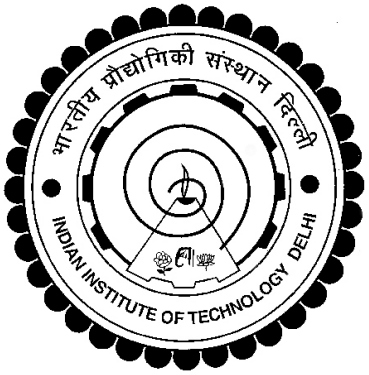
DOUBLE-INVERTER FED WOUND ROTOR INDUCTION MACHINE DRIVES: CONTROL AND RIPPLE MINIMIZATION

NIKHIL KRISHNA BAJJURI



DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

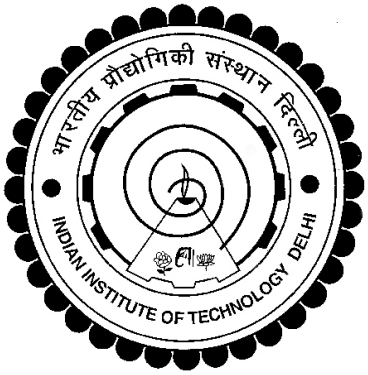
NOVEMBER 2020

DOUBLE-INVERTER FED WOUND ROTOR INDUCTION MACHINE DRIVES: CONTROL AND RIPPLE MINIMIZATION

by

NIKHIL KRISHNA BAJJURI
Department of Electrical Engineering

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



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NOVEMBER 2020

Certificate

It is certified that the thesis entitled "**Double-Inverter fed Wound Rotor Induction Machine Drives: Control and Ripple Minimization**," being submitted by **Mr. Nikhil Krishna Bajjuri** 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. The matter embodied in this thesis has not been submitted for award of any other degree or diploma.

Dated:

(Dr. Amit Kumar Jain)
Department of Electrical Engineering,
Indian Institute of Technology Delhi,
Hauz Khas, New Delhi-110016, India.

Acknowledgements

It has always been a pleasure to remind all the excellent people connected, directly or indirectly, to my doctoral research.

First of all, I bow to my head in respect to **Dr. Amit Kumar Jain**, my thesis advisor, especially for imparting the first seed of knowledge on Wound Rotor Induction Machines. His patience and calmness, in all forms of life, has always surprised me. His insight and foreseeing nature has helped me in gaining the maximum out the my research life at IIT. The brain storming sessions with him will be the most cherished technical moments of my life. Apart from the doctoral research, he has been at a constant help in balancing my professional and personal life.

Second, I shall not miss this opportunity to express my indebtedness to **P. Vinod Kumar**, Asst. Prof., C.V.R College of Engineering, without whom the journey to the IIT would not have been possible. His guidance, throughout the journey of analog and power electronic circuit design, is unforgettable. The knowledge gained from the power electronic projects, carried out under his guidance, has helped me to validate my doctoral research.

Third, I thank the review committee members, **Prof. M. Veerachary**, **Dr. Ramkrishan Maheshwari**, and **Dr. Anandarup Das**, for their appreciation, suggestions, and thoughtfulness, during the progress review sessions. I would like to appreciate the laboratory facilities and research environment provided by **Dr. Ramkrishan Maheshwari**, and **Dr. Anandarup Das**. I would also like to take this opportunity to thank **Dr. Seshan Srirangarajan**, for his help in procuring the machine setup. I would also like to thank **Mr. Dhanraj Singh**, and **Late. Mr. Suresh Chand** for their constant help in consumable/non-consumable procurement and laboratory sessions.

Besides, I would like to appreciate and thank **Dr. Himanshu Misra** and **Dr. Kapil Shukla**, for their spiritual and technical discussions. Especially, the spiritual discussions have enlightened and changed my viewpoint towards the science behind Indian culture. I shall not forget the technical discussions on DSP coding with M.tech students, **Mr. Sumeet Thakur** and **Mrs. Akhila Kishore**. The technical and non-technical expeditions with **Mr. Navneet Vaishnav** will always be cherished throughout my life. The tough knowledge sharing sessions with **Dr. Prasun Mishra** have helped me in increasing my level of patience. The enlightening discussions with **Mr. Himanshu Swamy** are unforgettable. I would also take this opportunity to thank **Mr. Rishikant Sharma**, **Dr. Shailendra Kumar**, **Mr. Anshul Varshney**, and **Late Dr. Konda Srikanth Reddy** for their refreshing messing, badminton, and tea-time sessions. And, I convey my best wishes and thanks to all the lab-mates, **Mr. Rahul Sharma**, **Mrs. Nidhi Bist**, **Mrs. Nebedita Parida**, **Mr. Martin Ch.**, **Mr. Aamir Rafiq**, **Miss. Khusboo Kumari**, **Miss. Cheshta Jain**, and **Miss. Apurva Verma**.

Lastly, I bow my head in respect to my parents, **Shri. B. Rajeshwar** and **Smt. B. Chandrakala**, my elder brother, **Shri. B. Nithin Kumar**, and my family, for their constant appreciation, motivation, and sacrifice, which paved a beautiful path to my doctoral research. I find no words to express the simplest things done by my wife, **Mrs. Nandini**, which acted as stress busters. I can only thank her for bearing my absence and yet being a motivation factor to me.

The work carried out in this thesis is funded by **Vishveswaraya PhD Scheme**, Ministry of Electronics and Information Technology (MeitY), India.

(Nikhil Krishna Bajjuri)

Abstract

The presence of VSCs on the stator and rotor terminals of Double-Inverter fed Wound Rotor Induction Machine (DI-WRIM) drives add to the power handing capability and control flexibility of the drive. However, due to the stator and rotor VSCs, the control and implementation complexity as well as the harmonic content of the drive is also increased. This thesis deals with the minimization of control and implementation complexity and, the harmonic content in the DI-WRIM drives.

To minimize the control and implementation complexity, the DI-WRIM drive is modelled and controlled as '2' virtual SQIMs. In the proposed modelling and control technique of DI-WRIM as '2' virtual SQIMs, the stator and rotor side controllers are identical to conventional FOC based SQIM drives. Thus, to control the DI-WRIM drive, two FOC based SQIM drives can be directly connected to the stator and rotor terminals of the WRIM, with some external communication. The '2' virtual SQIMs must produce a common torque in the air-gap and hence, the '2' virtual SQIMs are coupled using a common medium of coupling and this medium is the load angle between the stator and rotor currents. The feasibility of the proposed modelling and control technique is presented through extensive experimental results.

Unlike in SQIM drives, the harmonic source on the rotor side of the DI-WRIM also contributes to the ripple, along with the stator side harmonic source. This ripple is superimposed on the stator and rotor, fundamental fluxes and currents and, the generated torque. Thus, the harmonic model of the DI-WRIM drive is presented, in this thesis. Similar to the ripple analysis of SQIM drives, the torque ripple and current ripple in DI-WRIM is formulated in terms of the stator and rotor flux ripples, which are estimated from their respective sides. To facilitate the open-loop estimation of torque ripple and current ripple, a rotor position (speed) independent transformation technique is also proposed, to transform the estimated flux ripples to a single flux oriented reference frame. One important aspect of the harmonic analysis is that the interaction of stator and rotor flux ripples, which form current and torque ripple, is dependent on the mode of operation of WRIM. Therefore, stator-rotor PWM combinations, formed using the available PWM techniques, are proposed to reduce the torque and current ripple. Apart from the torque and current ripple in DI-WRIM, the variation of switching loss in the stator and rotor VSCs, due to the variation of stator and rotor power factors, is also analyzed. Based on the analysis, stator-rotor PWM combinations are also proposed to solely reduce switching loss and to reduce both current ripple and switching loss, along with flux sharing schemes between stator and rotor sides. The proposed PWM combinations, which are dedicated to reduce torque ripple, current ripple and/or switching loss, are independent within each other and does not majorly effect the other ripple.

The topology of DI-WRIM resembles the topology of Double-Inverter fed Open-End Winding Induction Machine (DI-OWIM) drive. In the DI-OWIM drive, each of the two stator winding terminals are connected to two individual VSCs, with isolated dc-link. The two VSCs are switched such that a 3-Level

Neutral Point Clamped (3L-NPC) converter is emulated on the stator terminals of the OWIM, in terms of the phase voltage. Thus, the ripple in the OWIM is similar to that of a 3L-NPC converter fed SQIM (3L-SQIM). This resemblance of DI-OWIM in DI-WRIM is explored to develop Equivalent 3L (EQ-3L) stator-rotor PWM combinations such that, a 3L-NPC converter is emulated in the air-gap of the WRIM, in terms of the quadrature axes flux ripples. With the proposed EQ-3L PWM combinations, the torque ripple in DI-WRIM is equivalent to the torque ripple in 3L-SQIM drive and it is further reduced when compared to stator-rotor PWM combinations formed using available PWM techniques.

The proposed modelling and control technique, combined with the proposed stator-rotor PWM combinations, can be a solution towards high performance DI-WRIM drive.

सार

द्वि-इन्वर्टर स्रोत वाउंड-रोटर-इंडक्शन-मशीन (द्वि-इन्व.वा.रो.इं. म.) ड्राइव के स्टेटर और रोटर के अवसान पर वोल्टेज-स्रोत-कनवर्टर का होना, उसकी क्षमता शक्ति और नियंत्रण शक्ति को बढ़ाता है। लेकिन, स्टेटर और रोटर के अवसान पर वोल्टेज-स्रोत-कनवर्टर के होने से, नियंत्रण और कार्यान्वयन की जटिलता के साथ-साथ हार्मोनिक मात्रा भी बढ़ जाती है। यह थीसिस उसी नियंत्रण और कार्यान्वयन की जटिलता और हार्मोनिक मात्रा को कम करने का अध्यन करता है।

यह कार्य नियंत्रण और कार्यान्वयन की जटिलता को कम करने के लिए द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. को दो अप्रत्यक्ष स्किर्रेल-केज-इंडक्शन-मशीन (स्कि.के.इं.म) के रूप में प्रतिरूपित और नियंत्रित करता है। इसके लिए प्रस्तावित किये गए प्रतिरूप और नियंत्रण शैली में स्टेटर और रोटर के तरफ के नियंत्रक एक पारंपरिक रोटर फ्लक्स उन्मुखी स्कि-के-इं-म ड्राइव के समान हैं। यह कार्य कहता है कि द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. ड्राइव को नियंत्रित करने के लिए, किसी बाहरी संचार के साथ दो स्कि-के-इं-म ड्राइव को सीधा द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. के स्टेटर और रोटर अवसान पर लगाया जा सकता है। इसके लिए जरूरी है कि दो स्कि.के.इं.म. स्टेटर और रोटर के बीच वात पर एक समान टार्क पैदा करें, और इस कारण दो अप्रत्यक्ष स्कि.के.इं.म. एक समान माध्यम से जुड़े हैं जो कि स्टेटर और रोटर के विद्युत प्रवाह के बीच का कोण है। इस कार्य की साध्यता को विस्तार से प्रयोगों द्वारा दर्शाया गया है।

स्कि.के.इं.म. ड्राइव से भिन्न, द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. में रोटर की तरफ का हार्मोनिक स्रोत भी स्टेटर की तरफ के हार्मोनिक स्रोत की तरह तरंगो को प्रभावित करता है। यह तरंगे स्टेटर और रोटर के विद्युत प्रवाह, फ्लक्स और उत्पन्न टार्क में संलग्न हो जातीं हैं। इसीलिए, द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. का हार्मोनिक प्रतिरूप इस थीसिस में प्रसुस्त किया गया है। स्कि.के.इं.म. ड्राइव के तरंग विश्लेषण के समान, द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. टार्क तरंग और विद्युत तरंग को सुत्रित किया गया है, जिनका आंकलन उनके अपने पक्ष से किया गया है। टार्क तरंग और विद्युत प्रवाह की तरंग के ओपन-लूप आंकलन की सुविधा के मद्देनजर आंकलित फ्लक्स तरंगो को एक अकेले फ्लक्स उन्मुखी ढांचे में करने के लिए, रोटर की स्थिति से स्वतंत्र एक तकनीक भी प्रस्तावित की गई है। स्टेटर और रोटर के फ्लक्स तरंगो के मिलने से टार्क तरंग और विद्युत प्रवाह तरंग का बनना हार्मोनिक विश्लेषण का एक महत्वपूर्ण पहलू है, जो कि वा.रो.इं.म. के परिचालन पर निर्भर करता है। इसलिए, उपलब्ध पी .डब्लू. एम. तकनीक के उपयोग से टार्क तरंग और विद्युत प्रवाह के तरंगो को कम करने के लिए स्टेटर और रोटर का पी .डब्लू. एम. संयोजन प्रस्तावित किया गया है। द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. में टार्क तरंग और विद्युत प्रवाह के तरंगो के साथ साथ स्टेटर और रोटर में उनके पावर फैक्टर के कारण होने वाले स्विचिंग हानि का भी अध्धयन किया गया है। अध्धयन के अनुसार, सिर्फ स्विचिंग हानि कम करने के लिए और विद्युत प्रवाह के तरंगो के साथ साथ स्विचिंग हानि को कम करने के लिए स्टेटर और रोटर में पी .डब्लू. एम. संयोजन भी प्रस्तावित किये गए हैं। टार्क तरंग, विद्युत प्रवाह के

तरंग और/या स्विचिंग हानि को कम करने के लिए प्रस्तावित पी .डब्लू. एम. संयोजन एक दूसरे से भिन्न हैं और किसी दूसरे तरंग को प्रभावित नही करते हैं।

द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. की सांस्थिति एक द्वि इन्वर्टर स्रोतित ओपन-एन्ड वाइंडिंग इंडक्शन मशीन (द्वि-इन्व.-ओ.वा.इं.म.) की सांस्थिति को दर्शाती है। द्वि-इन्व.-ओ.वा.इं.म. में स्टेटर के दोनों अवसान दो पृथक वोल्टेज-स्रोत-कनवर्टर से जोड़े जाते हैं, जो कि अलग अलग डीसी-लिंक के साथ हैं। दो पृथक वोल्टेज-स्रोत-कनवर्टर की स्विचिंग इस तरह की जाती है कि वह ओ.वा.इं.म. के स्टेटर अवसान पर उपस्थित फेज-वोल्टेज के अनुसार एक 3-स्तर के न्यूट्रल-पॉइंट-क्लेमपड कनवर्टर का अनुकरण करें। इसीलिए, ओ.वा.इं.म. में तरंगें एक 3-स्तर के न्यूट्रल-पॉइंट-क्लेमपड कनवर्टर के समान होतीं हैं। द्वि-इन्व.-ओ.वा.इं.म. का द्वि-इन्व.वा.रो.इं.म. की तरह अनुसरण का अध्ययन एक समकक्ष 3-स्तर के स्टेटर-रोटर के पी .डब्लू. एम. संयोजन बनाने के लिए किया गया है। क्राडेचर- एक्सेस-फ्लक्स -तरंगो के रूप में यह 3-स्तर का न्यूट्रल-पॉइंट-क्लेमपड कनवर्टर वा.रो.इं.म. के स्टेटर और रोटर के बीच वात पर उत्पादित किया गया है। प्रस्तावित 3-स्तर के पी .डब्लू. एम. संयोजन को लागू करने से टार्क तरंग एक 3-स्तर के स्कि.के.इं.म ड्राइव के समान होतीं हैं, और यह तरंगें उपलब्ध पी .डब्लू. एम. तकनीक के उपयोग से स्टेटर-रोटर पी .डब्लू. एम. संयोजन बनाने की अपेक्षा और कम हो जाती हैं।

प्रस्तावित कार्यान्वयन और नियंत्रण तकनीक, प्रस्तावित स्टेटर-रोटर पी .डब्लू. एम. संयोजन के साथ एक अच्छा प्रदर्शन करने वाले द्वि-इन्व.वा.रो.इं. म. ड्राइव का समाधान पेश करते हैं

Contents

List of Figures

List of Tables

Nomenclature

Symbol	Definition
Different Reference Frames:	
$(\alpha\text{-}\beta)$	Stationary reference frame
$(a\text{-}b)$	Rotor reference frame
$(d\text{-}q)$	Synchronously rotating arbitrary reference frame
$(D\text{-}Q)$	Stator flux reference frame as seen from $(\alpha\text{-}\beta)$
$(D_1\text{-}Q_1)$	Rotor flux reference frame as seen from $(\alpha\text{-}\beta)$
$(D_2\text{-}Q_2)$	Rotor flux reference frame as seen from $(a\text{-}b)$
$(D_3\text{-}Q_3)$	Air-gap flux reference frame as seen from $(a\text{-}b)$
$(d_1\text{-}q_1)$	Stator current reference frame as seen from $(\alpha\text{-}\beta)$
$(d_2\text{-}q_2)$	Rotor current reference frame as seen from $(a\text{-}b)$
$(d_3\text{-}q_3)$	Magnetizing current reference frame as seen from $(\alpha\text{-}\beta)$
Different Variables:	
$\bar{v}_s$	Stator voltage vector in $(\alpha\text{-}\beta)$
$\bar{v}_r$	Rotor voltage vector in $(a\text{-}b)$
$\bar{i}_s$	Stator current vector in $(\alpha\text{-}\beta)$
$\bar{i}_r$	Rotor current vector in $(a\text{-}b)$
$\bar{\psi}_s$	Stator flux vector in $(\alpha\text{-}\beta)$
$\bar{\psi}_r$	Rotor flux vector in $(a\text{-}b)$
v_1^*, v_2^*, v_3^*	Three phase voltage references
$v_{max}^*, v_{mid}^*, v_{min}^*$	Maximum, middle, and minimum of (v_1^*, v_2^*, v_3^*)
m_d	Fundamental generated torque
ω_s	Stator angular frequency
ω_r	Rotor angular frequency
ω_e	Rotor electrical angular frequency
F_s	Stator frequency
F_r	Rotor frequency
F_e	Rotor electrical frequency
ω_m	Rotor mechanical angular frequency
V_{dc}	Dc-link voltage
α_s	Angle between $\bar{v}_s$ and α-axis
α_r	Angle between $\bar{v}_r$ and a-axis
θ_s	Angle between $\bar{i}_s$ and α-axis

θ_r	Angle between $\bar{i}_r$ and a-axis
μ	Angle between $\bar{\psi}_s$ and α-axis
μ'	Angle between $\bar{\psi}_{sr}$ and a-axis
ρ	Angle between $\bar{\psi}_{rs}$ and α-axis
ρ'	Angle between $\bar{\psi}_r$ and a-axis
δ	Load angle between stator and rotor fluxes
δ_c	Load angle between stator and rotor currents
γ	Angle between $\bar{v}_s$ and $\bar{v}_r$

Subscript 'rs'	Rotor variable referred to (α-β)
Subscript 'sr'	Stator variable referred to (a-b)
Subscript 'xy'	'x' variable along y-axis
Superscript '^'	Represents the ripple quantity
Superscript ' * '	Represents the reference or set quantity

Constants:

L_s	Stator self inductance
L_r	Rotor self inductance
L_{ls}	Stator leakage inductance
L_{lr}	Rotor leakage inductance
L_o	Magnetizing inductance
L_g	Grid inductance
R_s	Stator resistance
R_r	Rotor resistance
R_g	Grid inductance's resistance
σ_s	Stator leakage factor
σ_r	Rotor leakage factor
σ	Total leakage factor $(1 - \frac{L_o^2}{L_s L_r})$
J	Moment of inertia
B	Friction Co-efficient
P	No. of poles
S0-S7	Switching states or vectors of a 2-level space vector polygon
T_1	Dwell time of active vector S1
T_2	Dwell time of active vector S2
T_z	Dwell time of inactive vector S0 or S7
T_c	Carrier period
T_s	Sub-cycle or half of carrier period
T_{sam}	Sampling period
T_{inv}	Converter delay
T_m	Mechanical time constant
T_f	Filter time constant

F_{sw}	Switching frequency
F_{sam}	Sampling frequency
K_{pi}	Inner-loop proportional constant
T_{ci}	Inner-loop PI-C time constant
K_{po}	Outer-loop proportional constant
T_{co}	Outer-loop PI-C time constant