GRID INTERACTIVE AND STANDALONE PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE FOR SOLAR PV ARRAY FED WATER PUMPING

ARYADIP SEN

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

HAUZ KHAS, NEW DELHI

JUNE 2024

GRID INTERACTIVE AND STANDALONE PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE FOR SOLAR PV ARRAY FED WATER PUMPING

by

ARYADIP SEN
Department of Electrical Engineering

Submitted

In fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JUNE 2024

CERTIFICATE

It is certified that the thesis entitled "**Grid Interactive and Standalone PMBLDC Drive and PMBLDC Motor Design for Solar Water Pumping**" being submitted by **Mr. Aryadip Sen** for the 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 **the** award of any other degree or diploma.

Dated: June 18, 2024

(Prof. Bhim Singh)
Electrical Engineering Department
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** 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** have been the inspiration for me to complete this work. His 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 his 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. B.K Panigrahi, Prof. G. Bhuvaneswari, Dr. Anandarup Das** and **Dr. Ashu Verma**, all SRC members for their valuable guidance and consistent support during my research work.

I wish to convey my sincere thank to **Prof. Bhim Singh, Prof. G. Bhuvaneswari, late Prof. M. L. Kothari, Prof. I.N Kar** and **Dr. Anandarup Das** for their valuable inputs during my course work, which has made the foundation for my research work. I am grateful to IIT Delhi for providing me the research facilities.

I would wish to express my sincere gratitude to **Prof. Bhim Singh, Prof. G. Bhuvaneswari, Dr. Anandarup Das** and **Prof. M. Veerachary,** as Prof. in-charge of PG Machine Lab, for providing me immense facilities to carry out experimental work. Thanks are due to Sh. Srichand, Sh. Puran Singh, Sh. Jitendra, Sh. Amit Kumar 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 thank all my seniors, Dr. Shailendra Kumar, Dr. Nishant Kumar, Dr. Ikhlaq Hussain, Dr. Aniket Anand, Dr. Anjanee Kumar Mishra, Dr.

Saurabh Shukla, Dr. Shadab Murshid, Dr. Piyush Kant, Dr. Radha Kushwaha, Dr. Seema Kewat, Dr. Nidhi Mishra, Dr. Anjeet K. Verma, Dr. Subarni Pradhan, Dr. Farheen Chisti, Dr. Rohni Sharma, Dr. Pabitra Shukla, Dr. Utkarsh Sharma and Dr. Rajan Sonkar to motivate me in the starting of my research work. I would like to use this opportunity to thank Dr. Rajan Sonkar, Dr. Anshul Varshney and Dr. Utkarsh Sharma, who have constantly helped me on all technical and non-technical issues. I would like to thank, Mr. Gurmeet Singh, Mr. Debasis Mishra, Mr. Sambasivaiah Puchalapalli Mr. Gaurav Modi, Dr. Jitendra Gupta, Ms. Yashi Singh, Mr. Rohit Kumar, Mr. Biswajeet Saha, Mr.Arjun Kumar and all PG machines lab group for their valuable support. I would also like to thank Mr. Satish, Mr. Yatindra Mani Tripathi, 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 **Ministry of Education, Govt. of India** for funding this research work under project grant number **RP03222**. I would like to thank **SERB, Govt. of India** for funding this research work under **SERB, National Science Chair Fellowship** of **Prof. Bhim Singh**.

My deepest love, appreciation and indebtedness go to my grandfather, late **Mr. Prashata Kumar Sen** for his dreams, sacrifices and wholeheartedly endorses. His trust in my capabilities have always motivated me to reach higher academic degrees. I would like to convey my unbounded love to my grandmother late **Mrs.Ila Sen** as I spent a major part of my childhood in her lap. A great deal of effort, endurance, encouragement and blessings of my parents **Mr. Achintya Kumar Sen** and **Mrs. Sujata Sen.** Moreover, I would like to thank my wife **Mrs. Madhurima Sen**, other family members and loving friends for giving me the inner strength and wholeheartedly support. Their trust in my capabilities has been a key factor to all my achievements.

At last, I am beholden to almighty for their blessings to help me to raise my academic level to this stage. I pray for their benediction in my future endeavours. Their blessings may be showered on me for strength, wisdom and determination to achieve in future.

Date: June 18, 2024

Aryadip Sen

ABSTRACT

The integration of solar photovoltaic (SPV) array energy in irrigation as well as domestic water pumping is very much prudent specially in isolated zones where the utility grid is either impractical or exorbitant. Apart from this, utilization of solar PV array energy in the field of water pumping reduces the utility grid load, carbon footprint and also saves conventional energy. In this research work, different methodologies for solar PV array fed water pumping system are developed using a permanent magnet brushless DC (PMBLDC) motor drive. A highly efficient PMBLDC motor significantly reduces the size of the solar photovoltaic array and so the installation cost. Moreover, unlike an induction motor, the speed of the PMBLDC motor is not limited by frequency of the supply. This reduces the size of the motor. A high efficient compact size optimized PMBLDC motor is investigated and designed here. Efficiency and cost optimization are done in the designed motor in comparison with the available counterpart. Optimization of the magnetic volume in the designed motor leads to optimization of the cost of the designed motor. A prototype of the designed motor is manufactured using industrial manufacturing facility for validation of the design results.

A position sensorless, compact, efficient and cost-effective PMBLDC motor drive is investigated with sensorless speed control. The Hall Effect position sensors, for sensing, the voltage sensor at the DC bus of the VSI and the motor phase current sensors are eliminated in the developed PMBLDC motor drive. In addition, the sensorless speed control is done using virtual position estimation. The system consists of a maximum power point tracking (MPPT) of solar photovoltaic array using VSI, feeding the PMBLDC motor. This developed system is capable of operating the solar photovoltaic array at its maximum available power using the same VSI, which is used for sensorless commutation and speed control. In order to develop a solar photovoltaic array fed water pumping further, reliable and economical, the position

sensorless PMBLDC motor drives are also developed for two-stage water pumping system. The position sensorless control is found the only way to use the PMBLDC motor for submersible water pumping. The work is further extended towards integration of DC-DC converter in the design system and a double stage solar PV array powered PMBLDC motor drive is also investigated for water pumping. Different DC-DC converters are placed for MPP and performances are analysed based on their simplicity, cost, design challenge and efficiency.

A challenging case of interaction in the solar PV array powered water pumping due to the intermittency of solar PV array power generation is resolved by using a battery integration and a single-phase grid as an external power backup. A battery integrated solar PV array and its control are evaluated to get a high reliable and fully utilised water pumping with PMBLDC motor. A grid interactive solar PV array and its control are demonstrated to get a well-engineered and fully utilised water pumping with PMBLDC motor such that the water pumping is not affected by the intermittency of the solar PV generation. The power is drawn from the single-phase grid in case the solar PV array is not able meet the power demand required by the water pumping system. Bi-directional power flow control is implemented for grid integrated water pumping system. The bi-directional power flow control gives an additional flexibility to feed the extra power to the utility grid by the installed solar PV array, which is not utilised for the water pumping system. This concept leads to a full utilization of the installed resources. Moreover, it is found as a source of earning by feeding electricity to the utility grid. The power quality (PQ) standard such as total harmonic distortion (THD) and power factor of grid current are mate by the developed system as per the IEEE-519 standard.

All the developed configurations are modelled and analysed using MATLAB/ Simulink tool in order to exhibit their performances under various operating conditions during steady state, starting and dynamic conditions. Simulated results are validated through experimental results obtained from the developed hardware laboratory prototype along with an industrial product prototype. The commercial viability of the developed system is justified from the developed industrial product prototype by their in-depth analysis considering cost, efficiency, size, reliability and performance.

सारांश

सिंचाई के साथ-साथ घरेलू जल पंपिंग में सौर फोटोवोल्टिक (एसपीवी) सरणी ऊर्जा का एकीकरण विशेष रूप से पृथक क्षेत्रों में बहुत विवेकपूर्ण है जहां उपयोगिता ग्रिड या तो अव्यावहारिक है या अत्यधिक है। इसके अलावा, जल पंपिंग के क्षेत्र में सौर पीवी सरणी ऊर्जा का उपयोग उपयोगिता ग्रिड लोड, कार्बन पदचिह्न को कम करता है और पारंपरिक ऊर्जा की भी बचत करता है। इस शोध कार्य में, स्थायी चुंबक ब्रशलेस डीसी (पीएमबीएलडीसी) मोटर ड्राइव का उपयोग करके सौर पीवी ऐरे फेड वॉटर पंपिंग सिस्टम के लिए विभिन्न पद्धतियां विकसित की गई हैं। एक अत्यधिक कुशल पीएमबीएलडीसी मोटर सौर फोटोवोल्टिक सरणी के आकार और इसलिए स्थापना लागत को काफी कम कर देती है। इसके अलावा, एक इंडक्शन मोटर के विपरीत, पीएमबीएलडीसी मोटर की गति आपूर्ति की आवृत्ति तक सीमित नहीं है। इससे मोटर का आकार कम हो जाता है। एक उच्च कुशल कॉम्पैक्ट आकार अनुकूलित पीएमबीएलडीसी मोटर की जांच और डिजाइन यहां किया गया है। उपलब्ध समकक्ष की तुलना में डिज़ाइन की गई मोटर में दक्षता और लागत अनुकूलन किया जाता है। डिज़ाइन की गई मोटर में चुंबकीय मात्रा के अनुकूलन से डिज़ाइन की गई मोटर की लागत का अनुकूलन होता है। डिज़ाइन परिणामों के सत्यापन के लिए औद्योगिक विनिर्माण सुविधा का उपयोग करके डिज़ाइन की गई मोटर का एक प्रोटोटाइप निर्मित किया जाता है।

एक स्थिति सेंसर रहित, कॉम्पैक्ट, कुशल और लागत प्रभावी पीएमबीएलडीसी मोटर ड्राइव की जांच सेंसर रहित गति नियंत्रण के साथ की जाती है। हॉल इफ़ेक्ट स्थिति सेंसर, सेंसिंग के लिए, वीएसआई के डीसी बस में वोल्टेज सेंसर और मोटर चरण वर्तमान सेंसर विकसित पीएमबीएलडीसी मोटर ड्राइव में समाप्त हो जाते हैं। इसके अलावा, सेंसर रहित गति नियंत्रण आभासी स्थिति अनुमान का उपयोग करके किया जाता है। सिस्टम में वीएसआई का उपयोग करके पीएमबीएलडीसी मोटर को फीड करते हुए सौर फोटोवोल्टिक सरणी की अधिकतम पावर प्वाइंट ट्रैकिंग (एमपीपीटी) शामिल है। यह विकसित

प्रणाली उसी वीएसआई का उपयोग करके अपनी अधिकतम उपलब्ध शक्ति पर सौर फोटोवोल्टिक सरणी को संचालित करने में सक्षम है, जिसका उपयोग सेंसर रहित कम्यूटेशन और गति नियंत्रण के लिए किया जाता है। सौर फोटोवोल्टिक ऐरे से संचालित जल पंपिंग को और अधिक विश्वसनीय और किफायती विकसित करने के लिए, दो-चरणीय जल पंपिंग प्रणाली के लिए स्थिति सेंसर रहित पीएमबीएलडीसी मोटर ड्राइव भी विकसित की गई है। सबमर्सिबल पानी पंपिंग के लिए पीएमबीएलडीसी मोटर का उपयोग करने का एकमात्र तरीका स्थिति सेंसर रहित नियंत्रण पाया गया है। डिजाइन प्रणाली में डीसी-डीसी कनवर्टर के एकीकरण की दिशा में काम को आगे बढ़ाया गया है और पानी पंपिंग के लिए एक डबल स्टेज सौर पीवी सरणी संचालित पीएमबीएलडीसी मोटर ड्राइव की भी जांच की जा रही है। एमपीपी के लिए अलग-अलग डीसी-डीसी कनवर्टर रखे गए हैं और उनकी सादगी, लागत, डिजाइन चुनौती और दक्षता के आधार पर प्रदर्शन का विश्लेषण किया जाता है।

सौर पीवी सरणी बिजली उत्पादन की रुक-रुक कर होने वाली सौर पीवी सरणी संचालित जल पंपिंग में बातचीत का एक चुनौतीपूर्ण मामला बैटरी एकीकरण और बाहरी पावर बैकअप के रूप में एकल चरण ग्रिड का उपयोग करके हल किया गया है। पीएमबीएलडीसी मोटर के साथ उच्च विश्वसनीय और पूरी तरह से उपयोग की जाने वाली जल पंपिंग प्राप्त करने के लिए एक बैटरी एकीकृत सौर पीवी सरणी और इसके नियंत्रण का मूल्यांकन किया जाता है। एक ग्रिड इंटरैक्टिव सौर पीवी सरणी और इसके नियंत्रण को पीएमबीएलडीसी मोटर के साथ एक अच्छी तरह से इंजीनियर और पूरी तरह से उपयोग की जाने वाली जल पंपिंग प्राप्त करने के लिए प्रदर्शित किया जाता है ताकि जल पंपिंग सौर पीवी पीढ़ी की रुक-रुक कर प्रभावित न हो। यदि सौर पीवी सरणी जल पंपिंग प्रणाली के लिए आवश्यक बिजली की मांग को पूरा करने में सक्षम नहीं है, तो बिजली एकल-चरण ग्रिड से ली जाती है। ग्रिड एकीकृत जल पम्पिंग प्रणाली के लिए द्वि-दिशात्मक विद्युत प्रवाह नियंत्रण लागू किया गया है। द्वि-दिशात्मक बिजली प्रवाह नियंत्रण स्थापित सौर पीवी सरणी द्वारा उपयोगिता ग्रिड को अतिरिक्त बिजली खिलाने के लिए अतिरिक्त लचीलापन देता है, जिसका उपयोग जल पंपिंग प्रणाली के लिए नहीं किया जाता है। यह

अवधारणा स्थापित संसाधनों के पूर्ण उपयोग की ओर ले जाती है। इसके अलावा, यह उपयोगिता ग्रिड को बिजली खिलाकर कमाई के स्रोत के रूप में पाया जाता है। बिजली की गुणवत्ता (पीक्यू) मानक जैसे कि कुल हार्मोनिक विरूपण (टीएचडी) और ग्रिड करंट के पावर फैक्टर को आईईईई-519 मानक के अनुसार विकसित प्रणाली द्वारा समायोजित किया जाता है।

सभी विकसित कॉन्फ़िगरेशन को स्थिर स्थिति, प्रारंभिक और गतिशील स्थितियों के दौरान विभिन्न परिचालन स्थितियों के तहत उनके प्रदर्शन को प्रदर्शित करने के लिए MATLAB/Simulink टूल का उपयोग करके मॉडलिंग और विश्लेषण किया जाता है। सिम्युलेटेड परिणामों को औद्योगिक उत्पाद प्रोटोटाइप के साथ विकसित हार्डवेयर प्रयोगशाला प्रोटोटाइप से प्राप्त प्रयोगात्मक परिणामों के माध्यम से मान्य किया जाता है। विकसित प्रणाली की व्यावसायिक व्यवहार्यता को लागत, दक्षता, आकार, विश्वसनीयता और प्रदर्शन पर विचार करते हुए उनके गहन विश्लेषण द्वारा विकसित औद्योगिक उत्पाद प्रोटोटाइप से उचित ठहराया जाता है।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

AC	Alternating Current
ADC	Analog to Digital Converter
ANN	Artificial Neural Network
BIS	Bureau of Indian Standards
BLDC	Brushless DC
CCM	Continuous Conduction Mode
CEC	Clean Energy Council
CER	Clean Energy Regulator
CLP	Connector LED Panel
CPU	Central Processing Unit
CSC	Canonical Switching Cell
CSI	Current Source Inverter
DAC	Digital to Analog Converter
DC	Direct Current
DSP	Digital Signal Processor
EMF	Electromotive Force
EMI	Electro-magnetic Interference
FL	Fuzzy Logic
IC	Integrated Circuit
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
IM	Induction motor
InC	Incremental Conductance
LED	Light Emitting Diode
LPF	Low Pass Filter
MNRE	Ministry of New & Renewable Energy
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NASA	National Aeronautics and Space Administration

Op-Amp	Operational Amplifier
P&O	Perturbation and Observation
PD	Positive Displacement
PFC	Power Factor Corrected
PI	Proportional-Integral
PLL	Phase Locked Loop
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PQ	Power Quality
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SEPIC	Single Ended Primary Inductor Converter
Si	Silicon
SRM	Switched Reluctance Motor
STC	Standard Test Condition
SyRM	Synchronous Reluctance Motor
TCDIC	Transformer Coupled Dual Input Converter
THD	Total Harmonic Distortion
TIBC	Two Inductor Boost Converter
TIBuck	Two Input Buck
UPF	Unity Power Factor
VSC	Voltage Source Converter
VSI	Voltage Source Inverter
VFI	Voltage Fed Inverter
ZSI	Z-Source Inverter
WPS	Water Pumping System