

การปรับค่าเหมาะสมของตัวเก็บประจุเพื่อให้สอดคล้องกับมุมเฟสในมอเตอร์ PSC

โดยอ้างอิงจากการวัดด้วยออสซิลโลสโคป

Optimization of Capacitor for Phase Angle Matching in PSC Motors

Based on Oscilloscope Measurement

วรรณวินิต วิจิตรเทมย์ และ บุญยัง ปลั่งกลาง*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
wanwinit_w@mail.rmutt.ac.th and boonyang.p@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ชนิด Permanent Split Capacitor (PSC) โดยเน้นการเลือกค่าตัวเก็บประจุให้สอดคล้องกับมุมเฟสระหว่างกระแสของขดลวดหลักและขดลวดเสริม เพื่อให้มอเตอร์ทำงานที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการที่ใช้ประกอบด้วยการวัดและวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสด้วยออสซิลโลสโคปในโดเมนเวลา เพื่อหาค่ามุมเฟสที่เกิดขึ้นจริงในสภาวะทำงานต่าง ๆ จากนั้นจึงประเมินประสิทธิภาพและแรงบิดของมอเตอร์ในแต่ละค่าของตัวเก็บประจุอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามุมเฟสมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าประสิทธิภาพ และสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดในการเลือกค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ถือเป็นการบูรณาการระหว่างแนวคิดทางทฤษฎีและการทดลองจริง โดยใช้เครื่องมือที่มีอยู่ทั่วไปในภาคสนามอย่างออสซิลโลสโคป ทำให้แนวทางนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงมอเตอร์จริง หรือพัฒนาต่อยอดสู่ระบบควบคุมอัตโนมัติในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: PSC มอเตอร์, การปรับค่าเหมาะสมของตัวเก็บประจุ, มุมเฟส, การวัดด้วยออสซิลโลสโคป, พาวเวอร์แฟกเตอร์, การเพิ่มประสิทธิภาพมอเตอร์

Abstract

This research presented a novel approach for improving the efficiency of Permanent Split Capacitor (PSC) motors by optimizing the capacitor value to align with the electrical phase angle between the main and auxiliary winding currents. The methodology involved time-domain waveform measurement using an oscilloscope to determine the actual phase angle under different operating conditions. Subsequently, the motor's efficiency and torque were evaluated across various capacitor values in a systematic manner. The results indicated that the phase angle was directly correlated with efficiency and could serve as a reliable indicator for selecting the optimal capacitor. This study integrated with the experimental verification by employing an accessible and widely available instrument

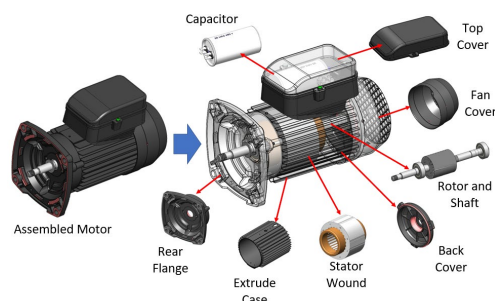
making the proposed technique practical for the real applications.

Keywords: permanent split capacitor (PSC) motor, capacitor optimization, phase angle, oscilloscope measurement, power factor, motor efficiency enhancement

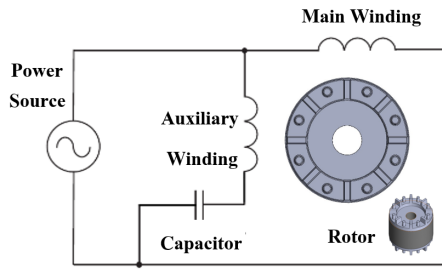
1. บทนำ

มอเตอร์เฟสเดียวชนิดคาปาซิเตอร์ Permanent Split Capacitor Motor เป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมในระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์ปั๊มสระว่ายน้ำ เนื่องจากโครงสร้างที่เรียบง่าย ราคาถูก และประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับงานโหลดคงที่ ความน่าสนใจในการวิเคราะห์มอเตอร์ชนิดนี้คือ ความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการเลือกค่าคาปาซิเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะโหลดที่ใช้งาน การเลือกค่าคาปาซิเตอร์ส่งผลโดยตรงต่อแรงบิดขณะสตาร์ท กระแสทำงาน และค่า power factor ในขณะ steady-state

ในภาพที่ 1 แสดงถึงองค์ประกอบภายในของมอเตอร์ PSC มอเตอร์อย่างชัดเจน โดยสามารถเห็นได้ว่าการประกอบส่วนหลักอย่างแฟนใบพัด ฝาครอบ สเตเตอร์ โรเตอร์ และฝาครอบหลัง ซึ่งตัวคาปาซิเตอร์จะถูกติดตั้งแบบถาวรในวงจรขดลวดเสริม (auxiliary winding) และมีผลต่อการสร้างมุมเฟสระหว่างกระแสของขดลวดหลักและเสริมอย่างชัดเจน จึงเป็นจุดที่สำคัญซึ่งมีผลกระทบต่อแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยตรง



ภาพที่ 1 PSC มอเตอร์ และชิ้นส่วนประกอบ



ภาพที่ 2 วงจรไฟฟ้ามอเตอร์ชนิด PSC

ในภาพที่ 2 แสดงภาพวงจรไฟฟ้า PSC มอเตอร์ ซึ่งใช้คาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมกับขดลวดเสริมเพื่อสร้างกระแส I_{aux} ที่นำกระแสของขดหลัก I_{main} อยู่ประมาณ 90° ทำให้สนามแม่เหล็กจากทั้งสองขดมีมุมต่างกัน เกิดการรวมกันเป็น สนามแม่เหล็กหมุน สำหรับสตาร์ทและเดินเครื่องอย่างต่อเนื่อง ในการทำงาน steady-state กระแสสองขดนี้ช่วยให้มอเตอร์มีแรงบิดเดินเรียบขึ้น, ประสิทธิภาพและค่า Power Factor สูงกว่า induction motor เฟสเดียวทั่วไปที่ไม่มีตัวเก็บประจุ

ในมอเตอร์ชนิด PSC กระแสในขดลวดหลัก I_{main} และขดลวดเสริม I_{aux} จะสร้างสนามแม่เหล็กสองทิศทาง หากกระแสทั้งสองทำมุม -90° (หมายถึง I_{aux} นำ I_{main} อยู่ 90°) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากทั้งสองขดจะมีทิศตั้งฉากกัน ทำให้การรวมเวกเตอร์กลายเป็น สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field) ที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด ผลที่ตามมาคือ 1. แรงบิดไฟฟ้าแม่เหล็กมีค่าเฉลี่ยสูงสุด เพราะแรงบิดสัดส่วนกับผลคูณของขนาดฟลักซ์สองขดและไซน์ของมุมระหว่างกันเมื่อ $\phi \approx 90^\circ$ ค่า $\sin \phi = 1$ ทำให้แรงบิดสูงสุด 2. การสูญเสียรีแอกทีฟในขดลวดหลักลดลง เพราะ I_{aux} ทำหน้าที่ชดเชยมุมเฟสของ I_{main} ให้กระแสรวมใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้า และส่งผลให้ Power Factor ดีขึ้น 3. ประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น เนื่องจากกำลังที่สูญเสียในรูปของความร้อน (I^2R และ core loss) ลดลง ขณะที่กำลังกลที่ส่งออกเพิ่มขึ้น สรุปคือการเลือกค่าคาปาซิเตอร์ให้ I_{aux} นำ I_{main} ประมาณ -90° ทำให้สนามแม่เหล็กสองขดตั้งฉากกันพอดี ซึ่งเป็นสถานะที่ได้แรงบิดและประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของ PSC มอเตอร์

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่กล่าวถึงการปรับค่าคาปาซิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ PSC มอเตอร์ โดยเน้นที่การเพิ่มประสิทธิภาพ การลดพลังงานสูญเสีย หรือการควบคุมทางไฟฟ้า โดยเฉพาะงานวิจัยในวารสารเรื่อง “Performance analysis of single phase capacitor run induction motor using MATLAB-Simulink model” ได้จำลองและวิเคราะห์การเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB-Simulink เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงบิดและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งเป็นการจำลองในเชิงทฤษฎีโดยไม่มีการวัดกระแสจริงในขดลวดหลักและเสริม ในทางตรงกันข้าม งานวิจัยฉบับปัจจุบันได้เน้นการเก็บข้อมูลจริงจากสนามด้วยออสซิลโลสโคป เพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสและหามุมเฟสที่แท้จริงใน

สถานะโหลดต่าง ๆ ซึ่งช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของระบบได้ลึกยิ่งขึ้น การใช้ข้อมูลจากออสซิลโลสโคปเพื่อวัดรูปคลื่นกระแสของขดลวดหลักและเสริม แล้วคำนวณหามุมเฟสที่แท้จริงเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับแรงบิดและประสิทธิภาพ ซึ่งไม่เคยปรากฏในงานวิจัยที่ผ่านมาชัดเจนในรูปแบบนี้ ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงเสนอแนวทางใหม่ที่สามารถนำไปใช้พัฒนาอัลกอริธึมควบคุมตัวเก็บประจุแบบอัตโนมัติ หรือใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พฤติกรรมมอเตอร์ในระดับละเอียด ซึ่งสามารถต่อยอดได้ง่ายและรวดเร็วในงานวิจัยเชิงอุตสาหกรรมหรือระบบฝังตัว

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้ใช้วิธีวัดและวิเคราะห์มุมเฟสระหว่างกระแสของขดลวดหลัก (Main winding) และขดลวดเสริม (Auxiliary winding) ของ PSC มอเตอร์ โดยใช้อุปกรณ์ออสซิลโลสโคป ซึ่งสามารถตรวจจับสนามของกระแสได้แบบเรียลไทม์ในโดเมนเวลา ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย:

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รายการ	พารามิเตอร์
จำนวนขั้วขดลวด	2 โพล
กำลังไฟฟ้า	750 วัตต์
ความเร็วรอบ	2750 รอบต่อนาที
พิกัดแรงดัน / ความถี่	240 โวลต์ / 50 เฮิร์ต
คาปาซิเตอร์	25 ไมโครฟารัด / 450 โวลต์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	โตนอก 112 / โตใน 57 มม.
ความหนาแกนสเตเตอร์	65 มม.
เกรดเหล็กซิลิกอน	50A1300

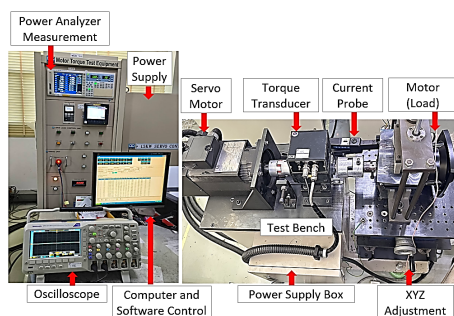
3.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลอง

1. PSC มอเตอร์ ขนาด 1 HP ที่สามารถเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ได้ภายนอกติดตั้งบนเครื่องทดสอบสมรรถนะมอเตอร์ตามภาพที่ 1 และคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกลของมอเตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 1 รวมถึง ตัวเก็บประจุชนิดต่าง ๆ
2. โหลดทางกลแบบเบรกแรงบิด (Torque brake) พร้อมเซนเซอร์วัดแรงบิดและความเร็วรอบแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งเป็นภาพจริงของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
3. ออสซิลโลสโคป 2 แชนแนล (Channel 1 สำหรับ I_{main} , Channel 2 สำหรับ I_{aux}) และ Current Probe แบบ High sensitivity เพื่อวัดรูปคลื่นกระแสของแต่ละขดลวด

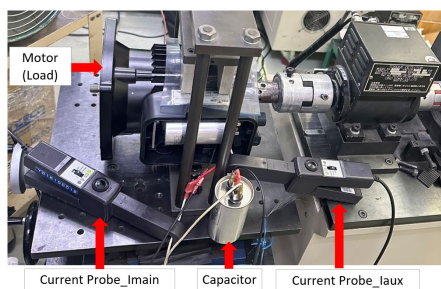
3.2 ขั้นตอนการวัดมุมเฟสด้วยออสซิลโลสโคป

1. เชื่อมต่อโพรบกระแสของ Channel 1 เข้ากับสายขดลวดหลัก และ Channel 2 กับสายขดลวดเสริมแสดงในภาพที่ 4

- เปิดออสซิลโลสโคปในโหมด Time-domain waveform และตั้งค่า Time base ให้อยู่ในช่วง 20 ms/div (สำหรับความถี่ 50/60 Hz)
- ใช้ฟังก์ชัน cursor หรือการวัดแบบ Automatic ของออสซิลโลสโคปเพื่อตรวจสอบตำแหน่งจุดสูงสุดของกระแสทั้งสองช่อง (I_{main} และ I_{aux})
- คำนวณระยะเวลาที่ต่างกันระหว่างจุดสูงสุดทั้งสอง (Δt)



ภาพที่ 3 เครื่องทดสอบสมรรถนะมอเตอร์



ภาพที่ 4 การต่อโพรบวัดกระแส I_{main} และ I_{aux}

5. คำนวณมุมเฟส (Phase Angle)

ในงานวิจัยนี้ การ คำนวณมุมเฟส (Phase Angle) ระหว่างกระแสของขดลวดหลัก (Main) และขดลวดเสริม (Auxiliary) ที่วัดด้วยออสซิลโลสโคปสามารถทำได้โดยใช้สูตรทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณไซน์ในโดเมนเวลา ตามสมการที่ (1) หรือ (2):

$$\text{สมการ} \quad \Phi = \Delta t \times f \times 360^\circ \quad (1)$$

$$\text{หรือ} \quad \Phi = \Delta t / T \times 360^\circ \quad (2)$$

โดยที่:

Φ = มุมเฟสที่ต้องการหา (หน่วย: องศา)

Δt = ค่าความต่างเวลา (Time delay) ระหว่างจุดพีคของ

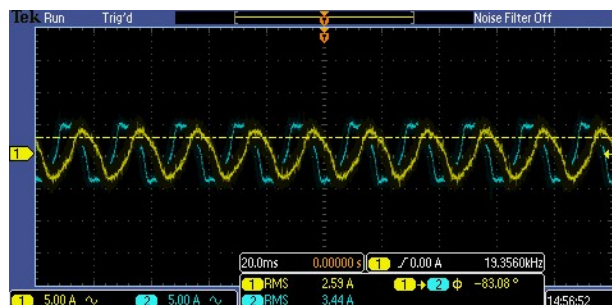
กระแส Main และ Auxiliary (หน่วย: วินาที)

f = ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (หน่วย: Hz) เช่น 50 Hz หรือ 60 Hz

360° = จำนวนองศาต่อหนึ่งคาบของคลื่นไซน์

T = คาบของสัญญาณ ($T = 1/\text{frequency}$)

จากภาพที่ 5 แสดงหน้าจอออสซิลโลสโคปที่เฟสของ Channel 2 ช้ากว่า Channel 1 อยู่ 83.08° ($\Phi = -83.08^\circ$) หมายความว่าที่ความถี่เท่ากับ 19.3560 กิโลเฮิร์ต (ช่องสเกลแนวนอน 20ms/div) ออสซิลโลสโคปแสดงคือค่าเท่ากับ -83.08° โดยเครื่องหมายลบแสดงว่า Aux (Ch2) ตามหลัง Main (Ch1)



ภาพที่ 5 หน้าจอออสซิลโลสโคปแสดงค่า I_{main} (Ch1), I_{aux} (Ch2) และ มุมต่างเฟส Φ

3.3 การวัดประสิทธิภาพและแรงบิด

หลังจากวัดมุมเฟสในแต่ละค่าคาปาซิเตอร์แล้ว จะทำการวัดค่าแรงบิด (Torque) และความเร็วรอบ (Speed) เพื่อคำนวณประสิทธิภาพมอเตอร์ในแต่ละกรณี โดยใช้สูตร ตามสมการที่ (3):

$$\text{สมการ} \quad h = \frac{T \times 2\pi N}{60 \times V \times I \times PF} \quad (3)$$

โดยที่:

h = ประสิทธิภาพของมอเตอร์

T = แรงบิด (Nm)

N = ความเร็วรอบ (RPM)

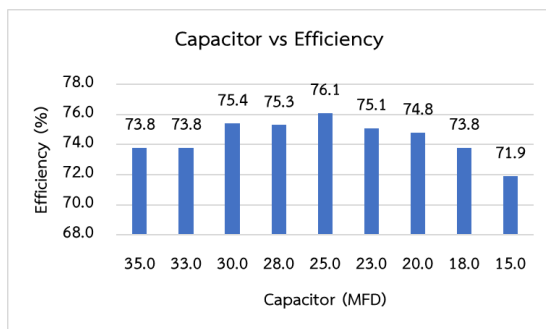
V = แรงดันไฟฟ้า (Volt)

I = กระแสไฟฟ้า (Ampere)

PF = ค่า power factor

ตารางที่ 2 ผลทดสอบมอเตอร์ที่โหลด 750 วัตต์ 240 โวลต์ 50 เฮิร์ต

Capacitor (μF)	Current (A)			Speed (rpm)	Torque (kg.cm)	Eff. (%)	PF. (%)
	I_t	I_{main}	I_{aux}				
35.0	4.35	2.49	3.74	2820	25.90	73.8	97.2
33.0	4.33	2.62	3.44	2815	26.00	73.8	97.8
30.0	4.21	2.84	3.10	2810	26.00	75.4	98.1
28.0	4.22	2.97	2.88	2805	26.10	75.3	98.4
25.0	4.17	3.16	2.54	2800	26.10	76.1	98.5
23.0	4.23	3.38	2.30	2795	26.20	75.1	98.3
20.0	4.28	3.68	1.97	2790	26.20	74.8	97.4
18.0	4.37	3.86	1.76	2775	26.40	73.8	96.9
15.0	4.55	4.21	1.44	2760	26.50	71.9	95.3

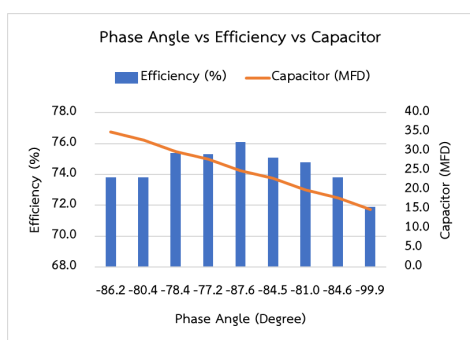


ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Capacitor กับ Efficiency

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าคาปาซิเตอร์ 25.0 μF ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดและเมื่อค่าคาปาซิเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ลดลง ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงพาราโบลาแบบกลับหัวของประสิทธิภาพต่อค่าคาปาซิเตอร์ที่ใช้งาน และในบางกรณีที่มีค่ามุมเฟสต่างกันเล็กน้อยเพียง 1.4° มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพมาก เช่น ที่ผลของคาปาซิเตอร์ 25 μF วัดได้มุมเฟสเท่ากับ -87.633° ในขณะที่ผลของคาปาซิเตอร์ 35 μF วัดได้มุมเฟส -86.218° ซึ่งต่างกันเพียง 1.4° ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอยู่ในช่วงความไม่แน่นอนรวมของการวัด และอยู่บนช่วงรารอบจุดเหมาะสม จึงเห็นค่ามุมเฟส “ไม่ปกติเสีย” กับคาปาซิเตอร์ทุกจุด

ตารางที่ 3 ผลการวัดค่ากระแสและมุมต่างเฟสด้วยออสซิลโลสโคป

Capacitor (μF)	AVG Current		AVG Phase angle (Deg.)	AVG Frequency (kHz)
	I _{main}	I _{aux}		
35.0	2.43	3.73	-86.218	21.256
33.0	2.59	3.44	-80.375	24.130
30.0	2.64	3.11	-78.373	26.597
28.0	2.98	2.86	-77.205	26.613
25.0	3.20	2.52	-87.633	24.920
23.0	3.36	2.28	-84.535	26.217
20.0	3.57	1.94	-80.988	11.077
18.0	3.95	1.73	-84.583	15.800
15.0	4.31	1.42	-99.918	12.057



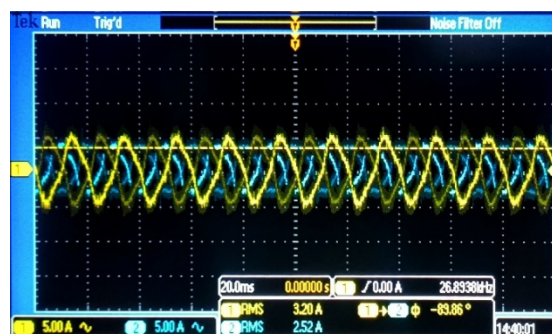
ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Efficiency, Phase Angle และ Capacitor

ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมเฟส (Phase Angle) กับ ประสิทธิภาพ (Efficiency) และ ค่าคาปาซิเตอร์ (Capacitor) แสดงให้เห็นจุด sweet spot ของมุมเฟสที่ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงที่สุด โดยสัมพันธ์กับค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบวงจรขับเคลื่อน PSC มอเตอร์

นอกจากการเลือกค่า C ที่เหมาะสมแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ เช่น การออกแบบสัดส่วนระหว่างขดลวดหลักกับขดลวดและการออกแบบทางกลเพื่อลดความร้อนมอเตอร์เป็นต้น



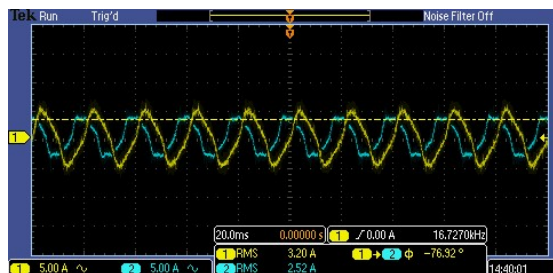
ภาพที่ 8 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามุมต่างเฟสที่คาปาซิเตอร์ 25.0 μF ครั้งที่ 1



ภาพที่ 9 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามุมต่างเฟสที่คาปาซิเตอร์ 25.0 μF ครั้งที่ 2

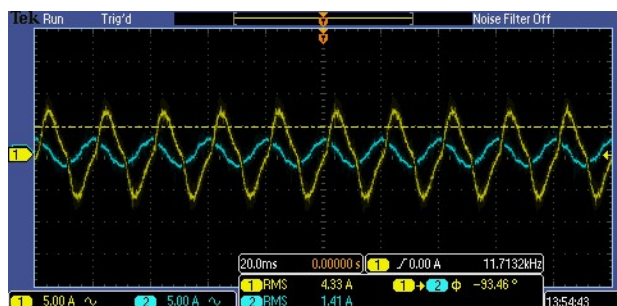


ภาพที่ 10 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามุมต่างเฟสที่คาปาซิเตอร์ 25.0 μF ครั้งที่ 3



ภาพที่ 11 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามมต่างเฟส
ที่ค่าคาปาซิเตอร์ 25.0 μF ครั้งที่ 4

ภาพที่ 8-11 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามมต่างเฟสที่ค่าคาปาซิเตอร์ 25.0 μF ภาพเหล่านี้แสดงรูปคลื่นของกระแสขดลวดหลัก Imain และกระแสขดลวดเสริม Iaux โดยมีการวัดซ้ำทั้งหมด 4 ครั้ง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความเสถียรของค่ามมเฟสที่ได้จากออสซิลโลสโคป



ภาพที่ 12 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามมต่างเฟส
ที่ค่าคาปาซิเตอร์ 15.0 μF

ภาพที่ 12 หน้าจอออสซิลโลสโคปวัดค่ามมต่างเฟสที่ค่าคาปาซิเตอร์ 15.0 μF ภาพเหล่านี้แสดงรูปคลื่นของกระแสขดลวดหลัก Imain และกระแสขดลวดเสริม Iaux หากเปรียบเทียบกับภาพหน้าจอออสซิลโลสโคปของคาปาซิเตอร์ 25 μF จะพบว่าเมื่อมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ให้ลดน้อยลงจนมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อ Imain เพิ่มขึ้นมากและ Iaux ลดลงอย่างมากทำให้การสูญเสียเกิดขึ้นมากและประสิทธิภาพมอเตอร์ลดลงมากเช่นกัน

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากดำเนินการทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้าและมมเฟสด้วยออสซิลโลสโคปในแต่ละค่าคาปาซิเตอร์แล้วจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของมมเฟส (Phase Angle) กับประสิทธิภาพ (Efficiency) และค่ากำลังไฟฟ้าโดยรวมของระบบ เพื่อประเมินหาค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

จากข้อมูลใน ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 พบว่า ค่าคาปาซิเตอร์มีผลโดยตรงต่อมมเฟสระหว่างกระแสขดลวดหลัก Imain และกระแสขดลวด

เสริม Iaux ส่งผลต่อแรงบิดและประสิทธิภาพโดยรวมของ PSC มอเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในเชิงประสิทธิภาพคือ 25.0 μF ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 76.1% และค่า Power Factor สูงถึง 98.5% ขณะที่ความเร็วรอบและแรงบิดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีอย่างสม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาจากผลการวัดด้วยออสซิลโลสโคปใน ตารางที่ 3 ที่ค่า 25.0 μF จะได้ค่าเฉลี่ยของ Phase Angle เท่ากับ -87.63° ซึ่งใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีที่ระบุว่า “แรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ PSC จะสูงสุดเมื่อมมเฟสระหว่าง Imain และ Iaux อยู่ใกล้ -90° (ไฟฟ้า)” ความคลาดเคลื่อนเพียง $\sim 2.4\%$ จากค่าทางทฤษฎีนี้ แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์สามารถทำงานในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้จริงเมื่อมมเฟสเข้าใกล้ -90°

5. วิเคราะห์และอภิปรายผล

จากผลการทดลองที่ดำเนินการในช่วงค่าคาปาซิเตอร์ 10.0 ถึง 35.0 ไมโครฟารัด โดยใช้วิธีวัดกระแสของขดลวดหลัก (Main winding) และขดลวดเสริม (Auxiliary winding) ผ่านออสซิลโลสโคป เพื่อนำไปคำนวณหามมเฟสที่เกิดขึ้นจริง พบว่า ค่าคาปาซิเตอร์มีอิทธิพลต่อมมเฟสของกระแสอย่างชัดเจน และสัมพันธ์โดยตรงกับค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) และค่า Power Factor ของระบบมอเตอร์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า:

- ค่าคาปาซิเตอร์ 25.0 ไมโครฟารัด ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 76.1% และ Power Factor สูงถึง 98.5% ภายใต้โหลดคงที่ 100% ที่ความเร็วประมาณ 2800 rpm
- มมเฟสที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปสำหรับค่าคาปาซิเตอร์นี้ คือ -87.63° ซึ่งใกล้เคียงกับทฤษฎีที่ระบุว่าควรอยู่ที่ -90° สำหรับสมรรถนะสูงสุด แสดงถึงความสอดคล้องระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎีทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
- ขณะที่ค่าคาปาซิเตอร์ที่มากกว่า เช่น 28.0 และ 33.0 ไมโครฟารัด กลับให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแม้จะมีมมเฟสในช่วง -77° ถึง -80° ซึ่งยังถือว่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี แต่ไม่ใช่ค่าที่ให้แรงบิดและ Power Factor สูงสุด

การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ค่าเพียงมมเฟสอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการตัดสินใจเลือกค่าคาปาซิเตอร์ที่ดีที่สุดแต่ต้องพิจารณาร่วมกับแรงบิด, ค่ากำลังไฟฟ้า, และความสมมาตรของ waveform จากออสซิลโลสโคปด้วย ซึ่งมีผลต่อความร้อนและอายุการใช้งานของมอเตอร์ในระยะยาว

ดังนั้น การเลือกค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมควรอ้างอิงจากข้อมูลเชิงทดลองจริงภายใต้โหลดเฉพาะ ไม่ควรใช้เพียงการคำนวณทางทฤษฎีหรือวิธีการสังเกตแบบคงที่ในเชิงออกแบบ เพราะการเบี่ยงเบนเล็กน้อยของมมเฟสสามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

6. สรุปผลและแนวทางวิจัยต่อยอด

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ PSC มอเตอร์ โดยอ้างอิงจากการวัดมุมเฟสของกระแสในขดลวดหลักและขดลวดเสริมผ่านออสซิลโลสโคป เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดของมอเตอร์ ภายใต้การทดสอบในช่วงค่าคาปาซิเตอร์ตั้งแต่ 15.0 ถึง 35.0 ไมโครฟารัด ที่โหลดเต็มกำลัง (Full load)

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลทดสอบ พบว่า:

1. ค่าคาปาซิเตอร์ 25.0 ไมโครฟารัด ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 76.1%, Power Factor 98.5%, และมีมุมเฟสเฉลี่ยระหว่างกระแสของขดลวดหลักและเสริมอยู่ที่ -87.63 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับหลักการทางทฤษฎีที่ระบุว่าประสิทธิภาพจะดีที่สุดเมื่อมุมเฟสเข้าใกล้ -90 องศา
2. แม้ว่าค่าคาปาซิเตอร์ที่มากกว่าจะสามารถเพิ่มค่าแรงบิดได้ในบางช่วง แต่กลับไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น เพราะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของมุมเฟสและค่า Power Factor ลดลง
3. ค่าคาปาซิเตอร์ที่ต่ำกว่า 20 ไมโครฟารัด ทำให้รูปคลื่นของกระแสเสริมเบี้ยวอย่างชัดเจน และเกิดแรงบิดต่ำ ไม่เหมาะกับการใช้งานในระบบจริง
4. การวัดมุมเฟสด้วยออสซิลโลสโคปร่วมกับการวิเคราะห์ waveform สามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าการใช้ค่าทางทฤษฎีล้วน ๆ

6.2 แนวทางวิจัยต่อยอด

จากผลการวิจัยนี้สามารถขยายผลและพัฒนาเป็นงานวิจัยในระดับลึกต่อไปได้ในหลากหลายแนวทาง เช่น การสร้าง Efficiency Map ตามค่าคาปาซิเตอร์และโหลด เพื่อให้ทราบพฤติกรรมการทำงานของ PSC มอเตอร์ ภายใต้ภาระโหลดที่แตกต่างกัน สิ่งนี้จะทำให้ไม่ต้องอ้างอิงแค่ ค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมภายใต้โหลดเดียว แต่สามารถมองเห็น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพทั้งระบบ ตามเงื่อนไขการใช้งานจริง หรือการใช้ Machine Learning เพื่อพยากรณ์ประสิทธิภาพจาก waveform: โดยนำข้อมูลมุมเฟส, ค่า PF, และรูปคลื่นกระแสมาใช้เป็น input ในการเทรนโมเดล ML เพื่อการพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมในงานควบคุมอัจฉริยะ จะช่วยเพิ่มความแม่นยำ ในการเลือกจุดทำงานที่มี efficiency สูงสุด และยังทำให้มอเตอร์ฉลาดขึ้น (Smart PSC Motor) โดยสามารถปรับตัวตามภาระโหลดจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Aldaikh, S.O. et al. (2024). Study of Starting Modes of Single-Phase Induction Motors When Changing the Parameters of the Stator Windings, Phase-Shifting Capacitor and Supply Voltage. IAPGOS, 2 (2 0 2 4) , 3 4 – 4 1 . <http://doi.org/10.35784/iapgos.5928>

- [2] Mossa, M.A. and Bolognani, S. (2018). Model Predictive Phase Angle Control for an Induction Motor Drive. Proc. of the 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt. IEEE, 1–6.
- [3] Oleschuk, V. (2019). Multiparameter Analysis for Efficiency Improvement of Single-Phase Capacitor Motor. Energies, 12(13), 2617. <https://doi.org/10.3390/en12132617>
- [4] Saygin, A. and Ucar, M. (2019). Improving the Starting Characteristics of Single Phase Induction Motors with an Auxiliary Winding Current Control. Engineering Science and Technology: An International Journal, 22 (1) , 3 4 – 4 1 . <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.005>
- [5] Thounthong, P. and Phurison, W. (2024). Stator Design Optimization of Induction Motors with Different Stator Slot Bar Combinations Considering Drive Cycle. Energies, 17(5), 1104. <https://doi.org/10.3390/en17051104>
- [6] Yildirim, S. (2025). A Review of Recent Trends in High-Efficiency Induction Motor Drives. Machines, 13(3), 268. <https://doi.org/10.3390/machines13030268>
- [7] Younis, M. and Mohammed, S. (2013). Performance Analysis of Permanent Split Capacitor (PSC) AC Motor Under Various Loads. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 12(23), 141–150.