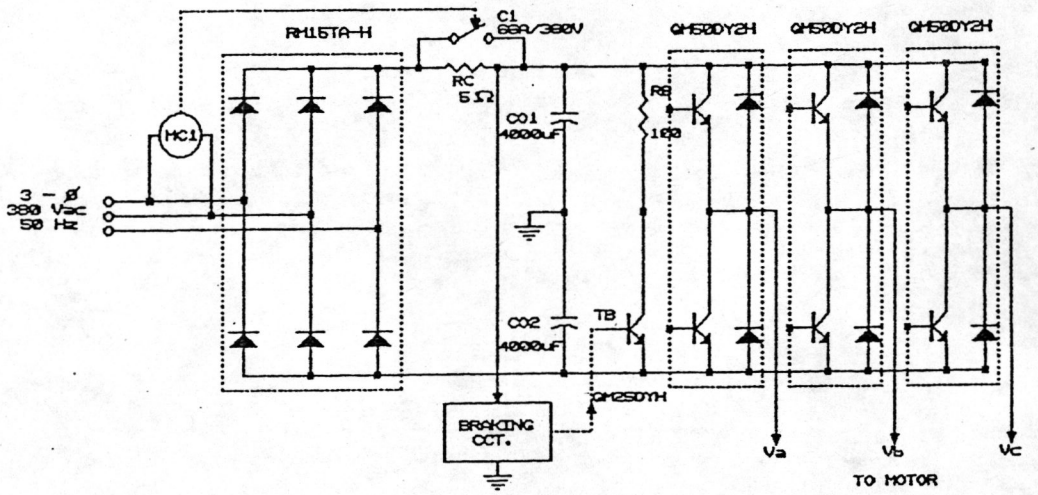
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ภาควงจรกำลัง

1. โครงสร้างของภาควงจรกำลัง

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage - fed inverter) มีโครงสร้างโดยทั่วไป ประกอบด้วย วงจรแปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรงหรือวงจรเรียงกระแสและ วงจรแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับหรือวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 แต่มีวงจรที่เพิ่มเติมเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ใช้งานได้ดีขึ้นก็คือ วงจรเบรคพลวัต(dynamic braking) และ วงจรจำกัดกระแสเกินในขณะเปิดเครื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีวงจรเบรคพลวัต

2. ข้อกำหนดในการออกแบบ

สำหรับการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์จะมีข้อกำหนด ซึ่งจะเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวงจรภาคกำลัง เพื่อให้ อินเวอร์เตอร์ทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพที่ดี ข้อกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

ข้อกำหนดในการออกแบบอินเวอร์เตอร์

รายการ(Item)		ข้อกำหนด (Specification)
พิกัด (rating)	ขนาด (capacity) (kW) (kVA)	 5 7.9
	Power factor	>0.5
ด้านเข้า (Input)	แรงดันขาเข้า (V) ความถี่ขาเข้า (Hz)	3 - Φ AC 380 V $\pm$ 10% 50 Hz $\pm$ 2%
ข้อกำหนดในการควบคุม	แรงดันขาออก (V)	3 - Φ AC 380 V / 50 Hz
	ความถี่ขาออก	5 - 50 Hz
	ระบบควบคุม V/f characteristic	Sinusoidal-wave PWM Voltage - fed Constant V/f Control
	อัตราเร่ง (วินาที) อัตราชลอ (วินาที)	1 - 10 1 - 10
ประสิทธิภาพ	เปอร์เซนต์(%)	>88

3. การออกแบบวงจรเรียงกระแส[7]

การออกแบบวงจรเรียงกระแส จากภาพที่ 2.1 วงจรเรียงกระแสประกอบด้วย ไดโอด (ที่ต่อกับแบบริดจ์), ตัวเก็บประจุ C และ ตัวต้านทาน R ที่ต่อขนานกันกับหน้าสัมผัสของรีเลย์ สำหรับลดกระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุในตอนเริ่มประจุ มิให้มีค่ามากเกินไป

ข้อกำหนดในตารางที่ 2.1 กำหนดให้

อินเวอร์เตอร์ : มีพิกัดทางด้านขาออก เท่ากับ 7.9 kVA

: มีพิกัดแรงดันขาเข้า เท่ากับ 380 โวลต์(Vrms)

ดังนั้น แรงดันไฟตรงสูงสุดขาออกของวงจรเรียงกระแส = $\sqrt{2}$ x 380 โวลต์

Vp = 537 โวลต์

เลือกให้วงจรกรองมีแรงดันกระเพื่อมได้ 2.5%

แรงดันไฟกระเพื่อมจากยอดถึงยอด Vr(p-p) = 537 x 0.025

= 13.43 โวลต์

แรงดันไฟตรงเฉลี่ย[8] Vdc = Vp - Vr(p-p)/2 (2.1)

= 530.68 โวลต์

ประจุไฟฟ้า Q ที่คายจากตัวเก็บประจุ ในช่วงเวลา $t \simeq T / 6$ มีค่าเท่ากับ

$$Q = C \times Vr(p-p) = Idc \times t \qquad (2.2)$$

กระแสไฟตรง (Idc) คำนวณจาก สมการ

Idc = กำลังไฟขาเข้า / แรงดันไฟเฉลี่ย x ประสิทธิภาพ

= 5×10^3 / (530 x 0.9)

= 8.49 แอมป์

จากสมการ (2.2) t คือ เวลาที่ตัวเก็บประจุคายพลังงานออก

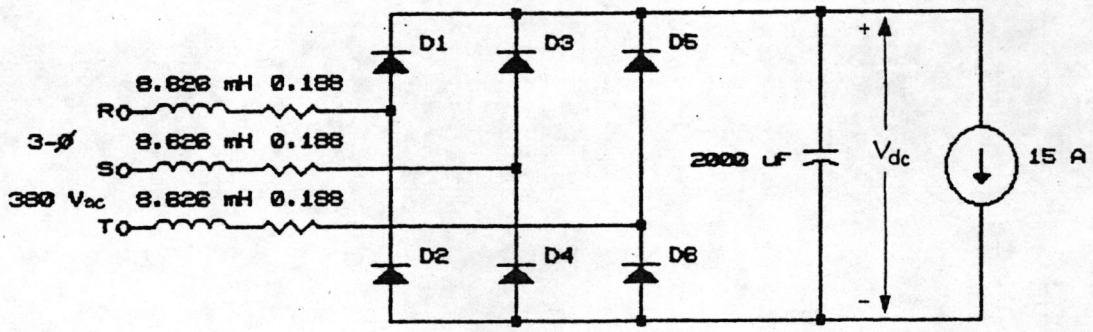
ประมาณเท่ากับ 20 ms/ 6 (t = 3.33 ms)

ดังนั้น ค่าตัวเก็บประจุ C = Idc x t / Vr(p-p) = 2105 ไมโครฟารัด

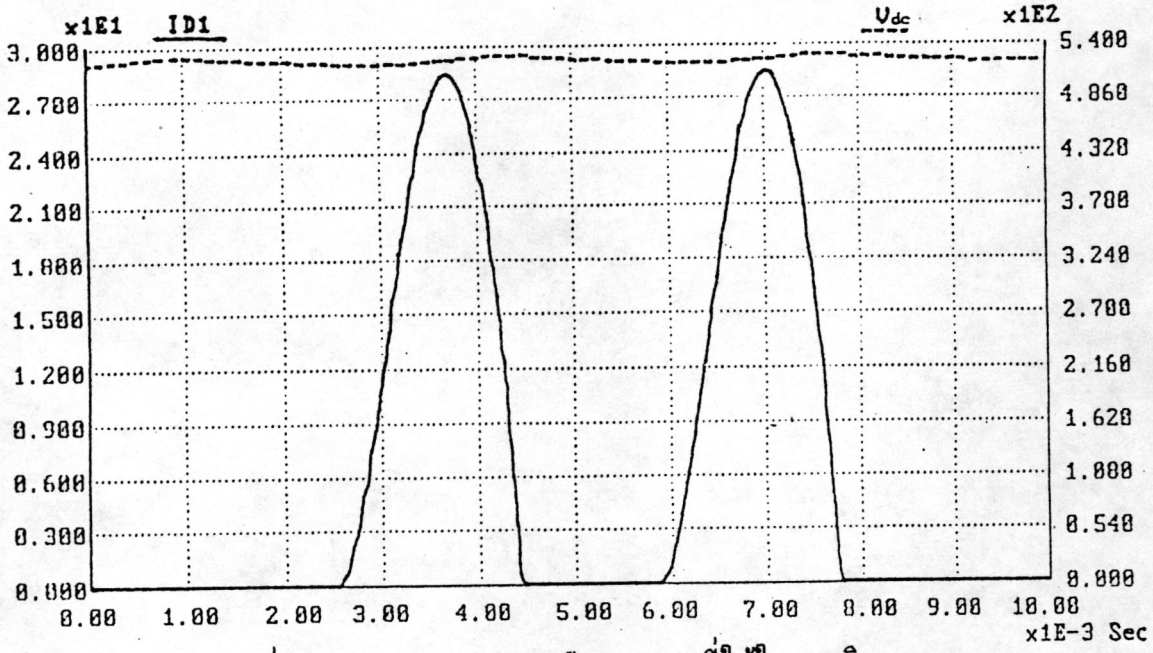
เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาด 4000 uF-350 Vdc 2 ตัว ก็จะได้ตัวเก็บประจุรวมมีค่าเป็น 2000 uF-700 Vdc

ในการหาขนาดของไดโอด จะต้องพิจารณาอิมพิแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟสลับ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด และการติดตั้งของอินเวอร์เตอร์ พิจารณาจากขนาด kVA ของอินเวอร์เตอร์ เท่ากับ 7.9 kVAกระแสที่ไหลในสายประมาณ12 แอมป์ จากตารางขนาดสาย[7] จะได้ขนาดของสาย 2.5 mm^2 ที่มีอิมพีแดนซ์ของสายเท่ากับ 180 + j30 mΩ ต่อ 1 สาย โดยที่สายมีความยาว 100 เมตร ห่างจากแหล่งจ่ายไฟซึ่งถือว่าเป็นหม้อแปลงขนาด 250 kVA ซึ่งหาอิมพีแดนซ์ ของตัวหม้อแปลงจะได้ ความต้านทานภายในเท่ากับ 8.32 mΩ[7]และรีแอกแตนซ์ 24.19 mΩต่อ 1เฟสจะได้อิมพิแดนซ์ของรวมทั้งสายและหม้อแปลง เท่ากับ 188.32 +j54.19 mΩ

เมื่อได้ค่าอิมพิแดนซ์ของแหล่งจ่าย ก็สามารถนำไปหาขนาดของไดโอด แต่เนื่องจากวิธีการคำนวณยุ่งยาก จึงใช้โปรแกรม LEC [6] ช่วยในการวิเคราะห์หาขนาดของกระแสอาร์เอมเอสที่ไหลผ่านไดโอดได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.2(ข)



(ก)



ภาพที่ 2.2 ก) วงจรเรียงกระแสที่ใช้ในการซิมมูเลต

ข) กระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_1 (ID1) ที่ได้จากการซิมมูเลต

ดังนั้นสามารถคำนวณกระแสอาร์เอมเอสที่ไหลผ่านไดโอด แต่ละตัวจากภาพที่ 2.2 (ข) ซึ่งถือว่า กระแสมีรูปคล้ายสัญญาณรูปไซน์ครึ่งคลื่นกระแสอาร์เอมเอสผ่านไดโอด ดังสมการ (2.3)[7]

$$Id\ (rms) = (1/\sqrt{2})\ (Ip\ \sqrt{2t/T}) \qquad (2.3)$$

จากภาพที่ 2.2 ข): ช่วงเวลาที่ไดโอดนำกระแส (t) เท่ากับ 1.7 ms

: คาบของเวลาของรูปคลื่นกระแส (T) เท่ากับ 10 ms

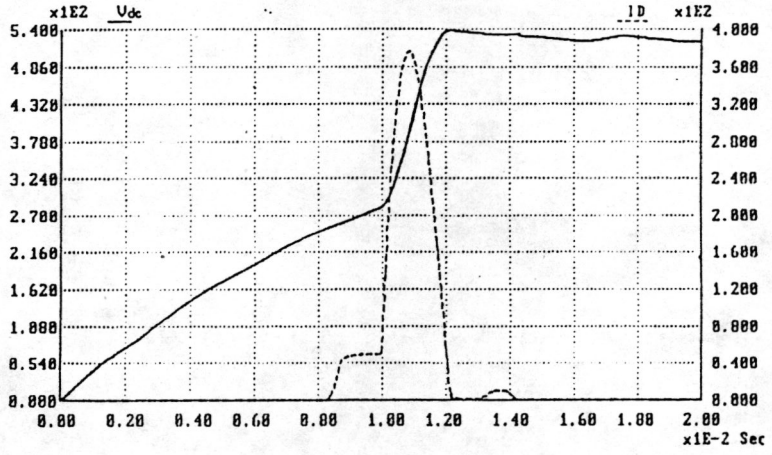
: ค่ากระแสยอด (Ip) เท่ากับ 28.4 A (มี 2 ลูกคลื่น)

จากสมการ 2.3 $Id(rms) = 28.4 \times (\sqrt{2 \times 1.7 / 10})$

$= 16.56$ แอมป์

หาค่าความต้านทาน R ที่จะทำหน้าที่ลดค่ายอดของกระแสไหลกระชากในช่วงแรกที่จ่ายแรงดันไฟสลับ 380 V เข้าในวงจร โดยการทดลองจากการซิมมูเลตและเปลี่ยนค่า R ที่ทำให้กระแสยอดมีค่าต่ำสุด และเปลี่ยนช่วงเวลาในการปิดลงของหน้าสัมผัส

s1 ที่เวลาต่างกันสรุปได้ว่า ค่าความต้านทาน R ควรมีค่า 5 โอห์ม ผลการซิมมูเลต ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงขนาดของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดที่หน้าสัมผัส s1 ปิดลงที่เวลา 10 ms

จากภาพที่ 2.3 กระแสสูงสุดประมาณ 360 A ดังนั้นจึงเลือกไดโอดที่สามารถทนกระแสเสิร์ช(I_{FSM}) ได้ถึง 400A และมีกระแสอาร์เอมเอสของไดโอดมากกว่า 16.56 แอมป์ ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมเลือกไดโอดเบอร์ RM15TA-H ที่เป็นแบบโมดูล (มีไดโอด 6 ตัวต่อกันแบบบริดจ์)

: I_d(rms) เท่ากับ 25 แอมป์

: V_{CE}(max) เท่ากับ 800 โวลต์(Vdc)

: I_{FSM} เท่ากับ 400 แอมป์ ที่ความถี่ 60 Hz

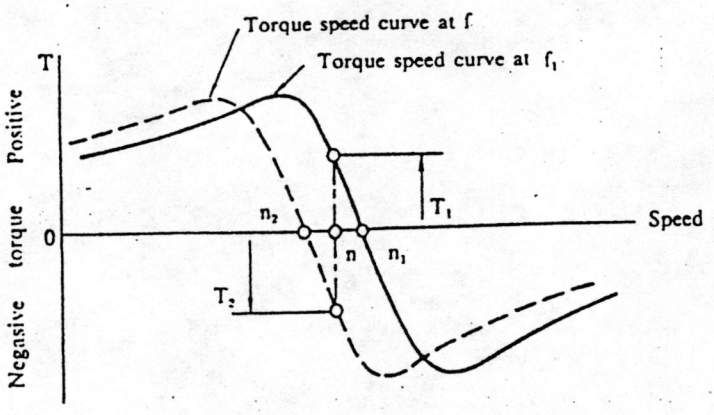
การคำนวณหาค่าความต้านทานสำหรับให้ตัวเก็บประจุคายประจุ ตามมาตรฐานของ วสท 40 ข กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีตัวต้านทานสำหรับให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้เหลือ 50 โวลต์ ภายใน 1 นาที ดังนั้นค่าความต้านทานในการคายประจุ สามารถหาได้จากสมการ (2.4)

$$50 = 1.1 \times 530 \exp(-60 / R_c C) \qquad (2.4)$$

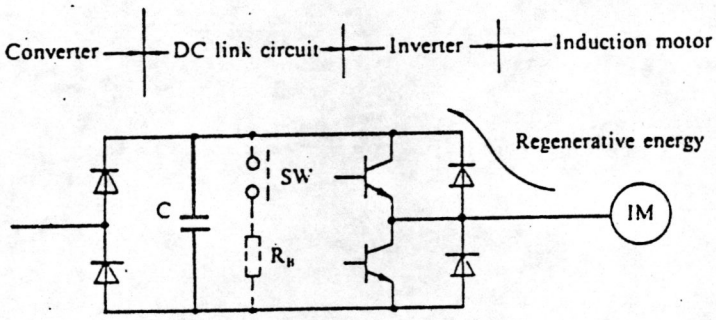
ดังนั้นค่าความต้านทาน Rc ประมาณเท่ากับ 12kΩ และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในความต้านทาน Rc เท่ากับ $530^2/12k\Omega$ (23.4 วัตต์) หรือ 0.46 เปอร์เซนต์ความต้านทาน Rc ควรมีขนาดมากกว่า 23.4 วัตต์ ดังนั้นเลือกให้ความต้านทานที่มีค่า 48 kΩ ขนาด 10 วัตต์ ต่อขนานกัน 4 ตัวมีค่าเท่ากับ 12kΩ

4. <u>การออกแบบวงจรเบรค</u>[9]

ในการใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยรักษาแรงดันและความถี่ให้มีค่าคงที่ คุณสมบัติของแรงบิดดังแสดงในภาพที่ 2.4 เมื่อสลิปของมอเตอร์เป็นลบ กล่าวคือ ฟลักซ์แม่เหล็กหมุน(synchronous speed)มีค่าน้อยกว่าความเร็วตัวหมุน (rotor rotating speed) เมื่อความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ลดลง แรงบิดที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จะมีค่าเป็นลบ และมอเตอร์จะถูกเบรค(ดูภาพที่ 2.4)เมื่อความถี่ของอินเวอร์เตอร์ เท่ากับ f_1 มายัง f_2 ความเร็วของฟลักซ์แม่เหล็กหมุนลดลงจาก n_1 มายัง n_2 ตามลำดับ และมีค่าต่ำกว่าความเร็วของตัวหมุน(n) นั้นคือ สลิปกลายเป็นลบ และแรงบิดของมอเตอร์(T_2)กลายเป็นแรงบิดของการเบรค (braking torque)



ภาพที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.5 แสดงทิศทางของพลังงานจากมอเตอร์ขณะทำการเบรค

ในขณะนี้มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดพลังงานด้วยการส่งพลังงานกลจากมอเตอร์และโหลด มาเป็นพลังงานไฟฟ้า ผ่านทางไดโอดของวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 2.5 พลังงานที่ถูกส่งกลับมานี้ไม่สามารถผ่านวงจรเรียงกระแสไปสู่แหล่งไฟสลับได้ จึงสะสมเป็นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

เนื่องจากโหลดมีความเฉื่อย(moment of inertia) มาก พลังงานที่ถูกส่งกลับมาจึงต้องมีการระบายโดยผ่านทางตัวต้านทาน(R_B)(ดูภาพที่ 2.1)

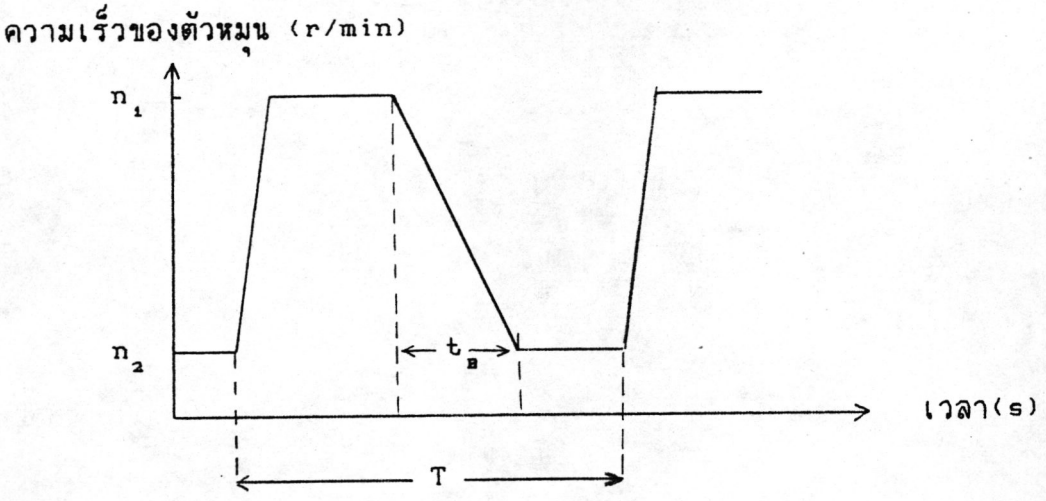
กำหนดให้ n_1 คือ ความเร็วตัวหมุนก่อนมีการลดความเร็ว

n_2 คือ ความเร็วตัวหมุนหลังจากทำการลดความเร็ว

t_B คือ เวลาที่ต้องการเบรค

T คือ คาบเวลาที่สามารถเปลี่ยนความเร็วซ้ำกันได้ เท่ากับ 20 วินาที

คำนวณหาพิกัดแรงบิดของมอเตอร์(motor rated torque,T_M)ได้จากสมการ(2.5)[9]



ภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์กับเวลา

$$T_M = \frac{P_M \times 10^3}{(2\pi n_m / 60)} \quad \text{(N-m)} \qquad (2.5)$$

โดยที่ P_m คือ พิกัดขนาดของมอเตอร์ เท่ากับ 5 kW

n_m คือ พิกัดความเร็วของมอเตอร์ เท่ากับ 1473 r/min

ดังนั้น พิกัดแรงบิดของมอเตอร์(T_M) เท่ากับ 32.41 N-m และแรงบิดในขณะทำการเบรค หาได้จากสมการ (2.6)[9]

$$T_B = \frac{(2\pi / 60)\ (n_1 - n_2)\ J}{t_B} - T_L \quad \text{(N-m)} \qquad (2.6)$$

โดยที่ n_2 คือ ความเร็วหลังทำการลดความเร็ว เท่ากับ 147.3 r/min

J คือ ค่าความเฉื่อย(moment of inertia)ของระบบ มีหน่วยเป็น $kg.m^2$

T_L คือ แรงบิดในขณะมอเตอร์ขับโหลด สมมุติให้มีค่าเท่ากับ 0.75 T_M (75เปอร์เซนต์ของT_M) หรือเท่ากับ 24.3 N-m

t_B คือ เวลาที่ใช้ในการเบรค สมมุติให้เท่ากับ 1 วินาที แต่ว่าแรงบิดในการเบรค(T_B) จะต้องมีค่าไม่เกิน พิกัดแรงบิด(rated torque) ดังนั้นจึงให้ T_B เท่ากับ T_M หรือเท่ากับ 32.41 N-m จากสมการ(2.6)ค่า J สูงสุดที่มอเตอร์สามารถขับเคลื่อนได้ เขียนใหม่ได้เป็นสมการ (2.7)[9]

$$J = \frac{(T_B + T_L)\, t_B\, (60 / 2\pi)}{(n_1 - n_2)} \quad (kg.m^2) \qquad (2.7)$$

เมื่อแทนค่าในสมการ (2.7)ค่าของ J เท่ากับ 0.3 $kg.m^2$

วิธีการคำนวณหาค่าความต้านทาน(R_B) สามารถหาได้จากสมการ (2.8)[9]

$$R_B = \frac{V_{dB}^2}{(2\pi\, n_1 / 60)\, T_B} \quad \Omega \qquad (2.8)$$

V_{dB} คือ ระดับแรงดันไฟตรงที่เริ่มทำการเบรค เท่ากับ 560 V เมื่อทำการแทนค่าลงในสมการ (2.8)ได้ค่า R_B เท่ากับ 62.7 Ω ส่วนขนาดของตัวต้านทาน R_B สามารถคำนวณได้จากสมการ(2.9)[9]

$$P_L = \frac{(2\pi/60)\,(n_1 - n_2)\,(T_B - 0.1T_M)\, t_B}{2\, t_c} \quad W \qquad (2.9)$$

$$= (1.047)\,(1327.7)\,(21.87)\,(1)/\,(40) \quad W$$

$$= 760 \quad W$$

เลือกตัวต้านทาน R_s ที่มีขนาด เท่ากัน หรือมากกว่า 1237 วัตต์ ในที่นี้สามารถหาตัวต้านทานได้ 900 วัตต์ ค่า 50 โอห์ม และทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดกระแสสูงสุด เท่ากับ 25 แอมป์

5. การออกแบบขนาดทรานซิสเตอร์ในวงจรอินเวอร์เตอร์[10]

จากข้อกำหนดในตารางที่ 2.1ขนาดของอินเวอร์เตอร์ เท่ากับ 7.9 kVA มีแรงดันขาออก Vac 380 โวลต์ ที่ 50 Hz ซึ่งสามารถคำนวณกระแสสูงสุดที่ผ่านทรานซิสเตอร์จากสมการ(2.10)

$$I_{T(max)} = (\sqrt{2/3}) \text{ kVA} / V_{ac} \qquad (2.10)$$

$$= (\sqrt{2/3}) 7.9 \text{ kVA} / 380 \text{ V}$$

$$= 16.97 \text{ A}$$

ตามข้อกำหนดของผู้ผลิตทรานซิสเตอร์ [11] กำหนดให้ ขนาดกระแสสูงสุดของทรานซิสเตอร์ควรมีค่ามากกว่ากระแสสูงสุด ประมาณ 3 เท่า และแรงดันสูงสุดของทรานซิสเตอร์ควรมีค่ามากกว่าแรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์ประมาณ 2 เท่า เลือกทรานซิสเตอร์ เบอร์ QM 50 DY2H ที่มี Ic (max) เท่ากับ 50 A ต่อ 1 ตัว และ Vce(max) เท่ากับ 1000 V ต่อ 1 ตัว