DEVELOPMENT OF FAULT DIAGNOSIS STRATEGIES FOR ELECTRIC VEHICLE MOTOR

ANURAG CHOUDHARY

School of Interdisciplinary Research

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DELHI

AUGUST 2024

DEVELOPMENT OF FAULT DIAGNOSIS STRATEGIES FOR ELECTRIC VEHICLE MOTOR

by

ANURAG CHOUDHARY

School of Interdisciplinary Research

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DELHI

AUGUST 2024

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, "**Development of Fault Diagnosis Strategies for Electric Vehicle Motor**", being submitted by **Mr. Anurag Choudhary (2020SRZ8246)** for the award of the degree of **Doctor of Philosophy,** is a record of bonafide research work carried out by him in the School of Interdisciplinary Research (SIRe) of the Indian Institute of Technology Delhi. Mr. Anurag Choudhary has worked under our guidance and supervision and has fulfilled the requirements for submitting this thesis to reach the requisite standard. The results obtained here have not been submitted to any other University or Institute for the award of any degree.

Prof. S. Fatima

Associate Professor

Centre for Automotive Research and Tribology

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi -110016, India

Prof. B.K. Panigrahi

Professor (HAG)

Department of Electrical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi -110016, India

Dated: 01 -08-2024

Place: New Delhi, India

ACKNOWLEDGEMENTS

I want to start by sincerely thanking my supervisor, **Prof. S. Fatima**, for his unflinching support, expert advice, and encouraging words. Her enthusiasm for research inspires others and spreads happiness. She had the expertise, patience, and ability to make neutral judgments that helped me to understand things correctly when I first started. She encouraged me to work outside of my comfort zone, which at the time seemed difficult, but I was crucially able to look back. She blessed me to keep some of her skills with me throughout my research career. I am equally grateful to another supervisor, **Prof. B.K. Panigrahi.** This Ph.D. would not have been possible without his support. I learned a lot from him, and he assisted in several ways in matters related to my Ph.D. His vast experience helped me better shape the papers before submission. I am thankful to him for feedback and corrections in draft papers, reports, etc., and for making them presentable. I am also thankful to **Prof. Ashu Verma** for being my Student Research Committee (SRC) chairman. Her guidance during my presentation was of immense help during the research work. She is always motivated to seek further learning. I express my deepest gratitude and indebtedness to other SRC members, **Prof. Deepak Kumar** and **Prof. S. K. Chattopadhyay**, for their consistent feedback and suggestions to improve the research quality. I also thank our head, **Prof. Hemant K Kashyap**, for providing occasional motivation and generating a positive work atmosphere. I would also like to thank all my instructors who taught me various subjects related to my research during course work, and these subjects helped me a lot during the Ph.D. research work. I would like to thank SIRe, CART, PG Section, and Central Library staff for their valuable support. I would love to give my deepest acknowledgment and appreciation to my best friend Mr. Rohit Kumar, who always motivated and helped me at each step of the Ph.D. Moreover, I would like to extend my warm gratitude to my colleagues and seniors, **Mr. Tauheed Mian, Mr.**

Rishmaya Kumar Mishra, Mr. Jonty Mago, Mrs. Sunali, Dr. Amar Kumar Verma, Mr. Ashutosh Negi, Mrs. Vandana Jagdish, Mrs. Bhavya Vats and all of my colleagues and friends who have helped me greatly with both emotional support and technical assistance during my research.

I want to thank my parents, my siblings, and my dear wife, Mrs Suniti, for their love, support, and patience over the past few months. She has worked with me through my late nights and early mornings and has kept me healthy. I appreciate you serving as my inspiration, editor, proofreader, and sounding board. I want to thank you for being my best friend most of all. Last but not least, I give God the glory for guiding me through difficulties and permitting the successful completion of this research work.

Anurag Choudhary

Dated: 01-08-2024

Place: New Delhi, India

ABSTRACT

Electric vehicles (EVs) are essential for future transportation, and various eco-friendly vehicles are being manufactured to attain the increasing demand for reducing environmental emissions, enhanced performance, and safety. The electric motor is a critical component of these eco-friendly vehicles for powering the wheels and propelling the vehicle forward. However, electric vehicle motors are susceptible to faults like any other mechanical system that can compromise their performance, safety, and longevity. Therefore, a fault diagnosis system is essential for the timely detection of faults and abnormalities in electric vehicle motors to ensure reliable performance, prevent safety hazards, and minimize maintenance costs.

This research work focuses on developing an efficient fault diagnosis strategy for electric vehicle motors. In pursuit of this, two fault simulators have been designed and developed to experimentally simulate the motor faults in two-wheelers and four-wheelers respectively. Various sensors, i.e., vibration, current, and acoustic and their data processing, are thoroughly investigated to assess their suitability for fault diagnosis of electric vehicle motors. These data processing methods include short-time Fourier transforms, continuous wavelet transforms, constant Q transforms, and wavelet synchrosqueezing transforms. After experimenting with the different sensors, it has been concluded that a fusion of vibration and the current signal is the most feasible, effective, and practical solution for electric vehicle motor fault diagnosis. The benefits of both signals are combined in the proposed fusion-based diagnosis solution, providing comprehensive coverage of both mechanical and electrical faults. Factors like suitability, performance, complexity, and mounting limitations drive the fusion-based decision. The developed diagnosis strategy involves the wavelet synchrosqueezing transform for decomposing raw signals collected

from the electric vehicle motor and then converted into time-frequency representation frames. A Multi-Input Convolutional Neural Network (MI-CNN) is designed and developed by combining the derived features from the vibration and current signal representation frames. The proposed MI-CNN can accurately diagnose a wide range of mechanical and electrical faults that may occur in the electric motor. Various performance metrics are employed to evaluate this diagnosis performance. These metrics assess the system's effectiveness in efficiently and accurately diagnosing different faults. Through rigorous testing, the developed fault diagnosis system demonstrates its proficiency in efficiently identifying and diagnosing faults in electric vehicle motors.

Furthermore, the developed fault diagnosis strategy through the fusion of vibration and current signatures is extended and validated in real-time on electric vehicles. To ensure the reliability of the approach, two dedicated electric vehicle setups have been utilized for testing and validating the fault diagnosis strategy using transfer learning. The results obtained from applying the diagnostic method initially on the laboratory motor and subsequently transferring it to the operational electric vehicle demonstrate the effectiveness and practicality of the proposed solution. This validation process reinforces the fault diagnosis system's confidence, showing its ability to perform efficiently and accurately in real-world scenarios on actual electric vehicles. In order to develop a field-worthy system that is relevant for real-time applications, a user-friendly on-board diagnostic solution is developed with a Graphical User Interface (GUI), enabling real-time fault prediction in electric vehicles. This diagnostic strategy leverages the established transfer learning-based diagnosis method, offering a reliable and efficient solution for identifying motor faults in electric vehicles. As a result, the system contributes to reduced maintenance costs, improved performance, enhanced safety, and prolonged longevity of electric vehicles.

सार

इलेक्ट्रिक वाहन (ईवी) भविष्य के परिवहन के लिए आवश्यक हैं, और पर्यावरणीय उत्सर्जन को कम करने, बेहतर प्रदर्शन और सुरक्षा की बढ़ती मांग को पूरा करने के लिए विभिन्न पर्यावरण-अनुकूल वाहनों का निर्माण किया जा रहा है। पहियों को शक्ति देने और वाहन को आगे बढ़ाने के लिए इलेक्ट्रिक मोटर इन पर्यावरण-अनुकूल वाहनों का आवश्यक घटक है। हालाँकि, इलेक्ट्रिक वाहन मोटरें किसी भी अन्य यांत्रिक प्रणाली की तरह दोषों के प्रति संवेदनशील होती हैं जो उनके प्रदर्शन, सुरक्षा और दीर्घायु से समझौता कर सकती हैं। इसलिए, विश्वसनीय प्रदर्शन सुनिश्चित करने, सुरक्षा खतरों को रोकने और रखरखाव लागत को कम करने के लिए इलेक्ट्रिक वाहन मोटर्स में दोषों और असामान्यताओं का समय पर पता लगाने के लिए एक दोष निदान प्रणाली आवश्यक है।

यह शोध कार्य इलेक्ट्रिक वाहन मोटर्स के लिए एक कुशल दोष निदान समाधान विकसित करने पर केंद्रित है। इसके अनुसरण में, दो पहिया और चार पहिया वाहनों दोनों में मोटर दोषों को प्रयोगात्मक रूप से अनुकरण करने के लिए दो दोष सिम्युलेटर डिजाइन किए गए हैं। आरंभ करने के लिए, इलेक्ट्रिक वाहन मोटरों के दोष निदान के लिए उनकी उपयुक्तता का आकलन करने के लिए विभिन्न सेंसर, यानी कंपन, वर्तमान और ध्वनिक और उनके डेटा प्रोसेसिंग की पूरी तरह से जांच की जाती है। इन डेटा प्रोसेसिंग विधियों में कम समय के फूरियर ट्रांसफॉर्म, निरंतर वेवलेट ट्रांसफॉर्म, निरंतर क्यू ट्रांसफॉर्म और वेवलेट सिन्क्रोस्क्वीज़िंग ट्रांसफॉर्म शामिल हैं। विभिन्न सेंसरों के साथ प्रयोग करने के बाद, यह निष्कर्ष निकाला गया है कि कंपन और विद्युत प्रवाह सिग्नल का संलयन इलेक्ट्रिक वाहन मोटर दोष निदान के लिए सबसे व्यवहार्य, प्रभावी और व्यावहारिक समाधान है। दोनों संकेतों के लाभों को प्रस्तावित संलयन-आधारित निदान समाधान में संयोजित किया गया है, जो यांत्रिक और विद्युत दोनों दोषों का व्यापक आवृत्त क्षेत्र प्रदान करता है। उपयुक्तता, प्रदर्शन, जटिलता और बढ़ती सीमाएँ जैसे कारक फ़्यूज़न-आधारित निर्णय को संचालित करते हैं।

विकसित निदान प्रक्रिया में इलेक्ट्रिक वाहन मोटर से एकत्र किए गए कच्चे संकेतों को विघटित करने के लिए वेवलेट सिंक्रोस्क्यूजिंग ट्रांसफॉर्म शामिल है और फिर समय-आवृत्ति प्रतिनिधित्व फ्रेम में परिवर्तित किया जाता है। एक मल्टी-इनपुट कन्वोल्यूशनल न्यूरल नेटवर्क (एमआई-सीएनएन) को कंपन और वर्तमान सिग्नल प्रतिनिधित्व फ्रेम से प्राप्त सुविधाओं को मिलाकर डिजाइन किया गया है। ऐसा करने से, एमआई-सीएनएन इलेक्ट्रिक मोटर में होने वाली यांत्रिक और विद्युत दोषों की एक विस्तृत श्रृंखला का सटीक निदान कर सकता है। इस निदान पद्धति के प्रदर्शन का मूल्यांकन करने के लिए विभिन्न प्रदर्शन मेट्रिक्स नियोजित किए जाते हैं। ये मेट्रिक्स विभिन्न दोषों का कुशलतापूर्वक और सटीक निदान करने में सिस्टम की प्रभावशीलता का आकलन करते हैं। कठोर परीक्षण के माध्यम से, विकसित दोष निदान प्रणाली इलेक्ट्रिक वाहन मोटर्स में दोषों की कुशलतापूर्वक पहचान और निदान करने में अपनी दक्षता प्रदर्शित करती है।

इसके अलावा, कंपन और वर्तमान हस्ताक्षरों के संलयन के माध्यम से विकसित दोष निदान पद्धति को इलेक्ट्रिक वाहनों पर वास्तविक समय में बढ़ाया और मान्य किया गया है। दृष्टिकोण की विश्वसनीयता सुनिश्चित करने के लिए, ट्रांसफर लर्निंग का उपयोग करके दोष निदान रणनीति के परीक्षण और सत्यापन के लिए दो समर्पित इलेक्ट्रिक वाहन सेटअप का उपयोग किया गया है। प्रारंभ में प्रयोगशाला मोटर पर निदान पद्धति को लागू करने और बाद में इसे परिचालन इलेक्ट्रिक वाहन में स्थानांतरित करने से प्राप्त परिणाम प्रस्तावित समाधान की प्रभावशीलता और व्यावहारिकता को प्रदर्शित करते हैं। यह सत्यापन प्रक्रिया दोष निदान प्रणाली के विश्वास को मजबूत करती है, जो वास्तविक इलेक्ट्रिक वाहनों पर वास्तविक दुनिया के परिदृश्यों में कुशलतापूर्वक और सटीक रूप से प्रदर्शन करने की क्षमता दिखाती है। एक क्षेत्र-योग्य प्रणाली विकसित करने के लिए जो वास्तविक समय के अनुप्रयोगों के लिए प्रासंगिक है, ग्राफिकल यूजर इंटरफेस (जीयूआई) के साथ एक उपयोगकर्ता के अनुकूल ऑन-बोर्ड डायग्नोस्टिक प्लेटफॉर्म विकसित किया गया है, जो इलेक्ट्रिक

वाहनों में वास्तविक समय की गलती की भविष्यवाणी को सक्षम करता है। यह प्लेटफ़ॉर्म स्थापित ट्रांसफर लर्निंग-आधारित निदान पद्धति का लाभ उठाता है, जो इलेक्ट्रिक वाहनों में मोटर दोषों की पहचान के लिए एक विश्वसनीय और कुशल समाधान प्रदान करता है। परिणामस्वरूप, सिस्टम रखरखाव लागत को कम करने, बेहतर प्रदर्शन, बढ़ी हुई सुरक्षा और इलेक्ट्रिक वाहनों के लंबे समय तक चलने में योगदान देता है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

ABBREVIATIONS

AC	Alternating Current
AM	Amplitude Modulation
AHM	Automotive Health Monitoring
AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ANSYS	Analysis System
BLDCM	Brushless Direct Current Motor
BEV	Battery Electric Vehicles
CAD	Computer-Aided Design
CBM	Condition Based Maintenance
CNN	Convolutional Neutral Network
CQT	Constant Q Transform
CWT	Continuous Wavelet Transform
DC	Direct Current
DBM	Deep Boltzmann Machine
DBN	Deep Belief Networks
DFT	Discrete Fourier Transform
DPL	Double Person Load
DWT	Discrete Wavelet Transform
DL	Deep Learning
DTL	Deep Transfer Learning
EVs	Electric Vehicles
EWT	Empirical Wavelet Transform
FD	Fault Diagnosis
FEM	Finite Element Modeling
FPL	Four Person Load
FFT	Fast Fourier Transform
FL	Fuzzy Logic
FM	Frequency Modulation
FN	False Negative
FP	False Positive
GUI	Graphical User Interface
HEV	Hybrid Electric Vehicles
IM	Induction Motor
IRT	Infrared Thermography
ICE	Internal Combustion Engine
LSTM	Long Short-Term Memory
LGPCA	Local and Global Principal Component Analysis
k-NN	k-Nearest Neighbor

ML	Machine Learning
MFS	Machine Fault Simulator
MI-CNN	Multi-Input-Convolutional Neural Network
MCC	Matthews Correlation Coefficient
MCSA	Motor Current Signature Analysis
MMD	Maximum Mean Discrepancy
PM	Phase Modu
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motors
PTG	Passive Thermography
PEV	Pure Electric Vehicle
PWM	Pulse width Modulation
RF	Random Forest
RNN	Recurrent Neural Network
RU-L	Ramp Up with Load
RU-NL	Ramp Up with No-Load
RD-L	Ramp Down with Load
RD-NL	Ramp Down with No-Load
RUL	Remaining Useful Life
ResNet	Residual Network
S-50	50% Speed
S-RD	Speed-Ramp Down
SRM	Switched Reluctance Motor
SBC	Single Board Computer
SVM	Support Vector Machine
SVM	Support Vector Machine
S-RU	Speed-Ramp-Up
S-100	100 % Speed
SPL	Single Person Load
SAE	Stacked Autoencoder Transfer
TL	Learning
TP	True positive
TN	True Negative
TBS	Time-Based Service
VGG	Visual Geometry Group

LIST OF SYMBOLS

X_{in}	Input signal
Y	weighted coefficients
λ	number of windows
$\mathbb{C}$	space vector of finite signal
F_O	CQT coefficient
O	specific octave or frequency band
C	convolution output
w	weight matrix
b	bias value
$Q(.)$	activation function
e	exponential of the dot product
Err	low fitness value
Z_{min}	minimum output
Z_{max}	maximum output
TP	true positive
MCC	Matthew's correlation coefficient
N	number of inputs
$*$	convolutional operation
I_{img}	input image
D	inputs vectors
A_{amp}	instantaneous amplitude
M	feature set
I	feature output
F	convolutional filter weights
P	width of the window
Q	length of the window
$\mathbb{R}^i$	space of real-valued vectors
L	label vector
$Prob(.)$	probability of an event
a	context associated with input
þ	prior probability associated
$1\{.\}$	indicator function
A	actual output
B	targeted output
FN	false negative
FP	false positive
TN	true negative
W	learnable weights
f_n	number of operations
P_{con}	concatenation process
$x(t)$	non-stationary signal
$\varphi(t)$	phase function

$gw(t)$	Gaussian window	S_q	time-frequency spectrum
ɲ	time-frequency distributions	R	WSST operation
$\hat{C}$	chirp rate	$\hat{t}$	delay estimator
$\widehat{K}$	original WSST		