ELECTROMECHANICAL OSCILLATIONS IN POWER SYSTEM: DETECTION, CHARACTERIZATION AND UTILIZATION

RAJIV JHA

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JULY, 2020

Electromechanical Oscillations in Power System: Detection, Characterization and Utilization

by

Rajiv Jha
Department of Electrical Engineering

Submitted

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

to the

Indian Institute of Technology Delhi

july 2020

Dedicated

to

My Family

whose constant love, support and encouragement drove me to complete this work

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **“Electromechanical Oscillations in Power System: Detection, Characterization and Utilization”** submitted by **Mr. Rajiv Jha**, to Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** is a bonafide record of research work carried out by him under my supervision. The contents of this thesis have not been submitted to any other institute or university for the award of any degree or diploma.

Date

Dr. Nilanjan Senroy

Professor

Department of Electrical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi-110016, India.

Acknowledgments

The work presented in this thesis would not have been possible without my close association with many people. I take this opportunity to extend my sincere gratitude and appreciation to all those who made this Ph.D. thesis possible.

First and foremost, I would like to extend my sincere gratitude to my research supervisor Prof. Nilanjan Senroy for introducing me to this exciting field of the power system and for his dedicated help, advice, inspiration, encouragement, and continuous support, throughout my Ph.D. His enthusiasm, integral view on research and his mission for providing high-quality work, has made a deep impression on me. During our course of interaction during the last five years, I have learned a deep understanding of the subject from him, including how to raise new possibilities in this field, how to approach a problem by systematic thinking, data-driven decision making, and exploiting serendipity. More than one occasion came during my Ph.D. when any outcome of solving a problem seemed very distant, then always, at those moments, his voice became the guiding light and pumped me with new energy to see the issue from a new angle. I owe him lots of gratitude for having me shown this way of research. I am thrilled to be associated with a person like Prof. Nilanjan Senroy in my life.

I acknowledge my deep sense of gratitude to the members of the doctoral research committee, Prof. Sukumar Mishra, Prof. A. R. Abhyankar and Dr. Ashu Verma for their valuable suggestions and scrutiny of this work. I am also grateful to Dr. B. K. Panigrahi for his co-operation and help in my research.

I am indebted to all my seniors, Dr. Pratyasa Bhui, Dr. Gayathri S. Nair, Dr. Deepak Pullagurram, and Dr. Ganesh Prasad Prajapat, for providing a warm research atmosphere, sharing knowledge and personal support. I am thankful to my friends especially, Dr. Manas Kumar Jena, Mr. Shivraman, Mr. Abdul Saleem Mir, Mrs. Sayari Das, Mrs. Ayesha Firdaus, Mr. Rishi Kant Sharma, Mr. Surya Prakash, Mr. Mudassir Maniar, and juniors Mrs. Tabiya Ahmad, Ms. Megha, Ms. Shaziya, Mr. Debargha Brahma, Mr. Pankaj who have helped me and made my life in IIT Delhi very exciting and gave a good memory.

I must thank the office staff, especially Mr. Yatindra Mani Tripathy, Mr. Satish, and power system lab staff, Mr. Anand, Mr. Gaurav, for their kind support throughout my Ph.D. at IIT Delhi.

I owe my deepest gratitude to my parents and relatives for their love, affection, care, and constant encouragement throughout the research work. A special thanks to my elder brother Dr. Dileep, sister-in-law Dr. Priyanka, sister Mrs. Alka and brother-in-law Mr. Sanjeet for their love and affection.

Last but not least, I owe my deepest gratitude towards my better half, Mrs. Khushboo Jha, for her continued support and understanding of my goals and aspirations. Her unfailing love and support have always been my strength. Her patience and sacrifice will remain my inspiration throughout my life. Without her help and support, I would not have been able to complete much of what I have done and become who I am. I am thankful to my son Jigyansh for giving me happiness during the last one and half months of my studies.

Rajiv Jha

Dated: Rajiv Jha

Abstract

This thesis mainly concentrates on exploring the detection and analysis of the onset of lightly damped electromechanical oscillation as soon as they appear in the system response, and tools were developed to characterize the signal. Electromechanical oscillations of sustained nature were further investigated, and the source-effect relationship behind the event was established. Data-driven techniques to utilize electromechanical oscillation of the power system and ascertain the power system conditions were further discussed. Different mathematical formulations were used to support the theories and tools proposed in the thesis and validated by several measurement data obtained from the time-domain simulation as well as field phasor measurement units (PMUs) as discussed in detail as follows:

1) A novel signal processing technique, wavelet ridge technique (WRT), was introduced in this thesis to extract the slow varying feature of the power system response. The idea behind this WRT is that for electromechanical oscillation, there exists a unique time/curve called 'ridge' along which the dominant oscillating trend can be appropriately extracted. It was seen that the WRT showed superior performance when compared to empirical mode decomposition (EMD) to extract the low-frequency oscillation in the noisy signal. One can estimate the impact of the disturbance on a system by obtaining the dynamic trend from the noisy signal and determining its characteristics. The generalized wavelet used in this thesis was an analytic wavelet, and the extracted signal was in the analytic format. This feature was further used to characterize the oscillatory signal i.e., estimating amplitude, frequency, mode shape, damping parameter of the oscillation.

2) A well-damped electromechanical oscillations do not pose a threat to system security, whereas sustained oscillation has a detrimental effect on the power system. Sustained oscillation can persist in the system due to (*i*) small-signal disturbance to weakly damped power system or (*ii*) periodic forced disturbance to weakly/ well-damped power system. A new data-driven technique was proposed in this thesis to distinguish the sustained oscillation between the natural and forced oscillation. It uses the characteristics of the ambient noise, which gets affected differently in both types of disturbance to determine the nature of sustained oscillation.

3) A measurement-based technique has been suggested in this thesis to locate the source of

the disturbance. The methodology calculates the dissipating energy contribution of a generator into the system, and depending on the nature of it, the source of forced oscillation has been localized. Dissipating energy calculation uses the measurement data from the generator as well as the load buses. The discussed method was tested and verified for various scenarios such as single and multiple sources of disturbance present at single and multiple time instants.

4) A multidimensional approach, which utilizes the measurement data as well as system information to locate the source, was discussed in this thesis. In this approach, frequency response function (FRF) for a pair of input/ output has been utilized to define an index to quantify the contribution of a generator in the disturbance, and based on that generator numbers were ranked. Another index using the time measurement data was proposed to sort the generators depending on its participation in the forced disturbance. Then, both sequences were compared using a multidimensional search algorithm, and then, the source was revealed.
5) Electromechanical oscillation recorded in the power system may be used for various applications. Three different applications of utilizing power system scenarios were discussed in this thesis. In one application, the oscillating trend of the signals was utilized to determine the most potential candidate of controller location by processing multivariate signal. Therefore, a multidimensional signal processing technique was discussed to process multidimensional data and evaluate power system conditions following a disturbance. A data-driven technique to form a reduced area network for a large system utilizing electromechanical oscillatory signal was proposed in this thesis. Furthermore, in this thesis, measurement data recorded at the generator terminals were utilized to estimate key states and parameters of the synchronous generator represented in the classical form. Various time-domain simulations and field measurement data were used to verify the proposed methods.

Keywords: Electromechanical oscillation, Signal processing technique, wavelet ridge technique, transient stability, small-signal stability, forced disturbance, Dissipating energy, frequency response function, multivariate signal processing technique, State and Parameter Estimation, unscented Kalman filter.

सार

यह थीसिस मुख्य रूप से सिस्टम प्रतिक्रिया में प्रकट होने के साथ ही हल्के से विद्युत चुम्बकीय दोलन की शुरुआत का पता लगाने और विश्लेषण की खोज पर केंद्रित है, और सिग्नल को चिह्नित करने के लिए उपकरण विकसित किए गए है। निरंतर प्रकृति के विद्युत दोलनों की आगे जांच की गई, और घटना के पीछे स्रोत-प्रभाव संबंध स्थापित किया गया। विद्युत प्रणाली के विद्युत-दोलन का उपयोग करने और बिजली व्यवस्था की स्थिति का पता लगाने के लिए डेटा-चालित तकनीकों पर आगे चर्चा की गई। निरंतर प्रकृति के विद्युत दोलनों की आगे जांच की गई, और घटना के पीछे स्रोत-प्रभाव संबंध स्थापित किया गया। विद्युत प्रणाली के विद्युत-दोलन का उपयोग करने और बिजली व्यवस्था की स्थिति का पता लगाने के लिए डेटा-चालित तकनीकों पर आगे चर्चा की गई। थीसिस में प्रस्तावित सिद्धांतों और उपकरणों का समर्थन करने के लिए विभिन्न गणितीय योगों का उपयोग किया गया है और समय-डोमेन सिमुलेशन से प्राप्त फ़ील्ड माप माप इकाइयों (PMUs) से प्राप्त कई माप डेटा द्वारा मान्य किया गया है, जैसा कि विस्तार से चर्चा की गई है:

1) एक नया सिग्नल प्रोसेसिंग तकनीक, तरंगिका रिज तकनीक (WRT), इस थीसिस में पेश की गई थी ताकि बिजली प्रणाली की प्रतिक्रिया की धीमी बदलती विशेषता को निकाला जा सके। इस WRT के पीछे का विचार यह है कि इलेक्ट्रोमैकेनिकल दोलन के लिए, एक अद्वितीय समय / वक्र होता है जिसे 'रिज' कहा जाता है, जिसके साथ प्रमुख दोलन प्रवृत्ति को उचित रूप से निकाला जा सकता है। यह देखा गया कि शोर संकेत में कम आवृत्ति दोलन निकालने के लिए अनुभवजन्य विघटन अपघटन (EMD) की तुलना में WRT ने बेहतर प्रदर्शन किया। एक शोर सिग्नल से गतिशील प्रवृत्ति प्राप्त करके और इसकी विशेषताओं का निर्धारण करके किसी सिस्टम पर गड़बड़ी के प्रभाव का अनुमान लगा सकता है। इस थीसिस में प्रयुक्त सामान्यीकृत तरंगिका एक विश्लेषणात्मक तरंगिका थी, और निकाले गए संकेत विश्लेषणात्मक प्रारूप में थे। इस विशेषता का उपयोग आगे थरथरानवाला संकेत को चिह्नित करने के लिए किया गया था, अर्थात्, आयाम, आवृत्ति, मोड आकार, दोलन के भिगोना पैरामीटर का आकलन।
2) एक अच्छी तरह से नम इलेक्ट्रोमैकेनिकल दोलन सिस्टम सुरक्षा के लिए खतरा पैदा नहीं करते हैं, जबकि निरंतर दोलन का बिजली व्यवस्था पर हानिकारक प्रभाव पड़ता है। (I) कमजोर सिग्नल प्रणाली को कमजोर करने के लिए या (ii) आवधिक रूप से कमजोर / अच्छी तरह से बिजली प्रणाली को परेशान करने के लिए आवधिक मजबूर गड़बड़ी के कारण निरंतर दोलन प्रणाली में बनी रह सकती है। इस थीसिस में एक नई डेटा-चालित तकनीक प्रस्तावित की गई थी जो प्राकृतिक और मजबूर दोलन के बीच निरंतर दोलन को अलग करती है। यह परिवेशीय शोर की विशेषताओं का उपयोग करता है, जो निरंतर दोलन की प्रकृति को निर्धारित करने के लिए दोनों प्रकार की गड़बड़ी में अलग-अलग प्रभावित होता है।
3) गड़बड़ी के स्रोत का पता लगाने के लिए इस थीसिस में माप-आधारित तकनीक का सुझाव दिया गया है। कार्यप्रणाली प्रणाली में एक जनरेटर के फैलने वाले ऊर्जा योगदान की गणना करती है, और इसकी प्रकृति के आधार पर, जबरन दोलन का स्रोत स्थानीयकृत किया गया है। ऊर्जा गणना को अलग करने के लिए जनरेटर के साथ-साथ लोड बसों के माप डेटा का उपयोग किया जाता है। चर्चा की गई विधि को विभिन्न परिदृश्यों जैसे एकल और एकाधिक समय में मौजूद अशांति के कई स्रोतों के लिए परीक्षण और सत्यापित किया गया है।
4) एक बहुआयामी दृष्टिकोण, जो माप डेटा के साथ-साथ स्रोत को खोजने के लिए सिस्टम जानकारी का उपयोग करता है, इस थीसिस में चर्चा की गई है। इस दृष्टिकोण में, इनपुट / आउटपुट की एक जोड़ी के लिए आवृत्ति प्रतिक्रिया फ़ंक्शन (FRF) का उपयोग गड़बड़ी में एक जनरेटर के योगदान को निर्धारित करने के लिए एक सूचकांक को परिभाषित करने के लिए किया गया है, और इसके आधार पर जनरेटर संख्याओं

को रैंक किया गया था। समय मापन डेटा का उपयोग करते हुए एक और सूचकांक को मजबूर गड़बड़ी में इसकी भागीदारी के आधार पर जनरेटर को सॉर्ट करने का प्रस्ताव दिया गया है। फिर, दोनों अनुक्रमों की तुलना एक बहुआयामी खोज एल्गोरिथ्म का उपयोग करके की गई, और फिर, स्रोत का पता चला।

5) विद्युत प्रणाली में दर्ज इलेक्ट्रोमैकेनिकल दोलन का उपयोग विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए किया जा सकता है। इस थीसिस में पावर सिस्टम परिदृश्यों के उपयोग के तीन अलग-अलग अनुप्रयोगों पर चर्चा की गई है। एक आवेदन में, मल्टीवेरेट सिग्नल को संसाधित करके नियंत्रक स्थान के सबसे संभावित उम्मीदवार को निर्धारित करने के लिए संकेतों के दोलन प्रवृत्ति का उपयोग किया गया है। इसलिए, बहुआयामी डेटा को संसाधित करने और एक गड़बड़ी के बाद बिजली प्रणाली की स्थिति का मूल्यांकन करने के लिए एक बहुआयामी सिग्नल प्रसंस्करण तकनीक पर चर्चा की गई है। इस थीसिस में इलेक्ट्रोमैकेनिकल ऑसिलेटरी सिग्नल का उपयोग करने वाले एक बड़े सिस्टम के लिए एक कम एरिया नेटवर्क बनाने के लिए डेटा-चालित तकनीक का प्रस्ताव किया गया है। इसके अलावा, इस थीसिस में, जनरेटर टर्मिनलों पर रिकॉर्ड किए गए माप डेटा का उपयोग प्रमुख राज्यों और शास्त्रीय रूप में प्रतिनिधित्व किए गए सिंक्रोनस जनरेटर के मापदंडों का अनुमान लगाने के लिए किया गया है। प्रस्तावित विधियों को सत्यापित करने के लिए विभिन्न समय-डोमेन सिमुलेशन और फ़ील्ड माप डेटा का उपयोग किया गया है।

कीवर्ड: इलेक्ट्रोमैकेनिकल दोलन, सिग्नल प्रोसेसिंग तकनीक, तरंगिका रिज तकनीक, क्षणिक स्थिरता, छोटे-सिग्नल स्थिरता, मजबूर गड़बड़ी, डिसिपेटिंग एनर्जी, फ्रिक्वेंसी रिस्पांस फंक्शन, मल्टीवेरेट सिग्नल प्रोसेसिंग तकनीक, स्टेट एंड पैरामेट एस्टिमेशन, अनसेंटेड कलमन फिल्टर।

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

List of Abbreviations and Symbols

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
EMO	Electromechanical Oscillation
PMU	Phasor Measurement Unit
PDC	Phasor Data Concentrators
GPS	Global Positioning System GPS
NO	Natural Oscillation
FO	Forced Oscillation
FD	Forced Disturbance
WRT	Wavelet Ridge Technique
WAMs	Wide-Area Measurement Systems
EMD	Empirical Mode Decomposition
IMF	Intrinsic Mode Functions
ERA	Eigen Realization algorithm
SVM	Support Vector Machines
SNR	Signal to Noise Ratio
POD	Proper Orthogonal Decomposition
SVD	Singular Value Decomposition
MWRT	Multivariate Wavelet Ridge Technique
WSCC	Western Systems Coordinating Council
PES	Power Engineering Society
RTDS	Real-time Digital Simulator

FRF	Frequency Response Function
SIMO	Single Input Multiple Output
DCI_F	Disturbance Contribution Index in Frequency Domain
$DCI_F\|_{\omega_{FO}}$	Disturbance Contribution Index in Frequency Domain at Forced Oscillation Frequency
DCI_T	Disturbance Contribution Index in the Time Domain
$DCI_T\|_{\omega_{FO}}$	Disturbance Contribution Index in Time Domain At Forced Oscillation Frequency
IF	Instantaneous Frequency
IA	Instantaneous Amplitude
AGC	Automatic Generation Control
AVR	Automatic Voltage Regulator
PSD	Power Spectral Density
COI	Centre of Inertia
MR	Magnitude Response
TF	Transfer Function
WPD	Wavelet Phase Difference
FDR	Frequency Disturbance Recorders
CI	Constant Impedance
CP	Constant Power
CC	Constant Current
HVDC	High Voltage Direct Current
WGN	White Gaussian Noise

ISO	Independent System Operator
NE	New England
PSS	Power System Stablizer
LSE	Least Square Estimation
UKF	Unscented Kalman Filter
$x(t)$,	Real-Valued Measurement Data
$A_a(t)$	Instantaneous Amplitude
$\phi_a(t)$	Instantaneous Phase
$S_a(t)$	Analytic Signal
$\omega_a(t)$	Instantaneous Frequency
$\mu(t)$	Oscillatory Trend of the Signal
$r_d(t)$	Random Variation present in a Signal
$\varepsilon(t)$	Noise
$\psi(t)$	Mother Wavelet
τ	Dilated Parameter
u	Translated Parameter
$X(\omega)$	Fourier transform of the signal $x(t)$
$\alpha_{m,n}$	A Normalizing Constant in Generalized Morse wavelet
$U(\omega)$	A unit step function
m, n	Wavelet Controlling and Shaping Parameter
$c^{\{.\}}$	Continuous Ridge Curve
$\hat{x}_{a,\psi}^{\{.\}}(t)$	Modulated Oscillatory Signal

W_{ψ}	Wavelet Transform
$\mathcal{A}$	Analytic Operator
ξ	Damping Ratio
$A_a(t)$	Canonical Amplitude
$\theta_a(t)$	Canonical Phase
$\|.\|$	Euclidean norm of an array
A	$N \times N$ state matrix,
$z_l(t)$	A source of low magnitude random white Gaussian noise
G_f,	Weights for forced oscillation
G_a	Weights for Random Disturbance Vectors
$f(t)$	Forced Oscillation Vector,
ω_f	Fundamental Frequency of External Periodic Disturbance
‘p’	Harmonic Number
ϕ	Right Eigenvector
ψ	Left Eigenvector
λ	Eigenvalues of matrix.
$\circledast$	Convolution Operator
x_{Res}	Residual left after Extracting Dominant Pattern
$\delta(\omega)$	Impulse Response
$x_{Ext}(t)$	Extracted signal
$x_{Res}(t)$	Residual signal
E_t	Total Energy of the System

E_G	Energy Stored in the Generators
E_{Nw}	Energy Stored in the Networks
E_L	Energy Stored in the Loads
V_B	Bus Voltages
Y	Admittance Matrix
I_G	Current Injection from Generators
I_L	Currents Drawn by Loads in phasor form
p, q	Bus Numbers.
$*$	The Complex Conjugate
TE	System Total Energy
E_{NT}	Energy Contribution of Network Components
E_{LT}	Energy Contribution of Load Components
E_{GT}	Energy Contribution of Generators
n_B, n_G, n_L	The number of total buses, generator buses and load buses respectively
$Y_{pq,rd}$	The admittance matrix for the reduced network
H	Moment of Inertia of the Generator
δ	Generator Rotor Angle
ω	Generator Rotor Speed
T_m	Generator Mechanical Torque
T_e	Generator Electrical Torque
K_{Exc}	Exciter Gain
V_t	Exciter Terminal Voltage

K_D	Damping Torque Coefficient
$\hat{X}_p$	p-th Order Deviation Vector
ν_X^2	Instantaneous Error
δ_T	Local Stability Level
K_{d_1}, K_{d_2}	Gains
Σ	Diagonal Matrix
$\overrightarrow{V_k}(t)$	Voltage Measurement Samples
$\overrightarrow{I_k}(t)$	Current Measurement Samples
$Subscript\ pu$	Per unit value of the respective variable
$E_S\angle\delta_s$	Internal EMF of synchronous generator connected to SMIB system
$V_B\angle\theta_B$	Infinite bus voltage magnitude and angle
X_T	Transmission line reactance of the transmission line connecting synchronous generator to SMIB system
$V_T\angle\theta_T$	Synchronous generator terminal voltage and its angle