PRICING BASED STRATEGIES FOR CHARGING OF ENERGY CONSTRAINED DEVICES AND VEHICLES

AJAY KUMAR GUPTA

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
OCTOBER 2024

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2024

PRICING BASED STRATEGIES FOR CHARGING OF ENERGY CONSTRAINED DEVICES AND VEHICLES

by

AJAY KUMAR GUPTA

BHARTI SCHOOL OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Submitted

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

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2024

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **" PRICING BASED STRATEGIES FOR CHARGING OF ENERGY CONSTRAINED DEVICES AND VEHICLES"** being submitted by **Mr. Ajay Kumar Gupta** to the Bharti School of Telecommunication Technology and Management, **Indian Institute of Technology Delhi**, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is the record of the bona-fide research work carried out by him under my supervision. In my opinion, the thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

Date:
New Delhi

(Prof. Manav Bhatnagar)
Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

Acknowledgements

First and foremost, I would like to thank my supervisor, Prof. Manav Bhatnagar, for his immense encouragement, expert guidance, and unwavering support throughout my Ph.D. program. His invaluable suggestions and insightful discussions made my research more enjoyable. Also, his honest dedication, boundless energy, and quest for knowledge are truly inspiring. My heartfelt gratitude also goes to Prof. Ananjan Basu, Prof. Seshan Srirangarajan, and Prof. Arpan Chattopadhyay for their valuable feedback and suggestions throughout my work.

Most importantly, I am grateful for the unwavering support and encouragement of my family, whose love and understanding have been instrumental throughout my thesis journey.

I want to thank my colleagues for their continuous support throughout my Ph.D., which involved valuable input and insightful discussions. I also like to thank my IIT friends for being there for me through the good and bad times. Without their support, I would have faced many difficulties finishing my Ph.D. program.

20-10-2024

Ajay Kumar Gupta

Abstract

Energy replenishment strategies are the crucial aspect of the widespread adaptation of the various energy constrained devices and vehicles (ECDVs) including unmanned aerial vehicles (UAVs), wireless rechargeable sensor nodes (WRSNs), and electric vehicles (EVs). Effective pricing strategies play a pivotal role in fostering the sustainable implementation of UAV and WRSN based applications including wireless communication, agriculture, environmental monitoring, and smart cities developments. Further, the EVs has received a great attention of researchers due to the development of battery technology and environmental issues. Moreover, the optimized pricing structures can incentivize investment in research and development, leading to technological advancements and cost reduction. Therefore, in this thesis we present a comprehensive pricing based schemes for the promising competitive market applications including UAV to UAV charging, UAV enabled charging of WRSN, and EV charging. A game-theoretic approach is used to obtain the closed form expressions of the equilibrium condition.

In the beginning, the idea of UAV to static UAV (SUAV) wireless charging is envisaged. A competitive market scenario of wireless charging of SUAVs by master UAV (MUAV), capable of wireless energy transfer (ET) is considered, wherein MUAVs are associated with their fixed grounded platforms. A UAV network is considered in which the most economical MUAV is dispatched to the known location of the SUAV and charge without discontinuing the mission of SUAV. Motivated by the fact that an optimized and relevant pricing scheme for futuristic charging service providers (CSPs) will be the critical aspect in the promising competitive market scenarios, a suitable pricing scheme is proposed; and the equilibrium in the market sharing condition using a game-theoretic approach is investigated. The Nash equilibrium (NE) for the total profit for each platform in a non-cooperative competitive environment is derived by

analyzing their corresponding best prices. In this regard, a closed-form expression of the decision boundary for the SUAVs, based on area division, is identified.

Next, the on-demand charging of the WRSNs is in a competitive market scenario is proposed. The wireless charging of the independent WRSNs in a network is modeled as a service in a common competitive market, where multiple CSPs indulge in a pricing war to maximize their profits by achieving fair market share based on area division. The grounded CSPs are associated with UAV-enabled chargers (UAVEC), which are dispatched to the concerned WRSNs with known positions and recharged wirelessly in a time-bound manner. A suitable pricing strategy for on-demand charging of the WRSNs in a competitive market scenario is studied, and the existence of NE for prices and profit of CSPs is investigate using a game-theoretic approach. The closed-form expressions of NE conditions and the CSP selection criterion for WRSNs are obtained, and the results are verified through simulations.

On the other hand, the charging infrastructures and pricing are crucial for the widespread adaptation of EVs. Therefore, we present a suitable pricing scheme for charging EVs in a competitive discrete-time dynamic market scenario, wherein multiple electric vehicle charging stations (EVCSs) adapt a comprehensive pricing model to maximize their profit. We study a pricing scheme for EV charging, where we use the updated information, such as EVs traffic distribution, locations of potential EVCSs, expected waiting time at each EVCS, grid energy cost at each EVCS, and the selfish behavior of EVs. The decision criterion for EVs in the considered network is studied for EVCSs. The NE profit of the EVCSs is obtained along with their prices at equilibrium.

Further, we introduce a modified game setup that alleviate the limitations of a conventional Hotelling's game (CHG) application in EV charging to achieve the price equilibrium among multiple non-cooperative players in a discrete dynamic market. In a CHG it is assumed that each player has a positive market share. However, a CHG provides positive utilities to all players at NE only if all the players choose their prices that satisfy the market sharing condition (MSC). The NE price depends on the locations of the players; therefore, the maximum utilities can be achieved only if locations of the players are confined such that the resultant NE price satisfy the MSC.

सार

ऊर्जा पुनःपूर्ति रणनीतियाँ मानव रहित हवाई वाहनों (यूएवी), वायरलेस रिचार्जेबल सेंसर नोड्स (डब्ल्यूआरएसएन) और इलेक्ट्रिक वाहनों (ईवी) सहित विभिन्न ऊर्जा विवश उपकरणों और वाहनों (ईसीडीवी) के व्यापक अनुकूलन का महत्वपूर्ण पहलू हैं। प्रभावी मूल्य निर्धारण रणनीतियाँ वायरलेस संचार, कृषि, पर्यावरण निगरानी और स्मार्ट शहरों के विकास सहित यूएवी और डब्ल्यूआरएसएन आधारित अनुप्रयोगों के स्थायी कार्यान्वयन को बढ़ावा देने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं। इसके अलावा, बैटरी प्रौद्योगिकी और पर्यावरणीय मुद्दों के विकास के कारण ईवी ने शोधकर्ताओं का बहुत ध्यान आकर्षित किया है। इसके अलावा, अनुकूलित मूल्य निर्धारण संरचनाएं अनुसंधान और विकास में निवेश को प्रोत्साहित कर सकती हैं, जिससे तकनीकी प्रगति और लागत में कमी आ सकती है। इसलिए, इस थीसिस में हम यूएवी से यूएवी चार्जिंग, यूएवी सक्षम डब्ल्यूआरएसएन चार्जिंग और ईवी चार्जिंग सहित होनहार प्रतिस्पर्धी बाजार अनुप्रयोगों के लिए एक व्यापक मूल्य निर्धारण आधारित योजनाएँ प्रस्तुत करते हैं। संतुलन स्थिति के बंद रूप अभिव्यक्तियों को प्राप्त करने के लिए एक खेल-सैद्धांतिक दृष्टिकोण का उपयोग किया जाता है।

शुरुआत में, यूएवी से स्थिर यूएवी (एसयूएवी) वायरलेस चार्जिंग के विचार की परिकल्पना की गई है। वायरलेस ऊर्जा हस्तांतरण (ईटी) में सक्षम मास्टर यूएवी (एमयूएवी) द्वारा एसयूएवी के वायरलेस चार्जिंग के एक प्रतिस्पर्धी बाजार परिदृश्य पर विचार किया जाता है, जिसमें एमयूएवी अपने निश्चित ग्राउंडेड प्लेटफ़ॉर्म से जुड़े होते हैं। एक यूएवी नेटवर्क पर विचार किया जाता है जिसमें सबसे किफायती एमयूएवी को एसयूएवी के ज्ञात स्थान पर भेजा जाता है और एसयूएवी के मिशन को बंद किए बिना चार्ज किया जाता है। इस तथ्य से प्रेरित होकर कि भविष्य के चार्जिंग सेवा प्रदाताओं (सीएसपी) के लिए एक अनुकूलित और प्रासंगिक मूल्य निर्धारण योजना आशाजनक प्रतिस्पर्धी बाजार परिदृश्यों में महत्वपूर्ण पहलू होगी, एक उपयुक्त मूल्य निर्धारण योजना प्रस्तावित की गई है; और गेम-थ्योरिटिक दृष्टिकोण का उपयोग करके बाजार साझाकरण स्थिति में संतुलन की जांच की गई है। एक गैर-सहकारी प्रतिस्पर्धी वातावरण में प्रत्येक प्लेटफ़ॉर्म के लिए कुल लाभ के लिए नैश संतुलन (एनई) उनके संगत सर्वोत्तम मूल्यों का विश्लेषण करके प्राप्त किया जाता है। इस संबंध में, क्षेत्र विभाजन के आधार पर एसयूएवी के लिए निर्णय सीमा की एक बंद-रूप अभिव्यक्ति की पहचान की गई है।

इसके बाद, प्रतिस्पर्धी बाजार परिदृश्य में WRSN की ऑन-डिमांड चार्जिंग प्रस्तावित की गई है। नेटवर्क में स्वतंत्र WRSN की वायरलेस चार्जिंग को एक सामान्य प्रतिस्पर्धी बाजार में एक सेवा के रूप में मॉडल किया गया है, जहाँ कई CSP क्षेत्र विभाजन के आधार पर उचित बाजार हिस्सेदारी हासिल करके अपने मुनाफे को अधिकतम करने के लिए मूल्य निर्धारण युद्ध में शामिल होते हैं। ग्राउंडेड CSP को UAV-सक्षम चार्जर (UAVEC) के साथ जोड़ा जाता है, जिन्हें ज्ञात स्थितियों के साथ संबंधित WRSN को भेजा जाता है और समयबद्ध तरीके से वायरलेस तरीके से रिचार्ज किया जाता है। प्रतिस्पर्धी बाजार परिदृश्य में WRSN की ऑन-डिमांड चार्जिंग के लिए एक उपयुक्त मूल्य निर्धारण रणनीति का अध्ययन किया जाता है, और CSP की कीमतों और लाभ के लिए NE के अस्तित्व की जाँच गेम-थ्योरिटिक दृष्टिकोण का उपयोग करके की जाती है। WRSN के लिए NE स्थितियों और CSP चयन मानदंड की बंद-रूप अभिव्यक्तियाँ प्राप्त की जाती हैं, और परिणामों को सिमुलेशन के माध्यम से सत्यापित किया जाता है।

दूसरी ओर, ईवी के व्यापक अनुकूलन के लिए चार्जिंग इंफ्रास्ट्रक्चर और मूल्य निर्धारण महत्वपूर्ण हैं। इसलिए, हम प्रतिस्पर्धी असतत-समय गतिशील बाजार परिदृश्य में ईवी को चार्ज करने के लिए एक उपयुक्त मूल्य निर्धारण योजना

प्रस्तुत करते हैं, जिसमें कई इलेक्ट्रिक वाहन चार्जिंग स्टेशन (ईवीसीएस) अपने लाभ को अधिकतम करने के लिए एक व्यापक मूल्य निर्धारण मॉडल को अपनाते हैं। हम ईवी चार्जिंग के लिए एक मूल्य निर्धारण योजना का अध्ययन करते हैं, जहाँ हम ईवी ट्रैफ़िक वितरण, संभावित ईवीसीएस के स्थान, प्रत्येक ईवीसीएस पर अपेक्षित प्रतीक्षा समय, प्रत्येक ईवीसीएस पर ग्रिड ऊर्जा लागत और ईवी के स्वार्थी व्यवहार जैसी अद्यतन जानकारी का उपयोग करते हैं। ईवीसीएस के लिए विचारित नेटवर्क में ईवी के लिए निर्णय मानदंड का अध्ययन किया जाता है। ईवीसीएस का एनई लाभ संतुलन पर उनकी कीमतों के साथ प्राप्त किया जाता है।

इसके अलावा, हम एक संशोधित गेम सेटअप पेश करते हैं जो एक असतत गतिशील बाजार में कई गैर-सहकारी खिलाड़ियों के बीच मूल्य संतुलन प्राप्त करने के लिए ईवी चार्जिंग में एक पारंपरिक होटलिंग गेम (सीएचजी) एप्लिकेशन की सीमाओं को कम करता है। सीएचजी में यह माना जाता है कि प्रत्येक खिलाड़ी के पास सकारात्मक बाजार हिस्सेदारी है। हालांकि, सीएचजी सभी खिलाड़ियों को एनई पर सकारात्मक उपयोगिताएं तभी प्रदान करता है जब सभी खिलाड़ी अपनी कीमतें चुनते हैं जो बाजार हिस्सेदारी की शर्त (एमएससी) को संतुष्ट करती हैं। एनई मूल्य खिलाड़ियों के स्थानों पर निर्भर करता है; इसलिए, अधिकतम उपयोगिताएँ केवल तभी प्राप्त की जा सकती हैं जब खिलाड़ियों के स्थान इस तरह से सीमित हों कि परिणामी एनई मूल्य एमएससी को संतुष्ट करे।

Table of Contents

Certificate i

Acknowledgements ii

Abstract iii

List of Figures x

Abbreviations xi

1 Introduction 1

1.1 Charging scenarios of UAVs, WRSNs, and EVs in a Competitive Market 1

1.2 Literature Survey 4

1.2.1 On-Demand Charging of UAVs 4

1.2.2 Charging of WRSNs 5

1.2.3 Charging of EVs 6

1.3 Motivation 9

1.4 Key Contributions 10

1.5 Outline of Thesis 12

2 Pricing Based Scheme for UAV-Enabled Wireless Energy Transfer 15

2.1 Introduction 15

2.1.1 Significant Contributions in This Chapter 17

2.2 System Model 18

2.2.1 Pricing Model 21

2.3 Solution Approach 22
2.4 Numerical Results and Discussions 29
2.5 Conclusion 36

3 A Non-cooperative Pricing Strategy for UAV-Enabled Charging of Wireless Sensor Network 39

3.1 Introduction 39
3.1.1 Major Contributions in This Chapter 40
3.2 System Model and Problem Formulation 41
3.2.1 Pricing Model and Definitions 44
3.2.2 Interplay among CSPs 46
3.2.3 Social Welfare Pricing Strategy 46
3.2.4 Welfare Grouping of WRSNs 46
3.3 Solution Approach 47
3.4 Numerical Results and Discussions 52
3.5 Conclusion 61

4 A Comprehensive Pricing Based Scheme for Charging of Electric Vehicles 63

4.1 Introduction 63
4.1.1 Significant Contributions in This Chapter 65
4.2 System Model 65
4.2.1 Pricing Model 67
4.3 Solution Approach 69
4.4 Numerical Results and Discussions 74
4.5 Conclusion 82

5 St-Hot: A Prospect of Price Equilibrium in a Multi-player Game for Electric Vehicle Charging Application 88

5.1 Introduction 88
5.1.1 Significant Contributions in This Chapter 89

5.2 System Model Description 90
5.2.1 Pricing Strategy 91
5.2.2 Utility of EVCS 92
5.2.3 Utility of an EV 92
5.3 Problem Formulation 92
5.4 The Conventional Hotelling's Limitations 95
5.5 Stackelberg-Hotelling: The Solution 97
5.5.1 St-Hot application for a three-player scenario ($\mathcal{N}$=3) 99
5.5.2 St-Hot application for a four-player scenario 104
5.6 Numerical Results and Discussions 110
5.7 Conclusion 115

6 Conclusions and Future Scope **117**
6.1 Conclusions 117
6.2 Future Scope of Work 119

Bibliography **121**

Publications **134**

Technical Biography of Author **136**

List of Figures

1.1 An illustration depicting wireless charging of WRSNs by UAVECs. . . 2

2.1 System model: An MUAV represents a UAV-mounted wireless energy transmitter. 18
2.2 Reaction functions of players O_1, O_3 and O_3, intersecting at NE. 28
2.3 Utility versus actions of platforms. 30
2.4 NE prices versus strategic location of players 31
2.5 Utilities at NE versus strategic locations. 32
2.6 Utilities of players at NE versus CED of SUAVs. 33
2.7 Prices and utilities of players at NE versus length of rectangular area. . 34

3.1 Illustration of wireless charging of the WRSNs by the UAVECs. 41
3.2 Service costs at NE versus strategic location of CSPs. 53
3.3 Utilities at NE versus strategic locations of CSPs. 57
3.4 Utilities of CSPs at NE versus length of rectangular region. 58
3.5 Utilities at NE versus energy costs of CSPs. 59
3.6 Utilities of CSPs at NE Vs mean energy demand of WRSNs. 59
3.7 Comparison of travel costs for 10 WRSNs randomly chosen in the area demand of $\mathcal{M}_1$. 60

4.1 System model: Charging scenario of EVs 66
4.2 Reaction functions of EVCSs showing the NE at intersection point. . . 72
4.3 Utilities versus prices of EVCSs. 73
4.4 NE prices versus strategic locations of EVCSs. 76

4.5 NE utilities versus strategic locations of EVCSs. 77
4.6 NE utilities versus energy costs of EVCSs. 78
4.7 NE utilities of EVCSs Vs average CED of EVs, when σ=5.77(kWh). . . 79
4.8 NE utilities of EVCSs Vs SD of CED, when μ_1=60(kWh) 79
4.9 NE utilities of EVCSs versus average traveling cost of EVs. 80
4.10 NE utilities of EVCSs versus strategic location in a four-player scenario. 81

5.1 System model of EV charging by competitive CSPs 90
5.2 NE results using CHG for various locations of $\mathcal{S}_1$ including violation of MSC (5.9a) when $\mathcal{N}$=3, ℓ_2=30 km, and ℓ_3=50 km. 97
5.3 NE results of CHG for various locations of $\mathcal{S}_3$ including violation of MSC (5.9d) when $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=10 km, and ℓ_2=30 km. 97
5.4 NE results using CHG for various locations of $\mathcal{S}_2$ including violation of MSC (5.9b) or (5.9c) when $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=10 km, and ℓ_3=50 km. 98
5.5 NE results using CHG for various locations of $\mathcal{S}_2$ including violation of MSC (5.9a) and (5.9d) when $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=20 km, and ℓ_3=40 km. 98
5.6 (Case-I) SHE for various locations of $\mathcal{S}_1$ when $\mathcal{S}_1$ follow $\mathcal{S}_2$ for $\mathcal{N}$=3, ℓ_2=30 km and, ℓ_3=50 km. 106
5.7 (Case-II) SHE for various locations of $\mathcal{S}_3$ when $\mathcal{S}_3$ follow $\mathcal{S}_2$ for $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=10 km, and ℓ_2=30 km. 106
5.8 (Case-III(a)) SHE for various locations of $\mathcal{S}_2$ when $\mathcal{S}_2$ follow $\mathcal{S}_1$ for $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=10 km, and ℓ_3=50 km. 109
5.9 (Case-III(b)) SHE for various locations of $\mathcal{S}_2$ when $\mathcal{S}_2$ follow $\mathcal{S}_3$ for $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=10 km, and ℓ_3=50 km. 110
5.10 (Case-IV) SHE for various locations of $\mathcal{S}_2$ when $\mathcal{S}_1$ and $\mathcal{S}_3$ follow $\mathcal{S}_2$ for $\mathcal{N}$=3, ℓ_1=20 km, and ℓ_3=40 km. 110
5.11 Utilities of players for various locations of $\mathcal{S}_1$ for $\mathcal{N}$=4, ℓ_2=20 km, ℓ_3=35 km, and ℓ_4=50 km, (a) CHG for various locations of $\mathcal{S}_1$ including violation of (5.25a), (b)(Case-I) SHE when $\mathcal{S}_1$ follows $\mathcal{S}_2$. 111

5.12 Utilities of players for various locations of $\mathcal{S}_4$ for $\mathcal{N}$=4, ℓ_1=5 km, ℓ_2=20 km, and ℓ_3=35 km, (a) CHG for various locations of $\mathcal{S}_4$ including violation of (5.25d), (b)(Case-II) SHE when $\mathcal{S}_4$ follows $\mathcal{S}_3$. 111

5.13 Utilities of players for various locations of $\mathcal{S}_2$ for $\mathcal{N}$=4, ℓ_1=15 km, ℓ_3=35 km, and ℓ_4=40 km, (a) CHG for various locations of $\mathcal{S}_1$ including violation of (5.25a) and (5.25d), (b)(Case-III) SHE when $\mathcal{S}_1$ follows $\mathcal{S}_2$ and $\mathcal{S}_4$ follows $\mathcal{S}_3$. 112

Abbreviations

BS	Battery Swapping
CED	Charging Energy Demand
CHG	Conventional Hotelling's Game
CS	Charging Station
CSP	Charging Service Provider
EH	Energy Harvesting
EV	Electric Vehicle
EVCS	Electric Vehicle Charging Station
HG	Hotelling's Game
MCS	Mobile Charging Station
MUAV	Master Unmanned Aerial Vehicle
NE	Nash Equilibrium
QoS	Quality of Service
SD	Standard Deviation
SG	Stackelberg Game
SHE	St-Hot Equilibrium
SUAV	Static Unmanned Aerial Vehicle
SWPS	Social Welfare Pricing Scheme
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAVEC	UAV-enabled Charger
UECSP	UAV-enabled Charging Service Provider
UMWET	UAV-mounted Wireless Energy Transmitter

WG	Welfare Grouping
WRSN	Wireless Rechargeable Sensor Network
WSN	Wireless Sensor Node