

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

20/01/2025

Projekttitel: ML-Ultra

Projektnummer:39125276

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	7. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/10/2021
Projektende	30/09/2024
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Dr. Johannes Stöckl
Postadresse	Giefinggasse 4, A-1210 Wien
Telefon	+43/664 825 14 87
Fax	n.a.
E-mail	johannes.stoeckl@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.atML

ML-Ultra

Multi-Level Ultra Converter

AutorInnen:

Dr. Zoran Miletic

DI Dr. Johannes Stöckl

Prof. Dr. Petar Grbovic

Dr. Franz Maislinger

Dr. Jon Azurza

Dr. Martin Wattenberg

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	5
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	7
2.5	Aufbau der Arbeit	7
3	Inhaltliche Darstellung	8
3.1	Applikationsanforderungen	8
3.2	Topologieuntersuchungen	8
3.3	Konzeptrealisierung	12
3.4	Validierung im Labor	14
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	15
5	Ausblick und Empfehlungen	16
6	Literaturverzeichnis	17
7	Kontaktdaten	18

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Das Projekt ML-Ultra beschäftigte sich mit leistungselektronischen Multi-Level Konvertern für Industrieantriebe und im Besonderen mit einer neuartigen 5-Level NE Type Topologie. Diese war im Detail zu untersuchen, in einem Konzept aufzubauen und gegenüber einem Referenzsystem zu validieren. Weiters waren Verwertungsmöglichkeiten über den Kern-Use-Case hinaus auszuloten.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Die thematischen Schwerpunkte des Projekts konzentrierten sich im Kern auf Leistungselektronik als Enabler für energieeffiziente Umwandlung für Antriebe, speziell Industrieantriebe. ML-Ultra sollte zeigen, dass mit der Verwendung von 5-Level Topologien wesentliche Verbesserungen gegenüber dem State-of-the-Art der 2-Level Topologien erzielt werden können. Abbildung 1 zeigt mehrerer interessanter Parameter im Vergleich mit anderen Topologien, die in Konsequenz auf wesentliche Parameter der Anwendung (Effizienz, Kosten, Zuverlässigkeit) gemappt werden können.

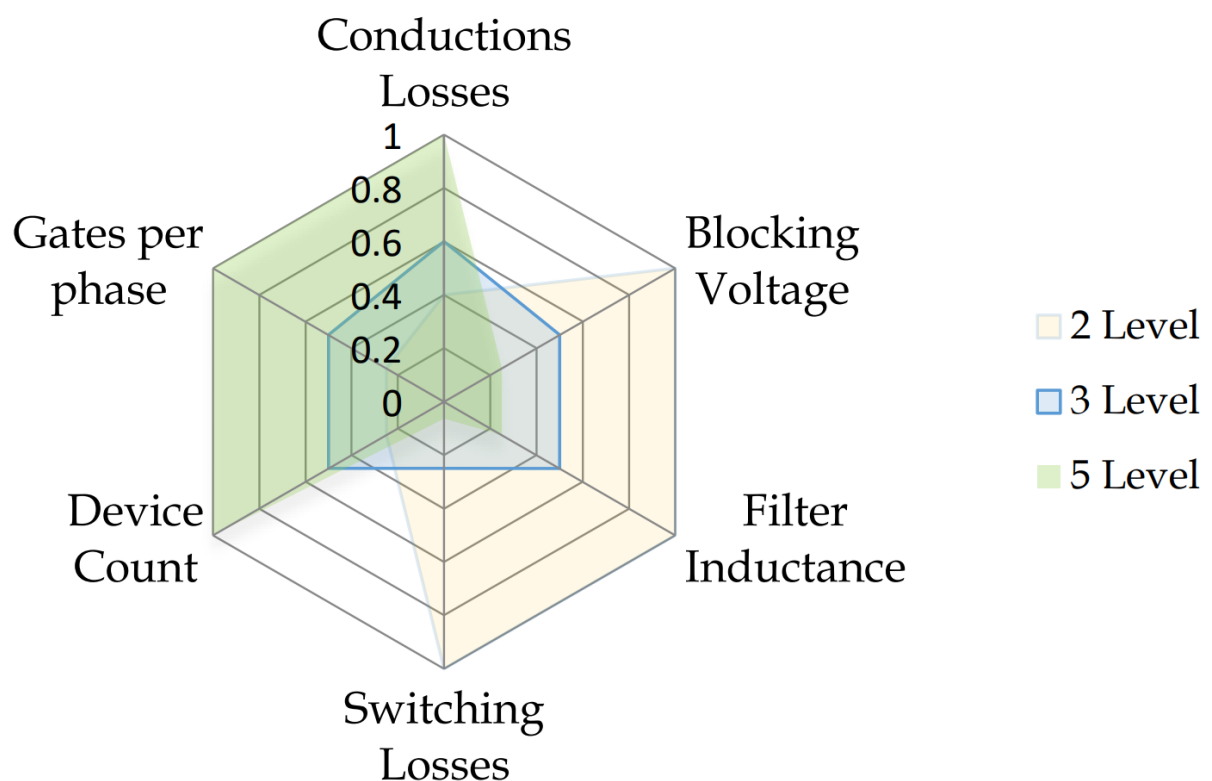


Abbildung 1 - Vergleich der ML-Ultra Topologie mit 2 bzw. 3-Level State-of-the-art in mehreren Parametern [D1]

2.3 Einordnung in das Programm

Da Projekt war bezüglich des Ausschreibungsleitfadens folgendermaßen einzuordnen:

Innovationen in Relation zu den Programmzielen

Ziel	Beschreibung
Grand Challenges	Mit den angestrebten Innovationen in ML-Ultra wurden energieeffiziente Umrichterkonzepte für ein weites Spektrum an Applikationsfelder erforscht. Durch die wesentliche Verkleinerung der Filter und lüfterlose Kühlkonzepte bestand zusätzlich ein Mehrwert durch Ressourceneffizienz und erhöhte Zuverlässigkeit/Lebensdauer der Systeme.
Österreichs Technologieführerschaft	Mit den Partnern Infineon und B&R Automation waren zwei weltweit führende Industrieunternehmen in dem Projekt involviert. Mit den angestrebten Innovationen entstand sowohl auf dem Gebiet der Leistungshalbleiter (Si, SiC, GaN) als auch im Bereich der integrierten Motordrives Potenzial für einen Ausbau der Aktivitäten auf den globalen Märkten.
Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor	Für alle Partner gilt, dass die Innovationen umgehend zu einer Stärkung der jeweiligen Teams und in der Folge potenzielle Vergrößerungen bedeuteten. Die Industriepartner konnten und können mittelfristig Fertigungskapazitäten erweitern. In Forschung und Lehre bedeuteten die Forschungsergebnisse auch einen weiteren Kompetenzzuwachs in den Teams sowie für die Studierenden.

Bezüglich der Themenfelder wurden folgende Zuordnungen getroffen.

Themenfeld	Beschreibung
Subthema 2.1	Die Innovationen ermöglichten den hocheffizienten Umgang mit elektrischer Energie mittels leistungselektronischer Komponenten und deren Integration in die Automatisierung basierend auf integrierter Motor-Drives.
Subthema 1.1	Die Innovationen konnten in einer netzgebundenen Variante für Systemdienstleistungen wie z.B. Power Quality Conditioner aber auch als leistungselektronisches System an der Schnittstelle zu Speicher- und Umwandlungstechnologien herangezogen werden.
Subthema 3.1	An der Schnittstelle zu Speicher und Umwandlungstechnologien bedeuteten die Innovationen auch eine verbesserte Zuverlässigkeit, Energieeffizienz und Lebensdauer durch Verbesserung leistungselektronischer Kernkomponenten.

2.4 Verwendete Methoden

Die verwendeten Methoden im Projekt ML-Ultra bedienten sich im Wesentlichen den Kernrepertoire leistungselektronischer Entwicklung. Das bedeutet Detailuntersuchungen der Konvertertopologie an sich sowohl in Form analytischer Methoden (z.B. Erstellen mathematischer Ableitungen von Verlusten), Simulationen der Topologie als Konverter sowie bereits integriert in ein System (Quelle – Konverter – Motor) wobei hier bereits ein Schwerpunkt mit Controller Hardware-in-the-Loop (C-HiL) zum Tragen kamen. Weiters kamen Methoden des Designs (CAD-Layout, mechanisches Design, thermisches Design). In der Folge Methoden der Fertigung (PCB, Gehäuse etc.) zum Einsatz, wobei dieser Teil natürlicherweise über die Beauftragung externer Partner erledigt wurden. Mittels Test- und Validierungsmethoden (Prüfstandaufbau, Messtechnik, Datenanalyse) konnten die Eigenschaften des Systems bestimmt werden. Zusätzlich wurden mit Methoden der Prototypenentwicklung zum Beispiel neuartige Powermodule aufgebaut werden.

2.5 Aufbau der Arbeit

Im Projekt wurde zuerst die Referenzapplikation der Industrial Drives untersucht, um Spezifikationen für den Demonstrationskonverter ableiten zu können. Parallel dazu wurde bereits die vorgeschlagene Topologie im Detail untersucht und ein grundlegendes Regelungskonzept erarbeitet. In der Folge konnte das Konzept in Form leistungselektronischer Hardware sowie der für die Regelung notwendigen Software realisiert werden. Anschließend wurde das Konzept im Labor validiert und ein Bericht dazu ausgearbeitet.

3 Inhaltliche Darstellung

Wie in 2.5 angedeutet, wurde der leistungselektronische Teil des Projekts in drei Abschnitte gegliedert, die auch für die inhaltliche Darstellung beibehalten wurden.

3.1 Applikationsanforderungen

Da es sich um einen öffentlichen Bericht handelt, werden die Anforderungen lediglich grob umrissen. Im Projekt selbst wurden diese weitaus detaillierter ausgearbeitet.

Netzeingangsspannung	3 x 200 V to 480 V $\pm 10\%$
Netzfrequenz	50 / 60 Hz $\pm 4\%$
Anschlussleistung	max. 18 kVA
Dauerausgangs-Leistung /Strom	8.5 kW 17 Aeff
Motor-Spitzenlast	21.25 kW 42.5 Aeff
Schaltfrequenz	≥ 20 kHz
Max. Ausgangsfrequenz	> 600 Hz
Gewünschter Gesamtwirkungsgrad	98.5%
Nominelle Zwischenkreisspannung	560 V

Weiters sollte in lüfterloses Kühlkonzept angestrebt werden.

3.2 Topologieuntersuchungen

Bei der zugrundeliegenden Topologie, die in ML-Ultra behandelt wurde, handelt es sich um eine 5-Level E-Type, Abbildung 2, die, mittels Schalter unterschiedlicher Spannungsfestigkeit, eine Optimierung der Verluste gestattet.

Die Zelle besteht aus mehreren Teilzellen (2x Halbbrücke und 1x 3-Level T-Type), die einander zu einer 5-Level Topologie ergänzen. Dabei können die äußeren Schalter mit kleineren Durchbruchspannungen realisiert werden, was in Summe auch die Verluste reduziert. Die Reduktion der Schaltspannungen wiederum verringern die Schalttripel und damit auch wieder die Verluste (Abbildung 2)

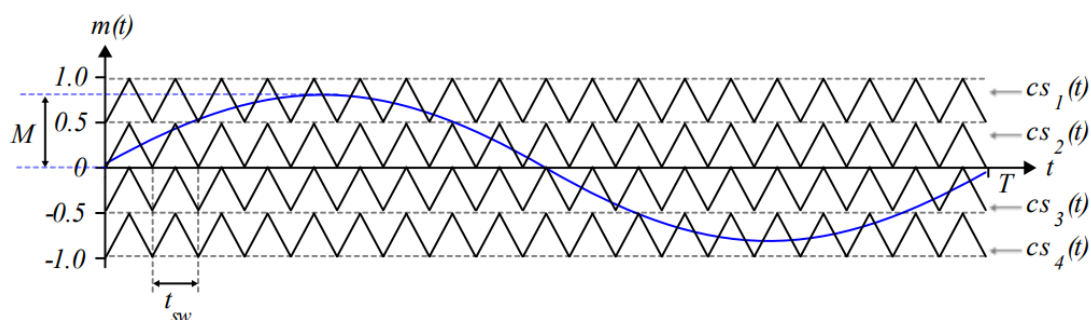


Abbildung 2 - Trägersignale für das Schalten der 5-L Topologie [D1]

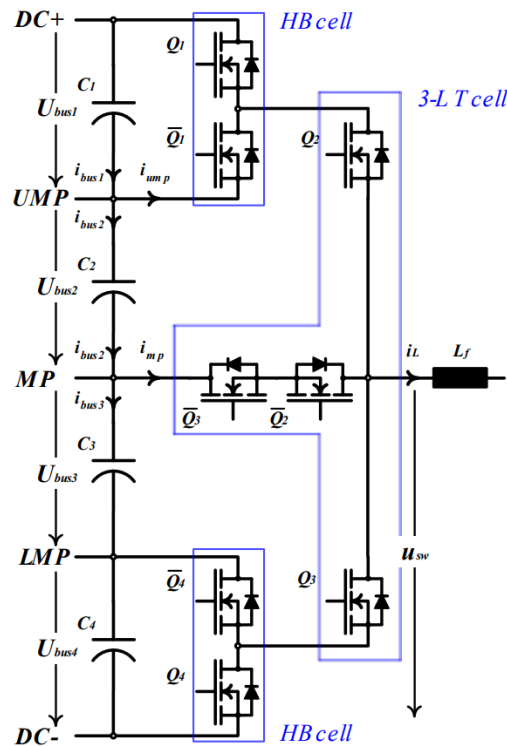


Abbildung 3 - 5-Level E-Type Topologie (eine Phase) [D1]

In einem weiteren Schritt wurden für diese Topologie Verlustuntersuchungen durchgeführt und die grundsätzlichen Verbesserungen in Effizienz allgemeiner Performance (Schaltspannungen zum Motor) gezeigt. Nachteilig hat sich herausgestellt, dass eine Balancierung der Teilspannungen des Zwischenkreises ein aktives Balancing benötigt. Auch hier wurde eine geeignete Schaltung entwickelt (Abbildung 4).

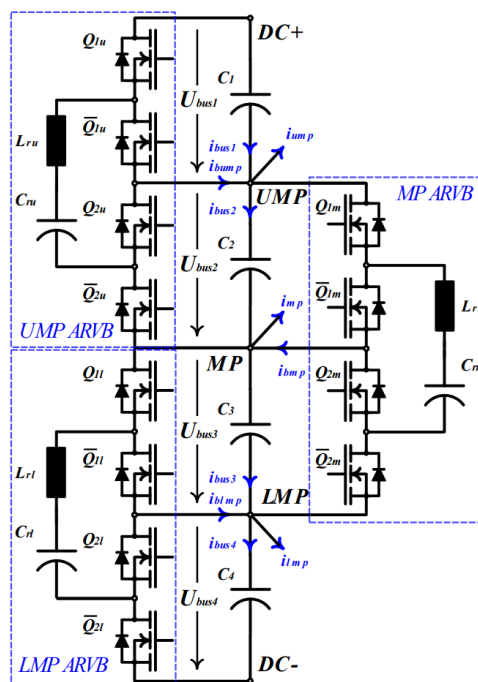


Abbildung 4 - Active Resonant Voltage Balancing (ARVB)

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zusammenfassend bestand das angestrebte System aus einer DC-Quelle (nicht dargestellt), dem Active Resonant Voltage Balancing, den Zwischenkreiskapazitäten und den, als 3-Phasensystem aufgebauten, 5L-Konverter, Filter und AC-Last bzw. Motor.

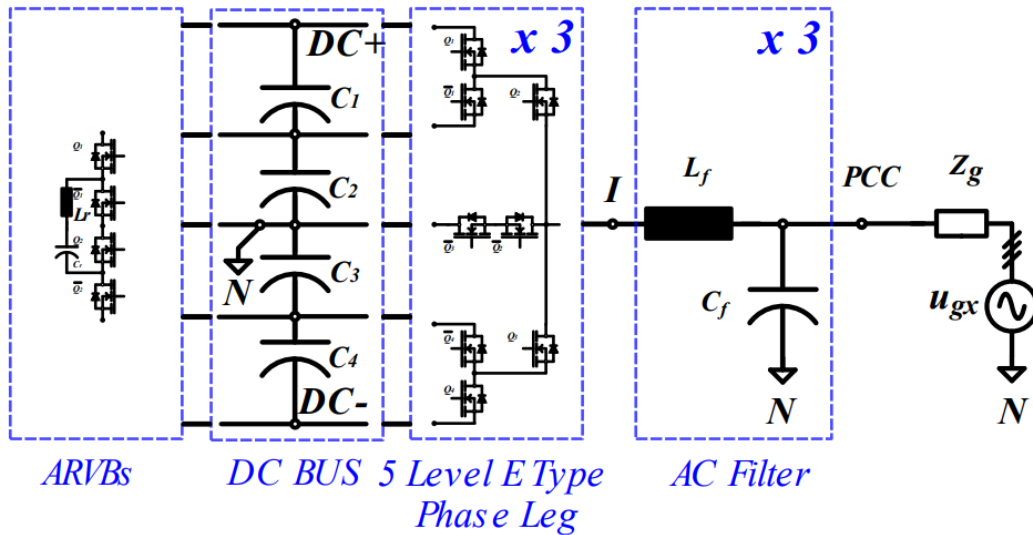


Abbildung 5 - Grundkonzept des Gesamtsystems

Parallel wurde eine Regelung für den Konverter mit dem Fokus auf die vereinbarte Applikation entwickelt (Abbildung 5) und in einer Offlinesimulation implementiert.

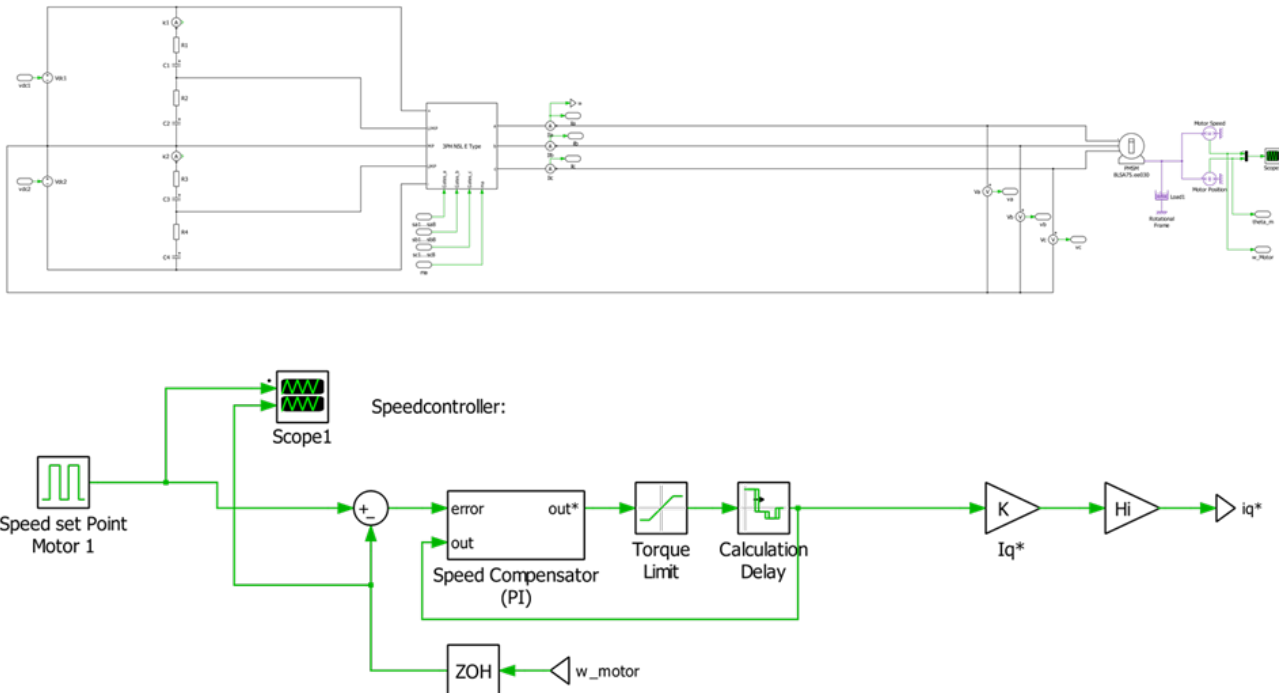


Abbildung 6 - vereinfachtes Simulationsmodell zur Entwicklung der Regelung mit der Software PLECS

Ein typisches Simulationsergebnis dazu sind die Analysen zu den Kommutierungen in den Halbbrücken (Abbildung 7) sowie der T-type Zelle (Abbildung 8).

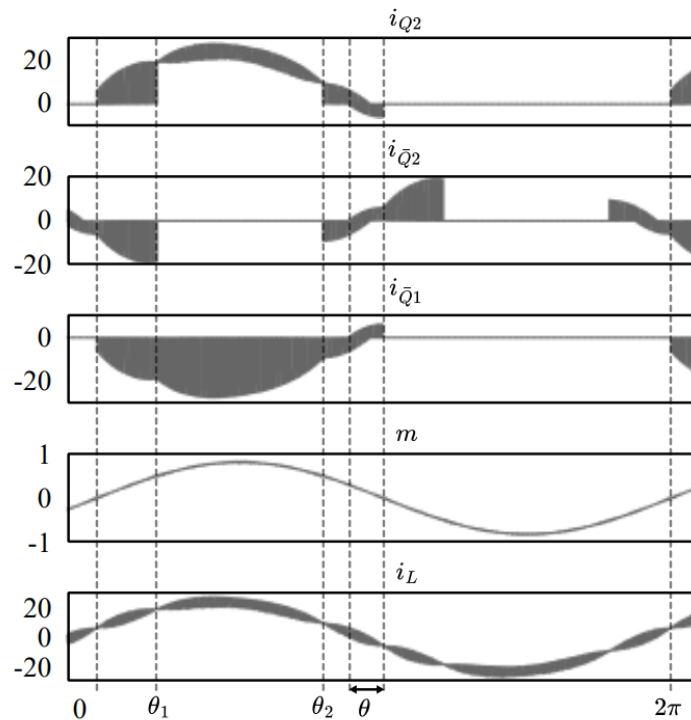


Abbildung 7 - Kommutierung in der Halbbrücke bei 15°

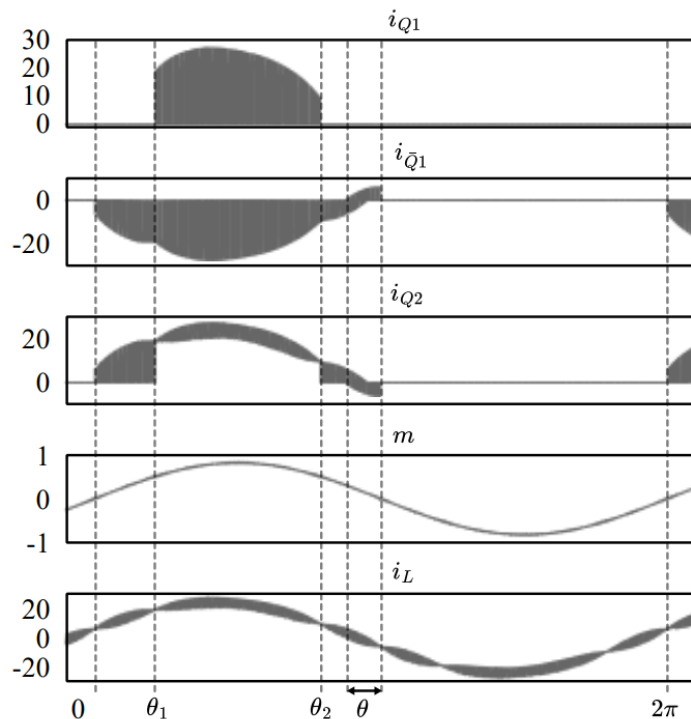


Abbildung 8 - Kommutierung in der T-Zelle bei 15°

3.3 Konzeptrealisierung

Die Designparameter wurden für die Realisierung des Konverters wie folgt konkretisiert:

<i>Symbol</i>	<i>Definition</i>	<i>Values</i>
S	Nominal power	12 kVA
I	Nominal current	17A
U_{bus}	DC BUS voltage	800V
Δi_L	Inductor Current Ripple	15%
Q_{C_f}	Capacitor Reactive Power	1%
f_{sw}	Switching frequency	20kHz
B_{max}	Max allowable Flux density	0.75 of B_{sat}
J	AC current density	$<4A/mm^2$
du/dt	Rate of change of voltage	$<50kV/\mu s$
T_{hs}	Average Heatsink Temperature	90 °C
T_{amb}	Max Ambient Temperature	50 °C

Der in einen Texas Instruments DSP implementierte Reglercode wurde in der Folge auch in einem Echtzeitsystem getestet und für d

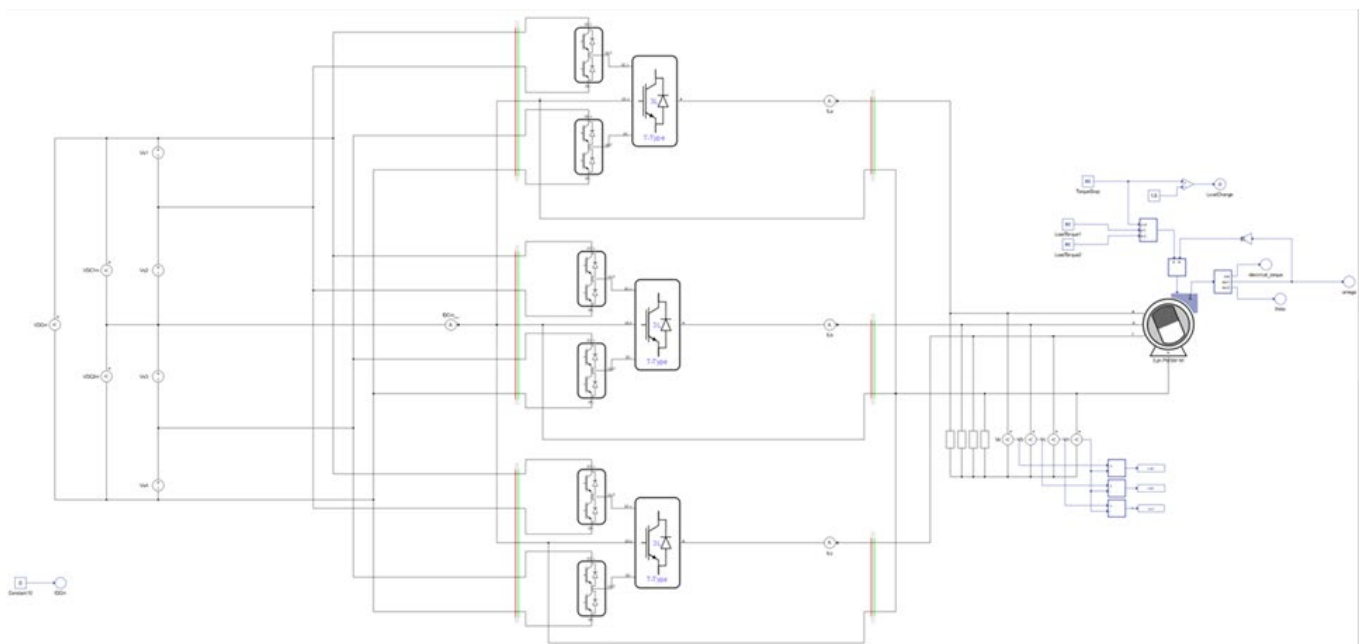


Abbildung 9 - Echtzeitsimulationsmodell für Reglerimplementierung im DSP mittels Typhoon-HIL (3-Phasen)

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Als finale Hardware des Konzepts wurde ein Dreiphasensystem aufgebaut, das aus allen wesentlichen Teilsystemen bestand (Abbildung 10). Dieser Konverter wurde anschließend der Validierung im Labor zugeführt.

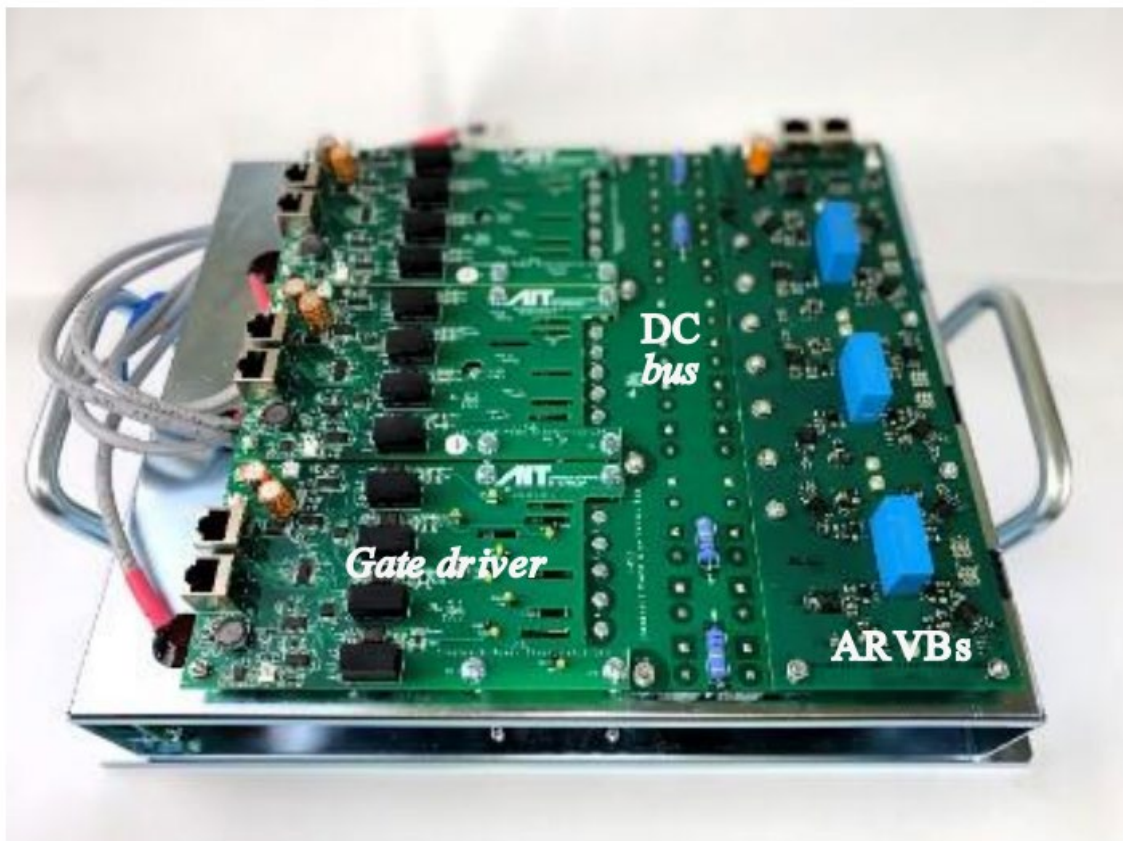


Abbildung 10 ML-Ultra Konverter mit Kennzeichnung der Teilsysteme

3.4 Validierung im Labor

Der Messaufbau ist in Abbildung 11 dargestellt. Dabei wurde die Referenzapplikation implementiert und die Schalteigenschaften evaluiert sowie konkrete Effizienzmessungen durchgeführt.

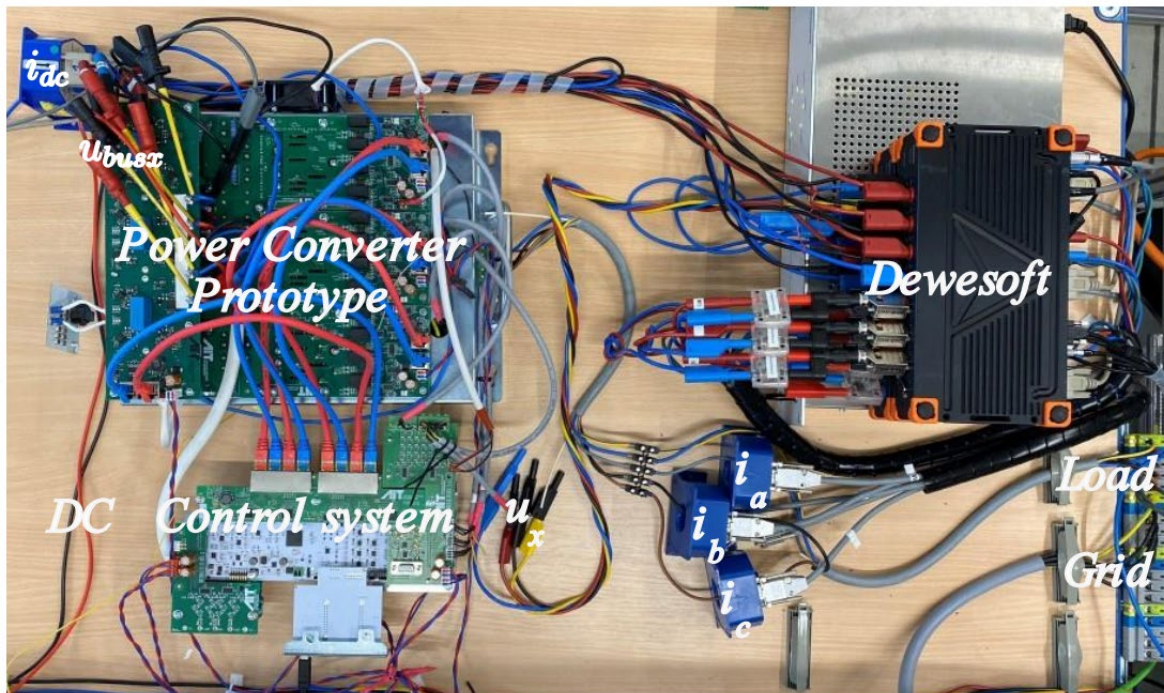


Abbildung 11 Messaufbau für die Validierung

Als exemplarisches Ergebnis ist in Abbildung 12 der Schaltvorgang eines Halbleiters zu sehen.

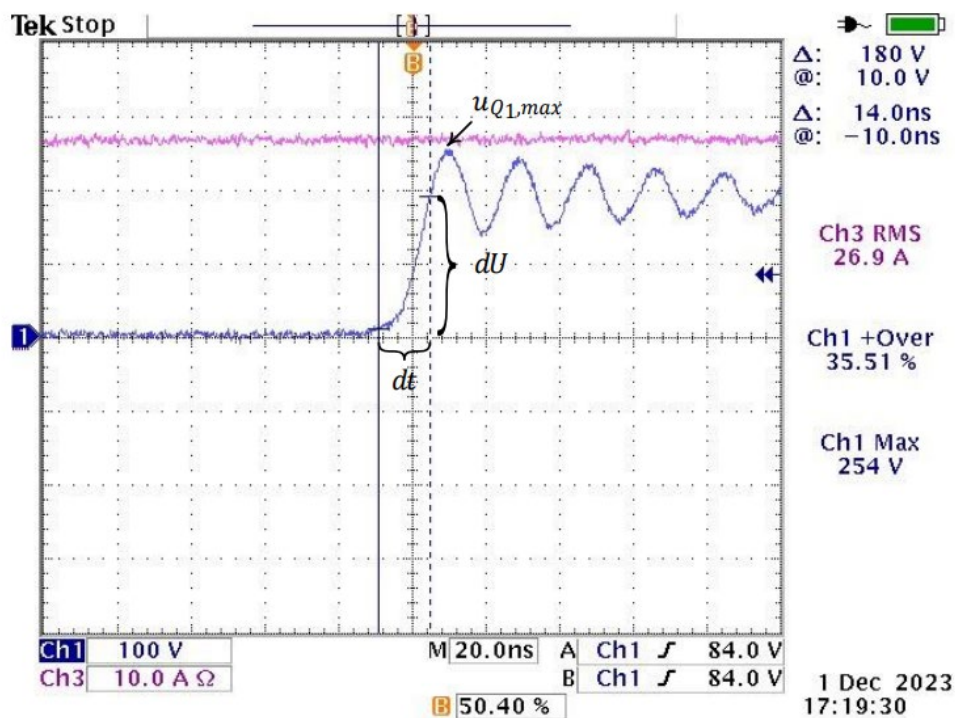


Abbildung 12 Schaltflanken des Konverters im Betrieb

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass der Konverter für die angestrebte Applikation und darüber hinaus (siehe 5) verwendet werden kann. Ein Funktionsnachweis konnte erbracht werden. Die Effizienzziele wurden übertroffen und mit Messergebnissen belegt werden. Das Erfordernis eines aktiven Balancings des Zwischenkreises hatte negativen Einfluss auf die Volumensziele, wobei auch hier Optimierungspotenziale aufgezeigt werden konnten. Im Rahmen der Zusammenarbeit konnten auch Verwertungsmöglichkeiten aufgezeigt werden und die Ergebnisse einer interessierten Fachwelt nahegebracht werden.

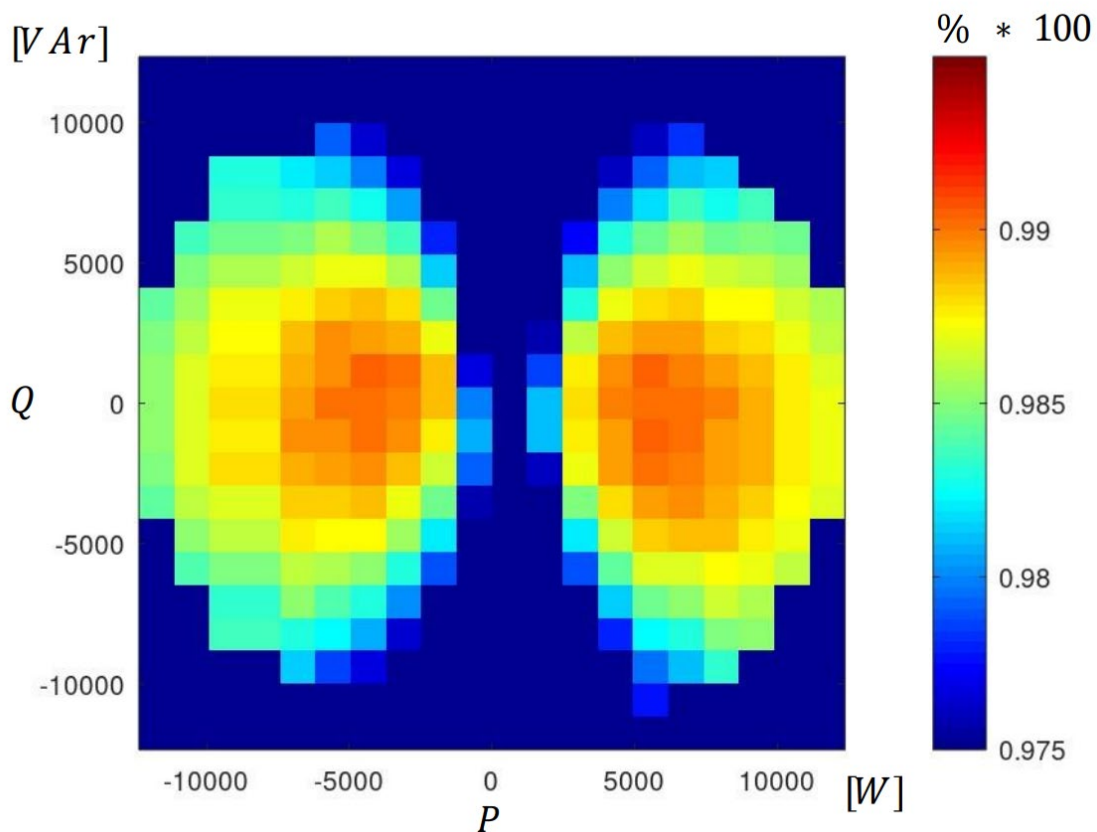


Abbildung 13 Effizienz des ML-Ultra Konverters

5 Ausblick und Empfehlungen

Abschließend konnte auch gezeigt werden, dass, neben der Kernapplikation in ML-Ultra (Industrial Drives) eine weitere Vielzahl von Applikationen mit dieser Topologie sinnbringend adressiert werden können. Dazu gehören EV-Applikationen, Battery Energy Storage Systems (BESS), Frequenzumrichter (VFD), unterbrechungsfreie Stromversorgungen (UPS), Photovoltaik (PV), Windenergiesysteme (WES) und flexible AC-Übertragungssysteme (FACTS).

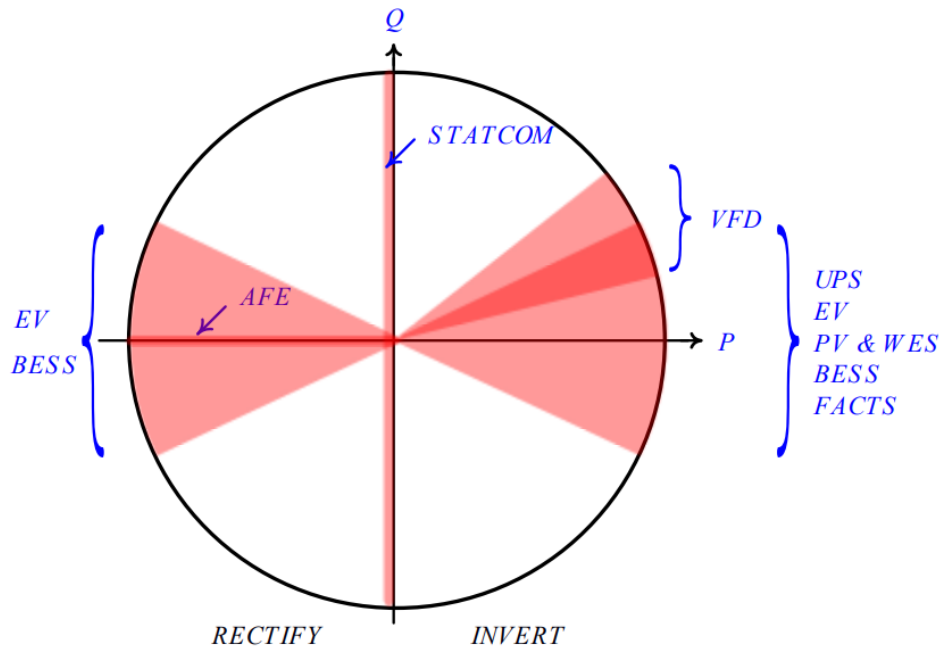


Abbildung 14 Darstellung der Anwendungsfelder für den 5L-Konverter

Zukünftige Aktivitäten könnten einerseits die konkrete Implementierung neuer Applikationsfelder umfassen. Ebenfalls interessant wären Optimierungen des Aufbaus selbst, wobei Möglichkeiten, die z.B. einer Verkleinerung oder Entfernung des Balancingkreises für die Zwischenkreisspannungen, der ein Drittel des Konvertervolumens umfasst, besondere Bedeutung zukommt.

Weitere Möglichkeiten einer umfassenden Ausschöpfung des Potentials beinhalten auch die Optimierung der Leistungshalbleiter in einer abgestimmten Wahl der Materialien (SiC und GaN) und Schaltereigenschaften für weitere Erhöhung der Effizienz.

6 Literaturverzeichnis

Konferenzbeiträge

[C1] Zoran Miletic, Vladan Durković and Petar J. Grbović, "Volume and weight comparison of 2-Level and 5-Level E-Type 3-Phase 4-Wire STATCOM Converter," presented at the 9th IEEE Southern Power Electronics Conference, December 2nd - 5th, Brisbane, Australia, 2024.

Tutorial Präsentationen

[T1] Petar J. Grbović, Thierry Menyard and Zoran Miletic, "Multi-Level & Multi-Cell Power Converters: from Theory to Practice," Tutorial presented @ the 10th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, (IPEMC 2024), Chengdu, May 17th - 22nd 2024, Chengdu, China.

Publikation von Journal Papers

[J1] Zoran Miletic, Petar J. Grbović and Thierry Menyard, "Analysis and Design of SiC Three-phase Four-wire 5 Level E-Type STATCOM Inverter," in the IEEE Access, Vol. 12, pp. 102521 – 102535, DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3432196](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3432196)

[J2] Zoran Miletic and Petar J. Grbović, "Analysis and Design of a Single-Phase Half-Bridge Rectifier with an Active DC bus," in the IEEE Access, Vol. 12, pp. 100591-100601, DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3430841](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3430841)

Disseratation Universität Innsbruck

[D1] Zoran Miletic, "Novel 5-Level E-Type Power Converter for Low Voltage Power Quality Applications: Analysis, Design and Optimization"
<https://bibsearch.uibk.ac.at/AC17344070>

7 Kontaktdaten

Projektleiter

DI Dr. Johannes Stöckl
+43(0) 50550-6032
johannes.stoeckl@ait.ac.at
AIT Autrian Institute of Technology GmbH
<http://www.ait.ac.at>
Giefinggasse 4
A-1210 Wien

Projektpartner

B&R Industrial Automation GmbH

Infineon Technologies Austria AG

Universtät Innsbruck
Institut für Mechatronik