

RENEWABLE ENERGY SUPPORT MECHANISMS FOR EFFICIENT AND SUSTAINABLE POWER SYSTEMS

SHILPA BINDAL



**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JULY 2025**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2025

RENEWABLE ENERGY SUPPORT MECHANISMS FOR EFFICIENT AND SUSTAINABLE POWER SYSTEMS

by

Shilpa Bindal

Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

HAUZ KHAS, NEW DELHI-110016 INDIA

July, 2025

Dedicated to

my father

Late. Sh. Santosh Kumar Bansal

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis titled **RENEWABLE ENERGY SUPPORT MECHANISMS FOR EFFICIENT AND SUSTAINABLE POWER SYSTEMS**, submitted by **Ms. Shilpa Bindal**, to the Indian Institute of Technology, Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a bonafide record of the research work done by her under my supervision and guidance. The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other Institute or University for the award of any degree or diploma.

Abhijit R. Abhyankar
Professor
Electrical Engineering Department
IIT Delhi, 110016

ACKNOWLEDGEMENTS

First and foremost, I would like to express my gratitude to my supervisor, Prof. Abhijit R. Abhyankar, for his unwavering support and guidance throughout my research journey. His expertise and constructive feedback have significantly shaped my academic development and inspired me to strive for excellence. I am thankful for the trust he placed in me, which helped me navigate the professional and personal challenges I faced at IIT Delhi. His mentorship has been invaluable, and I will carry his lessons with me throughout my career.

I would like to express my thanks to my doctoral research committee members: Prof. Nilanjan Senroy, Prof. Bijay Ketan Panigrahi, and Dr. Sumit Chattopadhyay. Their reviews and suggestions have broadened my understanding and helped me approach problems from diverse angles. I am also thankful to the faculty members - Prof. Ashu Verma, Dr. Ankit Singhal, and Dr. Yashasvi Bansal - for their time and valuable feedback.

I would like to express my gratitude to all my colleagues in the Power System Simulation Lab for fostering a positive work environment. I am particularly thankful to my seniors Shri Ram Vaishya, Ashok Jadhav, Megha Gupta, Shaziya Rasheed, Shruti Ranjan, and Bharath Krishna Attoti for their stimulating discussions during the initial phase of my Ph.D. I am grateful to my friends Pratik Kumar, Archita Vijayvargia, Meenakshi Khandelwal, and Shruti Kahaliya for their priceless support, adaptability, and the fun moments shared over the last five years.

I would like to express my heartfelt gratitude to my mother, Mrs. Sudesh Bansal, and my late father, Mr. Santosh Bansal, for their unlimited love, irreplaceable guidance, and countless sacrifices. My father's diligent and curious nature, along with his never-give-up attitude, has been a constant source of inspiration throughout my journey. My mother's calmness and patience have encouraged me to achieve a balance between work and life. I am also grateful to my brother, Mohit Bansal, for his kindness and thoughtful advice, which have helped me pass through challenging times.

I am profoundly grateful to my husband, Mr. Anil Kumar Bindal, for his unwavering love, comfort, and support. He took on more than his fair share of responsibilities at both work and home, allowing me the space to focus on my own pursuits. Without his constant encouragement and backing, completing my Ph.D. journey would not have been possible. I extend my heartfelt thanks to my mother-in-law, Mrs. Krishna Kanta Bindal, whose unconditional love and simplicity have given me the resilience I needed to keep moving forward.

I am also incredibly blessed to have my amazing children, Chetanya Bindal and Sidharth Bindal, whose presence fills my life with immeasurable joy and warmth. Their love has been a constant source of inspiration, motivating me to grow and strive to become the best version of myself each day.

Date: July 21, 2025

Shilpa Bindal

Place: New Delhi

ABSTRACT

This thesis addresses the technical and economic issues associated with renewable energy support mechanisms. The support mechanisms are adopted to promote investments in renewable energy (RE), as well as the generation and consumption of energy produced from renewable sources. In addition to promoting renewable energy, the design philosophy behind these mechanisms influences the power injection patterns and investment decisions of RE investors. Their actions, driven by these support mechanisms, impact power system operation and planning. The research conducted in this thesis aims to extensively study these impacts and suggest improvements. This thesis analyzes two types of support mechanisms: compensation mechanisms used for distributed energy resources (DERs) and procurement mechanisms used for centralized power plants.

The compensation mechanisms used to incentivize DERs are generation-based and encourage the DERs to inject maximum available power into the system. With high penetration of DERs, the practice of maximum power injection raises operational challenges for power system operators and reinforcement needs for power system developers. Contrary to the existing practice, encouraging the practice of system-aware power injection can provide multiple advantages to the power system entities, such as loss reduction, voltage profile improvement, and deferral in reinforcement plans. Thus, to increase advantages and address challenges, the design of compensation mechanisms needs to be revisited. New designs should incentivize the DERs to coordinate with system operators and dispatch power according to system requirements. The design of such schemes involves three crucial steps: first, determining a dispatch schedule for DERs; second, evaluating various

benefits of scheduling DERs; and third, compensating DERs according to their contributions.

Available research works provide DER scheduling strategies that satisfy power system operational or planning preferences. The literature lacks in providing a single scheduling strategy to meet the distinct objectives of power system operators and system developers. This thesis addresses this gap by formulating a single scheduling problem that incorporates goals of various power system entities. Developers' objectives of reducing asset utilization and operators' objectives of enhancing power system performance are aligned by analyzing the impact of power injection on branch flows. Thereafter, a phase-specific optimal power dispatch (OPD) scheme has been proposed. Adopting the proposed optimal power injection scheme over maximum power injection leads to reduced losses and asset utilization. Preferring a phase-specific optimal schedule over a balanced schedule provides additional advantages by controlling unbalance.

In addition to optimally scheduling DERs, power system utilities need to thoroughly quantify the economic benefits of their actions. The literature provides analytical approaches to quantify operational benefits in terms of loss reduction benefits. Moreover, the capacity deferral benefits resulting from reduced asset utilization have been determined using iterative methods. However, the advantages obtained by other indirect impacts such as reducing voltage unbalance and improving voltage profile have not been quantified. To quantify various benefits in entirety, this thesis proposes a benefit quantification methodology that can measure branch-level benefits caused by local power injection. Implementing the proposed methodology to quantify the benefits of OPD action illustrates that OPD action generates higher utility benefits compared to those obtained by maximum power injection.

Since the existing compensation mechanisms are generation-based, a higher compensation amount is paid to DERs providing maximum power injection over optimal power injection. This

thesis offers a compensation plan for OPD service to resolve this contradiction. The philosophy underneath the proposed scheme is to utilize the economic benefits of OPD services and allocate them according to the individual contribution. The economic benefits of OPD services by various DERs are the result of their cooperative actions. Hence, allocating benefits according to individual contribution requires the use of joint-cost allocation methods. In the literature, the Shapley value methods have been shown to satisfy fairness concerns and have been widely used to allocate joint benefits. However, the presence of cross-multiplicative terms and use of iterative methods restrict the application of this method. This thesis presents the application of Aumann-Shapley value method to allocate various benefits. Thereafter, a fair compensation scheme is developed by stacking the components allocated to each DER. The proposed scheme is self-sufficient for utilities as the revenue used to compensate service providers is generated from the OPD service. Variations in network loading and the locations of DERs affect the amounts of compensation and produce locational signals. The scheme is economically viable for all DERs and is especially beneficial for DERs located on downstream buses or near peak loads. In addition, the deployment of batteries to store unscheduled energy is shown to be a viable alternative for DERs in advantageous locations.

In addition to analyzing the compensation mechanisms for DERs, this thesis analyses the design of procurement mechanisms used for centralized power plants. Multi-technology auctions are widely deployed to procure capacities from centralized power plants. Large-scale energy buyers plan the long-term deployment of these auctions to minimize support cost as well as achieve target capacities. However, the capacities allocated to various RE generation groups often deviate from the long-term target mix. Quantity-based support mechanisms are used to align the capacity allocation vector with target-mix. These support mechanisms have cost implications and impose a contradiction between the objectives of cost efficiency and achieving the target mix. This thesis presents a tier-price-based approach to address the cost implications of support mechanisms. The

proposed approach presents an analysis of the impact of support mechanism on quantity shifts and correlates it with procurement costs. The correlation shows that it is possible to align the capacity allocation with long-term target mix while avoiding additional costs. Implementing the proposed approach in the Indian scenario, the long-term deployment of the proposed approach shows the achievement of the long-term capacity mix with significant cost savings.

The methodologies proposed in this thesis have been thoroughly examined on test systems and realistic scenarios. The results and detailed discussions provide deeper insights into the nature of the problems addressed.

संक्षेप

यह शोध अक्षय ऊर्जा के समर्थन तंत्र से जुड़े तकनीकी और आर्थिक मुद्दों को संबोधित करता है। इन समर्थन तंत्र को अक्षय ऊर्जा में निवेश बढ़ाने के साथ-साथ उन से उत्पादित ऊर्जा के उत्पादन और खपत को बढ़ावा देने के लिए अपनाया जाता है। अक्षय ऊर्जा को बढ़ावा देने के अलावा, इन तंत्रों के पीछे डिजाइन उद्देश्य अक्षय ऊर्जा निवेशकों के पावर इंजेक्शन पैटर्न और निवेश निर्णयों को प्रभावित करता है। नतीजतन, इन समर्थन तंत्रों द्वारा संचालित कार्य बिजली प्रणाली के संचालन और योजना को प्रभावित करते हैं। इस थीसिस में किए गए शोध का उद्देश्य उनके प्रभाव का व्यापक रूप से अध्ययन करना और सुधार का सुझाव देना है। यह शोध प्रबंध दो प्रकार के समर्थन तंत्रों का विश्लेषण करता है:

वितरित ऊर्जा संसाधनों (डी. ई. आर.) के लिए क्षतिपूर्ति योजनाएं और केंद्रीकृत बिजली संयंत्रों के लिए खरीद तंत्र। डी. ई. आर. को प्रोत्साहित करने के लिए उपयोग की जाने वाली क्षतिपूर्ति योजनाएं उत्पादन-आधारित हैं और डी. ई. आर. को प्रणाली में अधिकतम उपलब्ध बिजली डालने के लिए प्रोत्साहित करती हैं। डी. ई. आर. की निरन्तर बढ़ते प्रवेश के साथ, यह अभ्यास बिजली प्रणाली संचालकों के लिए परिचालन चुनौतियों और प्रणाली डेवलपर्स के लिए सुदृढीकरण की जरूरतों को जन्म देता है। इसके विपरीत, प्रणाली की आवश्यकताओं के अनुसार उत्पन्न बिजली का इंजेक्शन विभिन्न बिजली प्रणाली संस्थाओं के लिए कई लाभ प्रदान कर सकता है, जैसे कि ओमिक हानि में कमी, वोल्टेज प्रोफाइल में सुधार, और सुदृढीकरण योजनाओं में स्थगित करना। लाभ बढ़ाने और चुनौतियों का समाधान करने के लिए, क्षतिपूर्ति योजनाओं पर फिर से विचार करने की आवश्यकता है। नए डिजाइनों को आवश्यकतानुसार बिजली भेजने के लिए सिस्टम ऑपरेटरों के साथ डी. ई. आर. के समन्वय को प्रोत्साहित करना चाहिए। ऐसी योजनाओं के डिजाइन में तीन महत्वपूर्ण चरण शामिल हैं: पहला, डी. ई. आर. के लिए प्रेषण अनुसूची का निर्धारण; दूसरा, डी. ई. आर. के समय निर्धारण के संचयी लाभों का आकलन; और तीसरा, निष्पक्षता और आर्थिक व्यवहार्यता की चिंताओं को पूरा करते हुए डी. ई. आर. को मुआवजा देना।

उपलब्ध शोध कार्य परिचालन प्राथमिकताओं को संतुष्ट करने के लिए डी. ई. आर. समय निर्धारण रणनीतियाँ प्रदान करते हैं। हालांकि, पावर सिस्टम ऑपरेटरों और सिस्टम डेवलपर्स के विशिष्ट उद्देश्यों को पूरा करने के लिए एक एकल शेड्यूलिंग रणनीति प्रदान करने में साहित्य का अभाव है। इस शोध प्रबंध ने एक अनुकूलन समस्या तैयार करके इस अंतर को संबोधित किया जो विभिन्न लक्ष्यों के साथ संरेखित होता है। परिसंपत्ति उपयोग को कम करने के डेवलपर्स के उद्देश्यों और बिजली प्रणाली के प्रदर्शन को बढ़ाने के ऑपरेटरों के उद्देश्यों को शाखा प्रवाह पर बिजली इंजेक्शन के प्रभाव का विश्लेषण करके संरेखित किया जाता है। एक चरण-विशिष्ट इष्टतम बिजली इंजेक्शन योजना प्रस्तावित की गई है। अधिकतम पावर इंजेक्शन पर प्रस्तावित इष्टतम पावर इंजेक्शन को अपनाने से कम नुकसान और परिसंपत्ति उपयोग होता है। एक संतुलित बिजली इंजेक्शन पर एक चरण-विशिष्ट अनुसूची को प्राथमिकता देना असंतुलन को नियंत्रित करके अतिरिक्त लाभ प्रदान करता है।

डी. ई. आर. को इष्टतम रूप से निर्धारित करने के अलावा, वितरण उपयोगिताओं को अपने कार्यों के सभी आर्थिक लाभों की पूरी तरह से मात्रा निर्धारित करनी चाहिए। साहित्य नुकसान में कमी के लाभों के संदर्भ में परिचालन लाभों की मात्रा निर्धारित करने के लिए विश्लेषणात्मक दृष्टिकोण प्रदान करता है। वोल्टेज असंतुलन को कम करने से प्राप्त परिचालन लाभों की मात्रा निर्धारित नहीं की गई है। इसके अलावा, कम परिसंपत्ति उपयोग के परिणामस्वरूप क्षमता स्थगन लाभों को पुनरावृत्ति विधियों का उपयोग करके निर्धारित किया गया है। विभिन्न लाभों को पूरी तरह से निर्धारित करने के लिए, यह शोध प्रबंध एक लाभ परिमाणीकरण पद्धति का प्रस्ताव करता है जो स्थानीय बिजली इंजेक्शन के कारण होने वाले शाखा-स्तरीय लाभों को माप सकता है।

ओपीडी कार्रवाई के लाभों की मात्रा निर्धारित करने के लिए प्रस्तावित कार्यप्रणाली को लागू करना दर्शाता है कि ओपीडी कार्रवाई अधिकतम बिजली इंजेक्शन द्वारा प्रदान किए गए लाभों की तुलना में बिजली प्रणाली उपयोगिताओं के लिए अधिक लाभ उत्पन्न करती है।

भले ही ओपीडी कार्य उच्च लाभ प्रदान करते हैं, मौजूदा उत्पादन-आधारित मुआवजा योजना अधिकतम बिजली इंजेक्शन के लिए अधिक भुगतान करती है। यह थीसिस इस विरोधाभास को हल करने के लिए ओपीडी सेवा के लिए एक क्षतिपूर्ति योजना प्रदान करता है। प्रस्तावित योजना के तहत दर्शन ओपीडी सेवाओं के आर्थिक लाभों का उपयोग करना और उन्हें व्यक्तिगत योगदान के अनुसार आवंटित करना है। डी. ई. आर. के योगदान के अनुसार लाभों के आवंटन के लिए संयुक्त-लागत आवंटन विधियों की आवश्यकता होती है। सहकारी लाभों के लिए व्यक्तिगत योगदान की पहचान करने में पार-गुणक शर्तों को अलग करना शामिल है और इसके साथ निष्पक्षता की चिंताएं जुड़ी हुई हैं। शेषली वैल्यू विधियों को निष्पक्षता की चिंताओं को संतुष्ट करने के लिए दिखाया गया है और नुकसान में कमी के लाभों को आवंटित करने का प्रस्ताव किया गया है। हालांकि, क्षमता स्थगन लाभ की गणना करने के लिए उपयोग की जाने वाली पुनरावृत्ति विधियां इस विधि के अनुप्रयोग को प्रतिबंधित करती हैं। यह थीसिस विभिन्न लाभों को आवंटित करने के लिए एकात्मक-भागीदारी-आधारित औमन-शेषली मूल्य विधि प्रस्तुत करता है। प्रत्येक डी. ई. आर. के लिए आवंटित घटकों का ढेर लगाने से एक उचित मुआवजा योजना को जन्म मिलता है। प्रस्तावित योजना उपयोगिताओं के लिए आत्मनिर्भर है, क्योंकि ओपीडी सेवा राजस्व सेवा प्रदाताओं को मुआवजा देता है और सभी डी. ई. आर. के लिए आर्थिक रूप से व्यवहार्य है। नेटवर्क लोडिंग और डी. ई. आर. के स्थानों में भिन्नताओं को पारिश्रमिक राशि को प्रभावित करने और स्थानीय संकेतों का उत्पादन करने के लिए दिखाया गया है। यह योजना विशेष रूप से डाउनस्ट्रीम बसों और निकट भार केंद्रों पर डी. ई. आर. के लिए फायदेमंद है। इसके अतिरिक्त, अनिर्धारित ऊर्जा को संग्रहीत करने के लिए बैटरियों को तैनात करना लाभप्रद स्थानों में डी. ई. आर. के लिए एक व्यवहार्य विकल्प साबित हुआ है।

बिजली प्रणाली के संचालन और योजना के सामने आने वाले तकनीकी और आर्थिक मुद्दों को संबोधित करने के अलावा, यह शोध प्रबंध बड़े पैमाने पर ऊर्जा खरीदारों की आर्थिक और योजना संबंधी चिंताओं पर केंद्रित है। ऊर्जा खरीदार केंद्रीकृत बिजली संयंत्रों से क्षमता प्राप्त करने और समर्थन लागत को कम करने के लिए बड़े पैमाने पर आरई क्षमता नीलामी का उपयोग करते हैं। ये नीलामियाँ कई पीढ़ी के समूहों के लिए खुली हैं और दीर्घकालिक लक्ष्य मिश्रण को प्राप्त करने के लिए बार-बार तैनात की जाती हैं। हालांकि, एक नीलामी में, विभिन्न आरई उत्पादन समूहों को आवंटित क्षमताएं अक्सर दीर्घकालिक लक्ष्य मिश्रण से गलत संरेखित होती हैं। मात्रा-आधारित समर्थन तंत्र का उपयोग लक्ष्य-मिश्रण के साथ क्षमता आवंटन वेक्टर को संरेखित करने के लिए किया जाता है। इन नीलामियों में तैनात मौजूदा समर्थन तंत्रों में लागत निहितार्थ हैं और ऊर्जा खरीदारों के दो उद्देश्यों का खंडन करते हैं: लागत दक्षता और लक्ष्य मिश्रण प्राप्त करना। यह थीसिस समर्थन तंत्र के लागत प्रभावों को संबोधित करने के लिए एक स्तरीय-मूल्य निर्धारण-आधारित दृष्टिकोण प्रस्तुत करता है। मात्रा में बदलाव पर समर्थन तंत्र के प्रभाव का विश्लेषण करने और इसे खरीद लागत के साथ सहसंबंधित करने से पता चलता है कि अतिरिक्त लागतों से बचते हुए क्षमता-आवंटन को संरेखित करना संभव है। भारतीय परिदृश्य में प्रस्तावित दृष्टिकोण को लागू करने से, प्रस्तावित दृष्टिकोण की दीर्घकालिक तैनाती से महत्वपूर्ण लागत बचत के साथ दीर्घकालिक क्षमता मिश्रण प्राप्त करने में मदद मिल सकती है।

इस थीसिस में प्रस्तावित कार्यप्रणाली की परीक्षण प्रणालियों और यथार्थवादी परिदृश्यों पर अच्छी तरह से जांच की गई है। परिणाम और विस्तृत चर्चाएँ संबोधित समस्याओं की प्रकृति में गहरी अंतर्दृष्टि प्रदान करती हैं।

Contents

CERTIFICATE	i
ACKNOWLEDGEMENTS	ii
ABSTRACT	iv
List of Figures	xv
List of Tables	xvii
List of Abbreviations	xviii
1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Motivation for present work	10
1.2.1 Analyzing the impact of scheduling DERs on system performance . . .	10
1.2.2 Quantifying benefits of scheduling distributed energy resources	10
1.2.3 Allocating benefits associated with optimal power dispatch among the DERs	11
1.2.4 Designing compensation mechanism for optimal power dispatch	11
1.2.5 Designing procurement mechanisms for achieving RE-capacity targets .	11
1.3 Research Objectives	12
1.4 Outline of the Thesis	12
2 Optimal Power Injection by Distributed Energy Resources	14
2.1 Introduction	14
2.2 Analyzing impact of power injection on system performance	15
2.2.1 Impact on line flows	16

2.2.2	Impact on voltage unbalance	18
2.3	Determining optimal power dispatch schedule	22
2.4	Results and discussions	25
2.4.1	Comparison of maximum and optimal power injection	26
2.4.2	Comparison of symmetric and phase-specific optimal power injection .	30
2.4.3	Comparison of advantages with different load types	31
2.5	Summary	34
3	Quantifying Benefits of Optimal Power Injection by Distributed Energy Resources	35
3.1	Introduction	35
3.2	Proposed Methodology	36
3.2.1	Quantification of capacity deferral benefit	36
3.2.2	Quantification of operational benefit	40
3.2.3	Energy purchase reduction benefit	42
3.3	Results and discussions	43
3.3.1	Comparison of different power injection scenarios	44
3.3.2	Utility benefits v/s payments: a viewpoint on existing support mechanism	47
3.4	Summary	47
4	Designing Compensation Scheme for Optimal Power Injection by Distributed Energy Resources	49
4.1	Introduction	49
4.2	Solution Concept	51
4.2.1	Shapley Value method	51
4.2.2	Aumann-Shapley Value Method	52
4.3	Methodology to allocate benefits	53
4.3.1	Allocation of capacity deferral benefit	53
4.3.2	Allocation of grid-operational benefits	55
4.3.3	Energy purchase reduction benefit	56
4.4	Proposed compensation scheme	57
4.5	Results and discussions	60
4.5.1	Factors governing compensation	61

4.5.2	Axioms of fairness	62
4.6	Economic Viability	63
4.6.1	Inverter-assisted solar PVs	65
4.6.2	BESS-integrated and inverter assisted solar PVs	66
4.7	Summary	70
5	Achieving Capacity Targets through Multi Technology RE Auctions	72
5.1	Introduction	72
5.2	Conceptualization	74
5.2.1	Tier-price-based approach	75
5.2.2	Quantity shifts caused by tier-pricing	76
5.3	Proposed methodology	77
5.3.1	Correlation between quantity-shifts and procurement costs	77
5.3.2	Optimal quantity shifts for maximum cost savings	78
5.3.3	Shifts for achieving target-mix with cost-savings	81
5.4	Case-studies	83
5.4.1	Comparison of various quantity shifts	84
5.4.2	Application of proposed approach in Indian Context	87
5.5	Summary	90
6	Conclusion	92
6.1	Summary of the major contributions	97
6.2	Future research directions	98
	References	100
	Appendices	105
A	Estimation of available capacity margin	106
A.1	For smart-inverter assisted Solar Photovoltaic resource	106
A.2	For Battery-integrated Solar PVs	108
B	System Data	111
B.1	IEEE 906 bus distribution network	111

B.2	IEEE Reliability test system	129
C	Backward Forward Sweep Method	132
C.1	Iterative procedure	132
	List of Publications	134
	Biodata	135

List of Figures

2.1	Illustration of power flow through a line section	15
2.2	Utilization of a three-phase asset in unbalanced scenario (a) without and (b) with phase-specific optimal power injection.	21
2.3	Coordination scheme between DERs and system operator	22
2.4	Variation in phase voltages at various buses in 14 bus network	28
2.5	Variation in phase voltages at various buses of IEEE 906 bus network	29
2.6	Variation in active power losses with increasing unbalance and different load types	32
2.7	Maximum voltage deviation in various power injection scenarios for different load types	33
3.1	Utilization of a three phase asset (a) without any power injection (b) with optimal power injection	37
3.2	(a) Reinforcement delay caused by reduced asset utilization (b) Capacity deferral benefits by reinforcement delay	38
3.3	Comparison of hourly (a) benefits and (b) payments made by various power injection scenarios	47
4.1	Block diagram illustration for the compensation scheme	57
4.2	Payments offered to various DERs at different hours	61
4.3	Fair allocation of deferred cost benefit among various DERs	62
4.4	(a) DER locations in network (b) percentage allocation of CDB to DERs	63
4.5	Cumulative payments and expenses of DERs during life cycle of Solar PVs	65
4.6	Schematic diagram of BESS-integrated and inverter-assisted Solar PV	66
4.7	(a) Maximum generated power and optimal dispatch power at different hours (b) Variation in state of charge in BESS 1, 2, and 3 at different hours	67
4.8	Resulting annual compensation offered to various DERs under different payment scenarios.	69
4.9	Cumulative expenses and payments for BESS-integrated solar PVs	70

5.1	Illustration of quantity shifts and price variations caused by Tier-pricing	76
5.2	LCOE and annual generation capabilities for various power plant projects	84
5.3	Capacity allocation obtained by various market clearing approaches	85
5.4	Variation of costs with quantity shift in favor of hydro group	86
5.5	Group-specific installed capacities in India by 2023 and planned targets for 2030.	87
5.6	Variation of unit energy cost obtained by approach 1, 2, and 3.	89
5.7	Resulting capacity mix and RMSE from target-mix using various approaches	90
A.1	Sequence diagram for charging BESS system during solar hours	109
A.2	Sequence diagram to provide OPD service during non-solar hours	109
B.1	Single line diagram of IEEE European network	112
B.2	Variation of network load at minute and hourly resolution	112

List of Tables

2.1	Specifications of DERs	26
2.2	Load details of 14-bus network	26
2.3	Resulting active and reactive power dispatch under Scenario 2 and 3	27
2.4	Nodal power injection under scenario 1 and 2 for hour 12, winter season	28
2.5	Load multipliers and network loads on phase a and b	30
2.6	Percentage reduction in losses under balanced and phase-specific power injection scenarios	31
2.7	Percentage Reduction in Losses with various load types	32
3.1	Various benefits obtained in scenario 1 and 2 on a representative winter day	44
3.2	Variation in yearly CDB with increase in DER penetration	46
4.1	Details of network load and DER generation at different hours	60
4.2	Expected payments in year 1 & 10 under various scenarios	65
4.3	Details of solar PVs and battery storage system	67
4.4	Details of various cost components involved in battery integrated DERs	69
5.1	Supply curve parameters and energy capacities of various technology-groups	84
5.2	Procurement cost obtained by various market clearing approaches	85
5.3	Resulting quantity shifts, price variations and savings obtained by approach 2 and 3	86
5.4	Details of capacity targets and supply curve parameters for various groups	88
5.5	Resulting auction sizes and procurement costs under approach 1, 2 and 3.	88
B.1	Line cost, capacity and impedance details for IEEE 906 bus network	113
B.2	Load data for IEEE 906 bus network	114
B.3	Line data for IEEE 906 bus network	115

B.4	Hourly peak load in percent of weekly peak	130
B.5	Daily peak load in percent of weekly peak	130
B.6	Weekly peak load in percent of annual peak	131
B.7	Different seasons and corresponding weeks	131

List of Abbreviations

ASV	Aumann-Shapley Value
BESS	Battery Energy Storage System
CDB	Capacity Deferral Benefit
CI	Constant current load
CP	Constant power load
CZ	Constant impedance load
DERs	Distributed Energy Resources
EPRB	Energy Purchase Reduction Benefit
LRB	Loss Reduction Benefit
OPD	Optimal Power Dispatch
PI	Performance Index
RE	Renewable energy
RMSE	Root Mean Square Error
REIA	Renewable Energy Implementing Agency
SV	Shapley Value
TP	Total participation
UP	Unitary Participation
VUF	Voltage Unbalance Factor