

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแบบแอคทีฟของการสั่นสะเทือนของโรเตอร์เพื่อป้องกันการเสียเสถียรภาพที่เกิดจากปฏิกิริยาแบบไม่เชิงเส้นระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์	
ผู้เขียน	นายจักรพงษ์ จำรูญ	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	
คณะกรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร. ชีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
	รศ.ดร. แมทธิว โคล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
	รศ.ดร. ระดม พงษ์วุฒิธรรม	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรแบบหมุนจะมีช่องว่างแคบๆ ระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์อยู่ ถ้าการสั่นสะเทือนทำให้ความโค้งงอของโรเตอร์เกินกว่าระยะช่องว่างนั้นจะทำให้เกิดการสัมผัสกันของโรเตอร์และสเตเตอร์ การสัมผัสกันนี้อาจนำไปสู่ความเสียหายของเครื่องจักรได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการแบบใหม่สำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือนแบบแอคทีฟเพื่อป้องกันพฤติกรรมปฏิกิริยาระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ไม่ต้องการ พฤติกรรมที่ถูกพิจารณาประกอบด้วยการหมุนวนคู่ควบแบบซิงโครนัสของโรเตอร์และสเตเตอร์ และพฤติกรรมการหมุนวนแบบย้อนกลับ (backward whirl)

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาเสถียรภาพแบบใหม่โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของ Lyapunov เพื่อทำนายความเป็นไปได้ของการสั่นสะเทือนแบบไม่เชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ โดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงโคจรที่สม่ำเสมอของการหมุนวนแบบตาม (forward whirl) การควบคุมแรงป้อนกลับแบบพลศาสตร์ที่อาศัยการวัดแรงปฏิกิริยาระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ได้ถูกนำเสนอ แบบจำลองระบบพลศาสตร์ของโรเตอร์ที่มีโหมดการสั่นสะเทือนหลายโหมดได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบและประเมินสมรรถนะของตัวควบคุม นอกจากนี้การทดลองได้ถูกดำเนินการเพื่อตรวจสอบการใช้งานได้จริงของเทคนิคการควบคุมนี้

ในการดำเนินการวิจัย ชุดทดสอบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อเลียนแบบเครื่องจักรแบบหมุนทั่วไปที่มีโรเตอร์และสเตเตอร์แบบให้ตัวได้ (flexible) ทั้งนี้ระบบได้ถูกออกแบบให้มีคุณลักษณะทางพลศาสตร์ที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการหมุนวนคู่ควบของโรเตอร์และสเตเตอร์ในช่วงความเร็วรอบหนึ่งทั้งกรณีที่แรง

เสียดทานมีนัยสำคัญและไม่มีนัยสำคัญที่ตำแหน่งสัมผัส แบร็งก์แม่เหล็กแบบแอคทีฟถูกใช้ในการกำหนดแรงควบคุมให้กับโรเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้กลไกการสัมผัสกันของโรเตอร์และสเตเตอร์ถูกตั้งอยู่คนละระนาบกับแบร็งก์แม่เหล็ก สำหรับการศึกษาในเบื้องต้นนั้น แบบจำลองทางพลศาสตร์ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่ออธิบายการสั่นสะเทือนของโรเตอร์และพฤติกรรมปฏิริยาระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ โรเตอร์ได้ถูกจำลองเป็นโครงสร้างที่ให้อำนาจได้และสเตเตอร์ได้ถูกจำลองเป็นมวลที่มีสปริงและตัวหน่วงรองรับสำหรับการเคลื่อนที่แนวตั้งและแนวระนาบ คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโรเตอร์และสเตเตอร์ได้ถูกนำมารวมเข้าด้วยกันในแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ของทั้งระบบ แรงเสียดทานที่เกิดจากการสัมผัสกันของโรเตอร์และสเตเตอร์ก็ถูกนำมาคำนวณในแบบจำลองนี้ด้วยเช่นกัน

ในที่นี้การศึกษาด้านการจำลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เป็นไปได้ถูกดำเนินการบนพื้นฐานของสมการการเคลื่อนที่ของระบบซึ่งวิธีการหาเสถียรภาพโดยอาศัยพื้นฐานของ Lyapunov ได้ถูกใช้ในการทำนายพื้นที่พารามетริกที่โหมดการสั่นสะเทือนด้วยแอมพลิจูดสูงและการหมุนวนแบบย้อนกลับสามารถเกิดขึ้น วิธีการนี้ยังรวมถึงการกำหนดเงื่อนไขเสถียรภาพในรูปแบบข้อจำกัดของสมการเมทริกซ์เชิงเส้น (Linear Matrix Inequality) ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบคำตอบที่เป็นไปได้โดยใช้วิธีเชิงตัวเลขสำหรับการแก้ปัญหาสมการเมทริกซ์เชิงเส้น ขอบเขตพารามетริกสำหรับคำตอบของการหมุนวนแบบตามที่มีเสถียรภาพแบบทั่วถึง (global stability) สามารถหาได้ด้วยวิธีการนี้ ผลจากการจำลองสถานการณ์และการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกระโดดของการสั่นสะเทือนจากวงโคจรที่ไร้การสัมผัสสู่การหมุนวนคู่ควบของโรเตอร์และสเตเตอร์สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความเร็วรอบอยู่เหนือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างโรเตอร์หรือสเตเตอร์

ในงานวิจัยนี้ การจำลองสถานการณ์เพื่อศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานที่มีต่อการสั่นสะเทือนของโรเตอร์ได้ถูกดำเนินการขึ้นเช่นกัน สำหรับแรงเสียดทานในระดับต่ำแต่มีนัยสำคัญนั้น พบว่าโรเตอร์ได้แสดงพฤติกรรมของการหมุนวนแบบลิมิตไซเคิลที่มีการเคลื่อนที่แบบกระแทก (bouncing motion) สำหรับแรงเสียดทานในระดับสูง การหมุนวนของโรเตอร์จะล่องล้าเข้าสู่การหมุนวนแบบย้อนกลับที่ไร้เสถียรภาพด้วยแอมพลิจูดการสั่นที่ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ

ส่วนกลยุทธ์การควบคุมการสั่นสะเทือนนั้นได้ถูกสร้างขึ้นโดยมีโครงสร้างแบบ observer และมีแรงป้อนกลับแบบพลศาสตร์ (dynamic force feedback) สัญญาณอินพุตสำหรับตัวควบคุมคือแรงปฏิริยาระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ สัญญาณเอาต์พุตคือแรงที่ป้อนให้กับโรเตอร์ด้วยแบร็งก์แม่เหล็ก ตัวควบคุมแบบพลศาสตร์ถูกสังเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองของระบบแบบวงปิด (closed loop system) และเงื่อนไขเสถียรภาพแบบทั่วถึงสำหรับวงโคจรที่ไร้การสัมผัส เมื่อตัวควบคุมได้ถูกนำมา

ประยุกต์ใช้ พบว่าตัวควบคุมแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการป้องกันพฤติกรรมการกระโดดของ
แอมพลิจูดจากการสั่นสะเทือนที่ไร้การสัมผัสไปสู่การสั่นสะเทือนคู่ควบของโรเตอร์และสเตเตอร์ใน
กรณีของการทดลองสำหรับการหมุนวนคู่ควบของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่มีแรงเสียดทานซึ่งได้ถูก
ดำเนินการเช่นกันในที่นี้นั้น ถึงแม้ว่ารูปแบบการสั่นสะเทือนในการทดลองไม่เหมือนกับที่เกิดขึ้นใน
การจำลองสถานการณ์ แต่ผลการทดลองก็ยังบ่งชี้ได้ว่าวิธีการควบคุมที่ถูกเสนอนี้สามารถป้องกัน
ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่แบบกระแทกซึ่งเป็นระยะเริ่มต้นของการหมุนวนแบบย้อนกลับได้



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Thesis Title	Active Control of Rotor Vibration to Prevent Instability Arising from Non-linear Rotor-Stator Interactions	
Author	Mr. Chakkapong Chamroon	
Degree	Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)	
Advisory Committee	Assoc. Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan	Advisor
	Assoc. Prof. Dr. Matthew O. T. Cole	Co-advisor
	Assoc. Prof. Dr. Radom Pongvuthithum	Co-advisor

Abstract

For rotating machines with relatively long flexible rotors there may be axial location where small clearances exist between the rotor and stator. If the deflection of the rotor due to vibration exceeds the clearance space then rotor-stator contact will occur and this may lead the machine to malfunction or cause damage. This thesis proposes novel strategies for active vibration control to prevent unwanted rotor-stator interaction behaviours. Possible behaviours that are considered include coupled synchronous whirl of rotor and stator and friction-driven backward whirl.

A novel model-based approach to predict the possibility of nonlinear vibration response involving rotor-stator interaction is proposed. This approach is based on Lyapunov stability analysis of a steady orbit involving a forward whirl. A dynamic feedback control based on measurement of rotor-stator interaction forces is further proposed. A multi-mode rotordynamic model was developed in order to design controllers and evaluate performance. Experiments were undertaken in order to validate practical use of the proposed control technique.

The test rig was built to mimic a general rotating machine with flexible rotor and compliant stator. The system was designed to have dynamic characteristics such that rotor-stator coupled whirl response behaviour could be produced over a range of rotational speeds both with and without significant friction at the location of contact. An active magnetic bearing

was used to apply control forces to the rotor. A rotor-stator interaction mechanism was located in a separate plane. A dynamic model was derived in order to describe vibration of the rotor and the rotor-stator interaction behaviour. The rotor was represented as a flexible body and the stator represented as two identical spring-mass-damper systems for vertical and horizontal motion. Their dynamic properties were incorporated within a dynamic model of the whole system. Friction arising from rotor-stator contact was also accounted for in the model.

A simulation study to determine possible vibration behaviours was undertaken based on the system's equations of motion. Parametric regions where alternative high amplitude vibration modes and backward whirl solutions could occur were predicted by using the Lyapunov-based approach. This involved formulating stability conditions in the form of LMI constraints that could be checked for feasible solutions using numerical routines for convex optimization. Using this approach, parametric boundaries for a forward whirl solution to be globally stable could be obtained. The simulation and experimental results show that a jump in vibration from contact-free response to coupled whirl could occur for rotational speeds above the natural frequency of the rotor structure or of the stator structure.

Simulations were also obtained to investigate the influence of friction at the rotor-stator contact interface on the vibration response. With significant but relatively low friction, the rotor whirl exhibits a limit-cycle orbit involving bouncing motion. With high friction, the rotor whirl transgresses to a friction driven full backward whirl instability with a perpetual growth in vibration amplitude.

A vibration control strategy was formulated according to an observer-based structure and involving dynamic force feedback. The input signals to the controller were the measured rotor-stator interaction forces while the output signals were the forces applied to the rotor through the magnetic bearing. The dynamic controller gain was synthesized based on a closed loop system model and the global stability condition for a contact-free orbit. The controller was implemented and shown to be successful in preventing amplitude jump

behaviour i.e. transgressions from contact-free vibration to sustained coupled vibration of rotor and stator.

The experiments for rotor-stator coupled whirl with friction were also undertaken. Although the vibration patterns in the experiments did not exactly match those in the simulation results, the experimental results did indicate that an initial bouncing phase of back-ward whirl could be prevented using the proposed control method.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved