การจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วย MATLAB/SIMULINK สำหรับการสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์

THREE PHASE INDUCTION MOTOR SIMULATION USING MATLAB/SIMULINK FOR MACHINERY LABORATORY TEACHING ONLINE COURSES

รุจิพรรณ สัมปันณา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

9/1 ถ.พหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

E-mail: rujipan.s@bu.ac.th

วิชชากร เฮงศรีธวัช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

2410/2 ถ.พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

E-mail: vichchakorn.he@spu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 ยังคงส่งผลกระทบต่อผู้คนในสังคมเป็นวงกว้าง โดยเฉพาะการให้หยุดดำเนินงานด้านการเรียนการสอนของสถานศึกษาทุกแห่งโดยกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม เป็นเหตุให้การสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับผลกระทบค่อนข้างมาก เนื่องจากผู้เรียนไม่สามารถทำการทดลองกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงทำให้ขาดทักษะและความเข้าใจ บทความนี้จึงนำเสนอการใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ช่วยจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งเป็นเรื่องหนึ่งของการเรียนในวิชาดังกล่าวเพื่อนำไปสอนในรูปแบบออนไลน์ โดยเป็นการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ภายใต้สภาวะต่างๆ ตามขอบเขตการเรียนรู้ อาทิ การกลับทางหมุน การหาค่ากระแสสตาร์ท การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การหาประสิทธิภาพ รวมถึงการหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบเป็นต้น ผลสำรวจความพึงพอใจของผู้เรียนพบว่าส่วนใหญ่เห็นว่าการใช้โปรแกรมจำลองช่วยกระตุ้นการเรียนแบบออนไลน์ ทำให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น รวมถึงสามารถใช้อธิบายผลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำมาสอนทดแทนการเรียนในห้องจริงได้ในสถานการณ์ฉุกเฉิน

คำสำคัญ: แบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การจำลองด้วยซิมูลิงค์

ABSTRACT

Currently, the situation of the epidemic of Covid-19 continues to affect people in society at large. Especially the cessation of teaching and learning operations of all educational institutions by the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation. As a result, the teaching of electrical machinery operations has been quite affected. Because the learners are unable to experiment with real electrical machines, they lack skills and understanding. Therefore, this article presents the use of MATLAB / Simulink program to help simulate the operation of a three-phase induction motor, which is one of the subjects of the course to be taught in an online format. This is a study of motor performance characteristics under various conditions according to the learning scope, such as reversing motor direction, starting current, power factor improvement, efficiency estimation including finding the relationship of torque and speed, etc. The results of the student satisfaction survey found that the majority of the respondents said that using a simulation program stimulated online learning and cause more understanding. It can also be used to describe experimental results for analysis and conclusions clearly. This may be used as a guideline for teaching instead of classroom learning in emergency situations.

Keywords: Induction Motor Modeling, Simulink Simulation

1. บทนำ (Introduction)

วิชาทฤษฎีเครื่องจักรกลไฟฟ้า นับเป็นวิชาที่มีความสำคัญวิชาหนึ่งตามแผนการเรียนของหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ระดับปริญญาตรี เนื่องจากมีเนื้อหากล่าวถึงหลักการทำงานและการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญทางภาคอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิ หม้อแปลง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส รวมถึงมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น ประกอบกับการเรียนเชิงปฏิบัติที่มีเนื้อหาสอดคล้องกัน เพื่อให้นักศึกษามีทักษะ มีความรู้ความเข้าใจจนสามารถนำไปประกอบอาชีพทางด้านวิศวกรรมได้ ทั้งนี้เนื้อหาส่วนหนึ่งของการเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้กล่าวถึงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งถือว่าเป็นเครื่องจักรกลที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตของสถานประกอบการต่างๆ ทางภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูก ประสิทธิภาพสูง แข็งแรงทนทาน และสามารถควบคุมได้ง่าย ดังนั้นการเรียนในภาคปฏิบัติจึงให้ความสำคัญกับการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ค่อนข้างมาก อาทิ การสตาร์ทมอเตอร์ การกลับทางหมุน การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การจ่ายภาระ และการหาประสิทธิภาพ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 ที่ยังน่าเป็นห่วง ทำให้สถานศึกษาทุกแห่งจำเป็นต้องงดใช้อาคารสำหรับการเรียนการสอนตามนโยบายของรัฐเพื่อความปลอดภัย เป็นเหตุให้การเรียนการสอนส่วนใหญ่ถูกปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ (Online Teaching) รวมถึงกลุ่มวิชาปฏิบัติการด้วย ซึ่งสร้างความลำบากต่อผู้สอนพอสมควร เนื่องจากวัตถุประสงค์ของวิชาปฏิบัติการมุ่งเน้นให้ผู้เรียนมีประสบการณ์ด้วยการทดลองกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงเพื่อให้มีทักษะและความเข้าใจ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ค่อนข้างได้รับผลกระทบมาก

ความจำเป็นในการปรับรูปแบบการสอนทำให้เริ่มมีการนำโปรแกรมช่วยจำลองการทำงานเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้เสริมทักษะในเรื่องต่างๆ ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

ช่วยจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการสร้างแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ ที่มีการใช้ในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการตรวจสอบผลจำลองเพื่อความถูกต้องและสอดคล้องตามทฤษฎีเพื่อทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยผลสำรวจความพึงพอใจของผู้เรียนพบว่าส่วนใหญ่เห็นว่าการใช้โปรแกรมจำลองมีส่วนช่วยกระตุ้นการเรียนแบบออนไลน์ ทำให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจากการจำลองผลด้วยตนเอง รวมถึงสามารถอธิบายผลการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์และสรุปได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำมาสอนทดแทนการเรียนในห้องจริงได้ในสถานการณ์ฉุกเฉิน

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ในห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 1 โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดมีหน้าที่ดังแสดงในตารางที่ 1

ภาพที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

ตารางที่ 1 หน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

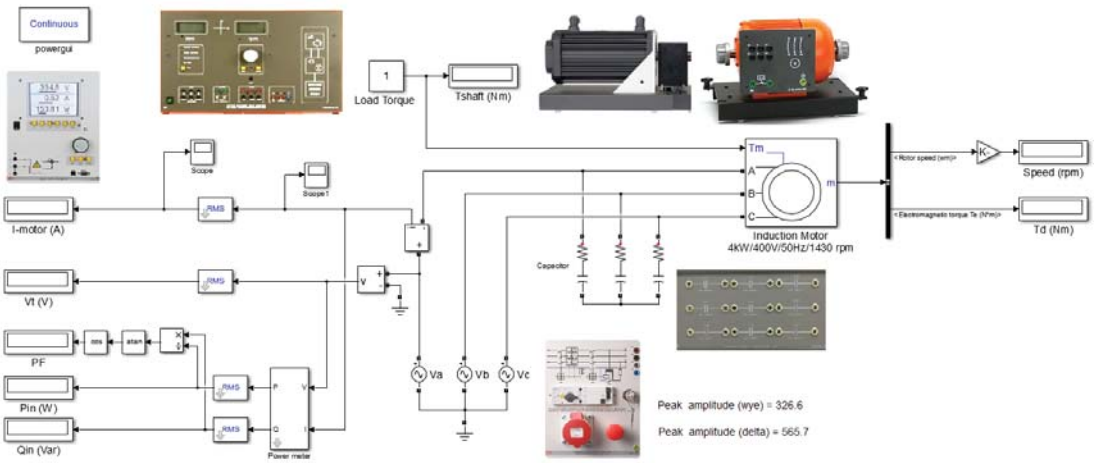
อุปกรณ์	หน้าที่
1. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส	ศึกษาคุณลักษณะการทำงาน
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส	จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. มัลติมิเตอร์ 1 เฟส	วัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. ชุดคาปาซิเตอร์	ปรับค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
5. มอเตอร์เซอร์โว	ใช้เป็นภาระ (Load) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
6. ชุดควบคุมมอเตอร์เซอร์โว	ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เซอร์โว

ในการทดลองจริงจะต่อแกนหมุนของมอเตอร์เซอร์โว (Servo Motor) ร่วมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อทำหน้าที่เป็นภาระ ซึ่งจะใช้ชุดควบคุมในการปรับขนาดแรงบิดโดยมีส่วนการแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วรอบ

บนหน้าจอ สำหรับค่ากำลังงานและกระแสที่มอเตอร์เหนี่ยวนำใช้ในการทำงานจะถูกวัดปริมาณด้วยมัลติมิเตอร์ (Multimeter) เพียงเฟสเดียว เพื่อนำผลการวัดทั้งหมดไปใช้ศึกษาคุณลักษณะการทำงาน

3. แบบจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกนำมาจากคลังข้อมูลซึ่งโปรแกรม MATLAB/Simulink จัดเตรียมไว้แล้ว โดยเลือกใช้เป็นประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก พิกัดขนาด 4 kW, 400 V, 50 Hz, 1430 rpm ซึ่งมีส่วนการแสดงผลค่าแรงบิดและความเร็วรอบในตัว สำหรับการวัดปริมาณทางไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงาน ถูกออกแบบให้มีการวัดค่าแรงดัน กระแส กำลังงานและค่าตัวประกอบกำลัง โดยได้รับพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 3 เฟส แบบสมดุล ดังภาพที่ 2



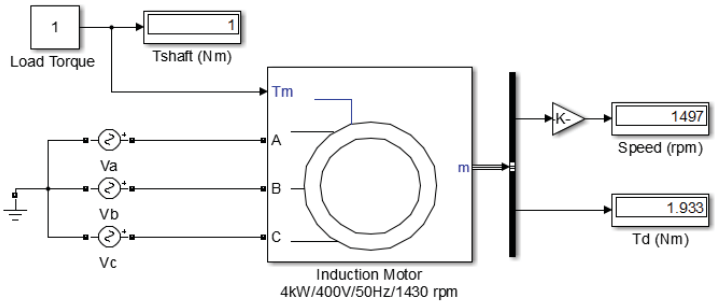
ภาพที่ 2 แบบจำลองการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

4. ผลจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

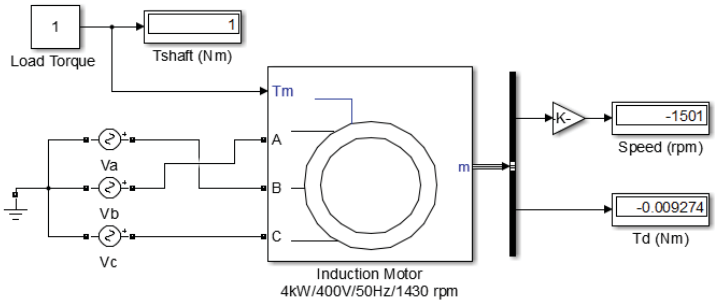
ประเด็นการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สำคัญตามเอกสารใบงานประกอบด้วย การกลับทางหมุน การหาค่ากระแสสตาร์ท การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง คุณลักษณะในการจ่ายภาระ การหาประสิทธิภาพ รวมถึงการหาความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบ

4.1 การกลับทางหมุน

ในทางปฏิบัติการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถทำได้ด้วยการสลับคู่เฟสของแหล่งจ่าย 3 เฟสเพียง 1 คู่ เพื่อเป็นการกลับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็ก โดยการจำลองผลในเรื่องนี้จะเริ่มให้มอเตอร์ได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายเรียงเป็นลำดับปกติ (Va,Vb,Vc) ซึ่งมอเตอร์จะมีทิศการหมุนตามเข็มนาฬิกาดังภาพที่ 3(a) สำหรับการกลับทางหมุนจะให้มอเตอร์ได้รับแรงดันสลับคู่เฟสกันของ Va และ Vb ทำให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยจะแสดงค่าความเร็วรอบเป็นตัวเลขที่ติดเครื่องหมายลบดังภาพที่ 3(b)



(a) การหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำในทิศตามเข็มนาฬิกา

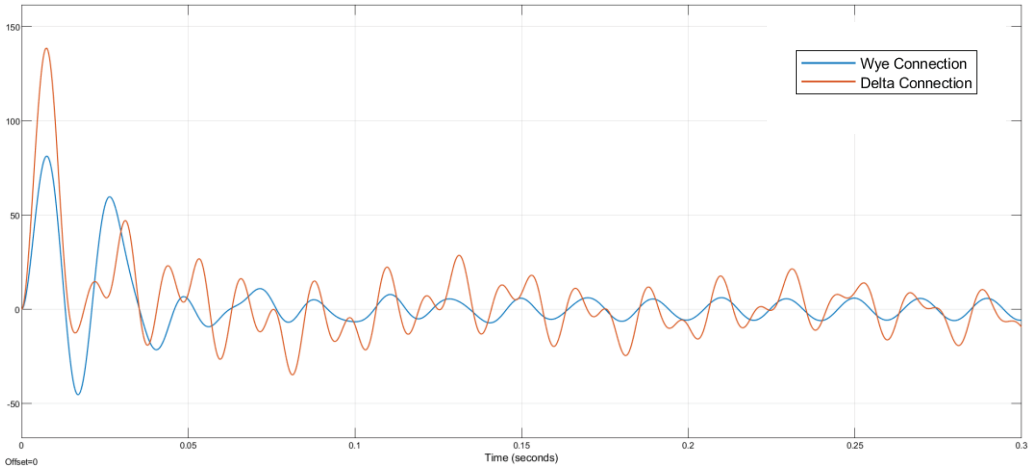


(b) การหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ภาพที่ 3 การจำลองกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

4.2 การสตาร์ทมอเตอร์

ผลจำลองค่ากระแสขณะสตาร์ทมอเตอร์ (Starting) และขณะทำงาน (Running) เมื่อมอเตอร์จ่ายภาระขนาด 1 Nm โดยเปรียบเทียบจากลักษณะการต่อขดลวดที่ต่างกันระหว่างการต่อแบบวายน์ (Wye) และการต่อแบบเดลต้า (Delta) แสดงเป็นค่าขนาดอาร์เอ็มเอส (RMS) ดังตารางที่ 2 และรูปคลื่นกระแสดังภาพที่ 4 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการต่อขดลวดแบบเดลต้าส่งผลให้ทั้งค่ากระแสสตาร์ทและกระแสทำงานสูงกว่าการต่อแบบวายน์



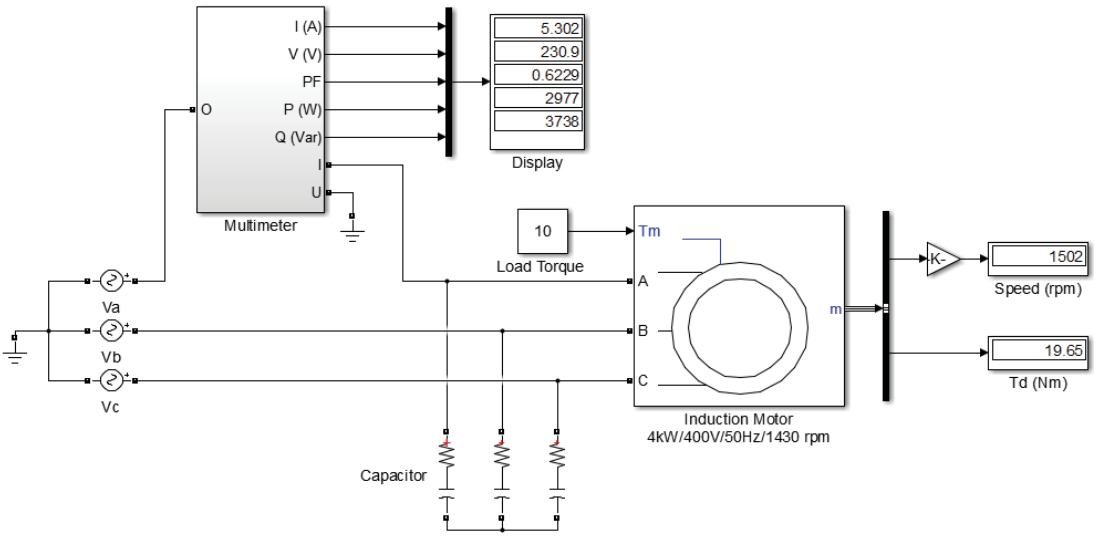
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบกระแสมอเตอร์ขณะสตาร์ทระหว่างการต่อแบบวายน์และเดลต้า

ตารางที่ 2 ค่ากระแสมอเตอร์ขณะสตาร์ทและขณะทำงาน

การต่อขดลวด	แรงดัน (V)	กระแสสตาร์ท (A)	กระแสทำงาน (A)
Wye	400	47.87	4.15
Delta	400	74.05	7.48

4.3 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอาจมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ โดยเฉพาะกรณีจ่ายภาระต่ำกว่าพิกัดมากๆ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการต่อชุดคาปาซิเตอร์ขนานเข้ากับมอเตอร์ตามภาพที่ 5 เพื่อให้มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) จากคาปาซิเตอร์ในการทำงาน ผลจำลองการใช้คาปาซิเตอร์ที่มีขนาดความจุ (Capacitance) ต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 3



ภาพที่ 5 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยชุดคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 3 ผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังตามขนาดความจุของคาปาซิเตอร์ต่างๆ

Parameters	No Cap	C = 10 µF	C = 20 µF	C = 30 µF
T (Nm)	10	10	10	10
n (rpm)	1476	1476	1476	1476
I (A)	5.023	4.210	3.653	3.166
P.F.	0.522	0.597	0.688	0.794
P (W)	578.2	580.3	580.3	580.3
Q (Var)	945.8	780.1	612.5	445.0

ผลการปรับปรุงตัวประกอบกำลังในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดให้มอเตอร์จ่ายภาระคงที่ขนาด 10 Nm ค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ (P.F.) จะสูงขึ้นตามขนาดความจุของคาปาซิเตอร์ ซึ่งสอดคล้องกับการใช้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Q) จากระบบที่น้อยลง ส่งผลให้การใช้กระแสของมอเตอร์ (I) ลดลงด้วย ในขณะที่

การใช้กำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (P) และความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าคงที่ ทั้งนี้ผลการจำลองที่ได้ทั้งหมดมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

4.4 การทำงานของมอเตอร์เมื่อจ่ายภาระ

คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ซึ่งต่อขดลวดแบบวายน์ เมื่อมีการจ่ายภาระที่มีขนาดแรงบิด (T) ต่างกันตามตารางที่ 4 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์หลายตัวที่สำคัญ อาทิ เมื่อภาระมีขนาดมากขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ในขณะที่มอเตอร์จะกินกระแส (I) และกำลังงานอินพุต (P_{in}) เพิ่มมากขึ้น รวมถึงค่าตัวประกอบกำลัง (P.F.) ในการทำงานก็จะสูงขึ้นตามด้วย

ตารางที่ 4 คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์เมื่อจ่ายภาระขนาดต่างๆ

T (Nm)	**2**	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**	**14**	**16**	**18**	**20**
n (rpm)	1494	1490	1485	1481	1476	1472	1467	1462	1457	1452
I (A)	4.29	4.36	4.51	4.59	4.84	5.46	5.90	6.12	6.38	6.93
P.F.	0.183	0.280	0.368	0.443	0.506	0.596	0.651	0.693	0.732	0.758
P_{in} (W)	529	826.4	1121	1404	1668	2047	2401	2779	3141	3476
P_{out} (W)	313	624.1	933.4	1241	1546	1849	2150	2449	2746	3032
η (%)	59.17	75.52	83.26	88.38	92.68	90.35	89.56	88.14	87.43	87.21

ค่ากำลังงานด้านเอาท์พุต (P_{out}) และค่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (η)ในตารางที่ 4 ขณะจ่ายภาระขนาดต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ โดยสามารถแสดงให้เห็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับปริมาณต่างๆ ดังภาพที่ 6 ประกอบด้วย แรงบิด-ความเร็วรอบ (ภาพที่ 6a) แรงบิด-กำลังงาน (ภาพที่ 6b) แรงบิด-กระแส (ภาพที่ 6c) แรงบิด-ตัวประกอบกำลัง (ภาพที่ 6d) และแรงบิด-ประสิทธิภาพ (ภาพที่ 6e) ตามลำดับ

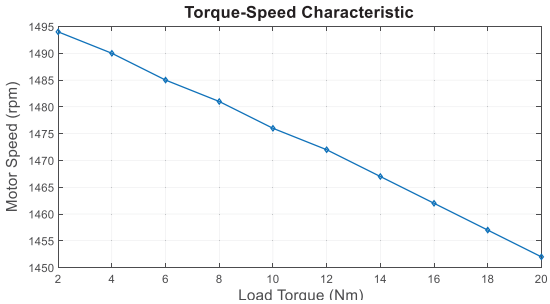
$$P_{out} = \frac{T \times n}{9.55} \tag{1}$$

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \tag{2}$$

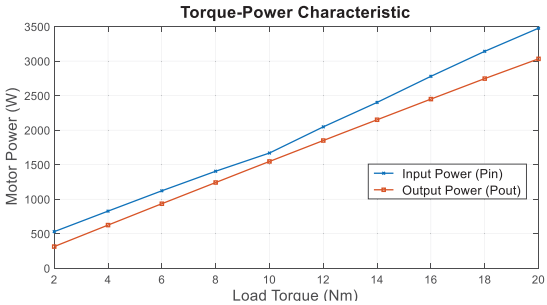
โดยที่ T คือขนาดแรงบิดของภาระ (Nm)

n คือความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

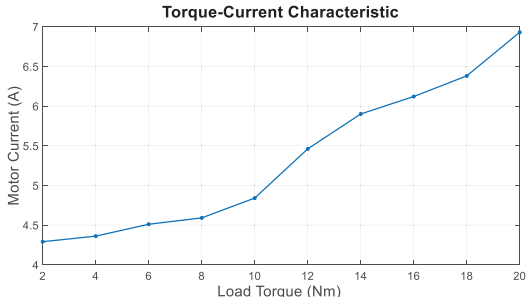
P_{in} คือกำลังงานอินพุตของมอเตอร์ (W)



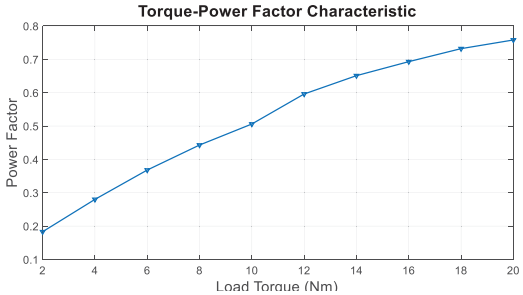
(a) คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบ



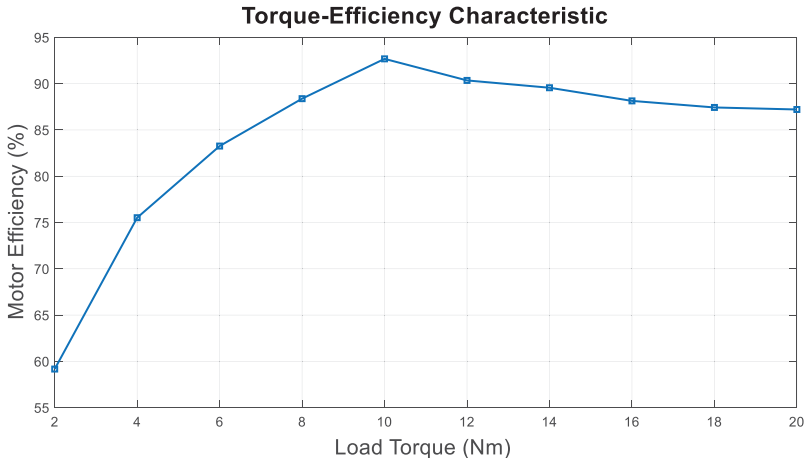
(b) คุณลักษณะแรงบิด-กำลังงาน



(c) คุณลักษณะแรงบิด-กระแส



(d) คุณลักษณะแรงบิด-ตัวประกอบกำลัง



(e) คุณลักษณะแรงบิด-ประสิทธิภาพ

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดโหลดกับปริมาณต่างๆ ของมอเตอร์ขณะทำงาน

ข้อสังเกตจากผลจำลองในภาพที่ 6b แสดงให้เห็นถึงการใช้กำลังงาน (P_{out}) ที่มากขึ้นตามการจ่ายภาระจนเกือบถึงค่าพิกัดของมอเตอร์ ในขณะที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นตามขนาดของภาระจนถึงค่าหนึ่ง (10 Nm) หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในการทำงานจริง

5. ผลสำรวจความพึงพอใจของผู้เรียน

ผลสำรวจความคิดเห็นของนักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ชั้นปีที่ 3 จำนวน 39 คน ที่มีต่อการเรียนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ด้วยโปรแกรมจำลองที่ได้ออกแบบไว้ มีวัตถุประสงค์เพื่อรับทราบและศึกษาความคิดเห็นของนักศึกษา เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา

รูปแบบการเรียนการสอนแบบออนไลน์ของวิชาปฏิบัติการ ด้วยการวิเคราะห์ผลตอบของคะแนนจากคำถามที่ออกแบบไว้ทางสถิติเชิงพรรณนา ประกอบด้วย ค่าความถี่ ร้อยละ และค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลสำรวจความคิดเห็นของนักศึกษาที่มีต่อการใช้โปรแกรมจำลองในการเรียนแบบออนไลน์

คำถาม	จำนวน (ร้อยละ)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยกระตุ้นในการเรียนแบบออนไลน์	1 (2.6)	2 (5.1)	5 (12.8)	17 (43.6)	14 (35.9)	4.05
2. การใช้โปรแกรมจำลองสามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างชัดเจน	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (5.1)	26 (66.7)	11 (28.2)	4.23
3. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยทำให้เกิดความเข้าใจการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ามากขึ้น	1 (2.6)	0 (0.0)	6 (15.4)	19 (48.7)	13 (33.3)	4.10
4. สามารถนำผลจากโปรแกรมจำลองไปวิเคราะห์และสรุปผลได้ตามหลักทฤษฎี	0 (0.0)	1 (2.6)	2 (5.1)	26 (66.7)	10 (25.6)	4.15
5. สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองในการทำงานจริงได้ในอนาคต	0 (0.0)	1 (2.6)	6 (15.4)	19 (48.7)	13 (33.3)	4.13
6. การใช้โปรแกรมจำลองสามารถทดแทนการเรียนในห้องปฏิบัติการได้ ในสถานการณ์ฉุกเฉิน	1 (2.6)	2 (5.1)	4 (10.3)	15 (38.5)	17 (43.6)	4.15
7. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยในการเรียนแบบออนไลน์ดีกว่าวิชาปฏิบัติการอื่นที่ไม่มีโปรแกรมจำลอง	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (5.1)	22 (56.4)	15 (38.5)	4.33
8. การใช้โปรแกรมจำลองช่วยในการเรียนแบบออนไลน์สามารถสร้างบรรยากาศในการเรียนให้น่าสนใจได้	2 (5.1)	1 (2.6)	8 (20.5)	17 (43.6)	11 (28.2)	3.87
9. การใช้โปรแกรมจำลองทำให้สามารถศึกษาด้วยตนเองได้	0 (0.0)	4 (10.3)	5 (12.8)	17 (43.6)	13 (33.3)	4.00
10. การเรียนแบบออนไลน์ ทำให้มีความสุขและมีความพอใจ	0 (0.0)	2 (5.1)	6 (15.4)	18 (46.2)	13 (33.3)	4.08

6. สรุปและอภิปรายผล

จากผลจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วย MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของโปรแกรม โดยสามารถออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์ได้ครอบคลุมตามขอบเขตการเรียนรู้ของวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งยังคงได้ผลตอบที่มีความถูกต้องสอดคล้องตามหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ นอกจากนี้ การใช้โปรแกรมจำลองสำหรับการสอนวิชาปฏิบัติการแบบออนไลน์ ยังสามารถช่วยให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจและมีความสนใจต่อการเรียนมากขึ้นเมื่อเทียบกับการฟังบรรยายอย่างเดียว โดยผลสำรวจความคิดเห็นของนักศึกษาแสดงถึงข้อมูลส่วนใหญ่เห็นด้วยว่าการใช้โปรแกรมจำลองมีส่วนช่วยกระตุ้นในการเรียนแบบออนไลน์ และช่วยทำให้เกิดความเข้าใจการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ามากขึ้น โดยกล่าวว่าการใช้โปรแกรมจำลองเข้ามาช่วยสอนสามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างชัดเจน รวมถึงสามารถนำไปวิเคราะห์และสรุปผลได้ตามหลักทฤษฎี และเมื่อเปรียบเทียบกับการสอนของวิชาปฏิบัติอื่น ส่วนใหญ่มีความเห็นว่าดีกว่าวิชาปฏิบัติการอื่นที่ไม่มีการใช้โปรแกรมจำลองช่วยสอน ที่สำคัญยัง

สามารถศึกษาได้ด้วยตนเองและคิดว่าสามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสำหรับการทำงานจริงได้ในอนาคต รวมทั้งยังมีส่วนช่วยสร้างบรรยากาศในการเรียนแบบออนไลน์ให้น่าสนใจได้

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าเราสามารถนำโปรแกรม MATLAB/Simulink เข้ามาช่วยจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้สอนในวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสถานการณ์ที่ไม่สามารถสอนในห้องปฏิบัติการได้ โดยเฉพาะเมื่อจำเป็นต้องมีการปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ ซึ่งถึงแม้ผู้เรียนจะไม่ได้ลงมือปฏิบัติจริงแต่ก็ยังคงมีทักษะในการใช้โปรแกรมช่วยจำลอง รวมถึงมีความเข้าใจคุณลักษณะสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้เป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

Manish Kumar Singh, Madhur Chauhan, Amit Kumar Singhal and Nitin Saxena. (2014). A Methodology to Develop A Simulink Model of Three Phase Induction Motor. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4*, Special Issue 1, February 2014.

Sri Manakula and Sri Manakula. (2014). Review of Modeling and Dynamic Analysis of Three Phase Induction Motor Using MATLAB Simulink. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 3*, Issue 3, March 2014.

SIMULINK. (2000). *Model-Based and System-Based Design,* Using Simulink, MathWorks Inc.,