**ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์** การตรวจสอบความหลากหลายและเสถียรภาพการตอบสนองแบบหมุนควงในระบบโรเตอร์-สเตเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

**ผู้เขียน** นายปริญญา งามประภาสม

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ. ดร. แมทธิว โคล

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พิจารณาเสถียรภาพพลวัตซึ่งพิสูจน์โดยอ้างอิงแบบจำลองในระบบโรเตอร์ที่อันตรกิริยาระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์อาจเกิดขึ้นในแนวขวางของช่องว่างแบบทรงกระบอกกลวง เกณฑ์การตอบสนองเชิงความถี่แบบ Nyquist ถูกใช้ทำนายขอบเขตเสถียรภาพสำหรับการทำงานของระบบทดสอบโรเตอร์-สเตเตอร์ภายใต้การสั่นสะเทือนแบบซิงโครนัสที่หมุนควงแบบเดินหน้า จุดประสงค์หลักของการศึกษานี้คือการกำหนดช่วงความถี่การหมุนและเงื่อนไขที่ไม่สมดุลของระบบทดสอบโรเตอร์-สเตเตอร์ที่อาจอนุญาตให้มีการรุกล้ำจากการหมุนควงที่ปราศจากการปะทะไปสู่การหมุนควงพร้อมการปะทะระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ และเปรียบเทียบผลกับการทำนายทางทฤษฎี

ชุดโรเตอร์-สเตเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโรเตอร์ยืดหยุ่นรองรับด้วยตลับลูกปืนเม็ดกลมที่ด้านท้ายทั้งสองด้าน ชุดแบริงแม่เหล็กแบบแอ็กทิฟและชุดทดสอบการปะทะถูกติดตั้งที่ระยะ 1/3 และ 2/3 ตามความยาวของเพลา ชุดโรเตอร์นี้มีความถี่ธรรมชาติในสองโหมดแรกคือ 20 เฮิรตซ์ และ 68 เฮิรตซ์โดยประมาณ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นช่วงความเร็วที่ครอบคลุมความเร็ววิกฤตของโรเตอร์ทั้ง 2 โหมด ระยะห่างตามแนวรัศมีระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ในระนาบการปะทะมีค่า 0.5 มิลลิเมตร สำหรับชุดทดสอบการปะทะ ตัวเรือนของสเตเตอร์ถูกรองรับด้วยแท่งเหล็กทรงกระบอก 4 เส้น ซึ่งสามารถปรับความยาวระหว่างตัวเรือนและฐานของสเตเตอร์เพื่อเปลี่ยน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความแข็งตึงของตัวรองรับสเตเตอร์และความถี่ธรรมชาติ ชุดแบริงแม่เหล็กแบบแอ็กทิฟถูกใช้เพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะเฉพาะบางอย่างของโรเตอร์และออกแรงซิงโครนัสซึ่งถูกใช้ในการทดสอบการปะทะ แท่นทดสอบนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเฉพาะพลวัตเหมือนเครื่องจักรอุตสาหกรรมที่มีโรเตอร์แบบยืดหยุ่น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างโรเตอร์ถูกอ้างอิงบนวิธีสมาชิกจำกัด (Finite Element Method) สมการของชิ้นส่วนถูกคำนวณโดยรวมผลของการเคลื่อนที่ ผลของการหมุน และผลของไจโรสโคป ความเร็ววิกฤติของแบบจำลองของโรเตอร์มีค่า 21 เฮิรตซ์ และ 66 เฮิรตซ์ แบบจำลองของโรเตอร์ถูกรวมกับแบบจำลองของสเตเตอร์ที่เป็นแบบจำลองแบบมวลก้อน (Lumped mass)

ในส่วนแรกของระเบียบวิธี ความถี่ธรรมชาติของสเตเตอร์ถูกตั้งเป็น 235 เฮิรตซ์ ข้อมูลการทดลองสำหรับขอบเขตของเสถียรภาพของการหมุนควงที่ปราศจากการปะทะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเกณฑ์การตอบสนองเชิงความถี่แบบ Nyquist สำหรับแบบจำลองโรเตอร์-สเตเตอร์ เส้นโค้งขอบเขตจากแบบจำลองดูคล้ายกับเส้นโค้งจากการทดลองแต่มีออฟเซตระหว่างเส้นโค้งทั้งสอง เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองทางทฤษฎี ตัวแปรที่ไม่แน่นอน 2 ตัวแปรในแบบจำลองได้ถูกเปลี่ยนค่า ตัวแปรแรกคือความแข็งตึงของการปะทะ $\kappa$ ตัวแปรที่สองคือมุมแรงเสียดทาน $\phi$ ค่าที่เหมาะสมของมุมแรงเสียดทานสำหรับระบบมีค่าเท่ากับ 8.5 องศา และค่าความแข็งตึงของการปะทะมีค่าเท่ากับ 370370 นิวตันต่อเมตรซึ่งให้ผลลัพธ์ดีที่สุด

ส่วนที่สองของระเบียบวิธีคือ ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทางกายภาพของระบบที่มีต่อพฤติกรรมของเสถียรภาพ ในการทดสอบนี้ได้ตัวแปรสองตัวแปร ตัวแปรแรกคือ การหน่วงของโรเตอร์ซึ่งถูกพิจารณาเป็นกรณีการหน่วยที่สูงขึ้นและกรณีการหน่วงที่น้อยลง ตัวแปรที่สองคือความถี่ธรรมชาติของสเตเตอร์ ซึ่งถูกเปลี่ยนจาก 235 เฮิรตซ์เป็น 40 เฮิรตซ์ สำหรับการเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณีระหว่างขอบเขตที่ไม่เสถียรจากการทดลองกับขอบเขตที่ไม่เสถียรจากแบบจำลอง สามารถสรุปได้ว่าเส้นโค้งจากแบบจำลองที่ไม่เสถียรไล่ตามแนวทางของเส้นโค้งจากการทดลอง ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากการทำนายโดยอ้างอิงแบบจำลองสำหรับระบบนี้ ความแม่นยำของการทำนายนี้อยู่ในระดับปานกลางเพราะในบางครั้งพบว่ามีการออฟเซตของความถี่และการออฟเซตของอัตราส่วนเกิดขึ้นระหว่างขอบเขตของจากการทดลองและขอบเขตจากทฤษฎี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

**Thesis Title** Investigation on Multiplicity and Stability of Whirl Responses in a Non-linear Rotor-stator System

**Author** Mr. Prinya Ngamprapasom

**Degree** Master of Engineering (Mechanical Engineering)

**Thesis Advisor** Assoc. Prof. Dr. Matthew O.T. Cole

## ABSTRACT

This research considers model-based verification of dynamic stability in rotor systems where contact interaction between rotor and stator may occur across a small annular clearance space. A Nyquist-type frequency response criteria is used to predict the stability boundary for operation of an experimental rotor-stator system under forward whirl synchronous vibration. The main purpose of this study was to determine the rotational frequency range and unbalance conditions of an experimental rotor-stator system that may permit contact-free whirl to transgress to whirl with rotor-stator contact and compare these results with theoretical predictions.

The rotor-stator set used in this research consists of a flexible rotor supported by ball-bearings at both ends. The AMB unit and contact test unit were installed at approximately 1/3 and 2/3 along the length of the shaft. This rotor has first two natural frequencies of 20 Hz and 68 Hz approximately. This research focuses on the running range covering two critical speeds of the rotor. The radial clearance between rotor and stator in the plane of contact is 0.5 mm. For contact test unit, the stator housing is supported by four rods which can be adjusted in length between housing and stator base to change stator support stiffness and hence natural frequency. The AMB was used to modify some characteristics of the rotor and exert synchronous forces which are used in the contact tests. This test rig is designed to reproduce the dynamic characteristic of an industrial machine with flexible rotor.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Mathematical modelling of the rotor structure was based on the Finite Element Method (FEM). The element equations were calculated including translational, rotational and gyroscopic effects. The critical speeds of the rotor were predicted to be 21 and 66 Hz. The rotor model is combined with the stator model which is a lumped mass model.

In the first part of the methodology, the stator natural frequency was set to 235 Hz. The experimental data for the boundary of stability of contact-free whirl was compared with data obtained from the Nyquist type-frequency response criterion for the rotor-stator model. The boundary curve from the model looks similar to the curve from the experiment but there was an offset between the two curves. To improve the accuracy of the theoretical model, two uncertain parameters in the model were changed. One of the two parameters was the contact stiffness $\kappa$. The second parameter was friction angle $\phi$. The suitable friction angle for the system was approximately $\phi$=8.5 degree and contact stiffness was $\kappa$=370370 N/m, to give best results.

The second part of the methodology was to investigate the influence of system physical parameters on the stability behaviour. In these tests we changed two parameters. First was rotor damping, for which two cases were considered with higher damping and lower damping. The second was stator natural frequency, which was changed from 235 Hz to 40 Hz. For the six comparisons made between experimental unstable boundary and model unstable boundary we can conclude that the unstable model curve follows the trend of the experimental curve. This result confirms that it is possible to have useful model-based prediction for this system. The accuracy of this prediction is fair because sometimes we found there are some frequency offset and ratio offset between the experimental and theoretical boundary.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved