SOME ASPECTS OF CONDITION MONITORING OF TRANSFORMER AND WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM (WECS)

HASMAT

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
OCTOBER 2018

SOME ASPECTS OF CONDITION MONITORING OF TRANSFORMER AND WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM (WECS)

by

HASMAT
Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
OCTOBER 2018

Dedicated to

My Parents, Daughters & Wife

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, "**Some Aspects of Condition Monitoring of Transformer and Wind Energy Conversion System (WECS)**" being submitted by **Mr. Hasmat** for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a record of bonafide research work carried out by him in the Department of Electrical Engineering of Indian Institute of Technology Delhi.

Mr. Hasmat has worked under my guidance and supervision and has fulfilled the requirements for the submission of this thesis, which to our knowledge has reached the requisite standard. The results obtained herein have not been submitted to any other University or Institute for the award of any degree.

Date:

(Prof. SUKUMAR MISHRA)
Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi – 110016, India

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my deepest gratitude to all those people who, in one way or another, have supported the realization of this work. First and foremost, I would like to thank my supervisors, Professor Sukumar Mishra, for his continuous guidance, support, and encouragement throughout the period of my Ph.D. studies at the Indian Institute of Technology Delhi, India. His invaluable suggestions and precious ideas have helped me walk through various stages of my research, while his passion and extraordinary dedication to work have always inspired and encouraged me to work harder.

Prof. Sukumar Mishra's commitment to my Ph.D has been an inspiration from the very outset and despite having the most demanding of work schedules, he always makes time for his Ph.D students. His thought-provoking suggestions and encouragement helped me in all the time of research and for the writing of this thesis. His wide expertise in the subject has been a great help for me. I am greatly indebted to him. Without his inputs, I could not have finished this work. Thank you.

I am grateful to the members of my dissertation committee, Dr. Bhim Singh, Professor of Electrical Engineering Department and Dean (Academic) of Indian Institute of Technology Delhi, Dr. B.K. Panigrahi, Professor of Electrical Engineering Department, and Dr. Ashu Verma, Assistant Professor of Centre for Energy Studies, for their detailed review, constructive suggestions and excellent advice during the progress of this research work. I am also thankful to Dr. M.L. Kothari, Dr. N. Senroy and Dr. T.C. Kandpal for their suggestions and encouragement provided during the period of work.

I would also like to thank my colleagues in the Power System Simulation Lab: Dushyant, Chandrasekhar, Surender, Gayatri,Somesh, Zarina P., Rishi, Subham, Neelakanteswar, Satish, Deepak, Sinigdha, Deepkiran, Subham, Sathiyanarayanan, Surya, Ikhlaq, Rajan and Ayesha, for making our lab such a friendly place to work in. I wish to thank all of them for offering their assistance, friendship, and valuable hints.

I would like to express my sincere thanks to my wife for her unconditional love, support and the struggle. I wish to extend my sincere thanks to my parents for their love and support. They have gone through in life to ensure my continuous progress that I have been able to strive in every endeavour of my life. I wish to extend my sincere thanks to my brother and sister, for their cooperation, and support during all these years of my Ph.D. studies.

October 2018

Place: New Delhi

Mr. Hasmat

ABSTRACT

The research work presented in this thesis discusses various complex issues associated with condition monitoring of wind energy conversion system (WECS). The aim of this dissertation research is to develop nonintrusive condition monitoring and fault detection (CMFD) approaches for WECS.In this thesis, four different key components of WECS have been used for condition monitoring and fault diagnosis purpose which are the key element in the WECS: 1) Condition monitoring of wind turbine generating system (WTGS), 2) Condition monitoring of gearbox, 3) Condition monitoring of bearing and 4) Condition monitoring of step-up transformer used for grid integration.

Generally, WTGS is under downtime condition for 3 to 10 days/year due to the components failures, which can be accounted to yaw system failure, structure failure, hydraulic and brakes failure, gearbox failure, sensors failure, drive train failure, control system failure, electric system failure, generator failure, blades/hub/pitch failure, and other failure. The failure due to imbalance indifferent mechanical structure also creates major faults in WTGS. The imbalance faults in blades, shaft, furl and aerodynamic asymmetry are the common imbalance faults in WTGS. The proposed approach uses only PMSG (permanent magnet synchronous generator) current signatures that have already been utilized by the protection and control system of WTGS, no additional mechanical sensors are required. However, there are challenges in using current measurements for CMFD of WTGS. First, it is a challenge to extract WTGS fault signatures from non-stationary current measurements, due to the variable-speed operating conditions of WTGS. Moreover, the useful information in current measurements for CMFD of WTGS usually has a low signal to noise ratio, which makes the CMFD difficult. For this, EMD

(empirical mode decomposition) and wavelet transform based on an appropriate signal processing technique have been proposed. Second, it is a challenge to select the most relevant input variables to the classifier for CMFD of WTGS. For this, the J48 algorithm and PCA algorithm based an appropriate feature selection technique have been proposed. The third, it is a challenge to find out the suitable technique for imbalance fault classification of WTGS. For this, a comparative study of six different artificial intelligence (AI) techniques (i.e., MLP, SVM, PSVM, ELM, GEP and MFQL) has been proposed to find out the suitable AI approach for CMFD of WTGS.

Gearbox is used in the WECS to enhance the rotation speed of the main shaft connected with the generator which is used to generate the electrical power if the generator is not a PMSG. Therefore, condition monitoring of gearbox has become more important for proper functioning of WECS. An unexpected fault of the gearbox may cause huge economic losses, even personal injury. So, probably failure diagnosis is an important process in the preventive maintenance of gearbox which avoids serious damage if defects occur in one of the gears during operation condition. Therefore, for early detection of the defects, AI-based an approach for gearbox fault diagnosis has been proposed in this dissertation by using vibration signals. The proposed approach overcomes the problems of feature extraction, feature selection and accuracy of fault diagnosis in the area of CMFD of the gearbox.

There are various places in WECS where bearings are utilized such as in main shafts, yaw drive, pitch bearings, generators, and gearboxes (if used). Bearing failure may occur due to defects in its inner race, outer race or the rolling elements. To prevent such breakdown, an advance condition monitoring system has been proposed in this dissertation for CMFD of WECS. To carry out the monitoring, the feature extraction, attribute selection and fault classification techniques are proposed for the CMFD of bearing.

Each WTGS in a WECS is equipped with a step-up transformer, which steps up turbine generator output voltage from a few hundred volts to the collector system's medium voltage distribution levels. These wind turbine step-up transformers are failing at an alarming rate and developers and operators of utility-scale wind farm projects are scrambling to identify the most likely causes for this widespread failure. Therefore, an accurate fault diagnosis is important in transformers for ensuring quality power supply with minimum disturbances of WECS. The dissolved gas analysis (DGA) has been widely used as a tool for transformer fault condition interpretation but it required personal experiences than mathematical modelling. Therefore, in this dissertation, an AI-based CMFD approach has been proposed to overcome the problem of conventional DGA interpretation, as well as proposed approach, solves the problem of selection of most relevant attributes, which are used as an input variable to the six different AI approaches.

The proposed approaches have extensively been tested on computer simulations and experiments for a PMSG based WTGS, gearbox, bearings and step-up transformer used in WECS and detailed discussions on each case study results have been presented.The results on test systems (i.e., direct-drive WTGS, gearbox, bearing and transformer) illustrate the effectiveness of the proposed approaches and provide insights into the nature of the problem.

सार

अनुसंधान इस शोध में प्रस्तुत काम विभिन्न जटिल पवन ऊर्जा रूपांतरण प्रणाली (WECS) की स्थिति निगरानी के साथ जुड़े मुद्दों पर चर्चा की। इस शोध प्रबंध अनुसंधान के उद्देश्य nonintrusive स्थिति निगरानी और गलती का पता लगाना (CMFD) विकसित करने के लिए WECS.In इस शोध के लिए दृष्टिकोण है, 1) पवन टरबाइन उत्पादन प्रणाली की दशा की निगरानी (WTGS), 2) गियरबॉक्स की दशा की निगरानी, 3) की दशा की निगरानी: चार WECS के विभिन्न प्रमुख घटक स्थिति निगरानी और गलती निदान जिस उद्देश्य के WECS में प्रमुख तत्व हैं के लिए इस्तेमाल किया गया है असर और 4) स्टेप-अप ग्रिड एकीकरण के लिए इस्तेमाल किया ट्रांसफार्मर की दशा की निगरानी।

आम तौर पर, WTGS घटक विफलताओं, जो प्रणाली की विफलता, संरचना विफलता, हाइड्रोलिक ब्रेक और विफलता, गियरबॉक्स विफलता, सेंसर की विफलता, ड्राइव ट्रेन की विफलता, नियंत्रण प्रणाली की विफलता रास्ते से हटना करने हिसाब किया जा सकता है की वजह से 3 से 10 दिनों के लिए / वर्ष डाउनटाइम शर्त के तहत है , बिजली प्रणाली की विफलता, जनरेटर विफलता, ब्लेड / हब / पिच विफलता, और अन्य विफलता। असंतुलन उदासीन यांत्रिक संरचना की वजह से विफलता भी WTGS में प्रमुख दोष पैदा करता है। ब्लेड में असंतुलन दोष, शाफ्ट, मोड़ना और वायुगतिकीय विषमता आम असंतुलन हैं WTGS में दोष। प्रस्तावित दृष्टिकोण केवल PMSG (स्थायी चुंबक तुल्यकालिक जनरेटर) का उपयोग करता है वर्तमान हस्ताक्षर कि पहले से ही WTGS के संरक्षण और नियंत्रण प्रणाली द्वारा उपयोग किया गया है, बिना किसी अतिरिक्त यांत्रिक सेंसर की आवश्यकता है। हालांकि, वहाँ cMFD के लिए वर्तमान माप का उपयोग करने में चुनौतियां हैं की WTGS। सबसे पहले, यह चर गति ओपेरा की वजह से, गैर स्थिर वर्तमान माप से WTGS गलती हस्ताक्षर निकालने के लिए एक चुनौती है WTGS की टिंग की स्थिति। इसके अलावा, WTGS की CMFD के लिए वर्तमान माप में उपयोगी जानकारी आमतौर पर शोर अनुपात, जो CMFD कठिन बना देता है के लिए एक कम संकेत है। इस के लिए, ईएमडी (अनुभवजन्य मोड अपघटन) और एक उचित सिग्नल प्रोसेसिंग के आधार पर बदलने तरंगिका तकनीक प्रस्तावित किया गया है। दूसरा, यह WTGS की cMFD के लिए वर्गीकारक लिए सबसे अधिक प्रासंगिक इनपुट चर का चयन करने के लिए एक चुनौती है। इस के लिए, J48 एल्गोरिथ्म और पीसीए एल्गोरिथ्म आधारित कोई उचित विशेषता चयन तकनीक प्रस्तावित किया गया है। तीसरा, यह है एक चुनौती WTGS के असंतुलन गलती वर्गीकरण के लिए उपयुक्त तकनीक पता लगाने के लिए। इस के लिए, छह अलग कृत्रिम बुद्धि (AI) तकनीक (यानी, MLP, SVM, PSVM, एल्म, GEP और MFQL) का एक तुलनात्मक अध्ययन को खोजने के लिए प्रस्तावित किया गया है बाहर WTGS की cMFD के लिए उपयुक्त ऐ दृष्टिकोण।

गियरबॉक्स जनरेटर जो बिजली उत्पन्न करने के लिए करता है, तो जनरेटर एक PMSG नहीं है प्रयोग किया जाता है के साथ जुड़ा हुआ मुख्य शाफ्ट की घूर्णन गति को बढ़ाने के लिए WECS में प्रयोग किया जाता है। इसलिए, गियरबॉक्स की स्थिति निगरानी WECS के समुचित कार्य के लिए और अधिक महत्वपूर्ण हो गया है । गियरबॉक्स की एक अनपेक्षित गलती का कारण हो सकता बड़ा आर्थिक नुकसान, यहां तक कि व्यक्तिगत चोट। तो, शायद विफलता निदान जो गंभीर क्षति से बचा जाता है, तो दोष आपरेशन हालत दौरान गियर में से एक में होते हैं गियरबॉक्स की निवारक अनुरक्षण में एक महत्वपूर्ण प्रक्रिया है। इसलिए, दोष का जल्दी पता लगाने के लिए, ऐ आधारित गियरबॉक्स गलती निदान के लिए एक दृष्टिकोण कंपन संकेतों का उपयोग करके इस शोध प्रबंध में प्रस्तावित किया गया है। प्रस्तावित दृष्टिकोण की cMFD के क्षेत्र में सुविधा निष्कर्षण, सुविधा चयन और गलती निदान की सटीकता की समस्याओं पर काबू पा गियरबॉक्स।

जहां बीयरिंग मुख्य शाफ्ट, विचलन ड्राइव, पिच बेयरिंग, जनरेटर में के रूप में ऐसी उपयोग किया जाता है WECS में विभिन्न स्थानों, और गियरबॉक्स (यदि प्रयोग किया जाता) कर रहे हैं। इसके भीतरी दौड़ में दोष, बाहरी जाति या रोलिंग तत्वों की वजह से असर विफलता हो सकती है। इस तरह के टूटने को रोकने के लिए एक अग्रिम हालत निगरानी प्रणाली WECS की cMFD के लिए इस शोध प्रबंध में प्रस्तावित किया गया है।, निगरानी, सुविधा निष्कर्षण बाहर ले जाने का श्रेय चयन और गलती वर्गीकरण तकनीक असर की cMFD के लिए प्रस्तावित कर रहे हैं करने के लिए।

एक WECS में प्रत्येक WTGS एक स्टेप-अप ट्रांसफार्मर, जो कलेक्टर सिस्टम के मध्यम वोल्टेज वितरण के स्तर के लिए कुछ सौ वोल्ट से टरबाइन जनरेटर उत्पादन वोल्टेज कदम के साथ सुसज्जित है। ये पवन टरबाइन स्टेप-अप ट्रांसफार्मर एक चौंकाने वाली दर और डेवलपर्स पर असफल रहे हैं और उपयोगिता पैमाने पर पवन खेत परियोजनाओं के ऑपरेटरों इस व्यापक विफलता का सर्वाधिक संभावित कारणों की पहचान के लिए पांव मार रहे हैं। इसलिए, एक सटीक गलती निदान WECS की न्यूनतम गड़बड़ी के साथ गुणवत्ता बिजली की आपूर्ति सुनिश्चित करने के लिए ट्रांसफार्मर में महत्वपूर्ण है। भंग गैस विश्लेषण (DGA) व्यापक रूप से ट्रांसफार्मर गलती हालत व्याख्या के लिए एक उपकरण के रूप में इस्तेमाल किया गया है, लेकिन यह गणितीय मॉडलिंग से निजी अनुभवों की आवश्यकता है। इसलिए, इस शोध प्रबंध में, एक ऐ आधारित cMFD दृष्टिकोण पारंपरिक डीजीए व्याख्या की समस्या है, साथ ही प्रस्तावित दृष्टिकोण से उबरने के लिए प्रस्तावित किया गया है , सबसे अधिक प्रासंगिक गुण है, जो छह के लिए एक इनपुट चर के रूप में उपयोग किया जाता है के चयन की समस्या का हल विभिन्न ऐ दृष्टिकोण।

प्रस्तावित दृष्टिकोण बड़े पैमाने पर कंप्यूटर पर परीक्षण किया गया है simulati

Contents

List of Figures

List of Tables

List of Symbols

Q	Reactive Power
P	Active Power
R_{ext}	variable resistance
CO_2	Carbon Dioxide,
CO	Carbon Monoxide
CH_4	Methane
C_2H_2	Acetylene
C_2H_6	Ethane
H_2	Hydrogen
C_2H_4	Ethylene
O_2	Oxygen
N_2	Nitrogen
^oC	Degree Centigrade
rad/s	Speed
Watt - *w*	Power
Nm	Torque
Pe	Electric Power
Te	Electric Torque
W	Rotating Speed
y(t)	Time Domain Signal
E	Energy
τ	Error Penalty
w	Weight And Bias
(τ)	Learning Rate
(b)	Bias
$e_m(t)$	Upper Envelope

$e_t(t)$	Lower Envelope
(%)	Percent
e	mse Error
t	Temperature
D1 and D2	Energy Discharge of low and high energy
T1-T3	Thermal Faults
f_1	Thermal Fault (<150^{o}C)
f_2	Thermal Fault (150-300^{o}C)
f_3	Thermal Fault (300-700^{o}C)
f_4	Thermal Fault (>700^{o}C)
f_5	Partial Discharge (PD) of low energy (LE) (PD1)
f_6	PD of high energy (HE) (PD2)
f_7	LE discharge (D1)
f_8	HE discharge (D2)
(s)	Processing time

Acronyms

ACI	American Concrete Institute
ADAMS	Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems
AdjBlMs	Blade imbalance
AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
ASME	The American Society Of Mechanical Engineers
ASTM	The American Society Testing And Materials
AWEA	American Wind Energy Association
BDFIG	Brushless Doubly Fed Induction Generator
bior	Bi-orthogonal wavelets
BlPitch	Aerodynamic asymmetry
BS	British Standards
BS	British Standard
CCA	Canonical Correlation Analysis
CCP	Common Coupling Point
CI	Computational Intelligence
CM	Condition Monitoring
CMFD	Condition Monitoring and Fault Diagnosis
coif1	Coiflets wavelets
CS	Cognitive System
CSA	Canadian Standard
CW	Control Winding
db	Daubechies wavelets
DEL	Damage Equivalent Load
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
DGA	Dissolved Gas Analysis
dmey	Discrete approximation of Meyer wavelet
DNV-GL	Det-Norske Varitas-Germanischer Lloyd
DOFs	Degrees of Freedom

DT	Decision tree
ELM	Extreme Learning Machine
EMD	Empirical Mode Decomposition
ET	Expression Tree
FAST	Fatigue, Aerodynamic, Structure, Turbulence
FB	Frequency Band
FFT	Fourier transform
FIST	Facilities Instructions, Standards, and Techniques
FQL	Fuzzy O Learning
GA	Genetic Algorithm
gaus	Gaussian wavelets
GEP	Gene Expression Programming
GP	Genetic Programming
haar	Haar wavelet
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
HVG	High Voltage Generator
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical And Electronics Engineers
IG	Induction Generators
IM	Iterative Method
IMF	Intrinsic Mode Function
IMS	Intelligent Maintenance System
IS	Indian Standard
ISO	International Organization For Standardization
J48	Java implementation of the C4.5 decision tree algorithm
LSC	Load-Side Converter
MCSA	Machine Current Signature Analysis
MD	Mass Density
mexh	Mexican hat wavelet
meyr	Meyer wavelet
MFQL	Modified Fuzzy Q Learning

morl	Morlet wavelet
MSC	Machine-Side Converter
MW	Mega Watt
NACU	National Association of Cement Users
NacYaw	Control errors of yaw system
NF	No fault
NN	Neural Network
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NTM	Normal Turbulence Models
OM	Orthogonalization Method
OPM	Orthogonal Projection Methods
OSIG	OptiSlip Induction Generator
PCA	Principle Component Analysis
PMIG	Permanent Magnet Induction Generator
PMSG	Permanent-Magnet Synchronous Generator
PNN	Probabilistic-NN
PSD	Power spectral density
PSVM	Proximal Support Vector Machine
PW	Power Winding
rbio	Reversed Bi-orthogonal wavelets
RMS	Root Mean Squared
ROC	
RotFurl	Rotor furl imbalance
RSC	The Rotor-Side Converter
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
SFRA	Sweep Frequency Response Analysis
SG	Synchronous Generator
SNR	signal to Noise Ratio
SRB	Spherical-Roller Bearings
SRG	Switched Reluctance Generator
STD	Standard Deviation

STFT	Short-Time Fourier Transform
SVD	Singular Value Decomposition
SVM	Support Vector Machine
sym	Symlets wavelets
TailFurl	Tail furl imbalance
TFG	Transverse Flux Generator
TRB	Tapered Roller Bearing
UL	American safety consulting and certification company
VA	Apparent Power
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
WECS	Wind Energy Conversion System
WEKA	Waikato Environment for Knowledge Analysis
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WRSG	Wound-Rotor Synchronous Generator