014



Samenvatting

Elektrische energie is niet meer weg te denken uit het dagelijkse leven, zowel thuis, in ondernemingen als in de industrie. Hoewel bijna alle elektronische applicaties steeds efficiënter worden, blijft de wereldwijde vraag naar energie steeds toenemen, aangezien het aantal gebruikers en applicaties sneller stijgt dan de technologische vooruitgang kan compenseren. Teneinde de totale productie van energie toch haalbaar en betaalbaar te houden, is het essentieel dat de distributie van de geproduceerde elektrische energie zo efficiënt mogelijk gebeurt, of met andere woorden dat de verliezen in de distributie zoveel mogelijk beperkt worden. Door het transport van elektrische energie op de hoogst mogelijke veilige spanning uit te voeren blijven de stromen en de daarmee samenhangende Joule-verliezen beperkt. Om het totale rendement te optimaliseren dient de spanning zo dicht mogelijk bij de eindgebruiker omgezet te worden naar een geschikte lagere spanning, en deze omzetting dient uiteraard ook zo efficiënt, goedkoop en compact mogelijk te gebeuren.

Dankzij een doorgedreven integratie van elektronische systemen, waarbij steeds meer functionaliteit gecombineerd wordt in monolithisch geïntegreerde circuits, kan de kostprijs, het vermogenverbruik en het formaat van deze elektronische systemen sterk beperkt worden. Deze doorgedreven integratie van elektronische systemen is niet beperkt tot de eindgebruikers van de elektrische energie, maar kan ook toegepast worden op de spanningsomzetting. De spanningsomzetting is in de meeste hedendaagse applicaties een efficiënte, schakelende DC-DC-converter, waarbij energie tijdelijk in een of meerdere reactieve elementen, zoals spoelen en condensatoren, wordt opgeslagen. Hierbij laat een hoge schakelsnelheid toe om de DC-DC-converter compact te houden.

Voor lage vermogens, typisch minder dan 1 Watt, is het mogelijk om deze spanningsomzetting volledig monolithisch te integreren. In sommige gevallen kan dit zelfs samen met het geïntegreerde elektronische circuit dat de eindgebruiker is van de energie, om zo een systeem met minimale afmetingen te realiseren. Voor hogere vermogens voldoen de volledig monolithisch geïntegreerde componenten niet om de gewenste efficiëntie te bereiken en blijken een aantal externe componenten noodzakelijk. Doorgaans zijn de reactieve componenten de meest beperkende factor en worden deze bij stijgende vermogens als eerste buiten het geïntegreerde circuit gebracht. Halfgeleidercomponenten, inclusief de vermogenstransistoren blijven daarentegen deel uitmaken van het geïntegreerde circuit, om zo een hybride geïntegreerde converter te bekomen. Dankzij deze hybride aanpak is het in de huidige hybride geïntegreerde converter-toepassingen haalbaar om maximaal ongeveer 60 Watt te verwerken, zij het enkel voor spanningen tot een paar Volt. Voor spanningen

van enkele tientallen Volt is het uitgangsvermogen van deze hybride geïntegreerde convertoren beperkt tot een tiental Watt. Voor nog hogere vermogens worden de geïntegreerde vermogenstransistoren eveneens een beperkende factor en worden deze vervangen door discrete vermogenstransistoren. In deze discrete convertoren is de omzetting van veel hogere vermogens mogelijk, maar de omvang van het systeem neemt snel toe. In dit werk worden de grenzen van de hybride aanpak onderzocht bij het gebruiken van zogenaamde *smart-power* technologieën, een generieke term voor betaalbare sub-micron CMOS technologieën met enkele uitbreidingen voor de integratie van hoogspanningscomponenten. Afhankelijk van de applicatie is het mogelijk om beter te presteren dan de huidige “beste” convertoren op het gebied van efficiëntie, formaat en kostprijs, door het combineren van de gepaste *smart-power* technologie en de juiste topologie.

Voor het bepalen van de mogelijkheden van *smart-power* DC-DC-convertoren worden eerst algemeen de belangrijkste parameters besproken voor een efficiënte energiedistributie en bekijken we de rol die spanningsomzetting speelt in de energiedistributie. Aansluitend kiezen we uit de mogelijke toepassingen een tweetal applicaties uit de wereld van de telecommunicatie waarvoor we de hybride monolitische integratie in een *smart-power* technologie wensen te optimaliseren. Daarna bekijken we de eigenschappen van een ideale convertor en de relevante specifieke kenmerken van de betaalbare *smart-power* technologieën voor de implementatie van DC-DC-convertoren. Rekening houdend met de beperkingen die aanwezig zijn in deze technologieën bepalen we een kostfunctie die toelaat om systematisch de verschillende topologieën voor convertoren te kunnen vergelijken zonder het volledige ontwerpproces te doorlopen. Vanuit deze kostfunctie valt het op dat de de facto standaard keuze voor de topologie in discrete convertoren, die gebaseerd is op het uitgangsvermogen, niet optimaal is voor convertoren met geïntegreerde vermogenstransistoren. Op basis van deze kostfunctie en de randvoorwaarden die gesteld worden aan onze concrete applicaties bepalen we de optimale topologie voor een *smart-power* implementatie voor de eerder gekozen applicaties.

Vervolgens gaan we een stap dichterbij de realiteit en bekijken we de gevolgen van parasitaire elementen in een *smart-power* implementatie van schakelende convertoren. De spanningspieken veroorzaakt door de lekductantie aan de secundaire van transformatorgeïsoleerde convertoren blijken daarbij een groot struikelblok voor een efficiënte implementatie. Aangezien de gebruikelijke aanpak van deze spanningspieken in discrete convertoren niet voldoet voor *smart-power* convertoren omwille van technologische beperkingen wordt een alternatieve aanpak aangetoond en geïmplementeerd, waarbij de energie uit de spanningspieken wordt geabsorbeerd en hierbij gerecycleerd naar de uitgang van de convertor. Hierdoor is het mogelijk om de spanningspieken sterk te reduceren en tegelijk het rendement vrijwel constant te houden. Zo bekomen we een efficiënte, compacte en betaalbare implementatie. De correcte werking van deze aanpak werd uitgetest en aangetoond, zowel in een versie gebruik makend van een commercieel verkrijgbaar geïntegreerd circuit, als in een eigen *smart-power* implementatie.

Uiteindelijk bekijken we ook de optimalisatie van schakelende convertoren over de volledige lastkarakteristiek door de mogelijkheden van een sterk geïntegreerde convertor uit te buiten. Alhoewel het maximale uitgangsvermogen nog steeds een van de karakteristieke

eigenschappen is van een convertor blijkt dat de meeste convertoren een belangrijk deel van hun levensduur significant lagere vermogens omzetten. Hierdoor is het wenselijk om ook bij een lagere uitgangsstroom en uitgangsvermogen het rendement te optimaliseren. Door de vermogenstransistoren op te splitsen in verschillende onafhankelijke segmenten, die in functie van de stroom al dan niet aangestuurd worden, kan het rendement bij lage stromen sterk verhoogd worden. Dit alles zonder de introductie van ongewenste frequentiecomponenten in de uitgangsspanning en zonder dat dit ten koste gaat van het rendement bij hogere stromen. Deze eigenschappen laten toe om deze optimalisatietechniek in vrijwel alle applicaties van hybride monolithische DC-DC-convertoren toe te passen, zonder grote impact op de complexiteit en de kost van het systeem. Deze aanpak werd uitgetest en aangetoond in een versie met discrete vermogenstransistoren, maar kon wegens een probleem met een digitaal controleblok enkel in simulatie aangetoond worden voor de eigen smart-power implementatie.

Tenslotte worden eveneens een aantal algemene conclusies geformuleerd en halen we de mogelijkheden voor toekomstig werk in het verlengde van dit onderzoek aan.

Summary

The supply of electrical energy to home, commercial, and industrial users has become ubiquitous, and it is hard to imagine a world without the facilities provided by electrical energy. Despite the ever increasing efficiency of nearly every electrical application, the worldwide demand for electrical power continues to increase, since the number of users and applications more than compensates for these technological improvements. In order to maintain the affordability and feasibility of the total production, it is essential for the distribution of the produced electrical energy to be as efficient as possible. In other words the loss in the power distribution is to be minimized. By transporting electrical energy at the maximum safe voltage, the current in the conductors, and the associated conduction loss can remain as low as possible. In order to optimize the total efficiency, the high transportation voltage needs to be converted to the appropriate lower voltage as close as possible to the end user. Obviously, this conversion also needs to be as efficient, affordable, and compact as possible.

Because of the ever increasing integration of electronic systems, where more and more functionality is combined in monolithically integrated circuits, the cost, the power consumption, and the size of these electronic systems can be greatly reduced. This thorough integration is not limited to the electronic systems that are the end users of the electrical energy, but can also be applied to the power conversion itself. In most modern applications, the voltage conversion is implemented as a switching DC-DC converter, in which electrical energy is temporarily stored in reactive elements, i.e. inductors or capacitors. High switching speeds are used to allow for a compact and efficient implementation.

For low power levels, typically below 1 Watt, it is possible to monolithically implement the voltage conversion on an integrated circuit. In some cases, this is even done on the same integrated circuit that is the end user of the electrical energy to minimize the system dimensions. For higher power levels, it is no longer feasible to achieve the desired efficiency with monolithically integrated components, and some external components prove indispensable. Usually, the reactive components are the main limiting factor, and are the first components to be moved away from the integrated circuit for increasing power levels. The semiconductor components, including the power transistors, remain part of the integrated circuit. Using this hybrid approach, it is possible in modern converter-applications to process around 60 Watt, albeit limited to voltages of a few Volt. For hybrid integrated converters with an output voltage of tens of Volt, the power is limited to approximately 10 Watt. For even higher power levels, the integrated power transistors also become a limiting factor, and are replaced with discrete power devices. In these

discrete converters, greatly increased power levels become possible, although the system size rapidly increases. In this work, the limits of the hybrid approach are explored when using so-called *smart-power* technologies. Smart-power technologies are standard low-cost submicron CMOS technologies that are complemented with a number of integrated high-voltage devices. By using an appropriate combination of smart-power technologies and circuit topologies, it is possible to improve on the current state-of-the-art converters, by optimizing the size, the cost, and the efficiency.

To determine the limits of smart-power DC-DC converters, we first discuss the major contributing factors for an efficient energy distribution, and take a look at the role of voltage conversion in the energy distribution. Considering the limitations of the technologies and the potential application areas, we define two test-cases in the telecommunications sector for which we want to optimize the hybrid monolithic integration in a smart-power technology. Subsequently, we explore the specifications of an ideal converter, and the relevant properties of the affordable smart-power technologies for the implementation of DC-DC converters. Taking into account the limitations of these technologies, we define a cost function that allows to systematically evaluate the different potential converter topologies, without having to perform a full design cycle for each topology. From this cost function, we notice that the de facto default topology selection in discrete converters, which is typically based on output power, is not optimal for converters with integrated power transistors. Based on the cost function and the boundary conditions of our test-cases, we determine the optimal topology for a smart-power implementation of these applications.

Then, we take another step towards the real world and evaluate the influence of parasitic elements in a smart-power implementation of switching converters. It is noticed that the voltage overshoot caused by the transformer secondary side leakage inductance is a major roadblock for an efficient implementation. Since the usual approach to this voltage overshoot in discrete converters is not applicable in smart-power converters due to technological limitations, an alternative approach is shown and implemented. The energy from the voltage overshoot is absorbed and transferred to the output of the converter. This allows for a significant reduction in the voltage overshoot, while maintaining a high efficiency, leading to an efficient, compact, and low-cost implementation. The effectiveness of this approach was tested and demonstrated in both a version using a commercially available integrated circuit, and our own implementation in a smart-power integrated circuit.

Finally, we also take a look at the optimization of switching converters over the load range by exploiting the capabilities of highly integrated converters. Although the maximum output power remains one of the defining characteristics of converters, it has been shown that most converters spend a majority of their lifetime delivering significantly lower output power. Therefore, it is also desirable to optimize the efficiency of the converter at reduced output current and output power. By splitting the power transistors in multiple independent segments, which are turned on or off in function of the current, the efficiency at low currents can be significantly improved, without introducing undesirable frequency components in the output voltage, and without harming the efficiency at higher currents. These properties allow a near universal application of the optimization technique in hybrid monolithic DC-DC converter applications, without significant impact on the complexity

and the cost of the system. This approach for the optimization of switching converters over the load range was demonstrated using a boost converter with discrete power transistors. The demonstration of our smart-power implementation was limited to simulations due to an issue with a digital control block.

On a finishing note, we formulate the general conclusions and provide an outlook on potential future work based on this research.