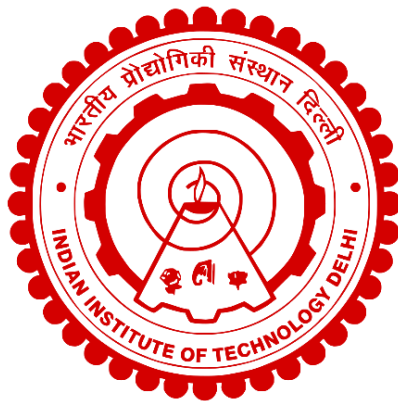


OPTIMIZATION FRAMEWORK FOR TRANSITIONING TO ELECTRIC BUS SYSTEM

PRANAV GAIROLA



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान दिल्ली

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2024

OPTIMIZATION FRAMEWORK FOR TRANSITIONING TO ELECTRIC BUS SYSTEM

By

PRANAV GAIROLA

Department Of Civil Engineering

Submitted

In partial fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2024

© INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI (IITD), NEW DELHI, 2024

“To my beloved parents, whose unwavering support and encouragement
have nurtured my passion for learning since the earliest days,
I owe an immeasurable debt of gratitude”.

“To my dear brother, whose curiosity and intellect have inspired
countless discussions and fuelled my own pursuit of excellence.
Thank you for being a constant source of inspiration”

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled “**Optimization Framework for Transitioning to Electric Bus System**” is being submitted by **Mr. Pranav Gairola** to the Indian Institute Of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**. This is a record of the research work and is entirely carried out by him under my supervision and guidance. The research report presented in this thesis has not been submitted for the award of any other degree or diploma.

Dr. Nezamuddin

Prof. Dinesh Mohan Chair for Transportation Planning

Associate Professor

Department Of Civil Engineering

Indian Institute Of Technology Delhi

New Delhi – 110016

India

ACKNOWLEDGEMENT

I am immensely grateful to my advisor, *Prof. Nezamuddin*, whose guidance, expertise, and unwavering support have been instrumental throughout this journey. Your encouragement and insights have shaped not only this thesis but also my academic and personal growth.

I extend my deepest appreciation to the members of my thesis committee, *Prof. Vasant Matsagar*, *Prof. Kalaga Ramchandra Rao*, and *Prof. Nomesh Bolia*, for their invaluable feedback, constructive criticism, and scholarly contributions that have enriched this work.

I would like to thank Ministry of Human Resources (MHRD) for their financial support, which made this research possible. Your investment in my education has been pivotal in the realization of this endeavour.

I am indebted to my family for their unwavering love, encouragement, and understanding. Their belief in me has been my source of strength and motivation, especially my parents. Special thanks are due to my twin brother *Prakhar Gairola* for his unwavering support, encouragement, and occasional comic relief during the challenging moments of this journey.

To my friends Ashish Dobhal, Sourav Das, Shayesta Wajid, Anamika Yadav, Aman Sharma, Abu Nasar your camaraderie, encouragement, and intellectual exchange have lightened the burdens and magnified the joys of the doctoral journey. Your presence has made this experience memorable and enriching.

Lastly, I express my gratitude to all those whose names may not appear here but whose contributions, whether big or small, have played a part in the completion of this thesis. Your support has been deeply appreciated.

Pranav Gairola

ABSTRACT

Battery electric buses (BEBs) have emerged as a promising solution for urban areas seeking to curb emissions while offering efficient public transportation. However, their widespread adoption faces financial and operational challenges. This thesis presents a multifaceted approach to address these challenges through electrification under budget and optimized system and operational design for electric buses. The research spans three interconnected objectives, all centred around the goal of enhancing the viability and sustainability of BEBs in urban transit.

The first objective, focusing on phased electrification for sustainable bus transit systems within budget constraints, acknowledges the significant promise of BEBs. However, it also underscores the considerable expenses associated with adopting BEBs, particularly due to the requirement for extensive charging infrastructure. Acknowledging the financial constraints faced by most transit agencies, the study proposes a framework for phased electrification under budget. This approach allows transit agencies to strategically transition from diesel/CNG buses to BEBs over time while staying within budget limitations.

At the heart of this framework lies an optimization model designed to identify the most suitable routes for BEB deployment and determine optimal charging infrastructure placement. The model considers critical parameters, including opportunity charging duration and budget allocation and was applied to the large bus network of New Delhi, India. The study's sensitivity analysis highlights the significance of these factors in shaping the daily electric bus mileage (e-mileage), a pivotal metric for electrification success. The results offer urban transit agencies a tangible blueprint for transitioning to a BEB system in a phased manner under budget that will promote long-term sustainability in urban transportation.

BEBs provide significant environmental advantages, yet their restricted driving range and extended charging periods pose operational hurdles for transit organizations. There is a

delicate trade-off between BEB battery capacities and charging infrastructure, spurred by the advent of fast-charging technology. This innovation holds the potential to notably enhance the daily driving range of BEBs while concurrently diminishing charging durations and battery dimensions.

The second objective explores how the size of BEB batteries can be adjusted in relation to the deployment of fast-charging infrastructure. By utilizing fast-charging technology, the study seeks to extend the daily driving range of BEBs and reduce the time required for recharging, thereby potentially decreasing the size of batteries needed. However, the study identifies a potential trade-off associated with this approach. While fast-charging stations offer the benefit of quicker energy top-ups, they may also lead to longer queues at terminals due to increased demand for rapid recharging across the entire network during daily operations.

Consequently, these extended queues may disrupt the schedules of BEBs, hindering their ability to fulfil their assigned duties within the designated timeframe and causing inefficiencies in public transit systems. This underscores the importance of carefully considering the deployment of fast-charging infrastructure in conjunction with BEB battery sizes. While fast-charging technology offers advantages such as extended driving range and reduced charging times, its implementation must be managed to minimize potential drawbacks, such as increased terminal congestion and scheduling disruptions. Strategies for optimizing the placement of charging infrastructure, scheduling procedures, and operational protocols may be necessary to maximize the efficiency and reliability of BEB operations while minimizing service disruptions.

Achieving the desired trade-off necessitates a thorough examination. Thus, an optimization model is crafted to ascertain the most efficient battery sizes and charger setups, factoring in constraints on waiting times by modelling M/M/1 queues at each charger of the charging stations. Implemented on a public bus subnetwork in New Delhi, the findings of this

research emphasize the pivotal relationship among battery capacities, charger configurations, and operational effectiveness. Transit authorities can leverage this integrated modelling approach to devise optimal BEB systems that adhere to service level agreements and operational benchmarks.

The third objective delves into the intricate relationship between the planning of BEB system and the scheduling of their charging activities. Recognizing that these aspects are closely intertwined, the study introduces an optimization framework to aid BEB operators in making strategic decisions regarding the configuration of charging stations (location, number of chargers, charging power).

This framework considers a range of factors that impact decision-making, including the initial capital investment required for setting up charging infrastructure, ongoing operational costs associated with maintenance and electricity consumption, fluctuating energy prices, and potential demand charges that may be incurred. By incorporating these variables into the optimization model, the study aims to provide a comprehensive understanding of the trade-offs involved in different charging station configurations.

Furthermore, the study acknowledges the uncertainty surrounding energy consumption, which can vary due to factors such as weather conditions, route changes, and passenger demand. To address this uncertainty, the researchers develop a robust counterpart to the deterministic optimization model. This robust formulation allows for more flexible decision-making under uncertain conditions while still ensuring that the resulting solution remains tractable and practical for real-world implementation.

Overall, the results of the study highlight the importance of considering both BEB planning and charging scheduling decisions in an integrated manner. Modelling strategic and operational decisions together facilitates more holistic decision-making, alignment of goals, optimization of resources, adaptability to change, and ultimately, improved performance. By

utilizing the optimization framework developed in this study, BEB operators can make informed decisions that minimize electricity costs and optimize recharging schedules, ultimately enhancing the sustainability and economic viability of their BEB systems.

In conclusion, this thesis provides a comprehensive overview of a research trilogy aimed at advancing the sustainability and practicality of Battery Electric Bus (BEB) systems in urban transportation. This thesis introduces innovative strategies such as initiation of bus electrification by addressing financial constraints, optimized system design considering delay modelling at the charging stations, and integrated BEB system design and charging scheduling modelling to tackle the challenges faced by transit agencies. These research efforts offer actionable insights that can transform urban transit systems into cleaner, more efficient, and economically viable alternatives. As cities worldwide seek to reduce emissions and promote sustainable public transportation, these studies provide valuable guidance to pave the way for a greener and more sustainable urban future.

Keywords: e-mobility, e-mileage, Battery electric bus (BEB), partial bus electrification, charging infrastructure design, battery sizing, queueing theory, waiting time, charging delay, Charging infrastructure planning, Charging scheduling, Integrated optimization framework, Energy consumption uncertainty, Robust optimization

सार

बैटरी इलेक्ट्रिक बसें (बीईबी) शहरी क्षेत्रों के लिए कुशल सार्वजनिक परिवहन की पेशकश करते हुए उत्सर्जन पर अंकुश लगाने के लिए एक आशाजनक समाधान के रूप में उभरी हैं। हालांकि, उनके व्यापक रूप से अपनाने से वित्तीय और परिचालन चुनौतियों का सामना करना पड़ता है। यह थीसिस विद्युतीकरण के माध्यम से इन चुनौतियों का समाधान करने के लिए एक बहुआयामी दृष्टिकोण प्रस्तुत करती है। इलेक्ट्रिक बसों के लिए बजट और अनुकूलित प्रणाली और परिचालन डिजाइन। अनुसंधान में तीन परस्पर जुड़े उद्देश्य शामिल हैं, जो शहरी पारगमन में बीईबी की व्यवहार्यता और स्थिरता को बढ़ाने के लक्ष्य पर केंद्रित हैं।

पहला उद्देश्य, बजट बाधाओं के भीतर टिकाऊ बस पारगमन प्रणालियों के लिए चरणबद्ध विद्युतीकरण पर ध्यान केंद्रित करना, बीईबी के महत्वपूर्ण वादे को स्वीकार करता है। हालांकि, यह बीईबी को अपनाने से जुड़े महत्वपूर्ण खर्चों को भी रेखांकित करता है, विशेष रूप से व्यापक चार्जिंग बुनियादी ढांचे की आवश्यकता के कारण। अधिकांश पारगमन एजेंसियों के सामने आने वाली वित्तीय बाधाओं को स्वीकार करते हुए, अध्ययन बजट के तहत चरणबद्ध विद्युतीकरण के लिए एक रूपरेखा का प्रस्ताव करता है। यह दृष्टिकोण पारगमन एजेंसियों को बजट सीमाओं के भीतर रहते हुए समय के साथ डीजल/सीएनजी बसों से बीईबी में रणनीतिक रूप से संक्रमण करने की अनुमति देता है।

इस ढांचे के केंद्र में एक अनुकूलन मॉडल है जो बीईबी परिनियोजन के लिए सबसे उपयुक्त मार्गों की पहचान करने और इष्टतम चार्जिंग इंफ्रास्ट्रक्चर प्लेसमेंट निर्धारित करने के लिए डिज़ाइन किया गया है। यह मॉडल अवसर चार्जिंग अवधि और बजट आवंटन सहित महत्वपूर्ण मापदंडों पर विचार करता है और इसे नई दिल्ली, भारत के बड़े बस नेटवर्क पर लागू किया गया था। अध्ययन का संवेदनशीलता विश्लेषण दैनिक इलेक्ट्रिक बस माइलेज (ई-माइलेज) को आकार देने में इन कारकों के महत्व पर प्रकाश डालता है, जो विद्युतीकरण की सफलता के लिए एक महत्वपूर्ण मीट्रिक है। परिणाम शहरी पारगमन

एजेंसियों को बजट के तहत चरणबद्ध तरीके से बीईबी प्रणाली में परिवर्तन के लिए एक ठोस खाका प्रदान करते हैं जो शहरी परिवहन में दीर्घकालिक स्थिरता को बढ़ावा देगा।

बीईबी महत्वपूर्ण पर्यावरणीय लाभ प्रदान करते हैं, फिर भी उनकी सीमित ड्राइविंग रेंज और विस्तारित चार्जिंग अवधि पारगमन संगठनों के लिए परिचालन बाधाएं पैदा करती हैं। फास्ट-चार्जिंग तकनीक के आगमन से प्रेरित, बीईबी बैटरी क्षमताओं और चार्जिंग बुनियादी ढांचे के बीच एक नाजुक व्यापार-बंद है। यह नवाचार चार्जिंग अवधि और बैटरी आयामों को कम करते हुए बीईबी की दैनिक ड्राइविंग रेंज को उल्लेखनीय रूप से बढ़ाने की क्षमता रखता है।

दूसरा उद्देश्य यह पता लगाता है कि फास्ट-चार्जिंग बुनियादी ढांचे की तैनाती के संबंध में बीईबी बैटरियों के आकार को कैसे समायोजित किया जा सकता है। फास्ट-चार्जिंग तकनीक का उपयोग करके, अध्ययन बीईबी की दैनिक ड्राइविंग रेंज को बढ़ाने और रिचार्जिंग के लिए आवश्यक समय को कम करने का प्रयास करता है, जिससे संभावित रूप से आवश्यक बैटरी के आकार में कमी आती है। हालाँकि, अध्ययन इस दृष्टिकोण से जुड़े संभावित व्यापार-बंद की पहचान करता है। जबकि फास्ट-चार्जिंग स्टेशन त्वरित ऊर्जा टॉप-अप का लाभ प्रदान करते हैं, दैनिक परिचालन के दौरान पूरे नेटवर्क में तेजी से रिचार्जिंग की बढ़ती मांग के कारण टर्मिनलों पर लंबी कतारें भी लग सकती हैं।

नतीजतन, ये विस्तारित कतारें बीईबी के शेड्यूल को बाधित कर सकती हैं, निर्धारित समय सीमा के भीतर अपने सौंपे गए कर्तव्यों को पूरा करने की उनकी क्षमता में बाधा डाल सकती हैं और सार्वजनिक परिवहन प्रणालियों में अक्षमताएं पैदा कर सकती हैं। यह बीईबी बैटरी आकार के साथ संयोजन में फास्ट-चार्जिंग बुनियादी ढांचे की तैनाती पर सावधानीपूर्वक विचार करने के महत्व को रेखांकित करता है। जबकि फास्ट-चार्जिंग तकनीक विस्तारित ड्राइविंग रेंज और कम चार्जिंग समय जैसे फायदे प्रदान करती है, इसके कार्यान्वयन को संभावित कमियों को कम करने के लिए प्रबंधित किया जाना चाहिए, जैसे कि टर्मिनल भीड़भाड़ और शेड्यूलिंग व्यवधानों में वृद्धि। सेवा व्यवधानों को कम करते हुए बीईबी संचालन की दक्षता और विश्वसनीयता को अधिकतम करने के लिए चार्जिंग बुनियादी ढांचे, शेड्यूलिंग प्रक्रियाओं और परिचालन प्रोटोकॉल की नियुक्ति को अनुकूलित करने की रणनीतियां आवश्यक हो सकती हैं।

वांछित समझौता प्राप्त करने के लिए गहन परीक्षण की आवश्यकता होती है। इस प्रकार, चार्जिंग स्टेशनों के प्रत्येक चार्जर पर एम/एम/1 कतारों को मॉडलिंग करके प्रतीक्षा समय की बाधाओं को ध्यान में रखते हुए, सबसे कुशल बैटरी आकार और चार्जर सेटअप का पता लगाने के लिए एक अनुकूलन मॉडल तैयार किया गया है। नई दिल्ली में एक सार्वजनिक बस सबनेटवर्क पर कार्यान्वित, इस शोध के निष्कर्ष बैटरी क्षमता, चार्जर कॉन्फ़िगरेशन और परिचालन प्रभावशीलता के बीच महत्वपूर्ण संबंध पर जोर देते हैं। ट्रांजिट अधिकारी इस एकीकृत मॉडलिंग दृष्टिकोण का लाभ उठाकर इष्टतम बीईबी सिस्टम तैयार कर सकते हैं जो सेवा स्तर के समझौतों और परिचालन बेंचमार्क का पालन करते हैं।

तीसरा उद्देश्य बीईबी प्रणाली की योजना और उनकी चार्जिंग गतिविधियों के शेड्यूल के बीच जटिल संबंध पर प्रकाश डालता है। यह मानते हुए कि ये पहलू आपस में घनिष्ठ रूप से जुड़े हुए हैं, अध्ययन चार्जिंग स्टेशनों के कॉन्फ़िगरेशन (स्थान, चार्जर की संख्या, चार्जिंग पावर) के संबंध में रणनीतिक निर्णय लेने में बीईबी ऑपरेटरों की सहायता के लिए एक अनुकूलन ढांचा पेश करता है।

यह ढांचा कई कारकों पर विचार करता है जो निर्णय लेने को प्रभावित करते हैं, जिसमें चार्जिंग बुनियादी ढांचे की स्थापना के लिए आवश्यक प्रारंभिक पूंजी निवेश, रखरखाव और बिजली की खपत से जुड़ी चल रही परिचालन लागत, ऊर्जा की कीमतों में उतार-चढ़ाव और संभावित मांग शुल्क शामिल हैं। इन चरों को अनुकूलन मॉडल में शामिल करके, अध्ययन का उद्देश्य विभिन्न चार्जिंग स्टेशन कॉन्फ़िगरेशन में शामिल ट्रेड-ऑफ की व्यापक समझ प्रदान करना है।

इसके अलावा, अध्ययन ऊर्जा खपत को लेकर अनिश्चितता को स्वीकार करता है, जो मौसम की स्थिति, मार्ग परिवर्तन और यात्री मांग जैसे कारकों के कारण भिन्न हो सकती है। इस अनिश्चितता को दूर करने के लिए, शोधकर्ताओं ने नियतात्मक अनुकूलन मॉडल का एक मजबूत समकक्ष विकसित किया है। यह मजबूत फॉर्मूलेशन अनिश्चित परिस्थितियों में अधिक लचीले निर्णय लेने की अनुमति देता है, साथ ही यह सुनिश्चित करता है कि परिणामी समाधान वास्तविक दुनिया के कार्यान्वयन के लिए व्यवहार्य और व्यावहारिक बना रहे।

कुल मिलाकर, अध्ययन के नतीजे एकीकृत तरीके से बीईबी योजना और चार्जिंग शेड्यूलिंग निर्णयों पर विचार करने के महत्व पर प्रकाश डालते हैं। रणनीतिक और परिचालन निर्णयों को एक साथ मॉडलिंग करने से

अधिक समग्र निर्णय लेने, लक्ष्यों का संरक्षण, संसाधनों का अनुकूलन, परिवर्तन के लिए अनुकूलनशीलता और अंततः बेहतर प्रदर्शन की सुविधा मिलती है। इस अध्ययन में विकसित अनुकूलन ढांचे का उपयोग करके, बीईबी ऑपरेटर सूचित निर्णय ले सकते हैं जो बिजली की लागत को कम करते हैं और रिचार्जिंग शेड्यूल को अनुकूलित करते हैं, अंततः उनके बीईबी सिस्टम की स्थिरता और आर्थिक व्यवहार्यता को बढ़ाते हैं।

निष्कर्ष में, यह थीसिस शहरी परिवहन में बैटरी इलेक्ट्रिक बस (बीईबी) प्रणालियों की स्थिरता और व्यावहारिकता को आगे बढ़ाने के उद्देश्य से एक शोध त्रयी का व्यापक अवलोकन प्रदान करती है। यह थीसिस वित्तीय बाधाओं को दूर करके बस विद्युतीकरण की शुरुआत, चार्जिंग स्टेशनों पर देरी मॉडलिंग पर विचार करते हुए अनुकूलित सिस्टम डिजाइन और पारगमन एजेंसियों के सामने आने वाली चुनौतियों से निपटने के लिए एकीकृत बीईबी सिस्टम डिजाइन और चार्जिंग शेड्यूलिंग मॉडलिंग जैसी नवीन रणनीतियों का परिचय देती है। ये शोध प्रयास कार्रवाई योग्य अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं जो शहरी पारगमन प्रणालियों को स्वच्छ, अधिक कुशल और आर्थिक रूप से व्यवहार्य विकल्पों में बदल सकते हैं। चूंकि दुनिया भर के शहर उत्सर्जन को कम करने और टिकाऊ सार्वजनिक परिवहन को बढ़ावा देने की कोशिश कर रहे हैं, ये अध्ययन एक हरित और अधिक टिकाऊ शहरी भविष्य का मार्ग प्रशस्त करने के लिए मूल्यवान मार्गदर्शन प्रदान करते हैं।

कीवर्ड: ई-मोबिलिटी, ई-माइलेज, बैटरी इलेक्ट्रिक बस (बीईबी), आंशिक बस विद्युतीकरण, चार्जिंग इंफ्रास्ट्रक्चर डिजाइन, बैटरी आकार, कतार सिद्धांत, प्रतीक्षा समय, चार्जिंग देरी, चार्जिंग इंफ्रास्ट्रक्चर योजना, चार्जिंग शेड्यूलिंग, एकीकृत अनुकूलन ढांचा, ऊर्जा खपत अनिश्चितता, मजबूत अनुकूलन

TABLE OF CONTENTS

CERTIFICATE	i
ACKNOWLEDGEMENT.....	ii
ABSTRACT.....	iii
List of Figures.....	xvi
List of Tables.....	xviii
List of Acronym.....	xix
CHAPTER 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Background	1
1.2 Challenges to Electric Bus Adoption	4
1.3 BEB and its Components	5
<i>1.3.1 Battery Configurations</i>	<i>6</i>
<i>1.3.2 Charging System Configurations.....</i>	<i>9</i>
1.4 Indian Government Policy Initiatives for Electric Mobility	12
<i>1.4.1 Electric Vehicle Policies in some key states in India:</i>	<i>14</i>
<i>1.4.2 State-Level EV Policies: Shaping Strategic and Operational Decisions in India... </i>	<i>15</i>
1.5 Motivation for the Study	18
1.6 Research Questions	22
1.7 Research Objectives	24
1.8 Thesis Outline	26
CHAPTER 2 : LITERATURE REVIEW.....	27
2.1 Background	27
2.2 Charging Infrastructure Design Problem	28
2.3 Charging Scheduling Problem	32

2.4 Integrated E-Bus System Design And Charging Scheduling	34
2.5 Research Gaps	36
2.5.1 Charging infrastructure design problem	37
2.5.2 Charging delay modelling for e-bus operations	37
2.5.3 Integrated e-bus system design and charging scheduling	38
CHAPTER 3 : BUS ELECTRIFICATION INITIATION PLAN	39
3.1 Background	39
3.2 Problem Statement	39
3.3 Model Formulation.....	44
3.3.1 Set and Indices.....	44
3.3.2 Notations.....	44
3.4 Case Study.....	47
3.4.1 Bus Network and Operational Parameters	47
3.4.2 Bus Electrification Parameters	48
3.5 Results and Analysis.....	51
3.6 Sensitivity Analysis	55
3.6.1 Charging duration (TC).....	55
3.6.2 Budget (B).....	58
3.7 Chapter Summary.....	60
CHAPTER 4 : CHARGING DELAY MODELLING FOR E-BUS OPERATIONS.....	63
4.1 Background	63
4.2 Modelling Waiting Time Limitations	70
4.2.1 Linearization of Non-Linear Constraint.....	71
4.2.2 Linearized Waiting Time Constraint.....	72
4.3 Stochastic Waiting Time Limitations	73
4.3.1 Stochastic Programming	73

4.3.2 Scenario Construction	78
4.3.3 Monte Carlo Techniques	79
4.3.4 Stochastic Model for Uncertain BEB Operations	80
4.4 Solution Method for Stochastic Model	83
4.4.1 Lower Bound on Zstochastic	83
4.4.2 Sub-gradient Approach	84
4.4.3 Upper Bound on Zstochastic	86
4.5 Algorithm 1: LR Procedure with Sub-gradient Pseudocode	86
4.6 Case Study	87
4.7 Bus Network and Model Parameters	89
4.8 Results and Analysis	93
4.8.1 Upper and Lower Bounds	94
4.8.2 Optimality Gap	95
4.8.3 Structural Results and Implications	95
4.9 Chapter Summary	98

CHAPTER 5 : INTEGRATED E-BUS SYSTEM DESIGN AND CHARGING

SCHEDULING.....	101
5.1 Background	101
5.2 Mathematical Formulation	105
5.3 Mathematical Notations	107
5.4 Objective Function	109
5.5 Constraints	109
5.5.1 Resource Constraints	109
5.5.2 Energy Conservation Constraints	110
5.5.3 Power Demand and Supply Constraints	111
5.5.4 Demand Charge Modelling	112

5.6 Robust Formulation.....	114
5.6.1 Robust Optimization Framework	116
5.6.2 Robust Counterparts (RC)	118
5.6.3 Approaches to Formulate RO Framework	119
5.6.4 Polyhedral Uncertainty Sets	120
5.6.5 Budgeted Uncertainty.....	122
5.7 Robust Model for Integrated E-Bus System Design and Charging Scheduling	122
5.8 Robust Counterpart	124
5.9 Case Study.....	126
5.9.1 Bus Route Network Parameters.....	127
5.9.2 Model Parameters	129
5.10 Results And Analysis.....	132
5.10.1 Implementation of Sharing Mechanism.....	137
5.10.2 Comparison With Existing Methods	139
5.10.3 Robust Model Solution	142
5.11 Impact of Uncertain Parameters	144
5.11.1 Uncertainty Budget.....	144
5.11.2 Energy Consumption Deviation	145
5.12 Chapter Summary.....	147
CHAPTER 6 : CONCLUSIONS AND FUTURE SCOPE	151
6.1 Background	151
6.2 Research Contributions	153
6.3 Research Limitations and Future Scope.....	154
6.4 Publications	163
6.4.1 Journals	163
6.4.2 Conferences	164

6.4.3 Other Published/Under Revision/Under Preparation Journal/Conferences.....	165
REFERENCES.....	179
BRIEF BIODATA	179

List of Figures

Fig. 1.1 Characteristics (Battery Capacity And Maximum Continuous Charging Power) of Different Cell Chemistries.....	6
Fig. 1.2 Comparison of the NMC, LFP And LTO Technologies Development Regarding Energy Density at the Cell and Battery Pack Level.	7
Fig. 1.3 Comparison of a 12-meter E-bus Mileage Range After 10 years of Use with NMC or LTO Batteries.	8
Fig. 1.4 Charging Methods for Electric Buses.....	11
Fig. 1.5 Research Plan	25
Fig. 3.1 Optimization Framework for E-Mileage Maximization.....	42
Fig. 3.2 New Delhi's Cluster Bus Network	48
Fig. 3.3 Charging Station Locations Over the Electrified Routes	52
Fig. 3.4 Cost Breakdown for Initial Phase Electrification Plan.....	53
Fig. 3.5 Impact of Varying Charging Duration (T_c) Over Daily E-Miles (VKT).....	56
Fig. 3.6 Impact of Varying Charging Duration (T_c) Over Electrification Measures	56
Fig. 3.7 Impact of Varying Charging Duration (T_c) Over Route Length Characteristics.....	57
Fig. 3.8 Impact of Varying Budget Allocation (B) Over Daily E-Miles (VKT).....	58
Fig. 3.9 Impact of Varying Budget Allocation (B) Over Electrification Measures	59
Fig. 3.10 Impact of Varying Budget Allocation (B) Over Route Length Characteristics	59
Fig. 3.11 Impact of Varying Budget Allocation (B) Over Cost Components	60
Fig. 4.1 Typical Bus Network Layout (DH = deadhead).....	65
Fig. 4.2 Methodological Framework for Charging Delay Modelling.....	65
Fig. 4.3 Proposed New Delhi Subnetwork for Electrification	88
Fig. 4.4 Battery Sizes Selected for Different Routes	96

Fig. 4.5 Charger Design (Location, Size and Capacity) Variables at Terminals and Depots..	97
Fig. 4.6 Cost Breakdown	98
Fig. 5.1 Integrated Charging Infrastructure Planning And Charging Scheduling Framework	106
Fig. 5.2 Robust Framework For Integrated E-Bus Planning And Charging Scheduling.....	126
Fig. 5.3 Subnetwork Proposed for Electrification in New Delhi	127
Fig. 5.4 Charging Station Configuration at the Electrified Terminals.....	134
Fig. 5.5 Charging profile of BEBs at Different Terminals	135
Fig. 5.6 Variation in Charging Behaviour of BEBs at Different Terminals	136
Fig. 5.7 Charging Profiles of Electric Buses: Terminal-wise Distribution.....	136
Fig. 5.8 Comparison of Charging Patterns Across Bus Terminals	137
Fig. 5.9 Heatmap for Charger Usage by Routes and Terminals	138
Fig. 5.10 Charging Events at Badarpur Border Terminal within a 30-Minute Interval.....	138
Fig. 5.11 Charging Station Configuration at the Electrified Terminals for Non-Sharing Model	142
Fig. 5.12 Cost Component Comparison for Various Robust Solutions.....	145
Fig. 5.13 Cost Component Comparison for Various Energy Consumption Deviations.....	146

List of Tables

Table 1.1 Emission from Different Vehicle Types in India, 2003-04 (Gigagram, Gg).....	2
Table 1.2 Comparison of a typical 12m e-bus performance	9
Table 3.1 Notations and descriptions.....	44
Table 3.2 Model parameters and corresponding values.....	49
Table 3.3 Charging Station Configuration Across the Electrified Terminals.....	54
Table 4.1 Notations	66
Table 4.2 Bus Sub-Network (Routes and Terminals)	89
Table 4.3 Network and Service Parameters	90
Table 4.4 Model Cost Parameters	91
Table 4.5 Model Parameters	92
Table 4.6 Comparison Between Deterministic and Stochastic Model	94
Table 5.1 Mathematical Notations.....	107
Table 5.2 Network Topology and Bus Route Network Parameters.....	128
Table 5.3 Model Parameters	130
Table 5.4 Other Model Parameters	131
Table 5.5 Total Annualized Cost Components	132
Table 5.6 Battery Size Selection for Routes	133
Table 5.7 Battery Size Selection for Sharing and Non-Sharing Optimization Models	140
Table 5.8 Cost Comparison for Sharing and Non-Sharing Optimization Models	141
Table 5.9 Comparison Between Deterministic and Robust Optimization Models	143
Table 5.10 Results for Different Level of Uncertainty	145
Table 5.11 Results for Different Deviation in Energy Consumption	146

List of Acronym

AC	Alternating Current
BEB	Battery Electric Bus
CI	Confidence Interval
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Carbon Dioxide
DC	Depot Charging
DOD	Depth of Discharge
DTC	Delhi Transport Corporation
EV	Electric Vehicle
FAME	Faster Adoption and Manufacturing of (Hybrid & Electric Vehicles)
GHz	Gigahertz
GHG	Greenhouse Gas
Gg	Gigagram
GTFS	General Transit Feed Specification
HC	Hydrocarbons
IEC	Information, Education, and Communication
IEA	International Energy Agency
IID	Independent Identically Distributed
INR	Indian Rupee
LFP	Lithium Iron Phosphate
LHS	Latin Hypercube Sampling

LMO	Lithium-Manganese Spinel
MILP	Mixed Integer Linear Program
MCS	Monte Carlo Sampling
Mt CO ₂ -eq	Metric ton CO ₂ equivalent
NCA	Nickel Cobalt-Aluminium
NEMMP 2020	National Electric Mobility Mission Plan 2020
NO _x	Nitrogen Oxides
OC	Opportunity Charging
PM	Particulate Matter
RC	Robust Counterparts
RO	Robust Optimization
RFP	Requests for Proposal
SAA	Sample Average Approximation
SLA	Service Level Agreement
SOC	State of Charge
TBC	Total Battery Cost
TDC _{off}	Off-Peak Total Demand Charges
TDC _{on}	Peak Total Demand Charges
TEC	Total Electricity Cost
TFCC	Total Fast Charger Cost
TFCSC	Total Fast Charging Station Cost
TOU	Time-of-Use
WTT	Well-to-Tank
TTW	Tank-to-Wheel
WTW	Well-to-Wheel