DESIGN, DEVELOPMENT, AND CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE WITH INVERTER OUTPUT LC FILTER

PRASUN MISHRA

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2020

DESIGN, DEVELOPMENT, AND CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVE WITH INVERTER OUTPUT LC FILTER

by

PRASUN MISHRA

Department of Electrical Engineering

Submitted

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

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2020

CERTIFICATE

It is certified that the thesis entitled "**Design, Development, and Control of Induction Motor Drive with Inverter Output LC Filter**," being submitted by **Mr. Prasun Mishra** 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 the award of any other degree or diploma.

Dated: 17. 04. 2020

(Dr. Ramkrishan Maheshwari)

Associate Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016, India

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my sincere and heartfelt gratitude to my supervisor, Dr. Ramkrishan Maheshwari, for the fruitful technical discussions, indispensable suggestions, and motivations which really invigorated me to overcome the hurdles in my doctoral research work. He always asked me to do a thorough analysis of the research problems to find meaningful solutions supported by mathematical and experimental validations, and steered me in the right co-ordinate. It was really a great opportunity to work under his skillful guidance on the trending research areas which finally opened the doors of the illuminated research world for me and made me believe in myself.

I am grateful to my SRC members, Prof. M. Veerachary, Dr. Amit Kumar Jain, and Dr. Ashu Verma, for evaluating my research work critically in every semester and giving valuable suggestions which really helped me to grow through with time. I want to thank Dr. Deepak Patil for a few fruitful technical sessions and suggestions. I also convey my regards to Prof. Bhim Singh, Prof. G. Bhuvaneswari, and Dr. Anandarup Das for their encouragement and support.

I am thankful to the staff of the PG Section, Account Section, Purchase and Store Section, Industrial R&D Unit, Central Library, and Departmental Office. I extend my immense gratitude to MHRD for monthly fellowship and SERB for funding the research expenditures. I extend my thanks to the staff (Mr. Dhanraj Singh and others) of UG Drives Lab and registered vendors for providing me the facilities and assistance timely. I would like to thank the staff of Jwalamukhi Hostel, Security Section, Scoops, Xerox Center, refreshment shops, and others for their convenient affairs and support.

The healthy work culture of UG Drives Lab of IIT Delhi has been a great pleasure to me. I would like to thank my associates (Mr. Navneet Vaishnav, Mr. Nikhil Krishna, Mr. Aamir Rafiq, Mr. Rahul Sharma, Mr. Himanshu Swami, Mr. Martin Cheerangal, Miss Nibedita Parida, Miss Nidhi Bist, Miss Khushboo Kumari, Miss Chesta Jain, Miss Apurva Verma, and others) and the alumni of UG Drives Lab (Dr. Kapil Shukla, Dr. Himanushu Mishra, Mr. Navneet Mangal, Mr. Gaurav Kumar, Mr. Thakur Sumeet Singh, Mr. Phani Sekhar Chennu, Mr. Sourabh Khandelwal, Mr. Rakesh Panda, Mr. Amit Kumar Kandi, Mr. Sritam Jena, and others) for their encouragement and support during my doctoral study. I also thank Dr. Sayan Basu Roy and Mr. Joyjit Mukherjee for a few doubt clarification sessions on control theory. I really want to mention the name of my

friends (Dr. Nishant Kumar, Mr. Anshul Varshney, Mr. Anjanee Mishra, Mr. Piyush Kant, Mr. Priyank Shah, Mr. Sreejith Raveendran, Mr. Tripurari Nath Gupta, Mr. Nikhil Kumar, Mr. Shrikant Misal, Mr. Saurabh Shukla, Mr. Akash Jain, and others), and juniors (Mr. Siddhartha Sarkar, Mr. Dhiman Das, Mr. Priyabrata Shaw, Mr. Punit Kumar Singhal, Mr. Ambuj Sharma, Mr. Shubham Sundeep, Mr. Bipin Patel, Mr. Purnashis Chakraborty, and the members of Basanta Utsab Samity of IIT Delhi) for making my stay enjoyable, hassle-free and memorable at IIT Delhi.

Finally, I wish to express my heartfelt profound respect, indebtedness, and intense love to my parents, siblings, teachers and my well-wishers for their blessings, love, affection, sacrifice, and co-operation to bring me up to this level.

Date: 17. 04. 2020 Prasun Mishra

ABSTRACT

Pulse-width modulated (PWM) three-phase (3-ph) voltage source inverter (VSI) fed 3-ph squirrel cage induction motor (SQIM) drive has been evolved into a matured and widely accepted technology through uninterrupted research works carried out over time. It has been widely used in various domestic and industrial constant or adjustable speed drives where the motor drive has to meet a constant or dynamic speed and torque demands of the load in a controlled manner based on the application requirements. In recent time, the superior material properties of silicon-carbide (SiC) over silicon (Si) have emerged the possibilities of using SiC power semiconductor devices in place of the prolonged Si power semiconductor devices used in the VSI. The SiC power device has the capabilities of blocking higher voltage, withstanding higher temperature, and switching at higher switching frequency with lower switching losses than the existing Si power device and thus it helps to increase the power density as well as efficiency of the VSI especially at medium and high power drives and also to reduce the cooling requirements. However, the cost of the SiC devices is still quite high as compared to the cost of Si devices and the power semiconductor device manufactures are trying to reduce it as much as possible.

However, the fast turn on and fast turn off features of the SiC devices in such high switching frequency operation make the design and printed circuit board (PCB) layout of dc-bus bar, gate driving circuits, protection circuits, sensing circuits of the SiC VSI quite challenging because of the presence of parasitic inductances and capacitances in different paths of the circuits. Therefore, a 5 kVA SiC MOSFETs based two-level 3-ph VSI have been designed, developed in-house as a part of this research work. The developed VSI has mainly three parts such as Power and Sensor Circuits (PSC), Gate Driver and Protection Circuits (GDPC), and Control Interface and Signal Conditioning Circuits (CISCC). The developed SiC VSI been successfully tested with an open-loop *v/f* controlled 3-ph SQIM with load at 5 kHz and 50 kHz switching frequencies and its performance has been evaluated. TMS320F28335 has been used as a digital signal controller for implementing the algorithm of open-loop *v/f* control. The steady-state temperature of the heat-sink of the VSI with natural and forced cooling has been measured by a thermocouple while the VSI continuously drives the SQIM for 90 minutes.

Space-vector pulse-width modulation technique is generally used in a two-level VSI fed SQIM drive mainly for better dc-bus utilization. However, the PWM output voltages of the VSI mainly

contain fundamental frequency component, higher-order harmonics in the sideband of the carrier or switching frequency, and certain low order harmonics because of the dead-time used in the VSI to prevent shoot-through. These higher-order switching harmonics mainly incur core losses (hysteresis and eddy current loss) and temperature rise inside the motor, and thus reduce the overall efficiency of the SQIM drive. The rate of rise (*dv/dt*) of the stator-voltages of the SQIM increases significantly because of the fast switching transients of the device with high dc-link voltage. It basically aggravates the chances of winding insulation failure, bearing current, electromagnetic magnetic interference issues, etc. Therefore, sinusoidal LC filter network is used in between the VSI and SQIM to make the motor input voltages sinusoidal by attenuating higher-order harmonics present in the pulse-width modulated output voltages of the VSI. It also increases the life of the motor by drastically reducing the fast switching transients of the motor input voltages. In this research work, a new methodology of designing a sinusoidal LC filter is proposed for a PWM VSI fed SQIM drive where the filter capacitance is chosen based on the reactive power demand of the SQIM at its rated frequency. However, the calculation of filter inductance in the proposed filter design method (PFDM) is similar to the calculation of filter inductance in the standard filter design method (SFDM). The proposed LC filter serves the purpose of a sinusoidal filter, reduces the *dv/dt*, and also supplies the reactive power demand of the SQIM and thus reduces the inverter output currents. The impacts of the LC filter designed by SFDM and PFDM on the magnitude of switch current, losses in the drive, temperature of dc-link capacitor, *dv/dt* at motor terminal, stator flux, and air-gap torque of the SQIM are analyzed with apposite simulation and experimental results. The experiments have been performed in an experimental set-up where the developed VSI is switching at 50 kHz and driving a SQIM in open loop *v/f* control at different test conditions. The proposed methodology can be used to design a sinusoidal LC filter for any VSI made of Si IGBTs or SiC MOSFETs switching at 5 kHz or 50 kHz.

SQIM drive without LC filter in rotor-flux oriented control (RFOC) is a stable closed-loop system at different operating points if two inner-loop and two outer-loop controllers are designed properly. However, the introduction of LC filter in between the VSI and the SQIM may make the closed-loop system unstable at different operating points when the parameters of the previously designed controllers for RFOC of SQIM without the filter are not changed. Therefore, the instability of the closed-loop drive at different operating points has been analyzed with the same controller parameters and it has been observed that such instability occurs due to high amplitude

resonance frequency oscillations. Therefore, four different active damping (AD) methods have been proposed to stabilize those unstable operating points by damping out the resonance frequency oscillations without incurring any active power loss. However, all these AD methods do not change the basic control structure of RFOC of SQIM and the parameters of the previously designed proportional-integral (PI) controllers of RFOC of SQIM without the filter.

The performance of the first two AD methods in RFOC of SQIM with LC filter is dependent on the proper calculation of damping gain in AD Method I using inverter-currents or gain matrix in AD Method II using LQR. In these two AD methods, compensating terms have been subtracted from the output voltage references of the inner-loop current controllers to damp out the resonance frequency oscillations without incurring any active power loss. However, multiple high-pass filters have been used for extracting resonance frequency components from the sensed state variables of the drive and the compensating terms are formulated. Moreover, these AD methods require additional sensors for sensing the inverter-currents or the voltages across the filter capacitors apart from the sensors used in RFOC of SQIM without filter.

However, AD Method III and Method IV, there is no need for additional sensors, tedious calculation of damping gain or gain matrix, high-pass filters for resonance frequency extraction. The AD Method III basically subtracts two feed-forward terms from two current references of the inner stator-current loops in RFOC of SQIM with the filter to stabilize the unstable operating points. The AD Method IV basically introduces time delay and modifies the inner stator-current loops to stabilize the unstable operating points. The performances of the drive with these methods have also been verified w.r.t the parametric variation of the system. Theoretical analysis, multiple simulation results, and experimental results have been presented at different test conditions of the drive to validate the effectiveness of four AD methods confirming satisfactory steady-state and dynamic performance of the SQIM drive with the filter.

सार

पल्स-चौड़ाई मॉड्यूलेटेड (पीडब्लूएम) तीन-चरण (3-ph) वोल्टेज स्रोत इन्वर्टर (VSI) खिलाया 3-ph गिलहरी पिंजरे प्रेरण मोटर (SQIM) ड्राइव को एक परिपक्व और व्यापक रूप से स्वीकार किए गए प्रौद्योगिकी पर निर्बाध शोध कार्यों में विकसित किया गया है| यह विभिन्न घरेलू और औद्योगिक निरंतर या समायोज्यगति ड्राइव में व्यापक रूप से उपयोग किया गया है जहां मोटर ड्राइव को एप्लिकेशन आवश्यकताओं के आधार पर नियंत्रित तरीके से लोड की एक निरंतर या गतिशील गति और टोक़ मांगों को पूरा करना है। हाल के समय में, सिलिकॉन (कार्ब) से अधिक सिलिकॉन (कार्ब) (SiC) के श्रेष्ठ भौतिक गुणोंने VSI में प्रयुक्त लंबे समय तक Si पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणों के स्थान पर SiC पॉवर सेमीकंडक्टर उपकरणों का उपयोग करने की संभावनाओं को उभारा है। SiC पावर डिवाइस में उच्च वोल्टेज को अवरुद्ध करने, उच्च तापमान को समझने, और मौजूदा स्विचन के साथ कम स्विचिंग आवृत्ति पर स्विच करने की क्षमता होती है, जो मौजूदा Si पॉवर डिवाइस की तुलना में कम होती है और इस प्रकार यह पावर डेंसिटी और साथ ही VSI की दक्षता को बढ़ाने में मदद करती है। मध्यम और उच्च शक्ति ड्राइव और शीतलन आवश्यकताओं को कम करने के लिए भी। हालांकि, SiC उपकरणों की लागत अभी भी काफी अधिक है क्योंकि Si डिवाइसों की लागत और पावर सेमीकंडक्टर डिवाइस मैन्युफैक्चरर इसे ज्यादा से ज्यादा कम करने की कोशिश कर रहे हैं।

हालांकि, इस तरह के उच्च स्विचिंग आवृत्ति ऑपरेशन में SiC उपकरणों की तेज़ गति और तेज़ी से बंद सुविधाएँ, डीसी-बसबार, गेट ड्राइविंग सर्किट, सुरक्षा सर्किट, SiC के संवेदन सर्किट का डिज़ाइन और मुद्रित सर्किट बोर्ड (PCB) लेआउट बनाती हैं। सर्किट के विभिन्न रास्तों में परजीवी अधिष्ठापन और समाई की उपस्थिति के कारण वीएसआई काफी चुनौती पूर्ण है। इसलिए, 5 kVA SiC MOSFETs आधारित दो-स्तरीय 3-ph VSI को डिज़ाइन किया गया है, जो इस शोध कार्य के एक भाग के रूप में विकसित किया गया है। विकसित VSI में मुख्य रूप से तीन भाग होते हैं जैसे पावर और सेंसर सर्किट (PSC), गेट ड्राइवर और प्रोटेक्शन सर्किट (GDPC), और कंट्रोल इंटरफेस और सिग्नल कंडीशनिंग सर्किट (CISCC)। सेंसर सर्किट में तीन-चरण मोटर धाराओं को संवेदन के लिए तीन वर्तमान सेंसर और डीसी-लिंक वोल्टेज को संवेदन के लिए एक वोल्टेज सेंसर होता है। विकसित SiC VSI को एक ओपन-लूप v / f नियंत्रित 3-ph SQIM के साथ 5 kHz और 50 kHz स्विचिंग आवृत्तियों पर लोड के साथ सफलता पूर्वक परीक्षण किया गया है और इसके प्रदर्शन का मूल्यांकन किया गया है। TMS320F28335 का उपयोग ओपन-लूप v / f नियंत्रण के एल्गोरिथ्म

को लागू करने के लिए एक डिजिटल सिग्नल कंट्रोलर के रूप में किया गया है। प्राकृतिक और मजबूर शीतलन के साथ वीएसआई के गर्मी-सिंक का स्थिर-राज्य तापमान एक थर्मोकपल द्वारा मापा गया है, जबकि वीएसआई लगातार एस क्यूआई एम को 90 मिनट तक चलाता है।

अंतरिक्ष-वेक्टर पल्स-चौड़ाई मॉड्यूलेशन तकनीक का उपयोग आमतौर पर दो-स्तरीय वीएसआई फेड एस क्यू आई एम ड्राइव में किया जाता है जो मुख्य रूप से बेहतर डीसी-बस अनुकूलन के लिए होता है। हालांकि, वीएसआई के पीडब्लूएम आउटपुट वोल्टेज में मुख्य रूप से मौलिक आवृत्ति घटक, वाहक के साइड बैंड में उच्च-क्रम के हारमोनिक्स और स्विचिंग-थ्रू को रोकने के लि एवीएसआई में उपयोग किए गए मृत-समय के कारण कुछ कम क्रम के हार्मोनिक्स शामिल हैं। ये उच्च-क्रम स्विचिंग हार्मोनिक्स मुख्य रूप से मुख्य नुकसान (हिस्टैरिसीस और एड़ी चालू नुकसान) और मोटर के अंदर तापमान में वृद्धि करते हैं, और इस प्रकार एस क्यूआई एम ड्राइव की समग्रदक्षता को कम करते हैं। SQIM केस्टेटर-वॉल्टेज के उदय (DV / dt) की दर डिवाइस की तेजी सेस्विचिंग ट्रांजिस्टर और उच्च स्विचिंग आवृत्ति ऑपरेशन के कारण काफी बढ़ जाती है। यह मूल रूप से घुमावदार इन्सुलेशन विफलता की संभावनाओं को बढ़ाता है, वर्तमान, विद्युत चुम्बकीय चुंबकीय हस्तक्षेप मुद्दों आदि को प्रभावित करता है। इसलिए, वीएसआई और एस क्यू आई एम के बीच साइनसॉइडल एलसी फिल्टर नेटवर्क का उपयोग मोटर इनपुट वोल्टेज सिटु से लाल को उच्च-क्रम हार्मोनिक्स में उपस्थित होने के लिए किया जाता है। VSI की पल्स-चौड़ाई संशोधित आउटपुट वोल्टेज। यह मोटर इनपुट वोल्टेज के तेजी से स्विचिंग के संक्रमण को कम करके मोटर के जीवन को भी बढ़ाता है। इस शोध कार्य में, पीडब्लूएम वीएसआई फीडेड एस क्यू आई एम ड्राइव के लिए साइनसॉइडल एलसी फिल्टर डिजाइन करने की एक नई पद्धति प्रस्तावित की गई है, जहां रेटेड आवृत्ति पर एस क्यू आई एम की प्रतिक्रियाशील बिजली की मांग के आधार पर फिल्टर कैपेसिटेंस चुना जाता है। हालांकि, प्रस्तावित फ़िल्टर डिज़ाइन विधि (PFDM) में फ़िल्टर इंडक्शन की गणना मानक फ़िल्टर डिज़ाइन विधि (SFDM) में फ़िल्टर इंडक्शन की गणना के समान है। प्रस्तावित नियंत्रण रेखा फ़िल्टर एक sinusoidal फ़िल्टर के उद्देश्य को पूरा करता है, DV / dt को कम करता है, और SQIM की प्रतिक्रियाशील बिजली की मांग की आपूर्ति भी करता है और इस प्रकार इन्वर्टर आउटपुट धाराओं को कम करता है।स्विच करेंट के परिमाण पर SFDM और PFDM द्वारा डिजाइन किए गए LC फ़िल्टर के प्रभाव, ड्राइव में नुकसान, डीसी-लिंक कैपेसिटर का तापमान, मोटर टर्मिनल पर DV / dt, स्टेटर फ्लक्स और SQIM के एयर-गैप टॉर्क का विश्लेषण किया जाता है। Apposite सिमुलेशन और प्रयोगात्मक परिणामों केसाथ। प्रयोग एक प्रयोगात्मक सेट-अप में किए गए हैं जहां विकसित VSI 50 kHz पर स्विच कर रहा है और विभिन्न परीक्षण स्थितियों में ओपन लूप v / f नियंत्रण

में एक SQIM ड्राइविंग कर रहा है। प्रस्तावित कार्यप्रणाली का उपयोग 5 kHz या 50 kHz पर स्विच करने वाले Si IGBTs या SiC MOSFETs से बने किसी भी VSI के लिए एक साइनसोइडल LC फ़िल्टर को डिज़ाइन करने के लिए किया जा सकता है।

रोटर-फ्लक्स ओरिएंटे डकंट्रोल (RFOC) में LC फिल्टर के बिना SQIM ड्राइव विभिन्न ऑपरेटिंग बिंदुओं पर एक स्थिर बंद लूप सिस्टम है यदि दो इनर-लूप और दो बाहरी-लूप नियंत्रकों को ठीक से डिज़ाइन किया गया है। हालाँकि, VSI और SQIM के बीच LC फ़िल्टर की शुरूआत, बंद लूप सिस्टम को विभिन्न ऑपरेटिंग बिंदुओं पर अस्थिर कर सकती है जब फ़िल्टर के बिना SQIM के RFOC के लिए पहले से डिज़ाइन किए गए नियंत्रकों के पैरामीटर नहीं बदले जाते। इसलिए, विभिन्न ऑपरेटिंग बिंदुओं पर बंद लूप ड्राइव की अस्थिरता का विश्लेषण एक ही नियंत्रक मापदंडों के साथ किया गया है और यह देखा गया है कि उच्च अस्थिरता प्रतिध्वनि आवृत्ति दोलनों के कारण ऐसी अस्थिरता होती है। इसलिए, चार अलग-अलग सक्रिय भिगोना (AD) विधियाँ उन अस्थिर संचालन बिंदुओं को स्थिर करने के लिए प्रस्तावित की गई हैं जो बिना किसी सक्रिय शक्ति हानि के प्रति ध्वनि आवृत्ति दोलनों को बाहर निकालते हैं। हालाँकि, ये सभी AD विधियाँ SQIM के RFOC की मूल नियंत्रण संरचना और फ़िल्टर के बिना SQIM के RFOC के पहले से डिज़ाइन किए गए आनुपातिक-इंटीग्रल (PI) नियंत्रकों के मापदंडों को नहीं बदलते हैं।

LC फिल्टर के साथ SQIM के RFOC में पहले दो AD विधियों का प्रदर्शन AD विधि में इन्वर्टर-करंट्स का उपयोग करने या LQR का उपयोग करके AD मैट्रिक्स में लाभ मैट्रिक्स की सही गणना पर निर्भर है। इन दो AD विधियों में, किसी भी सक्रिय बिजली के नुकसान के बिना अनुनाद आवृत्ति दोलनों को नम करने के लिए आंतरिक-लूप वर्तमान नियंत्रकों के आउटपुट वोल्टेज संदर्भों से क्षतिपूर्ति की शर्तों को घटाया गया है। हालांकि, ड्राइव के संवेदी अवस्था चर से अनुनाद आवृत्ति घटकों को निकालने के लिए कई उच्च-पास फिल्टर का उपयोग किया गया है और क्षतिपूर्ति की शर्तें तैयार की गई हैं। इसके अलावा, इन AD तरीकों में इनवर्टर-करंट या सेंसिटिव कैपेसिटर के अलावा वोल्टेज के अलावा SQIM के RFOC में इस्तेमाल किए गए सेंसर के अलावा अतिरिक्त सेंसर की आवश्यकता होती है।

हालाँकि, AD Method III और Method IV, अतिरिक्त सेंसरों की आवश्यकता नहीं है, डंपिंग गेन या लाभ मैट्रिक्स की थकाऊ गणना, अनुनाद आवृत्ति निष्कर्षण के लिए उच्च-पास फिल्टर। AD विधि मूल रूप से अस्थिर संचालन बिंदुओं को स्थिर करने के लिए फ़िल्टर के साथ SQIM के RFOC में आंतरिक स्टेटर-करंट लूप के दो वर्तमान संदर्भों से दो फीड-फॉरवर्ड शब्दों को घटाता है। AD विधि IV मूल रूप से समय की देरी का परिचय देता है और अस्थिर संचालन बिंदुओं को स्थिर करने के लिए आंतरिक स्टेटर-

वर्तमान छोरों को संशोधित करता है। इन विधियों के साथ ड्राइव के प्रदर्शन को सिस्टम के पैरामीट्रिक भिन्नता w.r.t भी सत्यापित किया गया है। फिल्टर के साथ SQIM ड्राइव के संतोषजनक स्थिर-राज्य और गतिशील प्रदर्शन की पुष्टि करने वाले चार एडी तरीकों की प्रभावशीलता को मान्य करने के लिए ड्राइव के विभिन्न परीक्षण स्थितियों में सैद्धांतिक विश्लेषण, कई सिमुलेशन परिणाम, और प्रयोगात्मक परिणाम प्रस्तुत किए गए हैं।

Table of Contents

LIST OF FIGURES

Fig. 5.57. i_{sa} (10A/div), v_{sa} (200V/div), i_{mr} (5.56 A/div), and ω_e (100 rad/s/div) with MC when the speed reference is fixed at 100 rad/s, and the load is applied at 2.50 s and removed at 6.30 s.

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

ASD	Adjustable Speed Drives
AD	Active Damping
BNC	Bayonet Neill-Concelman
CSD	Constant Speed Drives
CMR	Common-Mode Rejection
CCS	Code Composer Studio
CISCC	Control Interface and Signal Conditioning Circuits
CLTF	Closed-Loop Transfer Functions
DTC	Direct Torque control
DSC	Digital Signal Controller
DESAT	Desaturation
DFT	Discrete Fourier Transform
EMI	Electromagnetic Interference
EMC	Electromagnetic Compatibility
ESR	Equivalent Series Resistance
FOC	Field-Oriented Control
FRC	Flat Ribbon Cable
FFT	Fast Fourier Transform
FF	Feed-Forward
GDPC	Gate Driver & Protection Circuits
GM	Gain Margin
IDE	Integrated Development Environment
LQR	Linear Quadratic Regulator
MC	Modified Controllers
PWM	Pulse-Width Modulated
PI	Proportional-Integral
PSC	Power and Sensor Circuits
PFDM	Proposed Filter Design Method
PM	Phase Margin
RMS	Root Mean Square
RFOC	Rotor-Flux Oriented Control
RFR	Rotor-Flux Reference
SQIM	Squirrel Cage Induction Motor
SFDM	Standard Filter Design Method
SiC	Silicon Carbide
Si	Silicon
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation

SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation
SFOC	Stator-Flux Oriented Control
SR	Stationary Reference
TFs	Transfer Functions
THD	Total Harmonic Distortion
THB	Temperature Humidity Bias
ULVO	Under-Voltage Lockout
VSI	Voltage Source Inverter
WTHD	Weighted Total Harmonic Distortion

NOMENCLATURE

V_{dc}	dc-link voltage
f_s	Fundamental frequency of SQIM
f_{sw}	Switching frequency of VSI
L_f	Per-phase inductance of filter inductor
C_f	Per-phase capacitance of filter capacitor
R_f	Per-phase series resistance of filter inductor
f_{res}	Effective resonance frequency
R_s, R_r	Per-phase stator and rotor resistance of SQIM
L_{ls}, L_{lr}	Per-phase stator and rotor leakage inductance of SQIM
L_s, L_r	Per-phase stator and rotor self-inductance of SQIM
L_0	Per-phase magnetizing inductance of SQIM
σ	Total leakage factor of SQIM
σ_r	Rotor leakage factor of SQIM
ω_{mr}	Speed of rotor-flux in synchronously rotating rotor-flux reference frame
ω_e	Electrical speed of the rotor of SQIM
ω_r	Slip speed of SQIM
J	Moment of inertia of SQIM
B	Friction coefficient of SQIM
m_d	Developed electromagnetic torque of SQIM
m_l	Externally applied load torque
P	Number of poles of SQIM
ρ_{mr}	Angle between rotor-flux vector and stator-axis
ε	Angle between stator-axis and rotor-axis
$i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$	α and β components of stator-current in SR frame
$v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$	α and β components of stator-current in SR frame
$\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$	α and β components of rotor-flux in SR frame
i_{sd} , i_{sq}	d-and q-axis components of stator-current
v_{sd} , v_{sq}	d-and q-axis components of stator-voltage
i_{mr}	Rotor magnetizing current
v_{ffd} , v_{ffq}	d- and q-axis feed-forward terms in RFOC
i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}	a, b, and c phase stator-currents
v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}	a, b, and c phase stator-voltages
T_d	Sampling and transport delay in VSI and DSC
T_{isd} , T_{isq}	Time constant of the d- and q-axis stator-current controller
K_{isd} , K_{isq}	Gain of the d- and q-axis stator-current PI controller
K_{imr}	Gain of the magnetizing current PI controller
T_{imr}	Time constant of the magnetizing current PI controller

K_{ω}	Gain of the speed PI controller
T_{ω}	Time constant of the speed PI controller
$i_{inv\alpha}$, $i_{inv\beta}$	α and β components of inverter-current in SR frame
$v_{inv\alpha}$, $v_{inv\beta}$	α and β components of inverter-voltage in SR frame
i_{invd} , i_{invq}	*d*- and *q*-axis components of inverter-current
v_{invd} , v_{invq}	*d*- and *q*-axis components of inverter-voltage
i_{inva} , $i_{invb,}$ i_{invc}	*a*, *b*, and *c* phase inverter-currents
$v_{inva,}$ $v_{invb,}$$v_{invc}$	*a*, *b*, and *c* phase inverter-voltages
K_{damp}	Value of damping gain
$K_{critical}$	Critical value of damping gain
ξ	Damping factor of LC filter