ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF CURRENT FED DUAL ACTIVE BRIDGE BASED CONVERTER FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING APPLICATION

SAYANDEV GHOSH

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
HAUZ KHAS, NEW DELHI – 110016, INDIA
MAY 2025

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF CURRENT FED DUAL ACTIVE BRIDGE BASED CONVERTER FOR ELECTRIC VEHICLE CHARGING APPLICATION

by

SAYANDEV GHOSH

Electrical Engineering Department

Submitted
in fulfillment of requirements of degree of
DOCTOR OF PHILOSOPHY

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MAY 2025

CERTIFICATE

It is certified that the thesis entitled "Analysis and Development of Current Fed Dual Active Bridge Based Converter for Battery Charging Application" being submitted by Mr. Sayandev Ghosh for award of the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, is a record of the student work carried out by him under my supervision and guidance. The matter embodied in this thesis has not been submitted for award of any other degree or diploma.

Prof. Bhim Singh
Professor
Dept. of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi
India - 110016

Dated: May 27 , 2025

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my deepest gratitude and indebtedness to Prof. Bhim Singh for providing me an opportunity to carry out the Ph.D. work under his supervision. I thank Prof. G Bhuvaneswari and Prof. S Janardhanan for their initial support and guidance.

I wish to convey sincere thanks to past and present members of my SRC committee members, Prof. G Bhuvaneswari, Prof. T C Kandpal, Prof. Ramkrishan Maheshwari, Prof. B K Panigrahi, Prof. Anandarup Das and Prof. Santanu Mishra.

I thank the Renew Power and Science Engineering and Research Board (SERB) for providing support to this research. I thank PG Machines Lab for providing me with the facilities and assistance during my work.

I also convey my sincere thanks to Mr. Gaurav Kumar who has helped me a lot in my learning throughout this journey. I am very thankful to Mr. Rahul Kumar, Mr. Deepak Saw, and Mr. Siddharth Ghosh for their tremendous support in my low period. I also thank Mr. Sudip Bhattacharya for his motivation in this journey.

Lastly I thank my parents, Ms. Sanjukta Ghosh and Mr. Sadhan Chandra Ghosh, my wife, Ms. Pratistha Pal and my uncle, Mr. Banshi Mohan Ghosh for their unconditional support and well wishes.

I express my gratitude to almighty for all the opportunities and experiences that has been bestowed to me.

New Delhi

Date : May 27, 2025 Sayandev Ghosh

ABSTRACT

A conventional voltage fed dual active bridge (VFDAB) converter poses as a prominent solution for bidirectional DC-DC power conversion in high gain high power region. It presents multiple advantages like high power density, wide ZVS operation, high voltage gain and isolation. However, it suffers from high output ripple current, which is undesirable, particularly for low voltage high current applications. In this regard, current fed dual active bridge (CFDAB) converter is a potential converter for low voltage battery charging applications. The output inductors, which are present on the low voltage side of CFDAB, provide ripple-free battery current and shoot through protection under fault conditions. The behavior of this converter slightly differs from the conventional voltage fed dual active bridge converter and is less studied in literature. In this thesis, an accurate steady state model and simplified small signal model are developed for the CFDAB converter under PWM plus Phase shift (PPS) modulation. Using the steady state model, behaviour of the converter for entire range of operation in terms of some important electrical quantities are presented. The effect of carrier signal on the phase shift definition and power characterization of the CFDAB converter under PPS modulation are also studied. It is observed that the triangular carrier provides correct phase shift measurement than the sawtooth carrier.

Then the small signal analysis of the converter is performed using the improved HSS model. The improved HSS model considers only the effect on the dominant harmonics for the small signal perturbation. It discusses the presence of two resonances in the small signal model of CFDAB. One of them lies at switching frequency while other lies at converter natural frequency. The latter resonance either increases the steady state ripple or decreases the bandwidth of the conventional closed loop current controller. Hence, it presents adaptive notch integrated PI controller in order to overcome above drawbacks of simple PI controller.

Finally, a new perspective of considering EV as power transport device to underprivileged households is considered in this work. A converter solution is presented that enables battery charging of light electric vehicle (LEV) from AC as well as DC supply. Besides that, it is also capable to power the rural household appliances from the LEV battery. The converter system comprises of active bridge based single stage AC/DC converter with auxiliary DC port. The merit of the converter is that it provides solutions for multiple applications with reduced switch count. The single stage power conversion reduces the high frequency switch count for AC/DC conversion. The DC/DC interface utilizes partial circuitry to achieve the desired operation without any need for additional high frequency switches. The operation of the converter is categorized in three modes. Mode I comprises of LEV battery charging from AC grid. Mode II comprises of LEV battery charging from another EV or battery. Mode III conducts powering of household appliances by the LEV battery. The performance of the converter system is analysed under individual modes independently. The AC/DC interfacing supports unity power factor operation within the standard of IEC61000-3-2.

सारांश

एक पारंपरिक वोल्टेज फेड ड्यूल एक्टिव ब्रिज (VFDAB) कन्वर्टर उच्च गेन और उच्च पावर क्षेत्रों में द्विदिश डीसी-डीसी पावर रूपांतरण के लिए एक प्रमुख समाधान के रूप में प्रस्तुत होता है। यह उच्च शक्ति घनत्व,, विस्तृत ZVS संचालन, उच्च वोल्टेज गेन और पृथक्करण जैसी कई विशेषताएँ प्रदान करता है। हालांकि, यह उच्च आउटपुट रिपल करंट की समस्या से ग्रस्त होता है, जो विशेष रूप से निम्न वोल्टेज, उच्च करंट अनुप्रयोगों के लिए अवांछनीय है। इस संदर्भ में, करंट फेड ड्यूल एक्टिव ब्रिज (CFDAB) कन्वर्टर निम्न वोल्टेज बैटरी चार्जिंग अनुप्रयोगों के लिए एक संभावित समाधान है।

CFDAB कन्वर्टर की निम्न वोल्टेज साइड पर मौजूद आउटपुट इंडक्टर्स बैटरी को रिपल-फ्री करंट प्रदान करते हैं और फॉल्ट की स्थिति में शूट-थ्रू सुरक्षा भी देते हैं। इस कन्वर्टर का व्यवहार पारंपरिक वोल्टेज फेड ड्यूल एक्टिव ब्रिज कन्वर्टर से थोड़ा भिन्न होता है और साहित्य में इसका कम अध्ययन किया गया है। इस शोध में, PWM प्लस फेज शिफ्ट (PPS) माड्यूलेशन के अंतर्गत CFDAB कन्वर्टर के लिए एक सटीक स्थिर स्थिति मॉडल और सरलीकृत स्मॉल सिग्नल मॉडल विकसित किया गया है। स्थिर स्थिति मॉडल का उपयोग करके, कन्वर्टर के पूरे ऑपरेशन रेंज में कुछ महत्वपूर्ण विद्युत मानों के संदर्भ में इसका व्यवहार प्रस्तुत किया गया है।

PPS माड्यूलेशन के अंतर्गत, फेज शिफ्ट की परिभाषा और पावर कैरेक्टराइजेशन पर कैरियर सिग्नल के प्रभाव का भी अध्ययन किया गया है। यह पाया गया कि त्रिकोणीय कैरियर (triangular carrier) ने फेज शिफ्ट का अधिक सटीक मापन प्रदान किया, जबकि सॉ-टूथ कैरियर ने नहीं।

इसके बाद, बेहतर HSS मॉडल का उपयोग करके कन्वर्टर का स्मॉल सिग्नल विश्लेषण किया गया है। यह मॉडल स्मॉल सिग्नल गड़बड़ी के लिए प्रमुख हार्मोनिक्स के प्रभाव को ही ध्यान में रखता है। CFDAB के स्मॉल सिग्नल मॉडल में दो रेज़ोनेंस की उपस्थिति पाई गई: एक स्विचिंग फ्रिक्वेंसी पर और दूसरा कन्वर्टर की नैसर्गिक आवृत्ति (natural frequency) पर। यह दूसरा रेज़ोनेंस या तो स्थिर अवस्था में रिपल को बढ़ाता है या पारंपरिक क्लोज़्ड लूप करंट कंट्रोलर की बैंडविड्थ को घटाता है। इसलिए, इस समस्या के समाधान के लिए एक एडेप्टिव नॉच इंटीग्रेटेड PI कंट्रोलर प्रस्तावित किया गया है।

अंततः, इस शोध में एक नई दृष्टिकोण प्रस्तुत की गई है जिसमें ईवी (EV) को वंचित परिवारों के लिए पावर ट्रांसपोर्ट डिवाइस के रूप में प्रयोग करने की संभावना को दर्शाया गया है। एक कन्वर्टर समाधान प्रस्तावित किया गया है जो लाइट इलेक्ट्रिक व्हीकल (LEV) की बैटरी को एसी और डीसी दोनों सप्लाई से चार्ज करने में सक्षम है। इसके अलावा, यह LEV बैटरी से ग्रामीण घरेलू उपकरणों को भी पावर दे सकता है।

यह कन्वर्टर प्रणाली एक एक्टिव ब्रिज आधारित सिंगल स्टेज AC/DC कन्वर्टर और एक सहायक डीसी पोर्ट से मिलकर बनी है। इस कन्वर्टर की विशेषता यह है कि यह कम स्विच संख्या के साथ कई अनुप्रयोगों के लिए समाधान प्रदान करता है। सिंगल स्टेज पावर रूपांतरण AC/DC रूपांतरण के लिए हाई फ्रिक्केंसी स्विच की संख्या को कम करता है। DC/DC इंटरफेस आंशिक सर्किट्री का उपयोग करके वांछित संचालन प्राप्त करता है, बिना अतिरिक्त हाई फ्रिक्केंसी स्विच की आवश्यकता के।

कन्वर्टर के संचालन को तीन मोड में वर्गीकृत किया गया है:

- मोड I: AC ग्रिड से LEV बैटरी चार्जिंग
- मोड II: किसी अन्य EV या बैटरी से LEV बैटरी चार्जिंग
- मोड III: LEV बैटरी से घरेलू उपकरणों को पावर देना

कन्वर्टर प्रणाली के प्रदर्शन का स्वतंत्र रूप से प्रत्येक मोड में विश्लेषण किया गया है। AC/DC इंटरफेसिंग IEC61000-3-2 मानक के अंतर्गत यूनिटी पावर फैक्टर ऑपरेशन को भी सपोर्ट करता है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

ABBREVIATIONS

CFDAB	Current Fed Dual Active Bridge
DAB	Dual Active Bridge
DC	Direct Current
DPS	Dual Phase Shift
EPS	Extended Phase Shift
EV	Electric Vehicle
G2V	Grid to Vehicle
GAM	Generalized Average Modeling
HSS	Harmonic State Space
LEV	Light Electric Vehicle
LTP	Linear Time Periodic
PFC	Power Factor Correction
PPS	PWM plus Phase Shift
PSM	Phase Shift Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
SPS	Single Phase Shift
TPS	Triple Phase Shift
V2G	Vehicle to Grid
V2H	Vehicle to Home
V2V	Vehicle to Vehicle
VFDAB	Voltage Fed Dual Active Bridge
ZVS	Zero Voltage Switching