

# System-level optimization of three-phase three-level T-type UPS system

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Uemura, Hirofumi

**Publication date:**

2015

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010674522>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 23060

**SYSTEM-LEVEL OPTIMIZATION OF  
THREE-PHASE THREE-LEVEL T-TYPE  
UPS SYSTEM**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**HIROFUMI UEMURA**

Dr.Eng. Kyushu Institute of Technology, Japan

born 2. February 1982

citizen of Japan

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner  
Prof. Dr. Jorma J. Kyyrä, co-examiner

2015

# Abstract

Demand for highly efficient and very compact power converters has kept increasing in industrial applications such as general power supply systems, Power Conditioning Systems (PCSs) and Uninterruptible Power Supplies (UPSs) systems over the last decades. In order to optimize the performance of the converter systems and achieve both high efficiency and high power density, and multi-objective optimization must be performed during the development. A typical development process of a power converter system in an industrial company consists of several iterations of prototype hardware production, evaluation and design improvement procedures. However, the production of several prototypes results in higher development time and cost. Therefore, multi-objective optimization is an interesting alternative but has to cover several domains and must involve a large number of power components; accordingly, it is a rather complicated procedure and it is therefore difficult to perform the system-level optimization automatically.

The main goal of this thesis is to give a comprehensive automatic system-level optimization procedure of a 20 kVA three-phase three-level UPS system and an experimental evaluation of the losses, volumes and thermal models of the components. The approach includes detailed electro-thermal and magneto-thermal coupled losses / volume calculation models for power semiconductors, forced cooling extruded heat sinks, differential-mode (DM) inductors, and common-mode (CM) inductors. A simple losses / volume calculation model for capacitors, auxiliary circuits, and resistive components of the system are also included. The switching losses of different combinations of power semiconductors are experimentally measured and the most suitable semiconductor combinations for input side rectifier and output side inverter has been decided. In addition a local optimization model for DM induc-

tors including an extended compact thermal model to determine the hot-spot temperature inside a winding is proposed and experimentally evaluated. Typically, the EMI filter design is complicated and time consuming. This thesis also provides a detailed automatic two-stage EMI input filter design procedure including an EMI noise estimation technique. Combining this filter design procedure and the filter component losses / volume / thermal calculation models, the proposed optimization procedure is able to give a practically reasonable filter design under consideration of thermal constraints.

Four different magnetic materials and wide range of design parameters such as switching frequency and relative current ripple in the inductors are considered in the system-level optimization. An amorphous material is found to be a suitable selection for high efficiency and power density at reasonable cost. Optimum design parameters for hardware realization are selected based on the analysis of the trade-off between the system performances. As a result, a switching frequency of 16 kHz and a relative current ripple of 20 % are selected for 96.4 % efficiency at 2.3 kVA/dm<sup>3</sup> power density. In order to determine a practical number for power density, a virtual prototyping with 3D-CAD is performed. A practically realized UPS hardware achieves 0.9 kVA/dm<sup>3</sup> power density which shows good agreement with the virtual prototyping result. Finally, a measurement of the total system losses and an EMI test are performed on the realized hardware. Measurement result shows an efficiency of 96.5 % and confirm a less than 5 % error between measured losses and the proposed loss calculation model. Also it is confirmed that the realized EMI input filter satisfies the EMI requirement.

# Kurzfassung

Der Bedarf an hocheffizienten und sehr kompakten leistungselektronischen Konvertern, wie zum Beispiel allgemein Stromversorgungen, Leistungsaufbereitungssystemen (Power Conditioning Systems, PCSs) und unterbrechungsfreien Stromversorgungen (Uninterruptible Power Supplies, UPSs), ist weiter zunehmend. Um die Leistungsfähigkeit von solchen Stromrichtersystemen zu optimieren und sowohl einen hohen Wirkungsgrad als auch eine hohe Leistungsdichte zu erzielen, muss während der Entwicklung ein Mehrkriterienoptimierungsverfahren verwendet werden. Der heute typischerweise in der Industrie angewendete Entwicklungsprozess für Stromrichtersysteme besteht aus mehreren Iterationen über Prototypenherstellung, Evaluation und anschließende Verbesserung der Auslegung. Die Herstellung von mehreren Prototypen benötigt jedoch viel Zeit und resultiert daher in Zeitverzögerungen und hohen Kosten. Andererseits handelt es sich bei der Mehrkriterienoptimierung um einen komplexen, viele Bereiche umfassenden Vorgang, der eine grosse Zahl von Leistungskomponenten einschliesst, und daher eine automatische Optimierung auf Systemebene anspruchsvoll werden lässt.

Das hauptsächliche Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines kompletten, automatischen Optimierungsverfahrens auf Systemebene für ein dreiphasiges 20 kVA Dreilevel-UPS-System, sowie die experimentelle Evaluation der Komponentenmodellierung hinsichtlich Verlusten, Volumina und thermischen Berechnungen. Dieser Ansatz für eine Optimierung auf Systemebene umfasst ein detailliertes, gekoppeltes elektrothermisches und magnetothermisches Berechnungsmodell für Verluste und Volumina von Leistungshalbleitern, Zwangskühlsystemen basierend auf anwendungsspezifischen Kühlkörpern, sowie Gegentakt- (differential-mode, DM) und Gleichtaktdrosseln (common-mode, CM Induktivitäten). Ein einfaches Berechnungsmodell für Verluste und

Volumina von Kondensatoren, Hilfsstromkreisen und resistiven Komponenten im Stromrichter wird ebenfalls verwendet. Die Schaltverluste von verschiedenen Kombinationen von Leistungshalbleitern werden experimentell bestimmt und die geeignetsten Halbleiterkombinationen für den aktiven Eingangsgleichrichter und den Ausgangswechselrichter ausgewählt. Des Weiteren wird ein lokales Optimierungsmodell für Ggntaktdrosseln vorgeschlagen und experimentell evaluiert, welches ein erweitertes kompaktes thermisches Modell zur Ermittlung der maximalen Temperatur in der Wicklung beinhaltet. Typischerweise ist die Auslegung von EMV-Filtern eine komplizierte und zeitaufwändige Aufgabe. Die vorliegende Arbeit enthält deshalb auch ein detailliertes automatisches Auslegungsverfahren für zweistufige EMV-Filter, das eine Methode zur Abschätzung der leitungsgebundenen elektromagnetischen Störaussendung umfasst. Durch die Kombination dieses Filterauslegungsverfahrens mit den Berechnungsmodellen für Verluste und Volumina der Filterkomponenten sowie den entsprechenden thermischen Modellen kann das vorgeschlagene Optimierungsverfahren praxisnahe Filterauslegungen bestimmen, die auch thermische Einschränkungen berücksichtigen.

Die Optimierung auf Systemebene berücksichtigt vier verschiedene Magnetkernmaterialien sowie weite Parameterbereiche für beispielsweise die Schaltfrequenz oder den zulässigen relativen Stromrippel in den Filterinduktivitäten. Ein *amorphes* Kernmaterial wird als geeignete Wahl für die Erreichung eines hohen Wirkungsgrades und einer hohen Leistungsdichte bei vernünftigen Kosten identifiziert. Basierend auf der Analyse des Kompromisses zwischen den Kennwerten der entsprechenden Systeme werden optimale Auslegungsparameter für die Realisierung eines Prototypen ausgewählt. Für eine Schaltfrequenz von 16 kHz und einen relativen Stromrippel von 20 % ergeben sich so ein Wirkungsgrad von 96.4 % und eine Leistungsdichte von 2.3 kVA/dm<sup>3</sup>. Um die praktisch realisierbare Leistungsdichte zu ermitteln, wird virtuelles Prototyping mittels 3D-CAD verwendet. Der tatsächlich realisierte Aufbau eines UPS-Systems erreicht schliesslich eine Leistungsdichte von 0.9 kVA/dm<sup>3</sup>, was gut mit den Resultaten des virtuellen Prototypings übereinstimmt. Schlussendlich werden die gesamten Systemverluste des aufgebauten Prototypen sowie auch dessen EMV-Verhalten messtechnisch bestimmt. Die Resultate zeigen einen Wirkungsgrad von 96.5 %, was einer Abweichung von weniger als 5 % zwischen gemessenen und mit den vorgeschlagenen Verlustmodellen bestimmten Verlusten ent-

spricht. Ebenfalls kann gezeigt werden, dass das realisierte EMV-Filter die entsprechenden EMV-Anforderungen erfüllt.