Institut für Dynamik und Schwingungen
Leibniz Universität Hannover

Minghui Huang

Model-Based Poling of Piezoelectric Monolithic Ring Elements for Ultrasonic Torsional Transducers

Berichte aus dem IDS Band 06/2013
Herausgeber: Jörg Wallaschek

Institut für Dynamik und Schwingungen
Leibniz Universität Hannover

Berichte aus dem IDS

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Dynamik und Schwingungen
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS – Technik und Wissen GmbH, 2013
An der Universität 2 • 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 • Fax: 0511-762-18037
www.pzh-verlag.de • mail: info@pzh-verlag.de

ISBN 978-3-944586-24-3
ISSN 1868-1999

Verlag: TEWISS – Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Digital Print, Garbsen
Printed in Germany

Model-Based Poling of Piezoelectric Monolithic Ring Elements for Ultrasonic Torsional Transducers

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Minghui Huang
geb. am 16. September 1983 in Jiangsu, China

2013

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Wallaschek
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Maier
Tag der Promotion: 27. Februar 2013

Contents

Acknowledgment

This thesis summarizes my research work as a PhD candidate from 2008 to 2012 at the Institute for Dynamics and Vibration Research, Leibniz Universität Hannover.

Firstly, I would like to present my most sincere gratitude to my supervisor, Prof. Dr. -Ing. Wallaschek. Four years ago, he gave me the opportunity to realize my dream of continuing my research abroad. His insightful guidance, patient supervision creates a sufficient tolerant, supportive and inspiring academic atmosphere for me to do my research. This is the greatest fortune I could expect during my PhD years. I would like to thank my second examiner Prof. Dr. -Ing. Maier for reading my thesis and offering constructive feedback. I would also like to thank the chairman of the examination committee Prof. Dr. -Ing. Nyhuis for his interest on my thesis.

My grateful thanks go to my IDS colleagues. I would like to present my greatest appreciation to my group leader Dr. -Ing. Jens Twiefel. He helped me to build up my own research frame and constantly guided me to the right direction. This work would be much more difficult without those inspired discussions with him. I would also like to thank my good office-buddy Dipl. -Ing. Wiebold Wurpts, for all these constructive discussions and productive coffee-break times. I appreciate a lot for his patient help on the preparation of my defense. Working together with them both are the most memorable time of me in IDS. Additionally, I appreciate for all the help and important feedback from Dipl. -Ing. Sebastian Mojrzisch, Dipl. -Ing. Martin Zimmerman, Dipl. -Ing. Sebastian Schwarzendahl, Dipl. -Ing. Daniel Schurzig for their constructive feedback in my pre-defense phase.

Many thanks go to the colleagues of our workshop. Mr. Anton and his colleagues helped me to realize my design using their abundant mechanical manufacture experiences. I would also like to thank our lovely secretaries of IDS, Ms. Angelika Crohn and Ms. Nicole Röbbert. Your smiling faces and responsible working attitude make my days in IDS enjoyable.

Special thanks to China Scholarship Council (CSC) for the four-year financial support.

I would also like to thank my special chinese family in Hannover. Su Zhao and Yingmei Jiang, Xu Han and Xiaohui Wu, Tao Wu, Ding Wang and Zhuo Yu, Bin Xu and Peiyi Ma, Jing Zheng, Lei Wang and Chao Zhang. I am deelpy appreicated for all of your help and memorable gathering time in the last few years. I would also like to thank my good friend Lida Wölfer for her kind and understanding intercultural friendship.

Europe is not only the place I studied, but also my second home. I would like to thank Ms. Rina Janssen and Mr. Jos Wysmans, who always embrace me with the warm family time and constant encouragement on my work. I would also like to thank Mr. Leon Houben for those interesting discussions together and his strong support on my work.

I owe my deepest gratitude to my beloved parents for their good parenting, constant support, and great sacrifices to allow me to pursue my dream abroad. I would like to thank my young brother Jin Huang, for his understanding and sharing the responsibility to take care of our parents.

Last but not the least, my most special thanks go to my fiancee Michaël Houben, for all of his love, support and encouragement, for always holding my hands firmly no matter in good or bad times. I am so grateful to have him in my life.

Minghui Huang Nanjing, in August 2013

Kurzfassung

Ultraschall Torsionswandler werden in vielen technischen Applikationen eingesetzt. Im Vergleich zu longitudinalen Wandlern können Ultraschall Torsionswandler prinzipiell kompakter gebaut und daher leichter in andere Industriesysteme integriert werden. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit geeigneter piezoelektrischer Elemente werden technische Ultraschall Torsionswandler allerdings häufig groß gebaut oder müssen als teure Prototypen aufgebaut werden. Dadurch ist der breite Einsatz von Ultraschall Torsionswandlern eingeschränkt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Polarisierung piezoelektrischer monolithischer Ringelemente in Umfangsrichtung. Durch die anvisierte Leistungssteigerung bei gleichzeitig abnehmenden Kosten können weitere Applikationen für Ultraschall Torsionswandler erschlossen werden.

Die Untersuchung des Polarisationsprozesses erfolgt sowohl modellgestützt als auch experimentell. Im Rahmen der modellgestützten Untersuchung dient ein FE-Modell in Ansys zur Untersuchung der Polarisationsqualität von Ringelementen in verschiedenen Konfigurationen. Dabei werden insbesondere fächerartige und parallele Elektrodenmuster untersucht und in Bezug auf die Polarisationsqualität diskutiert. Weiterhin werden wichtige Einflussfaktoren wie z.B. die angelegte elektrische Feldstärke, Anzahl der Segmente, Geometrie der Ringelemente und Breite der Elektrode modellbasiert untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen wird eine optimale Konfiguration für die Polarisation abgeleitet. In experimentellen Voruntersuchungen wird weiterhin der Einfluss von Polarisierungsdauer und Temperatur auf die Polarisierungsqualität ermittelt. Basierend auf diesen Ergebnissen werden die monolithischen Ringelemente mit optimierten Prozessparametern polarisiert.

Nach der Polarisierung werden die Ringelemente quasistatisch und dynamisch charakterisiert. Dabei werden wichtige Parameter wie das äquivalente d_{15}, der effektive Kopplungsfaktor k_{eff} und die mechanische Güte Q_{m} gemessen. Als Referenz dient ein kommerzieller Prototyp. Die Ringelement erreichen eine äquivalentes d_{15} von 90×10^{-12} m/V, und damit ca. 75% des Referenzmusters. Allerdings zeigen die Ringelemente eine höhere mechanische Güte und eine höhere elektrische Admittanz als das Referenzmuster.

Als Anwendungsbeispiel werden zwei Torsionswandler aus den Ringelementen aufgebaut. Die Ringelemente erzeugen genügend Torsionsbewegung und weisen auch unter axialen Vorspannungen bis 70 MPa eine gute Leistung auf. Die monolithischen Ringelemente haben eine gute Perspektive zum zukünftigen Aufbau von Torsionswandlern in kompakter Ausführung bei geringen Kosten.

Schlagwörter: Polarisationsuntersuchung, d_{15} Ringelement, Ultraschall Torsionswandler, Piezokeramik

Abstract

Ultrasonic torsional transducers are key components for many engineering applications. Compared to longitudinal transducers torsional transducers are more compact and more suitable for system integration. However, due to the availability of suitable poled piezoelectric elements on the market the presented torsional transducers are either bulky or utilized expensive customized prototypes which limit the further applications of torsional transducers in a wider scope. This thesis aims at the poling of piezoelectric monolithic ring elements with polarization in circumferential direction to achieve adequate torsional output. It is a necessary first step for the applications of torsional transducers by combing increased performance and compact design at a reduced price.

This poling study is performed both from the aspect of modeling and experimental investigations in order to obtain adequate poled monolithic ring elements. In the modeling investigation a finite element model is developed using Ansys to simulate the poling quality of the ring elements in different configurations. Two poling patterns, with fan-shape and parallel-shape electrode configurations, are compared and discussed. The influence of vital factors are investigated including applied electric field strength, number of segments, geometrical parameters of rings, electrode width etc. Optimized poling pattern and factors are obtained based on the simulation results. In the experimental investigations a preliminary poling study is performed using properly designed poling setups and data acquisition system. The dependence of poling quality on time and temperature is discussed based on these results. The monolithic ring elements are poled using an optimized poling pattern and process parameters.

These poled ring elements are characterized by quasi-static measurements and dynamic measurements to evaluate the poling quality. Important parameters such as equivalent d_{15}, effective coupling factor k_{eff} and mechanical quality factor Q_{m} are measured. A commercially available customized prototype is utilized as a reference. In comparison, the poled monolithic ring elements developed in this study exhibit an equivalent d_{15} of 90 $\times$ 10^{-12} m/V which is approximately 70% of reference prototypes. The poled ring elements also show a mechanical quality factor Q_{m} up to 5 times higher and an electrical admittance up to 2 times higher than the counterparts of reference prototypes.

Two torsional transducers are assembled using monolithic ring elements poled in parallel-shape pattern. The results show that these monolithic ring elements can generate adequate torsional vibration and exhibit reasonably good performances under an application of axial preloads up to 70 MPa. These poled monolithic ring elements present

promising perspectives for manufacturing compact and cost-efficient torsional transducers in the future.

Key words: Poling technique, d_{15} ring element, torsional transducer, piezoceramic