กลุ่มที่ 3

บทความระดับชาติ

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(National Papers in Science and Technology)

กลุ่มย่อยที่ 1

เทคโนโลยีสารสนเทศ

วิศวกรรมศาสตร์

การจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ MATLAB/Simulink สำหรับการสอนรายวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์

TRANSFORMER SIMULATION USING MATLAB/SIMULINK FOR MACHINERY LABORATORY TEACHING ONLINE COURSES

วิชชากร เฮงศรีธวัช, พศวีร์ ศรีโหมด, เติมพงษ์ ศรีเทศ, มัซลัน ดาลี

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

2410/2 ถ.พหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. 0-2579-1111ต่อ 2272

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

บทคัดย่อ

จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด 19 ในช่วงที่ผ่านมา ทำให้สถานศึกษาทุกแห่งต้องงดการเรียนการสอนและปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ เป็นเหตุให้การสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับผลกระทบค่อนข้างมาก เนื่องจากผู้เรียนไม่สามารถทำการทดลองกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริงทำให้ขาดทักษะและความเข้าใจ ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink ช่วยจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นเรื่องหนึ่งของการเรียนในวิชาดังกล่าว เพื่อนำไปศึกษาคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงภายใต้สภาวะการจ่ายโหลดต่างๆ เช่น การหาประสิทธิภาพและอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน สำหรับการสอนในวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้เรียนเกิดทักษะและความเข้าใจมากขึ้น รวมถึงสามารถนำมาใช้เรียนทดแทนการสอนในห้องเรียนจริงได้

คำสำคัญ: แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้า การทดสอบเปิดวงจร การทดสอบลัดวงจร

ABSTRACT

From the situation of the spread of the COVID-19 virus in the past. Causing all educational institutions to refrain from teaching and changing to the online courses format. The experiential learning in electrical machines laboratory was quite affected. As the students are unable to do experiments with real electrical machines, they lack skills and understanding. Therefore, this article presents the use of MATLAB / Simulink to help simulate the behavior of transformers, which is one of the subjects of the study. To study the performance characteristics of transformers under various load conditions such as determining the efficiency and voltage regulation for online teaching in electrical machinery laboratory. With the aim of giving learners more skills and understanding including being able to be used as a replacement for teaching in the real classroom.

Keywords : Transformer Modeling, Open-Circuit Test, Short-Circuit Test

1. บทนำ (Introduction)

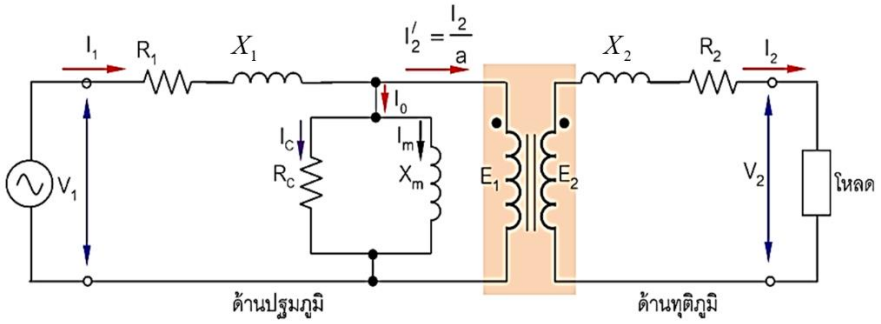
โดยทั่วไป แผนการเรียนวิชาเครื่องจักรกลไฟฟ้าของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ระดับปริญญาตรี จะประกอบด้วยการเรียนภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติซึ่งส่วนหนึ่งของการเรียนภาคทฤษฎีจะกล่าวถึงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว โดยใช้แบบจำลองต่อเฟสของหม้อแปลงในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพการทำงาน และอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน เป็นต้น สำหรับการเรียนภาคปฏิบัติจะเน้นเรื่องการทดสอบหม้อแปลงทั้งแบบเปิดวงจร (Open-Circuit Test) และลัดวงจร (Short-Circuit Test) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางไฟฟ้าของหม้อแปลง รวมถึงการศึกษาคุณลักษณะการทำงานของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดจริงที่สภาวะต่างๆ ด้วย

ทั้งนี้จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด 19 ในช่วงที่ผ่านมา ทำให้สถานศึกษาทุกแห่งจำเป็นต้องงดการเรียนการสอนตามนโยบายมาตรการเพื่อความปลอดภัยของประเทศ เป็นเหตุให้การเรียนการสอนส่วนใหญ่ถูกปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ (Online Teaching) รวมถึงกลุ่มวิชาปฏิบัติการด้วยซึ่งสร้างความกังวลใจให้กับผู้สอนพอสมควร เนื่องจากวัตถุประสงค์ของวิชาปฏิบัติการมุ่งเน้นให้ผู้เรียนมีประสบการณ์กับการทดลองกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจริง ได้เรียนรู้พฤติกรรมรวมถึงผลตอบสนองในการทำงานทำให้เกิดทักษะและความเข้าใจ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบออนไลน์ค่อนข้างได้รับผลกระทบมาก

อย่างไรก็ตาม ความจำเป็นในการปรับรูปแบบการสอนทำให้เริ่มมีการพิจารณานำโปรแกรมช่วยจำลองการทำงานเครื่องจักรกลไฟฟ้ามาใช้เสริมทักษะในเรื่องต่างๆ อาทิ การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์กระแสสลับ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ช่วยจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าตามเอกสารอ้างอิงลำดับ 2 แต่มีการปรับให้สอดคล้องกับบริบทและขอบเขตเนื้อหาที่สอน โดยเริ่มต้นจากการหาแบบจำลองที่ถูกต้องโดยใช้ผลการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจรที่เคยทำการทดสอบไว้ก่อนในห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ศึกษาพฤติกรรมและคุณลักษณะการทำงานที่สภาวะโหลดต่างๆ เพื่อทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยสามารถทดแทนการเรียนในห้องปฏิบัติการจริงจากสถานการณ์ที่ไม่สามารถทำได้กรณีเกิดเหตุสุดวิสัย

2. การทดสอบหม้อแปลง (Transformer Testing)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของหม้อแปลง โดยทั่วไปจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบคือการทดสอบแบบเปิดวงจรเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียที่แกน (Core Losses) หรือกำลังสูญเสียในขณะที่ยังไม่มีโหลด (No-Load Losses) และการทดสอบแบบลัดวงจรเพื่อใช้หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดทั้งหมดของหม้อแปลง (Copper Losses) นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการทดสอบดังกล่าวมาใช้หาค่าอิมพีแดนซ์หรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อันเป็นส่วนประกอบในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหม้อแปลงตามภาพที่ 1 ได้ด้วย เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำแบบจำลองที่ได้ (Transformer Model) ไปใช้วิเคราะห์หาคุณลักษณะและพฤติกรรมการทำงานขณะมีโหลดของหม้อแปลง อาทิ การหาอัตราเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน กระแสในการทำงาน กำลังสูญเสียและประสิทธิภาพ เป็นต้น ซึ่งในห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะใช้หม้อแปลงเฟสเดียวขนาดพิกัดกำลัง 2 kVA, แรงดัน 220V/110V, ความถี่ 50 Hz ในการศึกษา



ภาพที่ 1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของหม้อแปลง

โดยที่ V_1, V_2 คือแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

I_1, I_2 คือกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$R_1 + jX_1$ คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิ

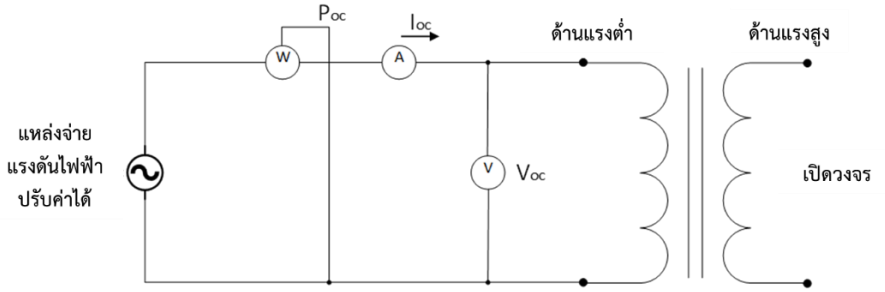
$R_2 + jX_2$ คืออิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านทุติยภูมิ

R_C คือความต้านทานของแกนหม้อแปลง

X_m คือรีแอคแตนซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลง

2.1 การทดสอบแบบเปิดวงจร (Open-Circuit Test)

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจรก็คือ การที่ให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานในลักษณะที่ไม่มีโหลด โดยทั่วไปจะให้ขดลวดทางด้านแรงต่ำต่อกับแหล่งจ่ายเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามพิกัด (Rated Voltage) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนขดลวดทางด้านแรงสูงให้เปิดวงจรไว้ โดยมีเครื่องวัดทางไฟฟ้าที่สำคัญต่ออยู่ด้วย ประกอบด้วย วัตต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะเปิดวงจร

จากภาพที่ 1 วิธีการทดสอบจะเริ่มจากการค่อยๆ ปรับแรงดันไฟฟ้าทางด้านแรงต่ำให้ได้ตามค่าพิกัดแรงดันของหม้อแปลง หลังจากนั้นบันทึกค่าที่ได้จากวัตต์มิเตอร์ซึ่งจะหมายถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{OC}) ส่วนค่าที่ได้จากโวลต์มิเตอร์จะหมายถึงแรงดันไฟฟ้าพิกัดด้านแรงต่ำ (V_{OC}) และค่าที่ได้จากแอมป์มิเตอร์ที่จะหมายถึงกระแสไฟฟ้าขณะที่ไม่มีโหลด (I_{OC}) ซึ่งจากข้อมูลการทดสอบแบบเปิดวงจรทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของแกนหม้อแปลงในวงจรสมมูลแบบประมาณ (R_C , X_m) ได้ตามสมการที่ (1) ถึง (4)

$$|Y_E| = G_C - jB_m = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \quad (1)$$

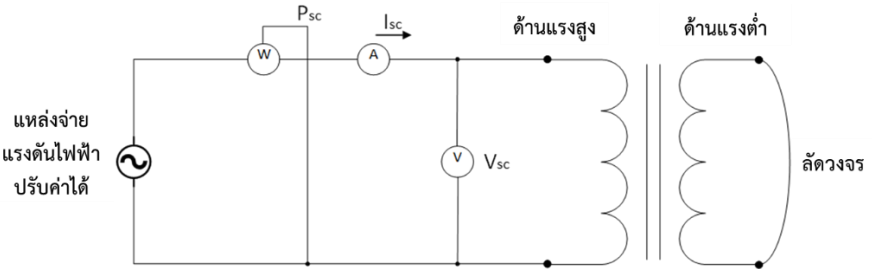
$$PF_{OC} = \cos\theta = \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \quad (2)$$

$$G_C = |Y_E| \cos\theta \quad \text{โดย} \quad R_C = \frac{1}{G_C} \quad (3)$$

$$B_m = |Y_E| \sin\theta \quad \text{โดย} \quad X_m = \frac{1}{B_m} \quad (4)$$

2.2 การทดสอบแบบลัดวงจร (Short-Circuit Test)

วิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจรก็คือ การให้ขดลวดทางด้านแรงสูงต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแล้วปรับแรงดันให้ได้กระแสเท่ากับค่ากระแสพิกัดด้านแรงสูงของหม้อแปลง โดยขดลวดทางด้านแรงต่ำให้ลัดวงจรไว้ ซึ่งยังคงใช้เครื่องวัดทางไฟฟ้าเหมือนเดิมคือ วัตต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และโวลต์มิเตอร์ ดังภาพที่ 3 ดังนั้นค่ากระแสที่ได้จากแอมป์มิเตอร์จะหมายถึงกระแสลัดวงจร (I_{SC}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงนั่นเอง ส่วนค่าที่ได้จากวัตต์มิเตอร์จะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งหมดในขดลวดทั้งสองด้านของหม้อแปลง (P_{SC}) ส่วนค่าที่ได้จากโวลต์มิเตอร์จะหมายถึงแรงดันไฟฟ้าขณะลัดวงจร (V_{SC}) ซึ่งอาจมีค่าประมาณ 5-12 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าพิกัดด้านที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 3 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะลัดวงจร

ในทำนองเดียวกันจากข้อมูลการทดสอบแบบลัดวงจร สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของหม้อแปลงแบบประมาณได้ตามสมการที่ (5) ถึง (7)

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (5)$$

$$R_{eq} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \quad (6)$$

$$X_{eq} = \sqrt{|Z_{eq}|^2 - R_{eq}^2} \quad (7)$$

โดยที่ R_{eq}, X_{eq} คือความต้านทานและรีแอคแตนซ์รวมของขดลวด

Z_{eq} คืออิมพีแดนซ์รวมของขดลวด

2.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงในห้องปฏิบัติการ (Transformer Testing Results)

ผลการทดสอบหม้อแปลงขนาด 2 kVA, 220V/110V ทั้งแบบเปิดวงจรและลัดวงจรรวมถึงผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจรและลัดวงจร

ค่าที่วัด	การทดสอบ		ผลคำนวณค่าพารามิเตอร์	
	เปิดวงจรด้าน 110V	ลัดวงจรด้าน 110V	R_C	2.85 kΩ
V (V)	220	9.32	X_m	0.86 kΩ
I (A)	0.27	9.09	R_{eq}	0.965 Ω
P (W)	17	79.8	X_{eq}	0.345 Ω

ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากผลการทดสอบนี้ จะพิจารณาจากวงจรสมมูลโดยประมาณซึ่งโดยทั่วไปก็เป็นค่าที่ยอมรับได้ในการนำไปคำนวณวิเคราะห์การทำงานของหม้อแปลงได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่เห็นคือเราไม่สามารถแยกค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ของขดลวดด้านแรงสูงและแรงต่ำออกจากกันได้ ทำให้การสร้างแบบจำลองของหม้อแปลงอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้าง ซึ่งโดยทั่วไปที่ยอมรับกันสำหรับการสร้างแบบจำลองอาจประมาณให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดทั้งสองด้านมีค่าเท่าๆ กันได้ทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ เนื่องจากการทำเช่นนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อการนำแบบจำลองไปศึกษาในเรื่องต่างๆ มากนัก ดังนั้นหากพิจารณาจากรูปวงจรสมมูลตามภาพที่ 1 ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์โดยรวมแบบประมาณจะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (8) และจะได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในแบบจำลองตามตารางที่ 2

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 \ , \ X_{eq} = X_1 + a^2 X_2 \tag{8}$$

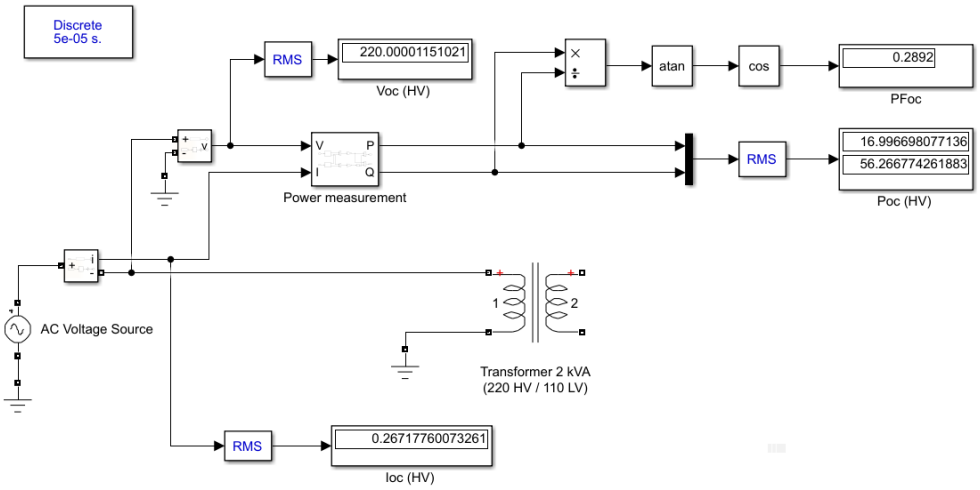
โดยที่ $a = \frac{V_1}{V_2}$ คืออัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

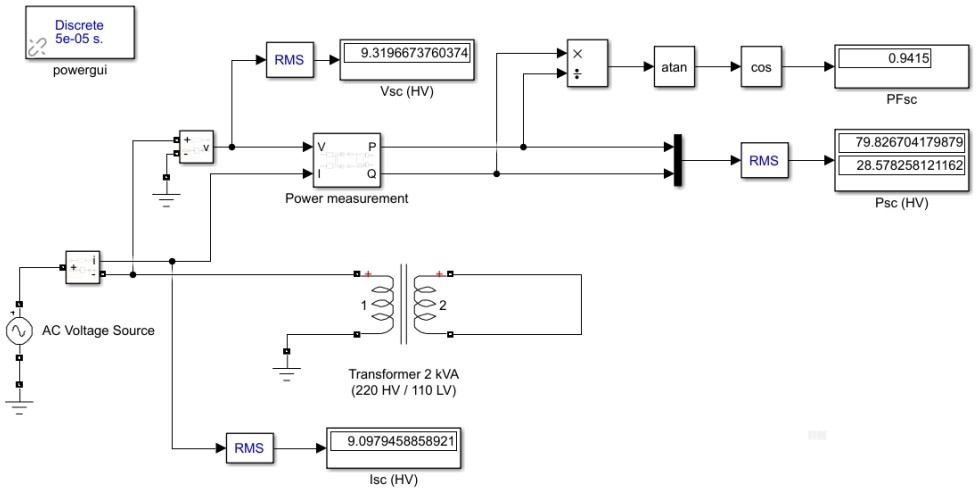
R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	X_1 (Ω)	X_2 (Ω)	R_C (Ω)	X_m (Ω)
0.3217	0.1608	0.1150	0.0575	2857.1429	862.0690

3. การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงด้วย MATLAB/Simulink

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตามตารางที่ 2 จึงทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สร้างจาก MATLAB/Simulink ด้วยวิธีจำลองการทดสอบแบบเปิดวงจรตามภาพที่ 4 และการจำลองแบบลัดวงจรตามภาพที่ 5 ซึ่งผลการจำลองทั้งค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 3 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการจำลองโดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงไว้ในตารางที่ 4 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากจึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์นี้ใช้เป็นแบบจำลองของหม้อแปลงได้



ภาพที่ 4 แบบจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปิดวงจร



ภาพที่ 5 แบบจำลองการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบลัดวงจร

ตารางที่ 3 ผลจำลองการทดสอบของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย MATLAB/Simulink

การจำลอง	$V\,(V)$	$I\,(A)$	$P\,(W)$	$P.F.$
เปิดวงจร	220	0.2672	16.9967	0.2892
ลัดวงจร	9.32	9.0979	79.8267	0.9415

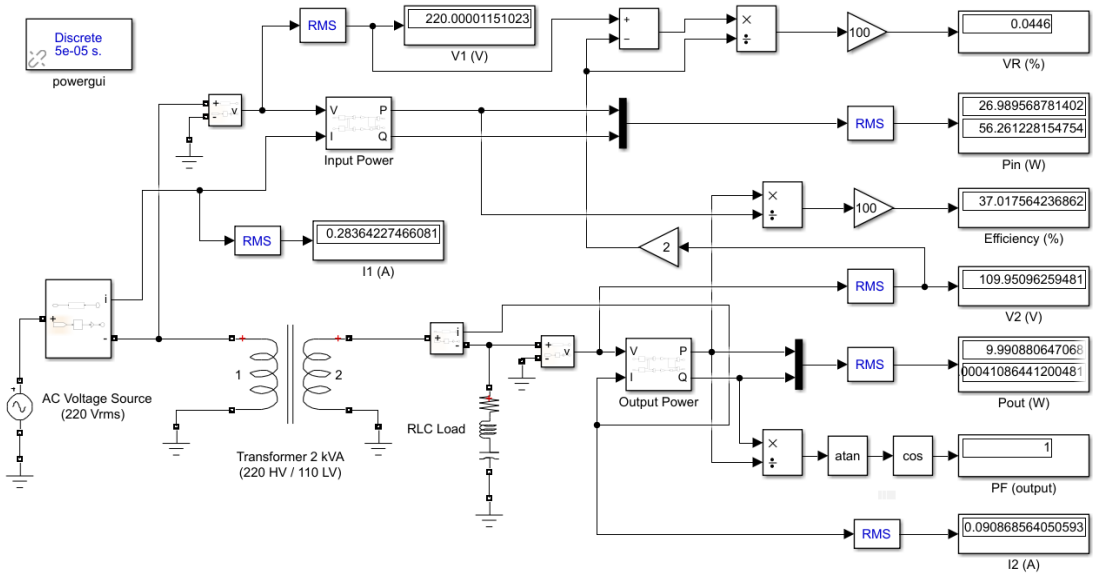
ตารางที่ 4 ผลเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากการจำลองด้วย MATLAB/Simulink

พารามิเตอร์	$R_1\ (\Omega)$	$R_2\ (\Omega)$	$X_1\ (\Omega)$	$X_2\ (\Omega)$	$R_C\ (\Omega)$	$X_m\ (\Omega)$
ผลจากการทดสอบ	0.3217	0.1608	0.1150	0.0575	2857.1429	862.0690
ผลจากการจำลอง	0.3215	0.1607	0.1151	0.0576	2847.6116	860.0902
ความคลาดเคลื่อน (%)	0.062	0.062	0.087	0.174	0.334	0.230

4. การจำลองการทำงานของหม้อแปลงด้วย MATLAB/Simulink

ตามขอบเขตเนื้อหาการทดลองการทำงานของหม้อแปลงในห้องปฏิบัติการ จะให้หม้อแปลงจ่ายโหลดทางไฟฟ้า 3 ประเภท คือโหลดความต้านทาน (R) โหลดความเหนี่ยวนำ (L) และโหลดตัวเก็บประจุ (C) ที่ค่าแตกต่างกันเพื่อวัดผลการใช้กระแส แรงดัน ค่าตัวประกอบกำลัง รวมถึงกำลังงานด้านเข้า (Pin) ด้านออก (Pout) และประสิทธิภาพในการทำงาน ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิผลของแบบจำลองหม้อแปลงที่ประมวลด้วย Simulink จึงได้เปรียบเทียบผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Lab) และการจำลอง (Sim) ในส่วนของกำลังงานและประสิทธิภาพดังตารางที่ 5 ถึงตารางที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ทั้งหมดมีค่าไม่เกิน 5%

อย่างไรก็ตาม การจำลองด้วย Simulink จำเป็นต้องปรับแบบจำลองกรณีที่หม้อแปลงจ่ายโหลด L และโหลด C เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการนั้นไม่เป็นแบบอุดมคติ (Non-Ideal) ซึ่งต่างจากการใช้ใน Simulink ทำให้การจำลองกรณีโหลดดังกล่าวต้องเพิ่มโหลดความต้านทานเพื่อให้มีการใช้กำลังงานด้านออกที่ค่าเท่ากันกับที่วัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จึงจะทำให้ได้ผลการจำลองที่มีความใกล้เคียงกับที่ค่าที่วัดจริงมากขึ้น



ภาพที่ 6 การทำงานของหม้อแปลงซึ่งจำลองด้วย MATLAB/Simulink

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการจ่ายโหลด R จากห้องปฏิบัติการและการจำลองด้วย Simulink

โหลด-R	กำลังงานด้านเข้า (Pin,W)			กำลังงานด้านออก (Pout,W)			ประสิทธิภาพ (%)		
(Ω)	Lab	Sim	%Error	Lab	Sim	%Error	Lab	Sim	%Error
220	74.9	71.9	4.0	56.8	54.9	3.3	75.8	76.3	0.7
480	44.0	42.2	4.1	26.3	25.2	4.2	59.8	59.7	0.2
880	31.6	30.7	2.8	14.2	13.7	3.5	44.9	44.7	0.4

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการจ่ายโหลด L จากห้องปฏิบัติการและการจำลองด้วย Simulink

โหลด-L	กำลังงานด้านเข้า (Pin,W)			กำลังงานด้านออก (Pout,W)			ประสิทธิภาพ (%)		
(H)	Lab	Sim	%Error	Lab	Sim	%Error	Lab	Sim	%Error
0.4	28.6	28.3	1.0	11.1	11.1	0.0	38.8	39.1	0.8
0.8	23.6	23.3	1.3	6.2	6.2	0.0	26.3	26.6	1.1
1.6	20.4	20.3	0.5	3.3	3.3	0.0	16.2	16.2	0.0

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลการจ่ายโหลด C จากห้องปฏิบัติการและการจำลองด้วย Simulink

โหลด-C	กำลังงานด้านเข้า (Pin,W)			กำลังงานด้านออก (Pout,W)			ประสิทธิภาพ (%)		
(μF)	Lab	Sim	%Error	Lab	Sim	%Error	Lab	Sim	%Error
0.9	16.9	17.1	1.2	0.1	0.1	0.0	0.58	0.58	0.0
1.8	17.2	17.1	0.6	0.1	0.1	0.0	0.58	0.58	0.0
3.6	17.7	17.7	0.0	0.7	0.7	0.0	3.95	3.96	0.3

การจำลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพ (Efficiency:Eff) และค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Voltage Regulation:VR) ในขณะหม้อแปลงทำการจ่ายโหลดแบบ RLที่ระดับกำลังงานต่างๆ (เทียบกับค่าพิกัดหม้อแปลง 2 kVA) แสดงไว้ในตารางที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่าประสิทธิภาพในการทำงานของหม้อแปลงจะมีค่าสูงขึ้นตามกำลังงานของโหลดที่จ่าย โดยจะมีค่าสูงสุดที่ระดับโหลดหนึ่งๆ ตามภาพที่ 7 รวมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันก็มีค่าสูงขึ้นด้วยเนื่องจากแรงดันด้านโหลดจะลดลงตามการจ่ายโหลดดังสมการที่ (9) และตามภาพที่ 8

ตารางที่ 8 ผลประสิทธิภาพและการเปลี่ยนแปลงแรงดันจากการจ่ายโหลดจำลองด้วย Simulink

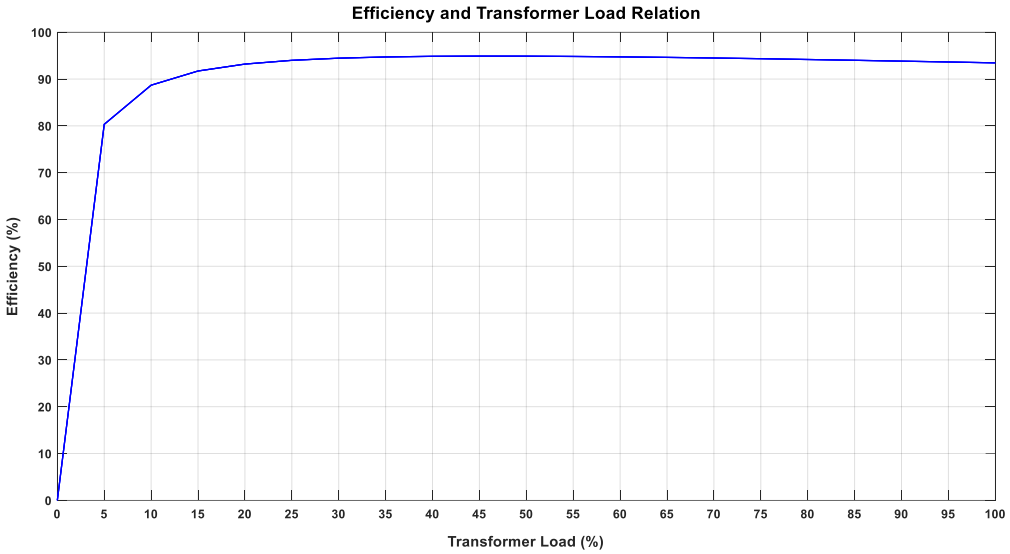
กำลังงานโหลดเทียบพิกัดหม้อแปลง		ค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง		กำลังงานโหลดเทียบพิกัดหม้อแปลง		ค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการจำลอง	
S (VA)	% Load	Eff (%)	VR (%)	S (VA)	% Load	Eff (%)	VR (%)
No-load	0	0	0.0247	1100	55	94.83	2.135
100	5	80.33	0.2161	1200	60	94.74	2.327
200	10	88.69	0.4076	1300	65	94.63	2.520
300	15	91.72	0.5992	1400	70	94.50	2.712
400	20	93.20	0.7909	1500	75	94.35	2.905
500	25	94.00	0.9827	1600	80	94.18	3.097
600	30	94.46	1.175	1700	85	94.01	3.290
700	35	94.72	1.366	1800	90	93.83	3.483
800	40	94.86	1.558	1900	95	93.65	3.676
900	45	94.90	1.751	2000	100	93.46	3.869
1000	50	94.89	1.943				

$$\%VR = \frac{(V_1 - V_2)}{V_2} \times 100 \tag{9}$$

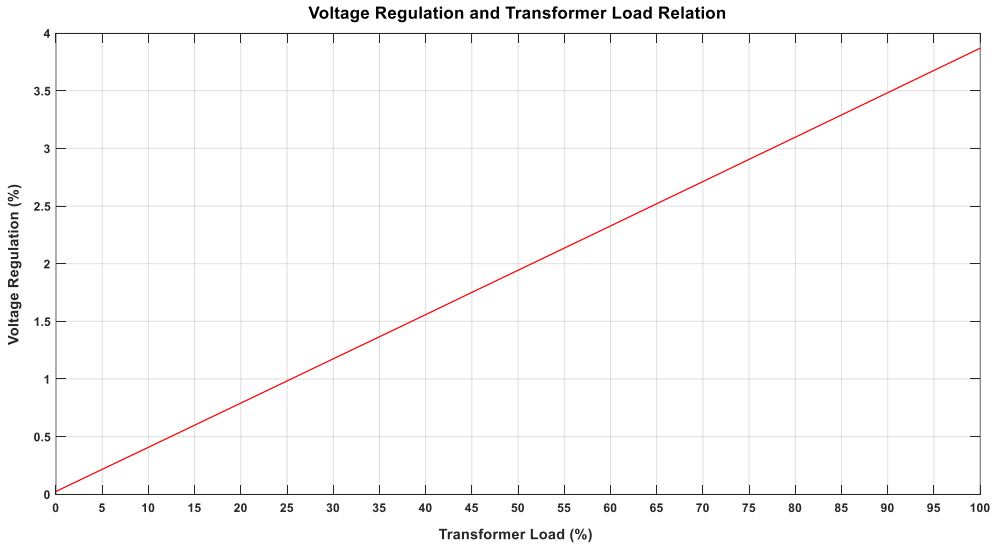
โดยที่ VR คืออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันของหม้อแปลง

V_1 คือแรงดันด้านเข้าของหม้อแปลง (220 Vrms)

V_2 คือแรงดันด้านโหลดของหม้อแปลง



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพและการจ่ายโหลดของหม้อแปลง



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันและการจ่ายโหลดของหม้อแปลง

5. สรุปและอภิปรายผล

จากผลจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของโปรแกรมโดยเริ่มจากการหาแบบจำลองของหม้อแปลงซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลการทดสอบแบบเปิดวงจรและลัดวงจรในห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นทำการปรับปรุงและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรมจำลองซึ่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนต่ำมาก เช่นเดียวกับการนำแบบจำลองหม้อแปลงไปใช้ศึกษา

คุณสมบัติกรณีการจ่ายโหลดชนิดต่างๆ โดยการเปรียบเทียบผลของกำลังงานและประสิทธิภาพในการทำงานของหม้อแปลงที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการและที่ได้จากการจำลอง นอกจากนี้ ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพรวมถึงค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีต่อการจ่ายโหลดของหม้อแปลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทำงานของหม้อแปลงในเชิงทฤษฎีด้วย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าเราสามารถนำโปรแกรม MATLAB/Simulink เข้ามาช่วยจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้สอนในวิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าในสภาวะการณ์ที่ไม่สามารถสอนในห้องปฏิบัติการได้ โดยเฉพาะเมื่อจำเป็นต้องมีการปรับรูปแบบเป็นการสอนออนไลน์ ซึ่งถึงแม้ผู้เรียนจะไม่ได้ลงมือปฏิบัติจริงแต่ก็ยังคงมีทักษะในการใช้โปรแกรมช่วยจำลองรวมถึงมีความเข้าใจคุณลักษณะสมบัติในการทำงานของหม้อแปลงในเรื่องต่างๆ ได้ดี

6. เอกสารอ้างอิง

ชัยรัตน์ วิสุทธิรัตน์. 2558. *เอกสารประกอบการสอน วิชาปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า.* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม. 2558.

Saffet Ayasun and Chika O. Nwankpa. 2005. Transformer Tests Using MATLAB/Simulink and Their Integration into Undergraduate Electric Machinery Courses. *Computer Applications in Engineering Education Journal.* 14(2), p.142-150, 2005.

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