CONTROL OF GRID INTEGRATED MULTIPLE SOLAR PV ARRAYS-BATTERY BASED MICROGRID SYSTEM

SHUBHRA

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

AUGUST 2021

CONTROL OF GRID INTEGRATED MULTIPLE SOLAR PV ARRAYS-BATTERY BASED MICROGRID SYSTEM

by

SHUBHRA

Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

AUGUST 2021

CERTIFICATE

It is certified that the thesis entitled "**Control of Grid Integrated Multiple Solar PV Arrays-Battery Based Microgrid System**," being submitted by **Mrs. Shubhra** 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 her under my supervision and guidance. The matter embodied in this thesis has not been submitted for award of any other degree or diploma.

Dated:

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

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my sincere gratitude and indebtedness to **Prof. Bhim Singh** from bottom of my heart for valuable guidance and constant supervision to carry out the Ph.D. work. It was an unique and rewarding learning experience to work under him throughout the research period, which has provided me with a deep insight to the world of technical quality research. The commitment, discipline, determination, dedication, resourcefulness and above all innovative approach of **Prof. Bhim Singh** have been the main inspiration for me to complete this work. His valuable advice, consistent guidance, continuous monitoring and daily encouragement and commitments to achieve excellence have motivated me to improve my work and make best use of my capabilities. It was due to his blessing that I have experienced numerous new traits of technical research that will help me throughout my life.

I express my deep gratitude and sincere thanks to **Prof. Sukumar Mishra, Prof. G. Bhuvaneswari and Prof. Ashu Verma,** SRC members for their valuable guidance and consistent support throughout my research work.

I wish to convey my sincere thanks to **Prof. Bhim Singh, Prof. B. P. Singh, Prof M.L. Kothari and Prof. Anandarup Das** for their valuable inputs during my course work, which made the strong foundation for my research work. I am grateful to IIT Delhi as an institute for providing me the requisite research facilities. Thanks are due to Sh. Srichand, Sh. Puran Singh and Mr. Jitendra of PG Machine lab for providing me facilities and assistance during this work. I am thankful to Dr. Chinmay Jain, Dr. Geeta Pathak, Dr. Shailendra Kumar, Dr. Ikhlaq Hussain**,** Dr. Rajan Sonkar, Dr. Aniket Anand, Dr. Sachin Devassy, Dr. Nidhi Mishra, Dr. Nishant Kumar, Dr. Sai Pranith Girimaji, Dr. Anjanee Mishra, Dr. Piyush Kant, Dr. Saurabh Shukla, Dr. Shadab Murshid, Dr.

Deepu Vijay, Dr. Priyank Shah, Dr. V.L. Srinivas and Mr. Anshul Varshney for their valuable aid and co-operation and informal support during this period.

I convey my sincere thanks to Ms. Farheen Chisti and Ms. Pavitra Shukl for motivation, co-operation and informal support during my research work. I would like to thank Ms. Rohini Sharma, Mr. P. Sambasivaiah and Mr. Munesh Kumar Singh for being supportive. I am thankful to Mr. Vineet P. Chandran, Dr. Tipurari Nath Gupta, Dr. Radha Kushwaha, Ms. Shatakshi Sharma, Ms. Seema and Ms. Vanadana Jain**,** for their valuable aid and co-operation.

Moreover, I would like to thank, Mr. Sreejith R, Mr. Gurmeet Singh, Mr. Anjeet Verma, Mr. Debasish Mishra, Ms. Subarni Pradhan, Dr. Tabish Mir, Mr. Utkarsh Sharma, Mr. K. P. Tomar, Mr. Sunil Kumar Pandey, Ms. Yashi Singh, Ms. Hina Parveen, Ms. Rashmi Rai, Mr. Yalavarthi Amarnath, Mr. Arayadip Sen, Mr. Kashif, Mr. Gaurav Modi, Mr. Sudip Bhattacharya, Mr. Bilal Naqvi, Mr. Jitendra Gupta, Mr. Utsav Sharma, Mr. Sandeep Kumar Sahoo, Ms. Shalvi Tyagi, Mr. Souvik Das, Mr. Vivek Narayanan, Saran Chaurashiya, Mr. Sharan Shastri, Mr. Shivam Yadav, Mr. Rahul Kumar, Mr. Deepak Saw, Ms. Kousalya V, Ms. Chandrakala Devi, Ms. Kripa and all PG Machines lab group for their valuable support.

I would also like to thank Mr. Yatindra Tripathi, Mr. Satish, Mrs. Sunita Verma, Ms. Moni, Mr. Sandeep and all other Electrical Engineering office staff for being supportive throughout my work. I thank all those who have directly or indirectly helped me to complete my dissertation.

The completion of this work was not possible without the blessings of my mother, Late Mrs. Arun Prabha. I would like to thank my father, Prof. Vir Singh for his consistent blessings and encouragement during the entire journey of my research work. I would like to thank my husband Mr. Bhupender Singh, my daughter Shaurya and my son Siddhnat for giving me the all requisite support during my research work. Their trust in my capabilities had been a key factor to all my

achievements. I would like to thank my sisters Abha and Puja, brother Vijay and their families for their continuous support and encouragement. I would like to thank my in-laws for their support and blessings.

I am indebted to almighty for their blessings to elevate my academic level and granting me the wisdom, health and strength to undertake this research task and enabling me to its completion.

Dated:

Shubhra

ABSTRACT

The microgrid comprises of distributed energy resources, battery energy storage (BES) and loads. Microgrid operates in standalone as well as grid connected modes. The integration of microgrid to the utility grid enhances the reliability and efficiency of system. The continuously increasing demand of electrical power, fossil fuels diminution and environmental concerns have resulted in the progression of renewable energy sources (RESs) i.e. hydro, wind and solar etc. Among the RESs, the solar power generation is clean and inexpensive. In grid integrated solar PV system, one PV array is used, however, due to the intermittent nature of solar PV power and loads, the off-grid mode operation is not reliable. At the grid outage/fault and non-accessibility of the solar PV array power, uninterrupted power is not delivered to the loads. Therefore, BES plays an important role at grid outage and unavailability of solar PV power and supplies power to the critical loads.

This work aims at the design, control and operation for various configurations of three-phase three-wire and three-phase four-wire single solar PV array-BES with a bidirectional converter systems and multiple solar PV arrays-BES based microgrids with synchronization to the grid. In these configurations above stated issues are addressed and continual power during the grid outage to the load side is ensured. A single voltage source converter (VSC) is utilized for DC to AC power conversion in three phase grid connected solar PV- BES with a bidirectional converter systems in a single stage topology. VSC operates with a current control and voltage control corresponding to the grid interactive and off-grid modes.

In three phase grid integrated multiple solar PV arrays-BES based microgrids, the DC links of main and ancillary VSCs are integrated with individual solar PV arrays through an individual maximum power point tracking (MPPT) technique. VSCs terminals are connected in parallel at the point of common coupling (PCC), which increases the power rating of microgrid and facilitates the microgrid expansion to distribute active power to the utility grid. It also improves the reliability of microgrid in an autonomous mode of operation. Under normal operating condition, the current control is used in the grid interactive mode for the main VSC, whereas at the grid disturbances, it operates with the voltage control to maintain the frequency and voltage at the PCC. A quality voltage is provided to the ancillary VSC, hence the current control is used for its operation. In the grid interactive mode, the grid maintains the voltage and frequency at the microgrid. Therefore, both VSCs operate with the current control algorithms.

In order to enhance the power rating of microgrid, resolving grid outage scenario and solve power

quality (PQ) concerns of the distribution network, numerous configurations of three phase multiple solar PV arrays-BES based microgrids are classified on the basis of battery connection at the DC link of the main VSC i.e. directly or through bidirectional converter, power conversion stages like, single stage or double stage and three phase supply i.e. three-phase three-wire or three-phase four-wire systems. In the three-phase grid integrated multiple solar PV arrays-BES based microgrids, a PV array is integrated in a double stage configuration at main VSC DC link, in which a DC-DC boost converter is utilized to obtain MPPT voltage in the first stage. Further, in the second stage, the main VSC is connected to the utility grid. The BES is also integrated directly at main VSC DC link and manages the load levelling. However, the second PV array is connected in a single stage configuration. In three phase grid integrated multiple solar PV arrays-BES with a bidirectional converter based microgrids, PV arrays are directly connected to the DC links of VSCs in a single stage configuration. The BES is integrated via a bidirectional converter at the main VSC DC link, which maintains its DC link voltage to the MPPT value and regulates the charging / discharging current of BES. In three phase grid integrated multiple solar PV arrays-based microgrids, two PV arrays of different power ratings, are connected to DC links of VSCs in a single stage topology and the main VSC provides active power is to the grid. In both the modes, VSCs regulate the load demands at their respective terminals. The PV power feed-forward component is utilized for the enhancement of system's dynamics and to distribute active power to the grid. The current control technique utilized in these configurations, improves the PQ issues such as harmonics current extenuation and power factor correction at the grid or at the grid forming converter. At no solar PV array power availability, VSC mode changes into the distribution static compensator (DSTATCOM) mode and the grid supplies the power to the loads. The three-phase four-wire multiple PV arrays-BES microgrids are utilized for mitigation of neutral current and to perform all other functions of three-phase three-wire system. These configurations are capable of distributing power to rooftop residential, industrial and commercial buildings, electric traction, electric vehicles, rural/remote areas and water pumping. The simulated performances of three-phase grid integrated single solar PV array-BES systems with a bidirectional converter and multiple solar PV arrays-BES based microgrids in the MATLAB/Simulink platform for various steady state and dynamic conditions are validated with experimental results on a developed prototype in the laboratory and through a real time controller OPAL-RT (OP4510) hardware in loop -test bench in RT-LAB platform, correspondingly.

सारांश

माइक्रोग्रिड में वितरित ऊर्जा संसाधन, बैटरी ऊर्जा भंडारण (बीईएस) और लोड शामिल हैं। माइक्रोग्रिड स्टैंडअलोन के साथ-साथ ग्रिड कनेक्टेड मोड में काम करता है। यूटिलटी ग्रिड में माइक्रोग्रिड का एकीकरण प्रणाली की विश्वसनीयता और दक्षता को बढ़ाता है। विद्युत शक्ति की लगातार बढ़ती मांग, जीवाश्म ईंधन की कमी और पर्यावरण संबंधी मुद्दों के परिणामस्वरूप अक्षय ऊर्जा स्रोतों (आरईएस) यानी हाइड्रो, विंड और सोलर आदि की प्रगति हुई है। आरईएस के बीच, सौर ऊर्जा उत्पादन स्वच्छ और सस्ती है। ग्रिड एकीकृत सौर पीवी प्रणाली में, एक पीवी सरणी का उपयोग किया जाता है, हालांकि, सौर पीवी पावर और लोड की आंतरायिक प्रकृति के कारण, ऑफ-ग्रिड मोड संचालन विश्वसनीय नहीं है। ग्रिड आउटेज/फॉल्ट और सोलर पीवी सरणी पावर की अगम्यता पर, लोड को निर्बाध बिजली नहीं दी जाती है। इसलिए, बीईएस ग्रिड आउटेज और सौर पीवी बिजली की अनुपलब्धता में एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है और महत्वपूर्ण लोड को बिजली की आपूर्ति करता है।

इस कार्य का उद्देश्य तीन-चरण तीन-तार और तीन-चरण चार-तार विभिन्न विन्यासों के लिए एकल सौर पीवी सरणी-बीईएस के साथ एक द्विदिश कनवर्टर सिस्टम और एकाधिक सौर पीवी सरणियाँ-बीईएस आधारित माइक्रोग्रिड का ग्रिड के साथ सिंक्रनाइज़ेशन के साथ डिजाइन, नियंत्रण और संचालन करना है। इन विन्यासों में ऊपर बताए गए मुद्दों को संबोधित किया जाता है और ग्रिड आउटेज के दौरान लोड साइड को निरंतर बिजली सुनिश्चित की जाती है। एक एकल वोल्टेज स्रोत कनवर्टर (वीएससी) का उपयोग डीसी से एसी बिजली रूपांतरण के लिए तीन चरण ग्रिड से जुड़े सौर पीवी-बीईएस में एकल चरण टोपोलॉजी में एक द्विदिश कनवर्टर सिस्टम के साथ किया जाता है। वीएससी ग्रिड इंटरएक्टिव और ऑफ-ग्रिड मोड के अनुरूप करंट कंट्रोल और वोल्टेज कंट्रोल के साथ काम करता है।

तीन-चरण ग्रिड इंटीग्रेटेड एकाधिक सोलर पीवी सरणियाँ-बीईएस आधारित माइक्रोग्रिड में, मुख्य और सहायक वीएससी के डीसी लिंक को व्यक्तिगत अधिकतम पावर पॉइंट ट्रैकिंग (एमपीपीटी) तकनीक के माध्यम से अलग-अलग सोलर पीवी सरणियों के साथ एकीकृत किया जाता है। वीएससी टर्मिनल सामान्य युग्मन (पीसीसी) के बिंदु पर समानांतर में जुड़े हुए हैं, जो माइक्रोग्रिड की पावर रेटिंग को बढ़ाता है और उपयोगिता ग्रिड को सक्रिय बिजली वितरित करने के लिए माइक्रोग्रिड विस्तार की सुविधा प्रदान करता है। यह संचालन के एक स्वायत्त मोड में माइक्रोग्रिड की विश्वसनीयता में भी सुधार करता है। सामान्य परिचालन स्थिति के तहत, मुख्य वीएससी के लिए ग्रिड इंटरेक्टिव मोड में करंट नियंत्रण का उपयोग किया जाता है, जबकि ग्रिड की आउटेज पर, यह पीसीसी पर आवृत्ति और वोल्टेज को बनाए रखने के लिए वोल्टेज नियंत्रण के साथ संचालित होता है। सहायक वीएससी को एक गुणवत्ता वोल्टेज प्रदान किया जाता है, इसलिए इसके संचालन के लिए करंट नियंत्रण का उपयोग किया जाता है। ग्रिड इंटरएक्टिव मोड में, ग्रिड माइक्रोग्रिड पर वोल्टेज और आवृत्ति को बनाए रखता है। इसलिए, दोनों वीएससी करंट नियंत्रण एल्गोरिदम के साथ काम करते हैं।

माइक्रोग्रिड की पावर रेटिंग बढ़ाने के लिए, ग्रिड आउटेज परिदृश्य को हल करने और वितरण नेटवर्क के गुणवत्ता (पीक्यू) मुद्दों के समाधान के लिए, तीन चरण मल्टीपल सौर पीवी सरणियों के कई विन्यास-बीईएस आधारित माइक्रोग्रिड

को मुख्य वीएससी के डीसी लिंक पर बैटरी कनेक्शन यानी सीधे या द्विदिश कनवर्टर के माध्यम से, बिजली रूपांतरण चरणों जैसे , सिंगल स्टेज या डबल स्टेज और तीन-चरण सप्लाई यानी तीन-चरण तीन-तार और तीन-चरण चार-तार सिस्टम के आधार पर वर्गीकृत किया जाता है । तीन-चरण ग्रिड एकीकृत एकाधिक सौर पीवी सरणियाँ -बीईएस आधारित माइक्रोग्रिड में, एक पीवी सरणी मुख्य वीएससी डीसी लिंक पर एक डबल चरण कॉन्फ़िगरेशन में एकीकृत होती है, जिसमें डीसी-डीसी बूस्ट कनवर्टर का उपयोग पहले चरण में एमपीपीटी वोल्टेज प्राप्त करने के लिए किया जाता है। इसके अलावा, दूसरे चरण में, मुख्य वीएससी को यूटिलिटी ग्रिड से जोड़ा जाता है। बीईएस भी सीधे मुख्य वीएससी डीसी लिंक पर एकीकृत है और लोड लेवलिंग का प्रबंधन करता है। हालाँकि, दूसरा पीवी सरणी एकल चरण कॉन्फ़िगरेशन में जुड़ा हुआ है। तीन-चरण ग्रिड इंटीग्रेटेड एकाधिक सोलर पीवी सरणियाँ-बीईएस के साथ द्विदिश कन्वर्टर आधारित माइक्रोग्रिड में, पीवी सरणियाँ सीधे सिंगल स्टेज कॉन्फ़िगरेशन में वीएससी के डीसी लिंक से जुड़े होते हैं। बीईएस को मुख्य वीएससी डीसी लिंक पर एक द्विदिश कनवर्टर के माध्यम से एकीकृत किया गया है, जो अपने डीसी लिंक वोल्टेज को एमपीपीटी मूल्य पर बनाए रखता है और बीईएस के चार्जिंग / डिस्चार्जिंग करंट को नियंत्रित करता है। तीन-चरण ग्रिड में एकीकृत एकाधिक सोलर पीवी सरणियाँ-आधारित माइक्रोग्रिड, विभिन्न पावर रेटिंग के दो पीवी सरणी, सिंगल स्टेज टोपोलॉजी में वीएससी के डीसी लिंक से जुड़े होते हैं और मुख्य वीएससी ग्रिड को सक्रिय पावर प्रदान करता है। दोनों मोड में, वीएससी अपने संबंधित टर्मिनलों पर लोड मांगों को नियंत्रित करते हैं। पीवी पावर फीड-फॉरवर्ड घटक का उपयोग सिस्टम की गतिशीलता को बढ़ाने और ग्रिड को सक्रिय बिजली वितरित करने के लिए किया जाता है। इन विन्यासों में उपयोग की जाने वाली करंट नियंत्रण तकनीक ग्रिड पर या ग्रिड बनाने वाले कनवर्टर पर, पीक्यू मुद्दों जैसे कि हार्मोनिक्स करंट एक्सटेन्यूएशन और पावर फैक्टर करेक्शन को सुधारती है।

सौर पीवी सरणी बिजली की उपलब्धता नहीं होने पर, वीएससी मोड वितरण स्थिर कम्पेसाटर (डीएसटीएटीसीओएम) मोड में बदल जाता है और ग्रिड लोड को बिजली की आपूर्ति करता है। तीन-चरण चार-तार एकाधिकपीवी सरणियाँ-बीईएस माइक्रोग्रिड का उपयोग न्यूट्रल करंट शमन के लिए और तीन-चरण तीन-तार सिस्टम के अन्य सभी कार्यों को करने के लिए किया जाता है। ये कॉन्फ़िगरेशन रूफटॉप आवासीय, औद्योगिक और वाणिज्यिक भवनों, इलेक्ट्रिक ट्रैक्शन, इलेक्ट्रिक वाहन, ग्रामीण / दूरस्थ क्षेत्रों और पानी पंपिंग को बिजली वितरित करने में सक्षम हैं। विभिन्न स्थिर अवस्था और गतिशील स्थितियों के लिए मैटलैब/सिमुलिंक प्लेटफॉर्म में एकल सौर पीवी सरणी-बीईएस के एक द्विदिश कनवर्टर सिस्टम और एकाधिकसौर पीवी सरणियाँ-बीईएस आधारित माइक्रोग्रिड के साथ तीन-चरण ग्रिड एकीकृत प्रणालियों के सिम्युलेटेड प्रदर्शनों को प्रयोगात्मक परिणामों के साथ प्रयोगशाला में प्रोटोटाइप और आरटी-एलएबी प्लेटफॉर्म में हार्डवेयर में लूप-टेस्ट बेंच के माध्यम से वास्तविक समय नियंत्रक ओपल-आरटी (ओपी4510), से मान्य किया गया है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

RESs	Renewable energy sources
VSC	Voltage Source Converter
PV	Photo Voltaic
BES	Battery Energy storage
PCC	Point of Common Coupling
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
PQ	Power Quality
MPPT	Maximum Power Point Tracking
SSS	Solid state switch
INC	Incremental Conductance
P&O	Perturb & Observe
PES	Power Electronics Switch
DSTATCOM	Distribution Static Compensator
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
DSO	Digital Storage Oscilloscope
PI	Proportional and Integral
PR	Proportional Resonant
MG	Microgrid
PLL	Phase Locked Loop
DSOGI-FLL	Dual Second-Order Generalized Integrator Frequency-Locked Loop
HIL	Hardware In Loop
THD	Total Harmonic Distortion
FFTPV	Feed-Forward Term of Solar Photovoltaic Power
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
QSG	Quadrature signals generator
SOGI-QSG (α) and SOGI-QSG (β)	Second-Order Generalized Integrator- Quadrature signals generator in $\alpha\beta$ reference frame

LIST OF SYMBOLS

v_{sab}, v_{sbc}	Grid line voltages
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Sensed grid voltages for three phases
V_t	Amplitude of grid voltages
u_{pa}, u_{pb}, u_{pc}	In-phase unit templates
i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}	Load phase currents
S_{pa}(q), S_{pb} (q), S_{pc}(q)	Weight components for three phases
$\delta_{pa\,(q)}$	Output current error
ψ_{pa} (q)	Variable step size
ρ_{pa} (q)	Regularization factor
λ, σ	Initial step size parameter, small positive parameter
H_{pa}(q)	Cost function
$P_{pv,}$ P_{bt}	PV power, battery power
S_{pv}, S_{bt}	Feed-forward terms due to P_{pv}, P_{bt}
S_{pavg}	Average weight of active load current
S_{Lp}	Amplitude of grid reference current
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Grid currents
i^*_{sa}, i^*_{sb}, i^*_{sc}	Grid reference currents
i_{esa}, $i_{esb,}$ i_{esc}	Grid currents error
V_r, ω_{ref}	Peak amplitude of load reference voltage, frequency
v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc}	Sensed load voltages for three phases
v^*_{La}, v^*_{Lb}, v^*_{Lc}	Reference load phase voltages
v_{Lar}, v_{Lbr}, v_{Lcr}	Load phase voltages error
i^*_{La}, i^*_{Lb}, i^*_{Lc}	Reference load phase currents
T_{La}(z), T_{Lb}(z), T_{Lc}(z)	Transfer functions of PR controllers
k_{dpv} k_{div}	Proportional and integral constants of discrete PR controller
θ_g, θ_l	Grid voltage angle, PCC voltage angle
$\Delta\theta$, f_g	Angle difference between Grid voltage and PCC voltage angle, Grid frequency
V_{dc}	Sensed DC link voltage
V^*_{dc}	Reference DC link voltage
V_{dce}	DC link voltage error
C_{dc}	DC link capacitance
I_{bt}, I^*_{bt}	Sensed and reference battery current
I_{btr}	Battery current error
k_{pdc}, k_{idc} and k_{pbt}, k_{ibt}	Proportional and integral gains of DC link voltage and battery current control
R_f , C_f	Ripple filter resistance and capacitance
L_f	Interfacing Inductor
L_b=L_{buck}=L_{boost}	Buck -Boost converter inductance
f_{sw}	Switching frequency
G_i	Solar irradiance
D_{buck}, D_{boost}	Bidirectional converter: Duty cycles for buck mode, boost mode
V_{oc}	Open circuit voltage of PV array
I_{sc}	Short circuit current of PV array

P_{mp}	MPPT voltage
I_{mp}	MPPT current
P_{pvmp}	MPPT power
m	Modulation index
h	Overloading factor
R_p, C_{pbat}	Battery constituents
i_{sn}, i_{Ln}, $i_{vscn,}$	Grid neutral current, load neutral current, VSC neutral current
i^*_{sn}	Reference neutral current
L_{fn}	Interfacing inductor neutral leg of VSC
$I_{pa,}$ $I_{pb,}$ I_{pc}	load active power constituents
τ, ψ_{pa}, ρ_{pa}, η_{pa}	A small positive constant for convergence control, current error, gradient adaptive step size, estimate of a gradient vector
I_{pLavg}	Average of active power constituent
I_{pnet}	Grid reference current amplitude
I_{pvw}	PV weight component i.e. feed-forward part
V_d, V_q	Direct axis and quadrature axis components of load voltages from Park's transformation
V^*_d, V^*_q	Direct axis and quadrature axis reference voltages
V_{erd}	Error between direct axis and quadrature axis parts of load voltages and reference direct axis and quadrature parts axis
I^*_d, I^*_q	Direct axis and quadrature axis current components
i_{Lfa}, i_{Lfb}, i_{Lfc}	Load reference currents
ω_{comp}, ω_{cop},	Frequency constituents of synchronization controller
θ_{comp}, θ_{cop}	Angle obtained from frequency constituents of synchronization controller
I_{bat}	Battery current
I^*_{bat}	Battery reference current
I_{bte}.	Battery current error
I^*_{er}	Current input to pulse width modulator of buck-boost converter
D_{boost1}	Duty cycle of boost converter
V_{dc1}, V_{dc2}	DC link Voltages for main and ancillary VSCs
V^*_{dc1}, V^*_{dc2}	Reference DC link Voltages for main and ancillary VSCs
C_{dc1}, C_{dc2}	DC link capacitor for main and ancillary VSCs
N_{ss1} and $N_{pp1,}$	Series and parallel modules for main VSC
N_{ss2} and N_{pp2}	Series and parallel modules for ancillary VSC
R_{ss} and R_{pp}	Series and parallel resistances for PV array
P_{pv1}, P_{pv2}	Solar PV array powers for main and ancillary VSCs
V_{pv1}, V_{pv2}	PV voltages main and ancillary VSCs
I_{pv1}, I_{pv2}	PV currents main and ancillary VSCs
I_{pa1}, I_{pb1}, I_{pc1}	Active power components of load currents for main VSCs
I_{pa2}, I_{pb2}, I_{pc2}	Active power components of load currents for ancillary VSCs
ψ_{pa1}, γ_{pa1}, η, ζ_{pa1}, δ	Current error, adaptable step size, scale factor, cross correlation between current error and input, forgetting factor
I_{pLavg1} and I_{pLavg2}	Active power constituents for main and ancillary VSCs
V_{dce1} and V_{dce2}	DC link voltage error for the main VSC and ancillary VSCs
I_{l1} and I_{l2}	DC loss constituent for the main VSC and ancillary VSCs

I_{wpv1} and I_{wpv2}	Feed-forward component for current control of main and ancillary *VSCs*
I_{pnet1} and I_{pnet2}	Aamplitude of grid reference current of main and ancillary VSCs
V_p and ω_r	Reference peak voltage amplitude and frequency for load voltages in multiple array microgrids
T_a(z), T_b(z), T_c(z),	Transfer functions of discrete non-ideal PR controller
k_{pv} and k_{iv}, ω_{cu}	Proportional and integral gains, bandwidth around resonant frequency for discrete non-ideal PR controller
i_{faload}, i_{fbload}, i_{fcload}	Load reference currents
i_{eLa}, i_{eLb}, i_{eLc}	Load current errors
V_{t1}	PCC voltage amplitude
u_{pa1}, u_{pb1}, u_{pc1}	PCC voltages unit templates
i_{sa1}, i_{sb1}, i_{sc1}	Main VSC sensed grid currents
i^*_{sa1}, i^*_{sb1}, i^*_{sc1}	Main VSC reference grid currents
i_{sa2}, i_{sb2}, i_{sc2}	Ancillary VSC sensed grid currents
i^*_{sa2}, i^*_{sb2}, i^*_{sc2},	Ancillary VSC reference grid currents
i_{La1}, i_{Lb1}, i_{Lc1}	Main VSC load currents
i_{La2}, i_{Lb2}, i_{Lc2}	Ancillary VSC load currents
i_{vsca1}, i_{vscb1}, i_{vscc1}	Main VSC's currents
i_{vsca2}, i_{vscb2}, i_{vscc2}	Ancillary VSC's currents
i_s	Grid currents
i_{s1}, i_{L1} , i_{vsc1}	Grid currents, load currents and VSC currents for main VSC
i_{s2}, i_{L2}, i_{vsc2}	Grid currents, load currents and VSC currents for ancillary VSC
G_1, G_2	Solar insolation intensity for PV array of main and ancillary VSCs
η_1 , μ, ξ_{pa1}, β_{pa1}	Small positive constant for convergence control, gain, current error, gradient adaptive step size, gradient vector.
T_a(s), T_b(s), T_{Lc}(s), ω_{cf}	Non-ideal PR controller's transfer functions, cut off frequency
i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}	Load reference currents
I_l	DC loss component for the ancillary VSC
I_{ebat}	Battery current error
k_{pbat}, k_{ibat}	Proportional and integral gains of battery current control,
η_{pa1}, λ , δ_{pa1}, ψ_{pa1} σ	Adjustable step size, convergence control parameter, current error, updating of step size by reducing the noise sequence, gain
ϕ_{pa1}, ε_{pa1}	Adaptive step size, current error
λ_{pa1}, ϕ_{pa1}	Gradient vector, current error in Benveniste algorithm
ρ, β, ξ_{pa1}	Tuning parameter, parameter for convergence rate and adaptive step size of the control algorithm by Zou et-al
i_{sn1},i_{Ln1}, i_{vscn1}	Grid neutral current, load neutral current and VSC neutral current for main VSC
i_{sn2}, i_{Ln2}, i_{vscn2}	Grid neutral current, load neutral current and VSC neutral current for ancillary VSC
$v_{s\alpha}$ and $v_{s\beta}$	90º-shifted grid voltages in $\alpha\beta$ reference frame
$v_{s\alpha}{}'$, $v_{sq\alpha}{}'$ and $v_{s\beta}{}''$, $v_{sq\beta}{}''$	In-phase and quadrature components through SOGI-QSG (α) and SOGI-QSG (β)
e_α, e_β	Error signals of SOGI-QSG (α) and SOGI-QSG (β)
$e_\alpha{}'$ and $e_\beta{}'$	Frequency error variables

Υ	FLL gain
v_{α}^{+} , v_{β}^{+}	Positive sequence components of grid voltages
e_{avg}	Average frequency error variable
ω_g'	Estimated frequency from DSOGI-FLL