# OPTIMAL NODE DESIGN STRATEGIES FOR ENERGY HARVESTING WIRELESS SENSOR NETWORKS

**K KAUSHIK**

**Department of Electrical Engineering**
**Indian Institute of Technology Delhi**
**October 2018**

# OPTIMAL NODE DESIGN STRATEGIES
# FOR ENERGY HARVESTING
# WIRELESS SENSOR NETWORKS

*by*


K KAUSHIK

*Department of Electrical Engineering*


*Submitted*

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

*to the*

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI INDIA**

**OCTOBER 2018**

# Certificate

This is to certify that the dissertation entitled **Optimal Node Design Strategies for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks**, submitted by **Mr. K Kaushik**, a Research Scholar, in the *Department of Electrical Engineering*, *Indian Institute of Technology Delhi*, *New Delhi*, *India*, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of an original research work carried out by him under my supervision and guidance. The dissertation fulfills all requirements as per the regulations of this Institute and in my opinion has reached the standard needed for submission. Neither this dissertation nor any part of the research claims in the dissertation has been submitted for any degree or academic award elsewhere.

**Prof. Swades De**
(Supervisor)
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi, 110016, India.

# Acknowledgements

Most of the research work that I have carried out throughout my PhD journey has been experimental in nature. There was never a moment where I had to back out from fulfilling my dream of learning the theoretical concepts through their practical implementation in hardware. All this has been possible only due to the constant support and encouragement of my supervisor Prof. Swades De. I would like to thank him for his patience in revising all my papers countless times and, his constructive criticism for my personal and professional improvement. Without his invaluable advise and support it would not have been possible for me to complete this dissertation.

I take this opportunity to express my sincere thanks to Prof. Indra Narayan Kar, Prof. Shouri Chatterjee, and Prof. Kolin Paul for their valuable feedback during my end semester presentations. I would like to thank Prof. Kaushik R. Chowdhury, Prof. Wendi Heinzelman, Prof. Stefano Basagni, and Prof. Soumya Jana for their valuable discussions and suggestions for improving my research work.

I would like to thank all my fellow researchers of the Computer Networks Research Group, who made this journey a memorable one. Further, I would like to extend them my best wishes for their future endeavors.

I would also like to thank P.G. Section of IIT Delhi for their International travel grant support for attending IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications conference 2013.

I express my heartfelt thanks to my parents who have been a constant source of inspiration to me all along and their encouraging words made this endeavor possible. Finally, I would like to thank my family, friends, and all others whose names are not mentioned here but have helped me to accomplish this work.

**K Kaushik**

# Abstract

The first step towards reducing air pollution is to measure the pollution level frequently with a high spatial resolution. High-resolution spatio-temporal maps of air pollution aid in pinpointing the source of pollution and designing effective policies to reduce the pollution. However, as tremendous cost involved is in the set-up of a pollution monitoring station, its density is low. A potential solution is to complement the existing pollution monitoring stations with a densely deployment of low-cost, battery-powered air pollution monitoring wireless sensor nodes such that a fine-grained readings of pollution can be captured with good accuracy.

As the low-cost air pollution monitoring sensors are quite energy hungry, they drain the batteries of a node faster and thereby reduce the lifetime of the deployed wireless sensor network (WSN). Therefore, they need to be replenished frequently if they are expected to operate continuously. Out of the existing energy sources for harvesting energy, Radio Frequency (RF) energy does not depend on environmental factors and is available either from an ambient or a dedicated RF source on-demand. Significant energy of a node can be saved by employing an Integrated Data and Energy MULE (IDEM) to charge the nodes via a dedicated RF source and collect data from them directly. However, for planning the path of IDEM for an uninterrupted operation of the WSN, a critical task is to investigate the components of energy consumed by a node in different activities. To this end, an extensive study on the energy consumptions with a few chosen pollution sensor examples was conducted. Based on the energy consumption and rectification parameters, the required recharging periodicity is derived. After the results are quantified, avenues are presented by where the cost of an RF energy harvesting wireless sensor node and the IDEM cost can be reduced to aid the scalability of the WSN.

Due to the factors such as, upper limit on the RF transmit power, path loss, fading, and low RF-DC efficiency of harvester at low input RF powers, the amount of harvested power by a node is low. Therefore, IDEM takes a long time to charge a single node which may be in the order of a few 10's of minutes. This mandates us to use multiple such IDEM's to achieve a perpetual operation and thus increases the cost of deploying such a WSN. Methods to increase the RF transfer efficiency are needed in order to make RF energy transfer more attractive. One way to achieve this is by transferring the excess energy harvested by an intermediate node to charge a remote node faster through multiple hops. Energy gains that can be realized by this multi-hop energy transfer (MHET) scheme are

quantified through experimental studies. Furthermore, experiments are also performed to find the optimal position where the intermediate node has to be placed for realizing high gains in MHET. Finally, it is also shown that the energy gain obtained can be translated to energy transfer range extension.

An IDEM can serve a higher number of nodes in an IDEM-based WSN if node's energy last longer. To this effect, wake-up receiver (WuRx) is a promising hardware solution that extends the life of a sensor node by switching off its radio to reduce idle listening energy consumption. On this front, one aspect of the thesis is design of cost-effective and long range WuRx solutions for range-based wake-up (RW) as well as directed wake-up (DW). In particular, an RF energy harvesting wireless sensor node is considered and it is investigated how a low-cost WuRx can be built using an RF energy harvester available at the node. Experimental results show that the developed prototype can achieve a wake-up range of $1.16$ m with $+13$ dBm transmit power. Further, through empirical study it is shown that at $+30$ dBm transmit power the wake-up distance of the developed RW module is $> 9$ m. Additionally, high accuracy of DW is demonstrated by sending a 5-bit ID from a transmitter at a bit rate up to $33.33$ kbps. Finally, optimized WuRx designs are presented for RW and DW using Agilent advanced design system, which offer up to $5.69$ times higher wake-up range for RW and energy savings per bit of about $0.41$ mJ and $21.40$ nJ, respectively, at the transmitter and the sensor node in DW.

Although a sustainable node operation can be achieved by employing an RF Energy source, it is not cost-effective solution when there are multiple high energy consuming pollution sensors on-board. Since the solar energy has the highest density among other harvesting sources, it serves as a potential ambient energy source in such scenarios and also satisfies the high energy demand posed by applications with higher Quality of Service (QoS) requirements. To address this requirement the practical feasibility of sustainable green sensor network is investigated with solar-powered nodes. On this front, simple yet efficient analytical circuit model is proposed for solar panel assisted supercapacitor charging, and statistical model is developed for characterizing the solar intensity distribution. Combining these circuit and statistical models, a novel solar charging rate distribution is derived for the solar-powered supercapacitor. The derived solar charging rate distribution is used to investigate the energy outage probability of a sensor node for a given sensing rate. Further, the proposed models are used to estimate the practical supercapacitor and the required solar panel sizes to ensure sustainability of sensor node operation at different geographical locations with varying sensing rate.

# सार

वायु प्रदूषण को कम करने की दिशा में पहला कदम उच्च स्थानिक संकल्प के साथ प्रदूषण स्तर को अक्सर मापना है। प्रदूषण के स्रोत को इंगित करने और प्रदूषण को कम करने के लिए प्रभावी नीतियों को डिजाइन करने में वायु प्रदूषण सहायता के उच्च-रिज़ॉल्यूशन स्पैतिओ-टेम्पोरल मानचित्र। हालांकि, प्रदूषण निगरानी स्टेशन की स्थापना में जबरदस्त लागत शामिल है, इसकी घनत्व कम है। संभावित प्रदूषण निगरानी स्टेशनों को कम लागत वाली, बैटरी संचालित वायु प्रदूषण निगरानी वायरलेस सेंसर नोड्स की घनी तैनाती के साथ मौजूदा प्रदूषण निगरानी स्टेशनों का पूरक करना है, ताकि प्रदूषण के सुगंधित रीडिंग को अच्छी सटीकता से पकड़ा जा सके।

चूंकि कम लागत वाली वायु प्रदूषण निगरानी सेंसर काफी भूख लगी है, इसलिए वे नोड की बैटरी को तेज़ी से निकाल देते हैं और इस तरह तैनात वायरलेस सेंसर नेटवर्क (डब्लूएसएन) के जीवनकाल को कम करते हैं। इसलिए, अगर उन्हें लगातार काम करने की उम्मीद है तो उन्हें अक्सर भरने की जरूरत है। कटाई ऊर्जा के लिए मौजूदा ऊर्जा स्रोतों में से, रेडियो फ्रीक्वेंसी (आरएफ) ऊर्जा पर्यावरणीय कारकों पर निर्भर नहीं है और मांग या मांग पर एक समर्पित आरएफ स्रोत से उपलब्ध है। एक नोड की महत्वपूर्ण ऊर्जा  एक समर्पित डेटा और ऊर्जा एमयूएलई (आईडीईएम) को एक समर्पित आरएफ स्रोत के माध्यम से नोड्स चार्ज करने और सीधे डेटा एकत्रित करके सहेजा जा सकता है। हालांकि, डब्लूएसएन के एक निर्बाध संचालन के लिए आईडीईएम के पथ की योजना बनाने के लिए, एक महत्वपूर्ण कार्य विभिन्न गतिविधियों में नोड द्वारा खपत ऊर्जा के घटकों की जांच करना है। इस अंत में, कुछ चयनित प्रदूषण सेंसर उदाहरणों के साथ ऊर्जा खपत पर एक व्यापक अध्ययन आयोजित किया गया था। ऊर्जा खपत और सुधार पैरामीटर के आधार पर, आवश्यक रिचार्जिंग आवधिकता व्युत्पन्न होती है। परिणाम प्रमाणित होने के बाद, रास्ते  जहां आरएफ ऊर्जा कटाई वायरलेस सेंसर नोड की लागत और आईडीईएम लागत की लागत डब्लूएसएन की स्केलेबिलिटी की सहायता के लिए कम किया जा सकता है।

कम इनपुट आरएफ शक्तियों पर आरएफ ट्रांसमिट पावर, पथ हानि, लुप्तप्राय, और कम आरएफ-डीसी दक्षता पर उच्च सीमा जैसे कारकों के कारण, नोड द्वारा कटाई की शक्ति कम होती है। इसलिए, आईडीईएम को एक नोड चार्ज करने में काफी समय लगता है जो कुछ 10 मिनट के क्रम में हो सकता है। यह हमें एक सतत संचालन प्राप्त करने के लिए कई ऐसे आईडीईएम का उपयोग करने के लिए अनिवार्य करता है और इस प्रकार इस तरह के डब्लूएसएन को तैनात करने की लागत में वृद्धि करता है। आरएफ ऊर्जा हस्तांतरण को और अधिक आकर्षक बनाने के लिए आरएफ हस्तांतरण दक्षता बढ़ाने के तरीके आवश्यक हैं। इसे प्राप्त करने का एक तरीका अतिरिक्त ऊर्जा को स्थानांतरित करना है  कई हॉप के माध्यम से एक दूरस्थ नोड को तेजी से चार्ज करने के लिए एक मध्यवर्ती नोड द्वारा कटाई। ऊर्जा लाभ जो इस बहु-हॉप ऊर्जा हस्तांतरण (एमएचईटी) योजना द्वारा महसूस किया जा सकता है प्रयोगात्मक अध्ययन के माध्यम से मात्राबद्ध किया जाता है। इसके अलावा, इष्टतम स्थिति को खोजने के लिए प्रयोग भी किए जाते हैं जहां एमएचईटी में उच्च लाभ को महसूस करने के लिए इंटरमीडिएट नोड रखा जाना चाहिए। अंत में, यह भी दिखाया गया है कि प्राप्त ऊर्जा लाभ का अनुवाद ऊर्जा हस्तांतरण सीमा विस्तार में किया जा सकता है।

आईडीईएम आधारित डब्लूएसएन में नोड की उच्च संख्या में नोड्स की सेवा कर सकते हैं ऊर्जा लंबे समय तक चलती है। इस प्रभाव के लिए, वेक-अप रिसीवर (वूआरएक्स) एक आशाजनक हार्डवेयर समाधान है जो निष्क्रिय रेडियो ऊर्जा खपत को कम करने के लिए अपने रेडियो को बंद करके एक सेंसर नोड का जीवन बढ़ाता है। इस मोर्चे पर, थीसिस का एक पहलू रेंज-आधारित वेक-अप (आरडब्ल्यू) के साथ-साथ निर्देशित वेक-अप (डीडब्लू) के लिए लागत प्रभावी और लंबी दूरी के वूआरएक्स समाधानों का डिज़ाइन है। विशेष रूप से, एक आरएफ ऊर्जा कटाई वायरलेस सेंसर नोड माना जाता है और यह जांच की जाती है कि नोड पर उपलब्ध आरएफ ऊर्जा हारवेस्टर का उपयोग करके कम लागत वाला वूआरएक्स कैसे बनाया जा सकता है। प्रायोगिक परिणामों से पता चलता है कि विकसित प्रोटोटाइप जागृत हो सकता है +13 डीबीएम ट्रांसमिट पावर के साथ 1.16 मीटर की रेंज। इसके अलावा, अनुभवजन्य अध्ययन के माध्यम से यह दिखाया गया है कि +30 डीबीएम ट्रांसमिट शक्ति पर विकसित आरडब्ल्यू मॉड्यूल की जागृत दूरी> 9 मीटर है। इसके अतिरिक्त, डीडब्ल्यू की उच्च सटीकता का प्रदर्शन ट्रांसमीटर से 5-बिट आईडी को 33.33 केबीपीएस तक थोड़ा सा दर पर भेजकर किया जाता है। अंत में, ऑप्टिमाइज्ड वूआरएक्स डिज़ाइन आरडब्ल्यू और डीडब्ल्यू के लिए एजिलेंट एडवांस्ड डिज़ाइन सिस्टम का उपयोग करके प्रस्तुत किए जाते हैं, जो ट्रांसमीटर पर क्रमश: 0.41 एमजे और 21.40 एनजे प्रति आरडब्ल्यूड ऊर्जा बचत के लिए 5.69 गुना अधिक जागने की रेंज प्रदान करते हैं। डीडब्ल्यू में सेंसर नोड।

हालांकि आरएफ एनर्जी स्रोत को नियोजित करके एक टिकाऊ नोड ऑपरेशन हासिल किया जा सकता है, लेकिन यह लागत प्रभावी समाधान नहीं है जब बोर्ड पर कई उच्च ऊर्जा उपभोग प्रदूषण सेंसर होते हैं। चूंकि सौर ऊर्जा अन्य कटाई स्रोतों के बीच उच्चतम घनत्व है, इसलिए यह ऐसे परिदृश्यों में संभावित परिवेश ऊर्जा स्रोत के रूप में कार्य करता है और उच्च गुणवत्ता की सेवा (क्यूओएस) आवश्यकताओं के साथ अनुप्रयोगों द्वारा उत्पन्न उच्च ऊर्जा मांग को भी पूरा करता है। इस आवश्यकता को हल करने के लिए टिकाऊ हरे सेंसर नेटवर्क की व्यावहारिक व्यवहार्यता की जांच सौर-संचालित नोड्स के साथ की जाती है। इस मोर्चे पर, अभी तक सरल सौर पैनल सहायक सुपरकेसिसीटर चार्जिंग के लिए कुशल विश्लेषणात्मक सर्किट मॉडल का प्रस्ताव है, और सौर मॉडल वितरण की विशेषता के लिए सांख्यिकीय मॉडल विकसित किया गया है। इन सर्किट और सांख्यिकीय मॉडल का मिश्रण, सौर ऊर्जा संचालित सुपरकेपसिटर के लिए एक उपन्यास सौर चार्जिंग दर वितरण प्राप्त किया गया है। व्युत्पन्न सौर चार्जिंग दर वितरण का उपयोग किसी दिए गए सेंसिंग के लिए सेंसर नोड की ऊर्जा आउटेज संभावना की जांच के लिए किया जाता है मूल्यांकन करें। इसके अलावा, प्रस्तावित मॉडल का प्रयोग व्यावहारिक सुपरकेसिसीटर और आवश्यक सौर पैनल आकार का अनुमान लगाने के लिए किया जाता है ताकि अलग-अलग भौगोलिक स्थानों पर सेंसर नोड ऑपरेशन की स्थिरता सुनिश्चित हो सके।

# Contents

# List of Figures

# List of Tables

# List of Acronyms

| | |
|---|---|
| ABC | Ambient Backscatter Communication |
| ACK | Acknowledgment |
| ADC | Analog to Digital Converter |
| ASIC | Application Specific IC |
| BMAC | Berkeley MAC |
| BTS | Base Transceiver Station |
| CDF | Cummulative Distribution Function |
| $CH_4$ | Methane |
| CO | Carbon Monoxide |
| $CO_2$ | Carbon Dioxide |
| CPCB | Central Pollution Control Board |
| CPU | Central Processing Unit |
| DC | Direct Current |
| DET | Direct Energy Transfer |
| DW | Directed Wake-up |
| EH | Energy Harvesting |
| EIRP | Effective Isotropic Transmit Power |
| ET | Energy Transfer |
| GDP | Gross Domestic Product |
| IC | Integrated Circuit |
| ID | Identity |
| IDEM | Integrated Data and Energy MULE |
| LAN | Local Access Network |
| LEACH | Low Energy Adaptive Clustering Hirearchy |
| LOS | Line of Sight |

| | |
|---|---|
| LPM1 | Low Power Mode 1 |
| LPM3 | Low Power Mode 3 |
| MAC | Medium Access Control |
| MCU | Micro Controller Unit |
| MHET | Multi Hop Energy Transfer |
| MPER | Multi Path Energy Routing |
| MULE | Mobile Ubiquitous LAN Extension |
| NAAQS | National Ambient Air Quality Standards |
| $NH_3$ | Ammonia |
| $NO_2$ | Nitrogen Dioxide |
| NREL | National Renewable Energy Labaratory |
| OOK | On Off Keying |
| QoS | Quality of Service |
| PDF | Probability Density Function |
| PWN | Perpetual Wireless Network |
| QoS | Quality of Service |
| WSN | Wireless Sensor Network |
| REACH | Range Enhancing Energy Harvester |
| RF | Radio Frequency |
| RFEH | Radio Frequency Energy Harvester |
| RFET | Radio Frequency Energy Transfer |
| RFID | Radio Frequency Identity |
| RMSE | Root Mean Square Error |
| RW | Range-based Wake-up |
| RZ | Return to Zero |
| SMAC | Synchronous MAC |
| STC | Standard Testing Conditions |
| TI | Texas Instruments |
| VOC | Volatile Organic Compounds |
| WARP | Wireless Ambient Radio Power |
| WISP | Wireless Identification and Sensing Platform |
| WHO | World Health Organisation |
| WuRx | Wake-up Receiver |
| WuTx | Wake-up Transmitter |
| WSN | Wireless Sensor Network |

# List of Symbols

| | |
|---|---|
| $V_{\text{int}}^{\text{min}}$ | Minimum interrupt voltage |
| $V_{\text{out}}^{\text{DC}}$ | Output voltage of RFEH |
| $P_{\text{r}}^{\text{min}}$ | Minimum input RF power for interrupt detection |
| $T_b$ | Duration of one bit |
| $N$ | Length of node ID |
| $V_{\text{cc}}$ | Supply voltage of MCU |
| $V_{\text{mote}}$ | Mote Supply Voltage |
| $V_{\text{int}}^{\text{min, TI}}$ | Minimum interrupt voltage needed by TI-mote |
| $I_{\text{int}}$ | Current consumed by interrupt pin |
| $P_{\text{r}}^{\text{min, TI}}$ | Minimum input RF power for interrupt detection on TI-mote |
| $P_{\text{r}}^{\text{min, W}}$ | Minimum input RF power for interrupt detection on Waspmote |
| $V_{\text{int}}^{\text{min, W}}$ | Minimum interrupt voltage required by Waspmote |
| $\lambda$ | Wavelength |
| $P_{\text{t}}$ | Power Transmitted |
| $P_{\text{r}}$ | Power Received |
| $G_{\text{t}}$ | Transmitter antenna gain |
| $G_{\text{r}}$ | Receiver antenna gain |
| $V_{\text{mote}}^{\text{rec,l}}$ | lower limit of recommended operating voltage of mote |
| $V_{\text{mote}}^{\text{rec,u}}$ | upper limit of recommended operating voltage of mote |
| $R_{SET}$ | Configuration Resistor |
| $R_{on}$ | On resistance of electronic switch |
| $R_{SET}^{W}$ | Configuration resistor for wake-up operation |
| $R_{SET}^{C}$ | Configuration resistor for charging operation |

| | |
|---|---|
| $R_{pd}$ | Pulldown resistor |
| $C_{\text{stage}}$ | Stage capacitor |
| $R_l$ | Load resistor |
| $C_m$ | Matching circuit capacitor |
| $L_m$ | Matching circuit inductor |
| $t_{\text{rise}}$ | Rise time |
| $t_{\text{fall}}$ | Fall time |
| $t_{\text{detect}}$ | Interrupt detection time |
| $D_1$ | External diode |
| $D_2$ | Internal diode |
| $D_c$ | Sensing duty-cycle |
| $N_{sn}$ | Number of on-board sensors |
| $r_s$ | Sensing rate in samples per day |
| $t_r^{N_{sn}}$ | Sum of response times of $N_{sn}$ sensors |
| $t_w$ | time for logging one sensor sample |
| $t_d$ | Duration of a day in seconds |
| $P_{cons}^{avg}$ | Average power consumption of a sensor node |
| $f_{ent}$ | Frequency of arrival of mobile entity |
| $P_{se}^{N_{sn}}$ | Average power consumption for $N_{sn}$ sensors during sensing |
| $P_w$ | Average power consumption during data logging |
| $P_{sl}$ | Average power consumption during sleep state |
| $P_o$ | Average power consumption during communication |
| $t_o$ | Average time for communication |
| $G$ | Solar Intensity |
| $N_S$ | Number of series connected solar cells |
| $R_S$ | Series resistance |
| $R_S^{STC}$ | Series resistance at STC |
| $R_P$ | Shunt Resistance |
| $R_P^{STC}$ | Shunt Resistance at STC |
| $I_M$ | Output solar panel current |
| $V_M$ | Output solar panel voltage |
| $\mathit{\Gamma}$ | Solar charging rate |

| | |
|---|---|
| $\mathit{\Gamma}_a$ | Solar charging rate for approximate solar panel model |
| $\mathit{\Gamma}_p$ | Solar charging rate for practical solar panel model |
| $p_{out}$ | energy outage probability |
| $C$ | Supercapacitor value |
| $V_x^{ext}$ | Cut-off voltage for $D_1$ |
| $V_x^{int}$ | Cut-off voltage for $D_2$ |
| $T$ | Solar cell temperature in kelvin |
| $T^{STC}$ | Solar cell temperature at STC in kelvin |
| $V_{OC}$ | Open circuit voltage |
| $I_{SC}$ | Short circuit current |
| $V_{mp}$ | Voltage at maximum power point |
| $I_{mp}$ | Current at maximum power point |
| $k$ | Boltzmann's constant |
| $q$ | Charge of electron |
| $I_0$ | Reverse saturation current |
| $I_0^{STC}$ | Reverse saturation current at STC |
| $n$ | Ideality factor |
| $n^{STC}$ | Ideality factor at STC |
| $I_{irr}$ | Solar current |
| $I_{irr}^{STC}$ | Solar current at STC |
| $\alpha_T^{'}$ | Relative temperature coefficient of $I_{SC}$ |
| $E_g$ | Band gap energy |
| $V_C^{\max}$ | Maximum charging voltage of supercapacitor |
| $f_G^{pol}$ | PDF of G |
| $m$ | order of polynomial function |
| $q_i$ | $i^{th}$ coefficient of polynomial |
| $V_{res}$ | Residual voltage of supercapacitor |
| $F_{\mathit{\Gamma}_a}$ | CDF of $\mathit{\Gamma}_a$ |
| $F_{\mathit{\Gamma}_p}$ | CDF of $\mathit{\Gamma}_p$ |
| $F_G$ | CDF of $G$ |
| $t$ | dummy variable for time |

| | |
|---|---|
| $V_{load}^{\max}$ | Maximum operable voltage of load |
| $V_{load}^{\min}$ | Minimum operable voltage of load |
| $V_C^{\max}$ | Maximum charging voltage of supercapacitor |
| $V_C^{\min}$ | Minimum charging voltage of supercapacitor |
| $G^{\max}$ | Maximum solar intensity |
| $N_S^p$ | $N_S$ for practical solar panel model |
| $N_S^a$ | $N_S$ for approximate solar panel model |
| $C_1$ | Supercapacitor size for storing excess energy |
| $t_{\text{start}}$ | $t$ at start of daylight time |
| $t_{\text{end}}$ | $t$ at end of daylight time |
| $C_1^u$ | Upper bound of $C_1$ |
| $C_1^l$ | Lower bound of $C_1$ |
| $C_2$ | supercapacitor size to support $P_{cons}^{avg}$ during non-sunlight hours |
| $V_C$ | supercapacitor voltage |