

บทที่ 4

การประหยัดพลังงานการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดดังกล่าว จากการศึกษาพบว่า Kusko and Galler (1983) ได้นำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานโดยอาศัยวิธีทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานให้มากที่สุด โดยในบทนี้จะอธิบายวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีที่เรียกว่า วิธีหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) นอกจากนี้จะนำเสนอผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ และการเปรียบเทียบผลการคำนวณดังกล่าวกับการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม

4.2 การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นวิธีที่อาศัยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียเทียบกับกระแสสนาม ให้เท่ากับศูนย์ โดยสมการกำลังงานสูญเสียที่ใช้แสดงได้ดังสมการที่ (4.1) เป็นสมการเดียวกับสมการที่ (2.25) ในบทที่ 2 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการคือ R_a เท่ากับ 15.99Ω , R_f เท่ากับ 735.43Ω , K_{st} เท่ากับ 8.68×10^{-7} และ K_h เท่ากับ 4.77×10^{-8} พารามิเตอร์ดังกล่าวได้จากการคำนวณและจากวิธี ATS ในบทที่ 3 การประหยัดพลังงานโดยใช้วิธีดังกล่าว มีเป้าหมาย คือ ต้องการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียต่ำที่สุด ที่ค่าความเร็วและแรงบิดต่าง ๆ และจากการศึกษาของ Kusko and Galler (1983) ได้กำหนดว่ากระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + 2i_a + K_{st} i_a^2 \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 + K_h i_f^2 \omega \quad (4.1)$$

$$i_a = \frac{T}{K_e' K_f i_f} \quad (4.2)$$

ค่า K_f ในสมการที่ (4.2) เป็นฟังก์ชันของกระแสสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (4.3) คือ

$$K_f = f(i_f) \quad (4.3)$$

แทนค่าสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.1) และทำการปรับรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ (4.4) ดังนี้

$$P_{loss} = \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2 i_f^2} + \frac{2T}{K_e' K_f i_f} + (R_f + K_h \omega) i_f^2 \quad (4.4)$$

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ต้องการคำนวณค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงดำเนินการหาอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสีย สมการที่ (4.4) เทียบกับกระแสสนาม เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = \frac{\partial}{\partial i_f} \left[\left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2 i_f^2} + \frac{2T}{K_e' K_f i_f} + (R_f + K_h \omega) i_f^2 \right] = 0$$

หรือ

$$\begin{aligned} & (R_f + K_h \omega) i_f^4 - \frac{T}{K_e' K_f^2} \frac{\partial K_f}{\partial i_f} i_f^2 - \left[\frac{T}{K_e' K_f} \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^3} \frac{\partial K_f}{\partial i_f} \right] i_f \\ & - \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2} = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5) กำหนดให้ K_f เป็นค่าคงที่ ซึ่ง $\frac{\partial K_f}{\partial i_f} = 0$ ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ (4.6)

ดังนี้

$$(R_f + K_h \omega) i_f^4 - \left(\frac{T}{K_e' K_f} \right) i_f - \left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2} = 0 \quad (4.6)$$

ทำการกำหนดตัวแปรใหม่ได้ดังนี้

$$A = R_f + K_h \omega$$

$$D = -\frac{T}{K'_e K_f}$$

$$E = -\left[R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{T^2}{K_e'^2 K_f^2}$$

ดังนั้นสมการที่ (4.6) จึงเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.7) คือ

$$Ai_f^4 + Di_f + E = 0 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) เป็นสมการกำลังสี่ สามารถแก้สมการด้วยวิธีการของ Lodovico Ferrari (Jean and Tignol, 2001) ซึ่งจะแสดงวิธีการแก้สมการที่ (4.7) เป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณ β จาก $\beta = \frac{D}{A}$ และ γ จาก $\gamma = \frac{E}{A}$

ขั้นตอนที่ 2: ใช้สมการ $P = -\gamma$ และ $Q = -\frac{\beta^2}{8}$ คำนวณค่า P และ Q

ขั้นตอนที่ 3: คำนวณค่า R จาก $R = -\frac{Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27}}$

ขั้นตอนที่ 4: ใช้ค่า R จากขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า U โดย $U = \sqrt[3]{R}$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณค่า y จากสมการที่ (4.8) คือ

$$y = \begin{cases} U - \frac{P}{3U}, & \text{if } U \neq 0 \\ U - \sqrt[3]{Q}, & \text{if } U = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

ขั้นตอนที่ 6: คำนวณค่า W โดยใช้สมการ $W = \sqrt{2y}$

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณค่า i_f ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (4.9)

$$i_f = \frac{\pm_s W \mp \sqrt{-\left(2y \pm_s \frac{2\beta}{W}\right)}}{2} \tag{4.9}$$

จากการคำนวณทั้ง 7 ขั้นตอน สุดท้ายจะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดการประหยัดในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่ากระแสสนามที่ได้จากสมการที่ (4.9) จะได้คำตอบออกมาทั้งหมด 4 ค่า ซึ่งจากค่ากระแสสนามทั้ง 4 ค่า จะต้องเลือกเพียง 1 ค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังงานต่อไป โดยเกณฑ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสม คือ ค่ากระแสสนามต้องไม่ติดลบ ค่ากระแสสนามต้องไม่มีค่าเป็นศูนย์ และค่ากระแสสนามต้องมีค่าไม่เกินค่าพิกัด และอีกประเด็นหนึ่งที่ต้องพิจารณาหลังจากเลือกค่ากระแสสนามแล้ว คือ นำค่ากระแสสนามที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.7) ถ้าค่ากระแสสนามที่แทนลงไปทำให้สมการดังกล่าวเป็นจริง จึงสรุปได้ว่าค่ากระแสสนามนั้นทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงานขึ้น

4.3 ผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์

ผลการคำนวณการประหยัดพลังงานที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ จะคำนวณหาค่ากำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการคำนวณกำลังงานอินพุตการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิมตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1 โดยการเปรียบเทียบนี้จะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (4.10) ซึ่งจะได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน} = \frac{P_{in, classical} - P_{in, OM}}{P_{in, classical}} \times 100\% \tag{4.10}$$

โดยที่ $P_{in, classical}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม
 $P_{in, OM}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีทางคณิตศาสตร์

T_L (N·m)	N (rpm)	วิธีดั้งเดิม			วิธีทางคณิตศาสตร์			เปอร์เซ็นต์การ ประหยัดพลังงาน
		i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	i_f (A)	v_a (V)	P_{in} (W)	
0.2	1000	0.30	82.51	88.09	0.11	40.75	38.40	56.41
	2000	0.30	160.73	109.03	0.12	71.73	59.47	45.46
	2750	0.30	220.00	125.09	0.12	97.08	75.38	39.74
0.4	1000	0.30	86.79	112.47	0.16	57.49	76.78	31.73
	2000	0.30	165.01	154.36	0.16	101.08	118.88	22.99
	2750	0.29	220.00	183.79	0.17	136.80	150.70	18.00
0.6	1000	0.30	91.07	139.15	0.19	70.33	115.16	17.24
	2000	0.30	169.29	201.98	0.20	123.59	178.30	11.72
	2750	0.29	220.00	245.07	0.21	167.27	226.00	7.78
0.8	1000	0.30	95.35	168.12	0.22	81.15	153.53	8.68
	2000	0.30	173.58	251.89	0.23	142.58	237.71	5.63
	2750	0.28	220.00	309.47	0.24	192.96	301.30	2.64
1	1000	0.30	99.63	199.38	0.25	90.69	191.91	3.75
	2000	0.30	177.86	304.09	0.26	159.30	297.11	2.30
	2750	0.27	220.00	377.67	0.27	215.59	376.60	0.28
1.2	1000	0.30	103.91	232.93	0.27	99.31	230.28	1.14
	2000	0.30	182.14	358.59	0.28	174.42	356.52	0.58
	2750	0.27	220.00	450.07	0.27	220.00	450.07	ไม่ประหยัด
1.4	1000	0.30	108.19	268.77	0.29	107.24	268.66	0.04
	2000	0.30	186.42	415.38	0.30	186.42	415.57	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	528.09	0.26	220.00	528.09	ไม่ประหยัด
1.5	1000	0.30	110.33	287.55	0.30	110.33	287.74	ไม่ประหยัด
	2000	0.30	188.56	444.63	0.30	188.56	444.82	ไม่ประหยัด
	2750	0.26	220.00	532.84	0.26	220.00	532.84	ไม่ประหยัด

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการคำนวณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานขึ้น ยกตัวอย่างที่ T_L เท่ากับ 0.2 N·m และ N เท่ากับ 1000 rpm ค่ากระแสสนามจากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม เท่ากับ 0.3 A และกำลังงานอินพุต เท่ากับ 88.09 W แต่เมื่อคำนวณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ค่ากระแสสนามและกำลังงานอินพุต เท่ากับ 0.11 A และ 38.40 W ตามลำดับ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่ากระแสสนามด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์สามารถประหยัดพลังงานได้ 56.41% ที่จุดการทำงานนี้ และต่อมาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจะลดลงเมื่อแรงบิดโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ มีบางจุดการทำงานที่ไม่สามารถประหยัดพลังงานได้ เช่น ที่ T_L เท่ากับ 1.4 N·m และ N เท่ากับ 2000 rpm

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนที่ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ โดยจะคำนวณค่ากระแสสนามที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดกำลังงานสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากผลการคำนวณในช่วงแรงบิดต่ำคือ ประมาณ ไม่มีโหลดจนถึงครึ่งหนึ่งของโหลดเต็มพิกัด สามารถลดกำลังงานสูญเสียได้ดี โดยเฉพาะในช่วงความเร็วรอบต่ำ ๆ แต่เมื่อแรงบิดของโหลดเข้าใกล้พิกัด การลดกำลังงานสูญเสียจะน้อยลง