# INTELLIGENT CONTROL OF GRID INTERFACED AND OFF-GRID SOLAR PV SYSTEMS

**VEDANTHAM LAKSHMI SRINIVAS**

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

**JANUARY 2020**

# INTELLIGENT CONTROL OF GRID INTERFACED AND OFF-GRID SOLAR PV SYSTEMS

*by*

**VEDANTHAM LAKSHMI SRINIVAS**

**Department of Electrical Engineering**

**Submitted**

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

**to the**

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**JANUARY 2020**

# CERTIFICATE

It is certified that the thesis entitled "**Intelligent Control of Grid-Interfaced and Off-Grid Solar PV Systems**," being submitted by **Mr. Vedantham Lakshmi Srinivas** for award of the degree of **Doctor of Philosophy** in the Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, is a record of the student work carried out by him under my supervision and guidance. The matter embodied in this thesis has not been submitted for award of any other degree or diploma.

**(Prof. Bhim Singh)**
**Department of Electrical Engineering**
**Indian Institute of Technology Delhi**
**Hauz Khas, New Delhi-110016, India**

**(Prof. Sukumar Mishra)**
**Department of Electrical Engineering**
**Indian Institute of Technology Delhi**
**Hauz Khas, New Delhi-110016, India**

# ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my deepest gratitude and indebtedness to **Prof. Bhim Singh** and **Prof. Sukumar Mishra** for providing me guidance and constant supervision to carry out the Ph.D. work. Working under him has been a wonderful experience, which has provided a deep insight to the world of research. Determination, dedication, innovativeness, resourcefulness and discipline of **Prof. Bhim Singh** and **Prof. Sukumar Mishra** have been the inspiration for me to complete this work. Their consistent encouragement, continuous monitoring and commitments to excellence have always motivated me to improve my work and use the best of my capabilities. Due to their blessing I have earned various experiences other than research which will help me throughout my life.

My sincere thanks and deep gratitude are to **Prof. G. Bhuvaneswari**, **Prof. N. Senroy** and **Dr. Ashu Verma**, all SRC members for their valuable guidance and consistent support during my research work.

I wish to convey my sincere thanks to **Prof. Bhim Singh**, **Prof. Sukumar Mishra**, **Prof. A. R. Abhayankar**, **Prof. B. K. Panigrahi**, **Prof. N. Senroy, Dr. Shubhendu Bhasin** and **Prof. P.R. Bijwe** for their valuable inputs during my course work which made the foundation for my research work. Moreover, my sincere thanks and deep gratitude are to **Prof. Bikash Pal, Prof. Chandan Chakraborty, Prof. Lie Xu**, **Prof. H. M. Suryawanshi** and **Prof. Vishal Verma** for their valuable support and guidance during collaborative work under “Indo-UK, RESCUES (Reliable and Efficient System for Community Energy Solutions)” and “Indo-UK, UKICERI (United Kingdom India Clean Energy Research Initiative)” projects. I am grateful to **IIT Delhi** for providing me the research facilities. I would wish to express my sincere gratitude to **Prof. G.**

**Bhuvaneswari**, in-charge, PG Machine Lab., for providing me immense facilities to carry out experimental work. Moreover, I express my thanks to **Dr. A. P. Prathosh** for valuable guidance at different times for collaboration work. Thanks are due to Sh. Srichand, Sh. Puran Singh, Sh. Jagbir Singh, Sh. Satey Singh Negi of PG Machines Lab, UG Machines Lab and Power Electronics Lab., IIT Delhi for providing me the facilities and assistance during this work.

I would like to offer my sincere thanks to Dr. Shailendra Dwivedi who suggested me to pursue Ph.D. with Prof. Bhim Singh. Moreover, I would like to thank all my seniors, Dr. Shailendra Kumar, Dr. Nishant Kumar, Dr. Ikhlaq Hussain, Dr. Aniket Anand, Dr. N. K. Swami Naidu and Dr. Rajan Sonkar to motivate me in the starting of my research work. I would like to use this opportunity to thank Dr. Sachin Devassy, who has constantly helped me on all technical and non-technical issues. My sincere thanks to Mr. Priynak Mukeshkumar Shah and Mr Abdul Saleem Mir for co-operation and informal support in pursuing this research work.

Moreover, I would like to thank Mr. Anshul Varshney, Mr. Anjanee Mishra, Mr. Deepu Vijay, Mr. Shadab Murshid, Mr. Piyush Kant, Mr. Saurabh Shukla, Mr Shubam Sundeep, Mr Rakesh Panda, Mr. Aryadip and all PG machines lab group for their valuable support. How could I forget my room mates Mr. Varun Kumar Gupta, Mr. Jayanth Reddy Danda, Mr. Pavitra Kumar, Mr. Manishankar, Mr. Baljender Singh, Mr. Suryansh Jasuja and Mr Shivam who supported and inspired me during my stay in Delhi.

I would also like to thank Mr. Satish, Mr. Yatindra, Mr. Narendra, Mr. Sandeep and all other electrical engineering office staff for being supportive throughout. I am likewise thankful to those who have directly or indirectly helped me to finish my dissertation study.

Moreover, I would like to thank the **Ministry of Human Resource Development (MHRD)**, India for financial support during this research work.

I would like to thank my mother, **Mrs. V. Lalitha**, my father **Mr. V. Lakshmidhar** and my grandfather **Mr. V Lakshmipathi** for their dreams, blessings and constant encouragement. Moreover, I would like to thank all my family members for giving me the inner strength and wholehearted support. I declare that the prayers and blessings of my spiritual master, as the one and only key factor that contributed to all my achievements. I am beholden to almighty lord Krishna for His blessings to help me to raise my academic level to this stage, with different arrangements. I pray for His benediction in my future endeavors. His blessings may be showered on me for strength, wisdom and determination to achieve in future.

**Dated:**

**Vedantham Lakshmi Srinivas**

# ABSTRACT

Rapid increasing trend of electric energy demand in the world and depletion of fossil fuel reserves motivate power generation from renewable energy sources. The renewable energy sources based distributed generation system contributes a minimization of greenhouse gas emissions and environmental impacts caused thereby. For this reason, renewable energy systems have been promoted worldwide to address the issues of energy poverty, pollution and climate change. An increased dependence on renewable energy resources is exhibited in recent years. Over 13.5% of global energy demand at present is met through renewable energy sources. Solar energy is an important renewable energy source that is expected to play a significant role in the future energy supply and consequently, solar photovoltaic based renewable energy system has emerged as a prominent contender.

The growing interest has been exhibited in grid integrated PV systems and also off-grid systems. Several issues are associated with operation of solar PV systems in grid-interfaced and off-grid operational modes. Firstly, the use of nonlinear loads in power conversion devices as lighting, medical equipment and electric traction has increased the concerns to maintain power quality in the distribution network. These nonlinear loads introduce the harmonics current which lead to reduced life and mal-operation of the power devices. Secondly, the load side neutral currents happen to cause the grid neutral current flow, thereby obstructing the general safety to personnel and the equipment. Thirdly, the leakage currents caused by the parasitic capacitance between the solar PV array and the ground, reduce the life-span of the solar PV array and cause safety issues to the operating personnel. Besides these, the grid integration of inertia-less solar PV system cannot support frequency regulation in the system. Moreover, the uninterrupted

operation of solar PV system under grid-side faults and sensor malfunctioning events is desired. Since the power electronic technology plays a major role, the research is focused on developing intelligent control techniques in addressing the aforementioned issues.

This research work aims at development and implementation of intelligent control strategies to address various challenges faced in three-phase grid-interfaced and off-grid solar photovoltaic systems. The strategies developed are simulated in MATLAB based environment for successful operation, and the laboratory prototypes are built to validate the simulation results through various experiments.

This research work mainly focusses on the solar PV systems connected in the distribution network. The different problems addressed in this work are classified as- (i) power quality improvement in three phase grid interfaced solar PV system under weak distribution grids (ii) low-voltage ride-through strategy in double stage solar PV system enabling load compensation capabilities (iii) leakage current suppression in grid-interfaced transformer-less PV system with power quality improvement features (iv) Inertia emulated solar PV system and its seamless transition under unintentional islanding events (v) control design for resilient operation of solar PV system under sensor malfunctioning events and cyber-attacks. In case of two-stage PV system, the first stage is a boost converter which serves for MPPT (Maximum Power Point Tracking) and the second stage is a grid tied VSC (Voltage Source Converter).

Initially, a methodology for three-phase grid-interfaced two-stage solar PV system for grid-currents balancing, grid harmonic-currents mitigation and reactive-power compensation under abnormal grid scenarios is contemplated. This system also ensures crest power extraction, neutral current compensation capability, VSC loss minimization, even during distorted grid voltages that occur at far radial ends in the distribution system. Then after, a low-voltage ride-through method for double stage solar PV array system is proposed which enables inherent VSC overcurrent protection and supplies reactive power compensation as per revised grid code. A methodology for leakage current elimination in two-stage PV system is then developed, to improve the life-span of a solar PV array system, without compromising the power quality improvement features such as grid-currents balancing, grid harmonic-currents mitigation and reactive-power compensation. Then after, a generalized predictive control based harmonic-voltage controller for three-phase grid-interfaced and off-grid distributed generation system. A minimization criterion is used in generalized predictive controller to achieve accurate output voltage tracking performance and flexibly control the output harmonic voltage, and thereby, the harmonic currents entering the grid, are regulated in grid interfaced operation. Moreover, a method for seamless transition of a distributed generation source based virtual synchronous generator is investigated, where the seamless transition is realized without any need for separate synchronizing tools or separate islanding detection algorithms. It inherits the grid-synchronization and islanding detection within itself, without dependency on the signal from the dedicated synchronization units. The system is not prone to delays in islanding detection during unintentional islanding events. Finally, a methodology is developed for uninterrupted operation of grid-interfaced solar PV system, which provides resilient operation under current-sensor malfunctioning events and various false-data injections. This control technique effectively identifies the malfunction/attack signal and generates corrective action. The performance evaluation of different aforementioned methodologies has been carried out under practical operating conditions. This work is expected to provide a good exposure to develop resilient solar PV systems in distribution network, with multifunctional capabilities.

# सार

दुनिया में इलेक्ट्रिक एनर्जी डिमांड का तेजी से बढ़ता चलन और जीवाश्म ईंधन के भंडार में कमी बिजली उत्पादन को अक्षय ऊर्जा स्रोतों से प्रेरित करती है। वितरित ऊर्जा स्रोत आधारित अक्षय ऊर्जा स्रोत ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन और पर्यावरणीय प्रभावों को कम करने में योगदान देता है। इस कारण से, ऊर्जा गरीबी, प्रदूषण और जलवायु परिवर्तन के मुद्दों के समाधान के लिए दुनिया भर में नवीकरणीय ऊर्जा प्रणालियों को बढ़ावा दिया गया है। नवीकरणीय ऊर्जा संसाधनों पर एक बढ़ी हुई निर्भरता हाल के वर्षों में प्रदर्शित की गई है। वर्तमान में वैश्विक ऊर्जा मांग का 13.5% से अधिक नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों के माध्यम से पूरा किया जाता है। सौर ऊर्जा एक महत्वपूर्ण नवीकरणीय ऊर्जा स्रोत है जो भविष्य की ऊर्जा आपूर्ति में महत्वपूर्ण भूमिका निभाने की उम्मीद करता है और परिणामस्वरूप, सौर फोटोवोल्टिक आधारित नवीकरणीय ऊर्जा प्रणाली एक प्रमुख दावेदार के रूप में उभरा है।

ग्रिड इंटिग्रेटेड पीवी सिस्टम और ऑफ-ग्रिड सिस्टम में बढ़ती रुचि को प्रदर्शित किया गया है। ग्रिड-इंटरफ़ेड और ऑफ-ग्रिड परिचालन मोड में सौर पीवी सिस्टम के संचालन के साथ कई मुद्दे जुड़े हुए हैं। सबसे पहले, बिजली रूपांतरण उपकरणों में प्रकाश, चिकित्सा उपकरण और बिजली कर्षण के रूप में नॉनलाइनियर लोड के उपयोग ने वितरण नेटवर्क में बिजली की गुणवत्ता को बनाए रखने के लिए चिंताओं को बढ़ा दिया है। ये नॉनलाइनियर लोड हार्मोनिक्स करंट का परिचय देते हैं जिससे जीवन में कमी आती है और बिजली उपकरणों का संचालन होता है। दूसरे, लोड साइड न्यूट्रल धाराएं ग्रिड न्यूट्रल करंट प्रवाह का कारण बनती हैं, जिससे कर्मियों और उपकरणों को सामान्य सुरक्षा बाधित होती है। तीसरा, सौर पीवी सरणी और जमीन के बीच परजीवी समाई के कारण रिसाव रिसाव, सौर पीवी सरणी के जीवन-काल को कम करता है और परिचालन कर्मियों को सुरक्षा के मुद्दों का कारण बनता है। इन के अलावा, जड़ता-कम सौर

पीवी प्रणाली का ग्रिड एकीकरण सिस्टम में आवृत्ति विनियमन का समर्थन नहीं कर सकता है। इसके अलावा, ग्रिड-साइड दोष और सेंसर की खराबी के तहत सौर पीवी प्रणाली का निर्बाध संचालन वांछित है। चूँकि पावर इलेक्ट्रॉनिक तकनीक एक प्रमुख भूमिका निभाती है, इसलिए अनुसंधान उपरोक्त मुद्दों को संबोधित करने में बुद्धिमान नियंत्रण तकनीकों को विकसित करने पर केंद्रित है।

इस शोध कार्य का उद्देश्य तीन चरण ग्रिड-बाधित और ऑफ-ग्रिड सौर फोटोवोल्टिक प्रणालियों में आने वाली विभिन्न चुनौतियों का सामना करने के लिए बुद्धिमान नियंत्रण रणनीतियों के विकास और कार्यान्वयन के लिए है। विकसित की गई रणनीतियों को सफल संचालन के लिए MATLAB आधारित वातावरण में सिम्युलेटेड किया जाता है, और विभिन्न प्रयोगों के साथ सिमुलेशन परिणाम को मान्य करने के लिए प्रयोगशाला प्रोटोटाइप का निर्माण किया जाता है।

यह शोध कार्य मुख्य रूप से वितरण नेटवर्क से जुड़े सौर पीवी सिस्टम पर ध्यान केंद्रित करता है। इस काम में संबोधित विभिन्न समस्याओं को वर्गीकृत किया गया है- (i) तीन चरण ग्रिड में बिजली की गुणवत्ता में सुधार, कमजोर वितरण ग्रिड (ii) के तहत सौर पीवी प्रणाली में कम वोल्टेज की सवारी के माध्यम से डबल स्टेज सौर पीवी प्रणाली में लोड क्षतिपूर्ति क्षमताओं को सक्षम करने की रणनीति iii) बिजली की गुणवत्ता में सुधार की सुविधाओं के साथ ग्रिड-इंटरफ़ेयर ट्रांसफार्मर-कम पीवी सिस्टम में रिसाव वर्तमान दमन। सेंसर की खराबी के तहत सौर पीवी प्रणाली के लचीले संचालन के लिए अनजाने द्वीपीय घटनाओं (v) नियंत्रण डिजाइन के तहत जड़ता सौर सौर प्रणाली और इसके निर्बाध संक्रमण का अनुकरण किया। घटनाओं और साइबर हमलों। दो-चरण पीवी प्रणाली के मामले में, पहला चरण एक बढ़ावा कनवर्टर है जो एमपीपीटी (अधिकतम पावर प्वाइंट ट्रैकिंग) के लिए कार्य करता है और दूसरा चरण एक ग्रिड बंधा हुआ वीएससी (वोल्टेज स्रोत कनवर्टर) है।

प्रारंभ में, ग्रिड-करियर संतुलन, ग्रिड हार्मोनिक-धाराओं शमन और असामान्य ग्रिड परिदृश्यों के तहत प्रतिक्रियाशील-शक्ति मुआवजे के लिए तीन-चरण ग्रिड-बाधित दो-चरण सौर पीवी प्रणाली के लिए एक कार्यप्रणाली पर विचार किया जाता है। यह प्रणाली शिखा शक्ति निष्कर्षण, तटस्थ वर्तमान क्षतिपूर्ति क्षमता, वोल्टेज स्रोत कनवर्टर (VSC) नुकसान को कम करने के लिए भी सुनिश्चित करती है, यहां तक कि वितरण प्रणाली में दूर के रेडियल सिरों पर होने वाले विकृत ग्रिड वोल्टेज के दौरान भी। उसके बाद, डबल स्टेज सोलर पीवी एरे सिस्टम के लिए एक लो-वोल्टेज राइड-थ्रू विधि प्रस्तावित है जो कि अंतर्निहित वीएससी ओवरक्रैक संरक्षण को सक्षम करती है और संशोधित ग्रिड कोड के अनुसार प्रतिक्रियाशील बिजली मुआवजे की आपूर्ति करती है। ग्रिड-करंट संतुलन, ग्रिड हार्मोनिक-धाराओं और दायित्व जैसे विद्युत गुणवत्ता सुधार सुविधाओं से समझौता किए बिना, सौर-पीवी सरणी प्रणाली के जीवन-काल को बेहतर बनाने के लिए, दो-चरण पीवी प्रणाली में रिसाव वर्तमान उन्मूलन के लिए एक पद्धति विकसित की गई है। -शक्ति मुआवजा। इसके बाद, तीन-चरण ग्रिड-बाधित और ऑफ-ग्रिड वितरित पीढ़ी प्रणाली के लिए एक सामान्यीकृत भविष्य कहनेवाला नियंत्रण आधारित हार्मोनिक-वोल्टेज नियंत्रक। सटीक आउटपुट वोल्टेज ट्रैकिंग प्रदर्शन को प्राप्त करने और आउटपुट हार्मोनिक वोल्टेज को नियंत्रित करने के लिए सामान्यीकृत भविष्य कहनेवाला नियंत्रक में एक न्यूनतमकरण मानदंड का उपयोग किया जाता है, और इस तरह, ग्रिड में प्रवेश करने वाले हार्मोनिक धाराओं को ग्रिड बाधित ऑपरेशन में विनियमित किया जाता है। इसके अलावा, एक वितरित पीढ़ी के स्रोत आधारित वर्चुअल सिंक्रोनस जनरेटर के निर्बाध संक्रमण के लिए एक विधि की जांच की जाती है, जहां अलग-अलग सिंक्रोनाइज़िंग टूल या अलग-अलग टापिंग डिटेक्शन एल्गोरिदम की आवश्यकता के बिना निर्बाध संक्रमण का एहसास होता है। यह समर्पित सिंक्रनाइज़ेशन इकाइयों से संकेत पर निर्भरता के बिना, अपने भीतर ग्रिड-सिंक्रोनाइज़ेशन और आइलैंडिंग का पता लगाता है। सिस्टम अनजाने में टापू की घटनाओं के दौरान द्वीप का पता लगाने में देरी की संभावना नहीं है। अंत में, ग्रिड-

इंटरफेयर सोलर पीवी सिस्टम के निर्बाध संचालन के लिए एक कार्यप्रणाली विकसित की गई है, जो वर्तमान-सेंसर की खराबी की घटनाओं और विभिन्न झूठे डेटा इंजेक्शनों के तहत लचीला संचालन प्रदान करता है। यह नियंत्रण तकनीक खराबी / हमले के संकेत को प्रभावी ढंग से पहचानती है और सुधारात्मक कार्रवाई उत्पन्न करती है। विभिन्न पूर्वोक्त कार्यप्रणाली का प्रदर्शन मूल्यांकन व्यावहारिक परिचालन स्थितियों के तहत किया गया है। यह कार्य बहुक्रियाशील क्षमताओं के साथ वितरण नेटवर्क में लचीला सौर पीवी सिस्टम विकसित करने के लिए एक अच्छा प्रदर्शन प्रदान करने की उम्मीद है।

# TABLE OF CONTENTS

**CHAPTER -III POWER QUALITY IMPROVEMENT IN THREE PHASE GRID INTERFACED PHOTOVOLTAIC SYSTEM UNDER WEAK DISTRIBUTION GRIDS**

# LIST OF FIGURES

# LIST OF TABLES

Table-8.2 Experimental System Parameters

# LIST OF ABBREVIATIONS

| | |
|---|---|
| AC | Alternating Current |
| ADC | Analog to Digital Converter |
| DAC | Digital to Analog Converter |
| DC | Direct Current |
| DSP | Digital Signal Processor |
| D-STATCOM | Distribution Static Compensator |
| FACTS | Flexible Alternating Current Transmission Systems |
| FRT | Fault Ride Through |
| GPC | Generalized Predictive Control |
| GPV | Grid Interfaced Photo Voltaic |
| IGBTs | Insulated Gate Bipolar Transistors |
| InC | Incremental Conductance |
| LMF | Least Mean Fourth |
| LMS | Least Mean Squares |
| LPF | Low Pass Filter |
| LVRT | Low Voltage Ride Through |
| MPP | Maximum Power Point |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| PCC | Point of Common Coupling |

| | |
|---|---|
| PI | Proportional Integral |
| PLL | Phase Locked Loop |
| P&O | Perturb and Observe |
| PV | Photo Voltaic |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| SOGI | Second Order Generalized Integrator |
| SECS | Solar Energy Conversion System |
| SPV | Solar Photo Voltaic |
| SRFT | Synchronous Reference Frame Theory |
| VSC | Voltage Source Converter |

# LIST OF SYMBOLS

| | |
|---|---|
| $C_{DC}$ | DC bus capacitance of the VSC |
| $C_r$ | Capacitance for ripple filter |
| $D$ | Duty ratio of boost converter |
| $D_{ref}$ | Reference duty ratio of boost converter |
| $f_s$ | Switching frequency |
| $I_{sc}$ | Short circuit current of single solar cell |
| $I_{mppC}$ | MPP current of single solar cell |
| $I_{SCA}$ | Short circuit current of SPV array |
| $\Delta I_{in}$ | Ripple current in the input current of boost converter |
| $I_{PV}$ | PV array current |
| $I_{mppA}$ | MPP current of SPV array |
| $I_{VSC}$ | VSC current in single-phase system |
| $I_{VSCmax}$ | Maximum current for VSC |
| $I_{VSCp}$ | Peak current for VSC |
| $I_{VSCr}$ | Peak ripple current for VSC |
| $I_{SW}$ | Current rating of IGBT switch |
| $W_{PVFF}$ | PV array feed forward contribution |
| $W_{Lp}$ | Magnitude of active power component of load current |
| $W_{gp}$ | Amplitude of reference grid current |

| | |
|---|---|
| $i_g$ | Sensed grid current in single-phase system |
| $i_{ga}$, $i_{gb}$, $i_{gc}$, $i_{gn}$ | Sensed grid currents in three-phase system |
| $i_{gref}$ | Reference grid current in single-phase system |
| $i_{garef}$, $i_{gbref}$, $i_{gcref}$ | Reference grid currents in three-phase system |
| $i_L$ | Sensed load current in single-phase system |
| $i_{Lh}$ | Harmonics component in sensed load current |
| $i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$ | Estimated fundamental currents by notch filter algorithm |
| $i_{La}$, $i_{Lb}$, $i_{Lc}$, $i_{Ln}$ | Sensed load currents in three-phase system |
| $I_{VSCa}$, $i_{VSCb}$, $i_{VSCc}$, $i_{VSCn}$ | VSC currents in three-phase system |
| $K_p$ | Proportional constant for PI controller |
| $K_i$ | Integral constant for PI controller |
| $L_B$ | Inductor for boost converter |
| $L_{VSC}$ | Interfacing inductor for VSC |
| $L_{VSCn}$ | Interfacing inductor for neutral leg of VSC |
| $m$ | Modulation index |
| $n_p$ | Number of parallel solar cells |
| $n_s$ | Number of series solar cells |
| $P_{maxA}$ | MPP power of SPV array |
| $P_{PV}$ | Power supplied by the PV array |
| $P_{VSC}$ | Power supplied by the VSC |
| $R_r$ | Resistance for ripple filter |

| | |
|---|---|
| $T_s$ | Switching time period |
| $v_{DC}$ | DC bus voltage |
| $V_{DCref}$ | Reference DC link voltage |
| $V_{DCmin}$ | Minimum DC bus voltage |
| $V_{DCmax}$ | Maximum DC bus voltage |
| $V_{mppC}$ | MPP voltage of single solar cell |
| $V_{mppA}$ | MPP voltage of SPV array |
| $V_{oc}$ | Open circuit voltage of single solar cell |
| $V_{OCA}$ | Open circuit voltage of SPV array |
| $V_{PV}$ | PV array voltage |
| $V_{PVref}$ | Reference PV array voltage |
| $V_m$ | Estimated amplitude of single-phase PCC voltage |
| $V_z$ | Estimated amplitude of three-phase PCC voltage |
| $V_{SW}$ | Voltage rating of IGBT switch |
| $x_{pa}$, $x_{pb}$, $x_{pc}$ | In-phase unit templates for phase-'*a*', '*b*' and '*c*' |
| $x_{qa}$, $x_{qb}$, $x_{qc}$ | Quadratic unit templates for phases '*a*', '*b*' and '*c*' |
| $\mu$ | Scaling factor in an adaptive DC link voltage control |