

DISS. ETH NO. 16414

**HIGH OUTPUT VOLTAGE
SERIES-PARALLEL RESONANT DC-DC
CONVERTER FOR MEDICAL X-RAY IMAGING
APPLICATIONS**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

FABIANA DA SILVEIRA CAVALCANTE

M.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina

born 07.09.1976

citizen of Brazil

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.W. Kolar, examiner

Prof. Dr. K. Fröhlich, co-examiner

2006

ABSTRACT

A particular application of a high-voltage DC-DC converter is to drive an x-ray tube used in medical x-ray imaging systems like Mammographs and Computed Tomographs (CT). For such application, low ripple voltage waveforms with fast rising time under exact no-overshoot response are required. The x-ray power generator must have the particular capability to adjust its DC output voltages across the x-ray tube in order to assure the best quality image for each specified pattern of body part. Higher output voltages are required to diagnose more dense body parts as all types of bones, and relatively lower high voltages may be adequately used for diagnosing soft tissues of the organs.

The adjustment of the voltage can be implemented by controlling the DC output high-voltage across the x-ray tube over widely specified ranges by using a DC-DC converter. The operation of high output voltage DC-DC converters is considerably affected by transformer non-idealities being caused by the large transformer turns ratio and/or large number of secondary turns. In particular, the leakage inductance and the secondary winding capacitance do take considerable influence on the converter behavior and do potentially reduce efficiency and reliability [EJW88]. Therefore, converter topologies suitable for x-ray imaging applications should integrate the parasitics of the transformer into the circuit operation. Accordingly, resonant converters are frequently employed for the realization of high output voltage DC-DC converter systems. However, the design of resonant converters is involved due to the large number of operating states occurring within a pulse period.

A new high-voltage DC-DC converter for x-ray medical application is proposed in this thesis. The state of the art technology used for x-ray

generators works in the frequency range from 30 kHz to 100 kHz. Due to these low switching frequencies, the magnetic components of these generators are large and heavy. The converter that is proposed in this thesis works at switching frequencies up to 500 kHz in order to reduce volume and weight. However, high frequency operation can generate additional losses in the converter. For this reason, it is important to find a topology and a modulation strategy that allows the converter to operate under soft-switching condition in the entire operating range, in order to reduce the converter losses.

This thesis presents three main contributions for the design of series-parallel resonant converters for high-voltage generation. The first contribution is a straightforward procedure for designing a full-bridge high output voltage series-parallel resonant DC-DC converter for medical x-ray imaging application. The approach is based on an extension of the first harmonic analysis proposed in [IKBY97]. There, the converter output power is controlled by frequency variation at fixed duty-cycle. That means, one has only one control variable. In contrast, for the procedure proposed in this thesis, the output power is controlled by duty-cycle variation while the operating frequency is automatically adjusted for ensuring the commutation of one bridge leg at zero current. As the second bridge leg due to operation above the resonance frequency commutates at zero voltage, soft-switching should be preserved in the entire operating range. Furthermore, in order to guarantee low losses in stand-by mode a control scheme minimizing the converter conduction and switching losses for no load operation is proposed. Also, the transient behavior of the converter is analyzed and a control concept is used, which allows to maintain the converter operation above resonance for all kinds of load changes.

The second contribution of this thesis is the small-signal model for the series-parallel resonant DC-DC converter with capacitive output filter, which models the strong nonlinear behavior of the system as a standard control system. A simple model is still missing in the literature and for this reason many controller designs are performed by trial and error [GSGB04]. The trial and error procedure is not convenient because the small-signal model varies significantly with load changes and the load is normally an

unknown parameter. Therefore, setting of the controller parameters can take a long time until a robust set of parameters are found. The main tool used in this work for deriving the small-signal model is the generalized averaging method proposed in [SNL⁺91]. This method overcomes the limitations of the traditional state-space averaging method because it does not require that the waveforms have small ripple magnitude. Thus, it is able to describe arbitrary types of waveforms. The method is based on the fact that the arbitrary waveform $x(\cdot)$ can be represented on the interval $\tau \in (t-T, t]$ by a Fourier series. The analysis calculates the time-evolution of the Fourier series coefficients as the window of length T slides over the actual waveform [SNL⁺91]. The proposed model simplifies the controller design for series-parallel resonant converters by removing the need of very complex mathematical analysis and saves the time required for measurements in the trial and error design method.

The controller design is the third main contribution of this thesis. This is a very relevant aspect of this work because the controller should meet very restrictive requirements of output voltage rising time and overshoot, which are mandatory for medical x-ray imaging equipments. This work proposes two different adaptive controllers for the series-parallel resonant DC-DC converter with capacitive output filter. The first controller is a gain scheduled controller. Gain scheduling is a feedforward adaptation and it can be regarded as a mapping from process to controller parameters. The main advantage of gain scheduling is the fast dynamic response of the controller. The second controller proposed in this work is a passivity based controller (PBC). This control approach shapes the energy of the system according to a chosen reference trajectory [CdL⁺03]. Passivity based control is a very robust method but the dynamic response is not as fast as the response of the gain scheduled controller because it depends on the speed of the estimate of the load. For medical x-ray imaging systems, fast dynamic response is a very important aspect. Thus, the gain scheduled controller is chosen for the practical implementation.

After concluding the design stage, a prototype is constructed in order to validate the theoretical studies. The prototype is tested at steady-state and under transient conditions and experimental results are presented

and critically analyzed. There is a very good agreement between the results obtained with the theoretical analysis and the experimental results. This shows the validity of the design methods developed in this thesis, which in the meantime have been used as basis for the development of a new generation of Mammography systems.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine besondere Anwendung von Hochspannungs- DC-DC Konverters ist die Spannungsversorgung von Röntgenröhren, welche in medizinischen Röntgenanwendungen wie Mammografie oder Computertomografie (CT) verwendet werden. Für diese Einsatzbereiche werden geringe Welligkeit der Röhrenspannung mit schnellen Anstiegszeiten ohne Überschwingen in der Sprungantwort benötigt. Der Röntgengenerator muss in der Lage sein, die erzeugte Gleichspannung für die Röntgenröhre so anzupassen, dass eine optimale Bildqualität für jeden gewünschten menschlichen Körperteil gewährleistet wird. Höhere Ausgangsspannungen werden für die Diagnose von dichteren Körperteilen wie z.B. alle möglichen Arten von Knochen benötigt. Auf der anderen Seite sind tiefere Hochspannungswerte geeigneter für weiche Organgewebe.

Die Spannungsanpassung über den spezifizierten Bereich kann mit Hilfe eines DC-DC Konverters mit Hochspannungsausgang realisiert werden. Der Betrieb von DC-DC Konvertern mit hoher Ausgangsspannung ist sehr abhängig von den Nichtidealitäten des Transformators, welche durch das grosse Windungszahlverhältnis und/oder die grosse Sekundärwindungszahl verursacht werden. Besonders die Streuinduktivität und die Sekundärwicklungskapazität haben einen grossen Einfluss auf das Verhalten des Konverters und können die Effizienz und Zuverlässigkeit beträchtlich reduzieren. Deshalb sind bei der Wahl der Konvertertopologie für medizinische Röntgendiagnostik die Nichtidealitäten des Transformators in den Schaltungsentwurf einzubeziehen. Entsprechend werden häufig Resonanzkonverter für die Realisierung von DC-DC Konvertersystemen mit hoher Ausgangsspannung verwendet. Das Design von Resonanzkonvertern ist wegen der grossen Anzahl von

Betriebszuständen, welche innerhalb einer Pulsperiode auftreten, relativ komplex.

In dieser Arbeit wird ein neuer Hochspannungs-DC-DC-Konverter für medizinische Röntgendiagnostik vorgestellt. Die aktuelle Technologie, welche heute in Röntgengeneratoren verwendet wird, arbeitet in einem Frequenzbereich zwischen 30kHz und 100kHz. Aufgrund dieser tiefen Schaltfrequenzen weisen die magnetischen Komponenten der Generatoren relativ hohes Volumen und Gewicht auf. Der neue, in dieser Arbeit behandelte Konverter arbeitet daher mit Schaltfrequenzen bis zu 500 kHz, so dass das Volumen und das Gewicht erheblich reduziert werden können. Der Einsatz solch hoher Frequenzen würde bei konventionellem Betrieb hohe Verluste des Konverters verursachen. Aus diesem Grund ist es wichtig eine Schaltungstopologie und eine zugehörige Betriebsweise zu finden, welche im ganzen Arbeitsbereich ein *Soft-Switching* der Leistungshalbleiter ermöglicht und so die Konverterschaltverluste reduziert.

Diese Arbeit präsentiert drei Hauptbeiträge für das Design eines Serien-Parallel Resonanzkonverters zur Hochspannungsversorgung von Röntgenröhren. Der erste Beitrag beschreibt ein direktes Verfahren für die Festlegung der Bauelemente des Leistungskreises gestützt auf eine Erweiterung der ersten harmonischen Analyse nach Ivensky et al. [IKBY97]. In der genannten Arbeit wurde die Ausgangsspannung des Konverters durch eine Frequenzvariation bei konstantem Tastverhältnis geregelt. Das bedeutet, dass nur eine Kontrollvariable zur Verfügung steht.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren präsentiert, bei dem die Ausgangsleistung durch die Veränderung des Tastverhältnisses geregelt wird, wobei die Betriebsfrequenz automatisch angepasst wird um sicher zu stellen, dass immer einer der beiden Brückenarme des Konverters im Nulldurchgang des Resonanzstromes schaltet. Da der zweite Brückenarm wegen überresonanten Betriebes unter Nullspannung schaltet, ist *Soft-Switching* über den ganzen Arbeitsbereich gewährleistet. Um weniger Verluste im *Stand-by Mode* zu garantieren, wird zusätzlich eine Betriebsweise angegeben, welche die Verluste des Konverters im Leerlauf reduziert. Weiters wird das Verhalten des Konverters bei spontanen

Laständerungen analysiert und ein Steuerkonzept vorgeschlagen, welches den überresonanten Betrieb für alle möglichen Laständerungen sicherstellt.

Der zweite Beitrag dieser Arbeit ist ein regelungstechnisches Kleinsignalmodell für den Serien-Parallel Resonanzkonverter mit kapazitivem Ausgangsfilter, welches ein stark nichtlineares Regelsystem darstellt. Da ein solches Modell bisher in der Literatur fehlte, wurden die meisten Regelungsverfahren durch *Trial and Error* entworfen [GSGB04]. Diese Vorgehensweise ist aber schwierig, da das dynamische Verhalten stark von der Last abhängt welche normalerweise ein unbekannter Parameter ist. Aus diesem Grund kann sich das Einstellen eines Satzes robuster Reglerparameter relativ zeitaufwendig gestalten. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Modell vereinfacht den Reglerentwurf für den Serien-Parallel Resonanzkonverter, indem es die Notwendigkeit einer sehr komplexen mathematischen Analyse beseitigt und so eine durchgängige regelungstechnische Betrachtung ermöglicht.

Der dritte wesentliche Beitrag dieser Arbeit beschreibt ein neues Regelungsverfahren. Die regelungstechnische Beherrschung des Systems ist ein sehr wichtiger Aspekt, da der Regler restriktive Anforderungen der medizinischen Diagnostik bezüglich Anstiegszeit und Überschwingen der Ausgangsspannung einhalten muss. Um die theoretischen Studien zu validieren wird ein Prototyp aufgebaut, und anschliessend im stationären Betrieb und unter transienten Bedingungen getestet. Danach werden die experimentellen Resultate präsentiert und kritisch analysiert. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der theoretischen Analyse. Dies bestätigt die Gültigkeit der Designmethoden, die in dieser Arbeit entwickelt und inzwischen als Grundlage für die Entwicklung einer neuen Generation von Mammographen herangezogen wurden.