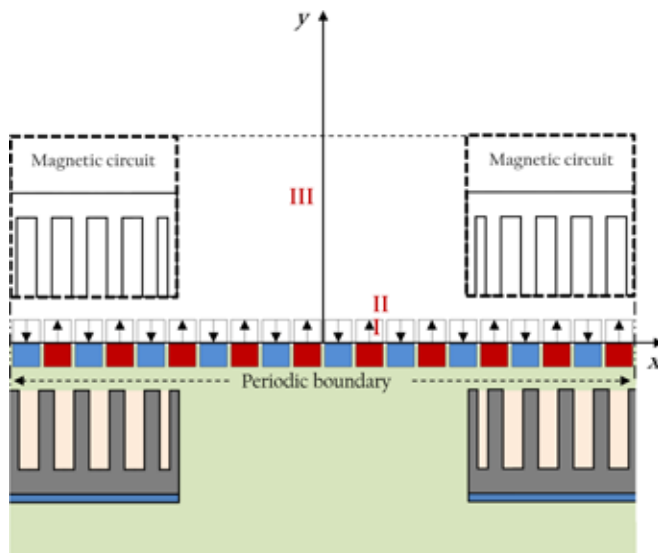


UnJae Seo

## Permanent Magnet Linear Generator for the Application as Range Extender in Full Electric Vehicles



# **Permanent Magnet Linear Generator for the Application as Range Extender in Full Electric Vehicles**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur  
UnJae Seo

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer  
Univ.-Prof. Dr. h. c. Jan Sykulski

Tag der mündlichen Prüfung: 04. September 2017



Aachener Schriftenreihe zur  
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 31

**UnJae Seo**

**Permanent Magnet Linear Generator  
for the Application as Range Extender  
in Full Electric Vehicles**

Shaker Verlag  
Aachen 2018

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

**Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer  
Institut für Elektrische Maschinen  
RWTH Aachen  
52056 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5938-0

ISSN 1861-3799

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Kurzfassung

Das Konzept eines Elektrofahrzeugs, das den Range Extender (REX) anwendet, kann das Problem der Laufleistung des Elektrofahrzeugs lösen. Der Range Extender zeichnet sich durch kleine Verbrennungskraftmaschine und Kraftgenerator aus. Ein solches Antriebssystem ist möglich, um in einem effizienten Betriebspunkt betrieben zu werden. Es ist möglich, die Laufleistung von EV durch die Kombination spezifischer Betriebsstrategie auf dem On-Board-installierten Energiesystem außerordentlich zu erhöhen.

In dieser Doktorand-Dissertation wird das Range Extender-Elektrofahrzeugs mit dem obigen Konzept mit reinem Elektrofahrzeugs verglichen. In dieser Dissertation wird versucht, den Flugkolben-Linearmaschine, einen untypischen Motor, als REX zu verwenden. Somit ist ein Kraftgenerator, der sich mit einem Flugkolbenmaschine kombiniert, eine lineare elektrische Maschine. Der am besten geeignete Generator für dieses System unter den Lineargeneratoren mit Permanentmagnet wird in dieser Abschlussarbeit ausführlich behandelt. Bei der Verwendung von Permanentmagneten ist es eine Doppelstatorstruktur und die Triebkraft ist eine eisenlose Form. Zur Berechnung der Leistung eines Generators wird das theoretische Magnetsystem-Simulationsmodell unter Verwendung der Ersatzschaltkreismethode berechnet. Mit dieser analytischen Methode wird versucht, den numerischen Analysenaufwand des Magnetsystems zu reduzieren. In dieser Abschlussarbeit wird ein Bemessungsverfahren für ein optimales Design unter den gegebenen Beschränkungen vorgeschlagen. Durch Kombination des entwickelten analytischen Modells und optimalen Designalgorithmus werden die Maximierung der Effizienz und die Minimierung der aktiven Masse der Kombination von sechs Polen und Schlitzen und die Optimierung mit der thermischen Bedingung der Wicklung durchgeführt, und die dazugehörige Pareto-Front wird verglichen und analysiert. Durch die Wahl einer von sechs Kombinationen wird die Optimierung inklusive Endeffekte erneut durchgeführt.

In dieser Studie wird eine Optimierungsmethode der Bi-Zielfunktion mit Beschränkungen für ein Maschinendesign unter Verwendung der Bayes'schen Optimierungstechnik vorgeschlagen. Für den Algorithmus wird ein Ersatzmodell, das der tatsächlichen Funktion sehr ähnlich ist, mit Kriging erstellt. Für die Verteilung von Lösungen auf der Pareto-Front werden die Generalisierungsmethode des Zielfunktionswerts und drei Aufnahmekriterien-Methoden eingeführt. Der entwickelte Algorithmus eignet sich für die Verwendung, wenn die eigentliche Funktionsauswertung aufgrund der viel Zeitaufwand im Vergleich zu anderen Optimierungstechniken zeitaufwendig ist. Das analytische Modell wird durch Vergleich der Ergebnisse mit der Finite-Elemente-Methode verifiziert. Schubkraft, Eisenverlust und Wirbelstromverlust des Permanentmagneten werden berücksichtigt. Für das entwickelte analytische Modell sind die Ergebnisse sehr

konsistent mit der Finite-Elemente-Methode. Um die Leistungspulsation aufgrund der linearen Bewegung des Motorkolbens zu lösen, wird die Leistungskompensation unter Verwendung eines Superkondensators vorgeschlagen.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	State of the arts . . . . .	2
1.2	Objectives . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Range extender electric vehicle</b>	<b>5</b>
2.1	Layout . . . . .	5
2.1.1	Operation mode . . . . .	6
2.2	Power management problem . . . . .	7
2.3	Basic analysis of REX-EVs . . . . .	8
2.3.1	Vehicle mass . . . . .	9
2.3.2	Required maximum power of range extenders . . . . .	9
2.3.3	Specification of the REX-EV . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Free piston linear generators</b>	<b>17</b>
3.1	Free piston engine . . . . .	17
3.1.1	History . . . . .	17
3.1.2	Configurations . . . . .	17
3.1.3	Features . . . . .	18
3.1.4	Control challenges . . . . .	19
3.2	Free piston linear generator . . . . .	19
3.2.1	Previous works . . . . .	19
3.2.2	Analysis of electrical system . . . . .	22
3.2.3	Modeling of the free piston engine . . . . .	34
3.2.4	Control of the free piston engine . . . . .	36
3.2.5	Simulation of the free piston linear generator . . . . .	40



<b>4</b>	<b>Modeling and analysis of permanent magnet linear machines with ironless mover</b>	<b>45</b>
4.1	Similar works for the free piston linear generator application . . . . .	45
4.2	General descriptions of the machine topology . . . . .	46
4.3	Hybrid magnetic circuit analysis . . . . .	48
4.3.1	Definition of the geometry of given machine . . . . .	50
4.3.2	2D magnetic field solution for the mover side . . . . .	50
4.3.3	2D magnetic field solution for the end effects . . . . .	54
4.3.4	Magnetic equivalent circuit . . . . .	56
4.3.5	Interface condition . . . . .	58
4.3.6	System equation . . . . .	64
4.3.7	Jacobian matrix . . . . .	66
4.3.8	Force calculation . . . . .	67
4.3.9	Flux linkage and inductance . . . . .	68
4.3.10	Iron loss calculation . . . . .	69
4.3.11	Numerical issues . . . . .	71
4.3.12	Validations . . . . .	71
4.4	Initial design considerations . . . . .	78
4.5	Thermal analysis . . . . .	85
4.5.1	General descriptions . . . . .	85
4.5.2	Modeling for thermal analysis . . . . .	85
4.5.3	Equivalent thermal network . . . . .	87
4.5.4	System equation . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Bayesian Optimization Approach for Constrained Multiobjectives and Expensive Cost Functions</b>	<b>93</b>
5.1	General descriptions . . . . .	93
5.2	Basics of Kriging . . . . .	95
5.3	Acquisition criteria . . . . .	96
5.3.1	Single objective . . . . .	96
5.3.2	Multi objectives . . . . .	98
5.3.3	Handling constraints . . . . .	101
5.3.4	Optimization procedure . . . . .	103
5.4	Test results . . . . .	104
5.4.1	Further discussion . . . . .	106

---

<b>6</b>	<b>Optimization of permanent magnet linear generators with ironless mover</b>	<b>107</b>
6.1	General descriptions . . . . .	107
6.2	Numbers of poles and slots optimization . . . . .	107
6.2.1	Optimization results . . . . .	110
6.3	Optimization including end region . . . . .	112
6.3.1	Optimization results . . . . .	113
6.3.2	FEA validation . . . . .	117
<b>7</b>	<b>Discussion and Future Work</b>	<b>121</b>
7.1	Discussions and Conclusions . . . . .	121
7.2	Thesis contributions . . . . .	124
<b>A</b>	<b>FPLG control oriented model</b>	<b>125</b>
<b>B</b>	<b>System matrices for HMEC analysis</b>	<b>126</b>
<b>C</b>	<b>PM eddy current loss</b>	<b>129</b>
<b>D</b>	<b>Basis of Kriging</b>	<b>131</b>
<b>E</b>	<b>Optimization results</b>	<b>135</b>
<b>F</b>	<b>Optimum design variables</b>	<b>137</b>
	<b>Nomenclature</b>	<b>141</b>
	<b>BIBLIOGRAPHY</b>	<b>147</b>