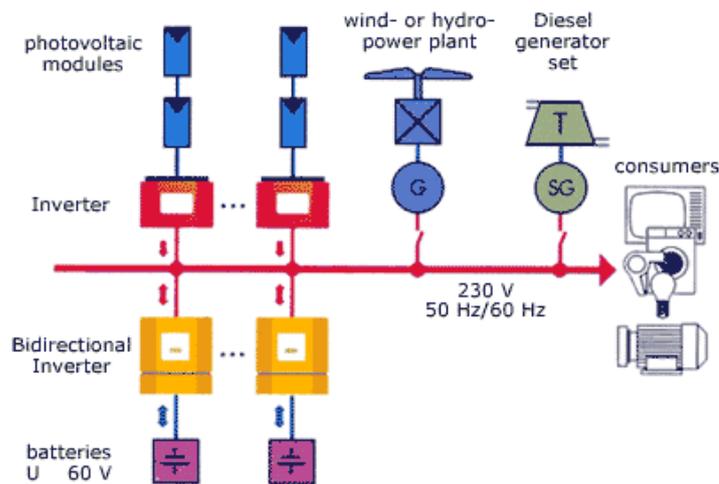




บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน คือระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) กังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Gen-set) และเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีนี้ระบบพลังงานทดแทนจะหมายถึงระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตรวมไม่เกิน 300 กิโลวัตต์ โดยมีแหล่งพลังงานหลักมาจากพลังงานหมุนเวียนอย่างน้อยหนึ่งชนิด ตัวอย่างเช่น ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวผลิตไฟฟ้า และมีแบตเตอรี่เป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้านี้มีค่าดำเนินการระบบที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซล/เบนซินต่อกับแบตเตอรี่ ระบบมีความน่าเชื่อถือและความมั่นคงของระบบสูงขึ้น จากลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 2.1 การทำงานของระบบอธิบายได้ดังนี้ ในเวลากลางวันเมื่อพลังงานจากแสงอาทิตย์หรือจากลมเพียงพอ เซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ก็จะผลิตไฟฟ้าออกมา ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดย Grid inverter และส่งเข้าสายส่งไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถส่งเข้าสายส่งได้ทันที กรณีที่หากมีไฟฟ้าเหลือใช้จากระบบ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดย Battery inverter และประจุไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้ในเวลากลางคืนหรือในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์และไม่มีลม ในเวลากลางคืนระบบไฮบริดจะจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ โดยใช้ไฟฟ้าที่ประจุอยู่ในแบตเตอรี่ และไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลม ในกรณีที่ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่าง ๆ และพลังงานในแบตเตอรี่ ไม่เพียงพอต่อความต้องการ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ดีเซลก็จะเดินเครื่องเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ การทำงานทั้งหมดที่กล่าวมานั้นถูกควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์



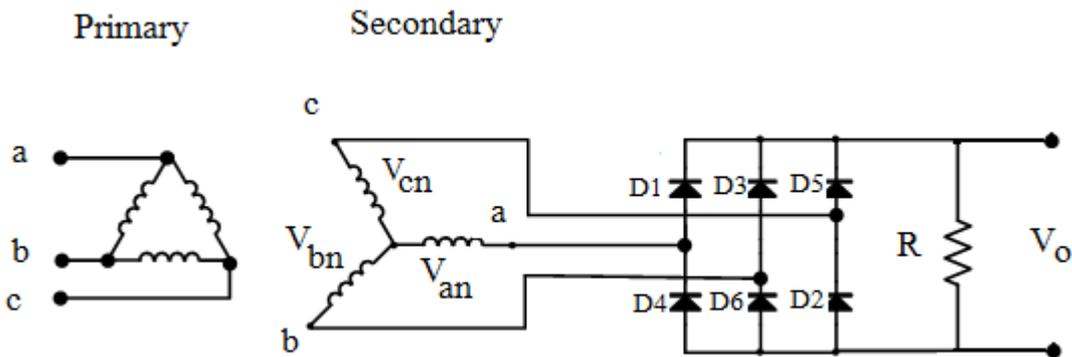
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนทั่วไป



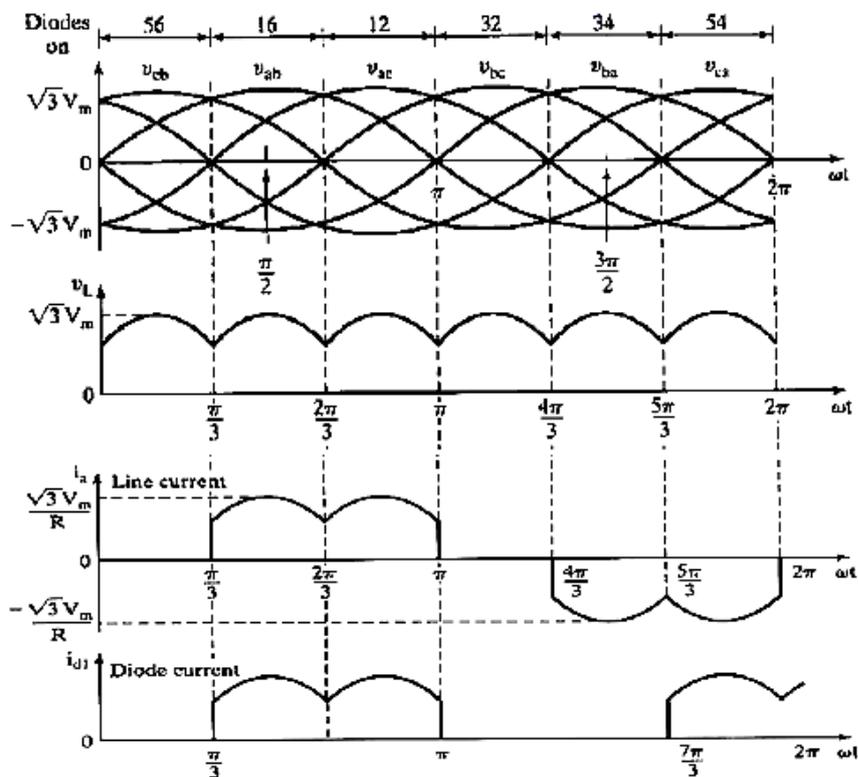
2.1 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ [6]

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์จะใช้กับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ๆ และจะให้รูปคลื่นที่เรียกว่าเป็นฟูลเวป โดยจะขอดคลื่น 6 ขอดถูกคลื่นต่อหนึ่งคาบเวลา ซึ่งจะทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีริบเบิ้ลน้อยมาก สามารถหาค่าคาปาซิเตอร์ที่มีค่าไม่สูงนักทำหน้าที่ฟิลเตอร์ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีริบเบิ้ล

$$v_{an} = V_m \sin(\omega t) \quad v_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad v_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$



รูปที่ 2.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟส





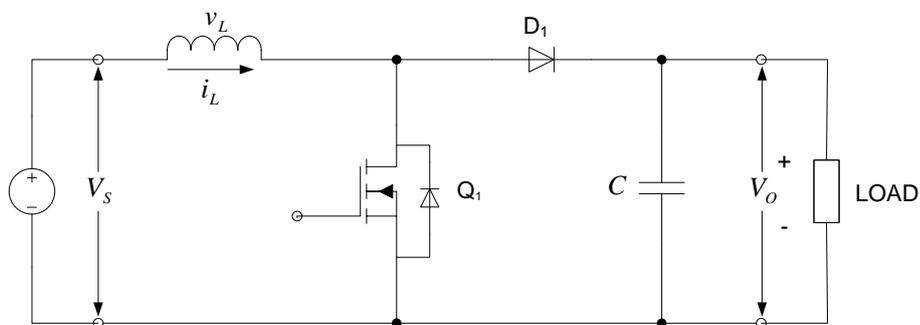
การนำกระแสของไดโอดแต่ละตัวจะมีเวลาในการนำกระแส 120° และการนำกระแสของ ไดโอดแต่ละครั้งจะนำกระแสกันเป็นคู่แต่ละคู่จะนำกระแส 60° ซึ่งหากใช้สัญญาณลูกคลื่น V_{ab} เป็น สัญญาณอ้างอิงก็จะเห็นว่า ไดโอด D1 และ D2 นำกระแสพร้อมกันที่มุม $0 - \frac{\pi}{3}$ ไดโอด D3 และ D2 นำกระแสพร้อมกันที่มุม $\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 มุมการนำกระแสของไดโอด

คู่ของไดโอดที่นำกระแส	มุมนำกระแสของไดโอด
D1 - D2	$0 - \frac{\pi}{3}$
D3 - D2	$\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$
D3 - D4	$\frac{2\pi}{3} - \pi$
D5 - D4	$\pi - \frac{4\pi}{3}$
D5 - D6	$\frac{4\pi}{3} - \frac{5\pi}{3}$
D1 - D6	$\frac{5\pi}{3} - 2\pi$

2.2 วงจรทบทระดับแรงดัน [6]

ตัวแปลงผันแบบทบทระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟตรง (DC-DC Converter) ชนิดหนึ่งที่จะทำให้แรงดัน ทางด้านเอาต์พุตมีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุตดังวงจรในรูปที่ 2.3 การทำงานจะ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบกระแสต่อเนื่องและแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัย



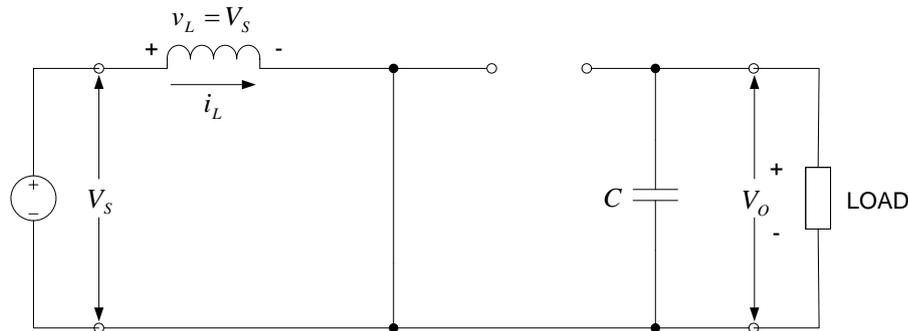
รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันแบบทบทระดับแรงดัน



หลักการการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามต้องการ จะเริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะเท่ากับศูนย์และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละโหมด ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวดังนี้

2.2.1 ขณะสวิตช์นำกระแส

จากรูป 2.3 กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดังรูป 2.4 จากกฎของเคอร์ชอฟจะได้สมการแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

$$-V_s + v_L = 0 \quad (2.1)$$

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.3)$$

เมื่อ

- V_s คือแรงดันแหล่งจ่าย
- v_L คือแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
- L คือตัวเหนี่ยวนำ
- i_L คือกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำ

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสคงที่ อาจจะได้ว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

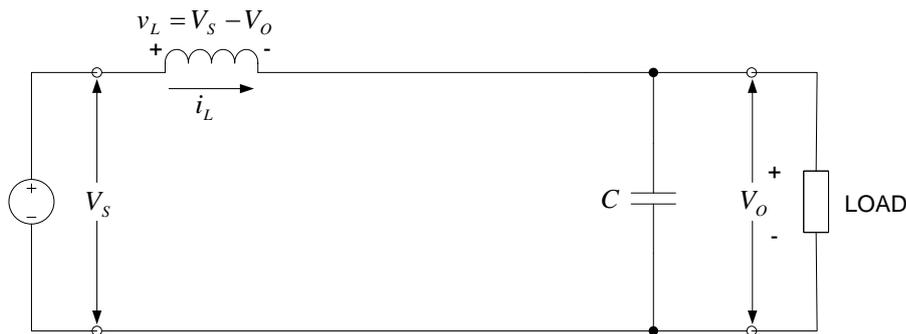


$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{Dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.4)$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.5)$$

$\Delta i_{L,on}$ หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะนำกระแส

2.2.2 ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดไม่ได้ ไดโอดจะถูกไบอัสไปหน้าให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง

สมมุติแรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกมีค่าคงที่ จากกฎของเคอร์ชอฟจะได้สมการของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$-V_s + v_L + V_o = 0 \quad (2.6)$$

$$v_L = V_s - V_o \quad (2.7)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.8)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.9)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส $dt = (1-D)T$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่และอาจจะถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.10)$$



ที่สถานะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธรมีค่าเท่ากับศูนย์
จะได้ว่า

$$\Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} = 0 \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{V_s}{L}\right)DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.12)$$

$$V_s D + (V_s - V_o)(1-D) = 0$$

$$V_s D + V_s - V_s D - V_o + V_o D = 0$$

$$V_s - V_o(1-D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.13)$$

2.2.3 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรทระดับแรงดัน

สมมติการสูญเสียภายในวงจรทระดับแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ กำลังไฟฟ้าที่ออกจากแหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้ากระแสตรงจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับโดยให้โหลดเป็นตัวต้านทานจะได้

$$P_s = P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.14)$$

$$P_s = V_s I_s = V_s I_L \quad (2.15)$$

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.16)$$

จาก $V_o = \frac{V_s}{1-D}$ และ $V_s I_L = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R}$

ดังนั้นจะได้ว่า $I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad (2.17)$



กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด หาได้จากค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส และจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุดและต่ำสุด คือ

$$I_{L,\max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$I_{L,\max} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} + \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) \quad (2.18)$$

$$I_{L,\min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) \quad (2.19)$$

สมมติให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและมีค่าเป็นบวก ดังนั้นจะหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด ที่ทำให้วงจรทบระดับแรงดันทำงานได้ในขอบเขตระหว่างโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ได้จากการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการ (2.5)

$$I_{L,\min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_s DT}{L} \right)$$

$$I_{L,\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.21)$$

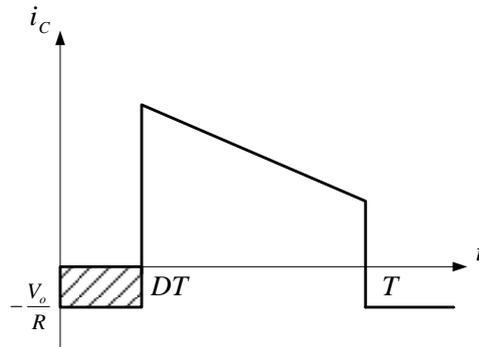
การปรับค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด จากสมการ (2.6) สามารถทำได้โดยการปรับค่า D หรือค่าความต้านทานโหลด R หรือค่าความถี่สวิตช์

2.2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้รักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเหมาะสมและค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



การคำนวณหาระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากขอดถึงขอดสามารถหาได้จากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

$$|\Delta Q| = C\Delta V_o = I_o\Delta t_{on} \quad (2.22)$$

จาก $I_o = \frac{V_o}{R}$ และ $\Delta t_{on} = DT$

ดังนั้นจะได้

$$\Delta V_o = \frac{I_o\Delta t_{on}}{C} = \frac{V_oDT}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \quad (2.23)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.24)$$

เมื่อต้องการจะลดอัตราะลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้ศูนย์ หรือการเพิ่มค่าโหลด หรือเพิ่มค่าของตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตช์ให้สูงขึ้น

2.3 วงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ [7],[8]

วงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะคล้ายกับกรณิวงจรฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ที่ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กจะไม่ใช้ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะกำหนดให้เป็นแบบอุดมคติเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ สวิตช์ S_{w1} จะนำกระแสในขณะที่ S_{w2} จะไม่นำกระแส



2.3.1 กรณีสวิตช์ S_{w1} นำกระแสและสวิตช์ S_{w2} ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ S_{w1} นำกระแสจะเป็นผลทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) เท่ากับ

$$V_{p1} = V_s \quad (2.25)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ (P_1) จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ชุด ที่เหลือ ดังนี้

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.26)$$

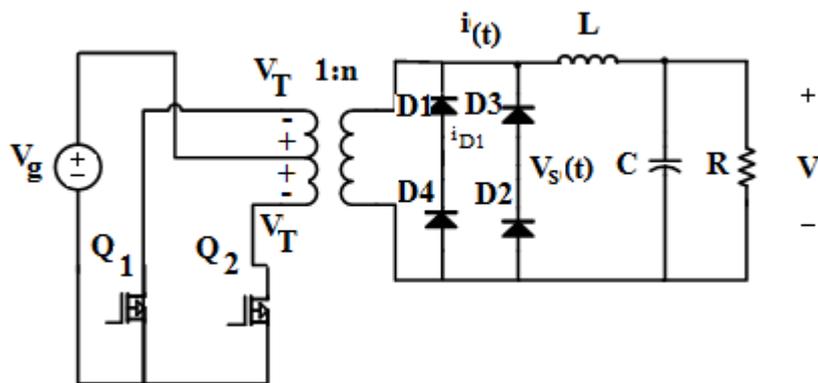
$$V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.27)$$

$$V_{sw2} = 2V_s \quad (2.28)$$

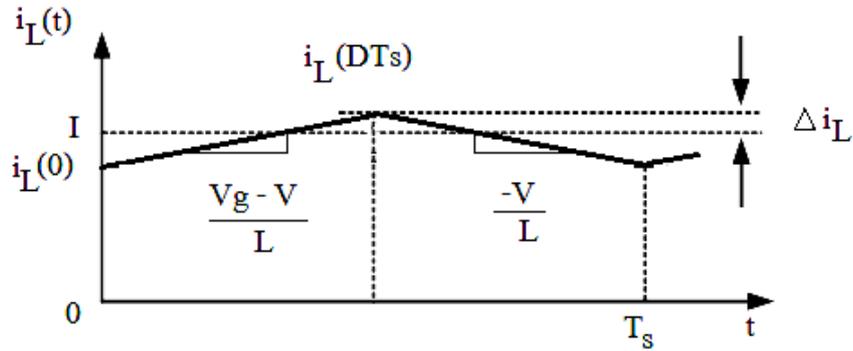
ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสตรงขณะที่ไดโอด D_2 ได้รับไบอัสกลับ

$$V_x = V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.29)$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0 \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.7 วงจรพูช-พูลคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.8 กระแสไหลผ่าน

ถ้าสมมติให้แรงดันไฟฟ้าค่านอก V_0 และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าคงที่ ช่วงเวลาที่ สวิตช์นำกระแสจะเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x มีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x ในช่วงเวลาที่สวิตช์ S_{w1} นำกระแสจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{L_x}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_x}}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0}{L_x} \quad (2.31)$$

$$\left(\Delta i_{L_x} \right)_{closed} = DT \left[\frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0}{L_x} \right] \quad (2.32)$$

2.3.2 กรณีสวิตช์ S_{w1} ไม่นำกระแสและสวิตช์ S_{w2} นำกระแส

จะเป็นผลทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ V_{p2} เท่ากับ

$$V_{p2} = -V_s \quad (2.33)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิ จะถ่ายเทไปยังขดลวดอีก 3 ชุดที่เหลือ ดังนี้

$$V_{p1} = -V_s \quad (2.34)$$



$$V_{s1} = -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.35)$$

$$V_{s2} = -V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.36)$$

$$V_{sw1} = 2V_s \quad (2.37)$$

เมื่อไดโอด D_2 ได้รับไบอัสไปหน้าขณะที่ไดโอด D_1 ได้รับไบอัสกลับ

$$V_x = -V_{s2} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (2.38)$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_0 \quad (2.39)$$

โดยที่แรงดันไฟฟ้า V_{Lx} จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าเป็นบวก โดยค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อสวิตช์ S_{w2} นำกระแส และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x สามารถหาได้โดยให้สมการที่ (2.39)

2.3.3 กรณีสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส

ในกรณีที่ทั้งสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดปฐมภูมิ P_1 และ P_2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะยังคงไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 ยังคงได้รับไบอัสตรง แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดทุติยภูมิแต่ละขดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าเท่ากับ

$$V_x = 0 \quad (2.40)$$

$$V_{Lx} = V_x - V_0 = -V_0 \quad (2.41)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L_x มีค่าเท่ากับ $-V_0$ เป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน L_x จะมีค่าลดลงด้วยการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ

$$\frac{\Delta i_{Lx}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lx}}{\left(\frac{T}{2} - DT \right)} = -\frac{V_0}{L_x} \quad (2.42)$$



แก้สมการหาค่า Δi_{LX} จะได้

$$\left(\Delta i_{LX}\right)_{open} = -\left(\frac{V_0}{L_X}\right)\left(\frac{1}{2}-D\right)T \quad (2.43)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะของกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่สภาวะอยู่ตัวในหนึ่งคาบเวลาจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\left(\Delta i_{LX}\right)_{closed} + \left(\Delta i_{LX}\right)_{open} = 0 \quad (2.44)$$

$$\left(\frac{V_S(N_S/N_P)-V_0}{L_X}\right)(DT) + \left(\frac{V_0}{L_X}\right)\left(\frac{1}{2}-D\right)T = 0$$

แก้สมการหาค่า V_0 จะได้

$$V_0 = 2V_S\left(\frac{N_S}{N_P}\right)D \quad (2.45)$$

โดยที่ D ในที่นี้จะหมายถึง ดิวตี้ไซเคิลของสวิตช์แต่ละตัว

ถ้าระลอกคลื่นของแรงดันก็จะสามารถหาได้คล้ายกับกรณีวงจรบัก ก็ได้

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-2D}{32L_X C f^2} \quad (2.46)$$

การวิเคราะห์ที่ได้กระทำมาก่อนหน้านี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของตัวเหนี่ยวนำ L_m ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยถ้าทำการเพิ่มผลของตัวเหนี่ยวนำ L_m ในวงจรสมมูล จะได้ว่า ค่ากระแส i_{Lm} จะเพิ่มขึ้นเมื่อสวิตช์ S_{w1} นำกระแส จากนั้นจะไหลวนอยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} ไม่นำกระแส และกระแสไฟฟ้า i_{Lm} จะมีค่าลดลงเมื่อสวิตช์ S_{w2} นำกระแส เนื่องจากช่วงเวลาในการนำกระแสของทั้งสวิตช์ S_{w1} และ S_{w2} จะเท่ากัน เป็นผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสภาวะของกระแส i_{Lm} มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือในทางอุดมคติ แกนแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกริเซ็ทภายในแต่ละคาบเวลาของการสวิตช์



2.4 ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม [9]

ตัวควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณทางออก (Output) ของระบบกับสัญญาณทางเข้า (Input) หรือค่าที่ต้องการควบคุมหรือค่าอ้างอิง (Reference) ที่มีค่าคงที่ของระบบ ผลของการเปรียบเทียบที่ได้คือค่าเบี่ยงเบนหรือค่าผิดพลาด (Error) หลังจากนั้นตัวควบคุมอัตโนมัติจะนำค่าเบี่ยงเบนไปสร้างเป็นสัญญาณขึ้นมาใหม่เพื่อควบคุมให้ระบบลดการเบี่ยงเบนหรือ ลดค่าผิดพลาดลงให้เป็นศูนย์หรือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ลักษณะการทำงานของตัวควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณขึ้นมาควบคุมระบบดังกล่าวนี้ เรียกว่า “การทำงานควบคุม” ซึ่งสามารถแบ่งตัวควบคุมอัตโนมัติออกเป็นแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) ตัวควบคุมแบบ ปิด-เปิด หรือ แบบสองตำแหน่ง
- 2) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller หรือ P Controller)
- 3) ตัวควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย (Integral Controller หรือ I Controller)
- 4) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller)
- 5) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบอนุพันธ์ (PD Controller)
- 6) ตัวควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย ร่วมกับแบบอนุพันธ์ (Proportional plus Integral plus Derivative Controller หรือ PID Controller)

ตัวควบคุมอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะใช้ในระบบควบคุมความดันของของไหล เช่น น้ำมัน หรือ อากาศ การเลือกใช้ตัวควบคุมอัตโนมัติต้องดูความเหมาะสมของโรงงานและสภาวะการทำงาน อาจรวมไปถึงความปลอดภัย ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ขนาดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ขอกกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Controller) เพียงอย่างเดียว

2.4.1 การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

การกระทำการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วยหรือการควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) นี้ค่าของสัญญาณทางออกของตัวควบคุมกำหนดได้ดังสมการที่ (2.47)

$$M(t) = K_p E(t) + \left(\frac{K_p}{T_i} \right) \int_0^t E(t) dt \quad (2.47)$$

เมื่อ $M(t)$ คือ สัญญาณทางออกของตัวควบคุม
 $E(t)$ คือ สัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้น



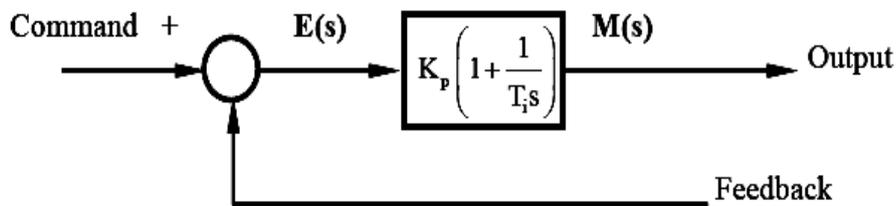
หรือเขียนในรูปของฟังก์ชัน โอนย้าย (Transfer Function) ได้คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อ K_p คือ ความไวของสัดส่วนหรืออัตราขยาย

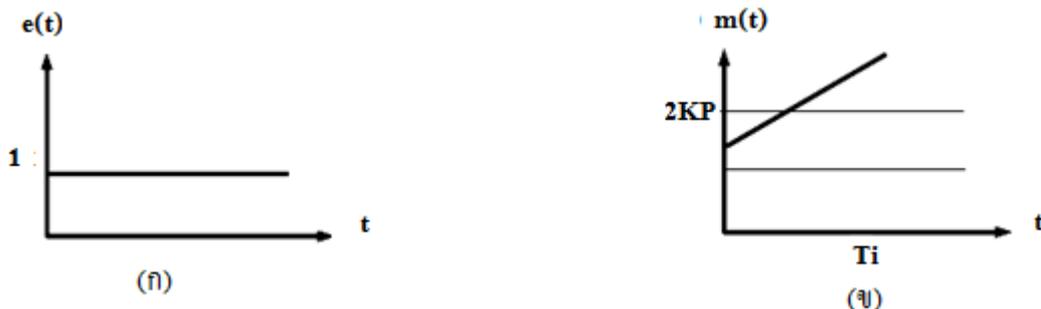
T_i คือ เวลาบูรณาการรวมหน่วย

ค่าของ K_p และ T_i สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งการปรับค่าจะมีผลต่อการกระทำ การควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย แต่ถ้าปรับค่าความไวของสัดส่วน K_p จะส่งผลให้ทั้งการกระทำ การควบคุมแบบสัดส่วนและการกระทำแบบบูรณาการรวมหน่วย ส่วนกลับของ T_i เรียกว่า“อัตราส่วนจัดใหม่” เป็นจำนวนครั้งต่อวินาที การควบคุมแบบสัดส่วนเริ่มต้นใหม่ จากสมการที่ (2.28) เขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย [13]

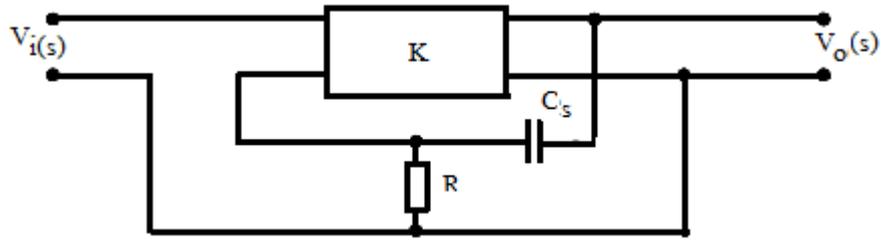
สมมติให้สัญญาณผิดพลาด $E(t)$ เป็นฟังก์ชันยูนิตสเต็ป (unit step) ดังรูปที่ 2.10 (ก) สัญญาณทางขาออกของตัวควบคุม $M(s)$ จะได้อ้างรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 สัญญาณผิดพลาดเป็นยูนิตสเต็ปกับสัญญาณทางออกของตัวควบคุมพีไอ



วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย

จากรูปที่ 2.11 เขียนฟังก์ชันโอนย้าย (Transfer Function) ได้ดังสมการ (2.49)

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{1 + K \left(\frac{R}{R + \left(1 + \frac{1}{sC_s} \right)} \right)} \quad (2.49)$$

กำหนดให้

$$K \left(\frac{R}{R + \left(1 + \frac{1}{sC_s} \right)} \right) \geq 1 \quad (2.50)$$

ดังนั้น

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{\frac{KR}{R + \frac{1}{sC_s}}} = \frac{K \left(R + \frac{1}{sC_s} \right)}{KR} \quad (2.51)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R + \frac{1}{sC_s}}{R} \quad (2.52)$$

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = 1 + \frac{1}{RC_s s} \quad (2.53)$$



กำหนดให้ $\tau = RC_s$ โดย τ คือ ค่าเวลาคงตัวของกระบวนการรวมหน่วย

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = 1 + \frac{1}{s\tau} \quad (2.54)$$

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย (PI Control) มีผลต่อระบบคือ

- 1) ทำให้ระบบมีการตอบสนองเร็วเหมือนการควบคุมแบบสัดส่วน
- 2) ทำให้ระบบมีความแม่นยำเหมือนการควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย

ดังนั้นการควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบบูรณาการรวมหน่วย จะมีผลทำให้ระบบมีความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด ที่สภาวะคงตัว (Steady State) และมีผลต่อการตอบสนองที่รวดเร็ว

2.5 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล [10]

การพัฒนาด้านการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่มีความเร็วสูง ทำให้มีการคิดค้นประดิษฐ์ตัวประมวลผลที่ใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกว่า ดีเอสพี (DSP) โดยตัวประมวลผลดังกล่าวจะเน้นที่ความเร็วของคำสั่งทางคณิตศาสตร์ ในปัจจุบันที่บริษัทผู้ผลิตชิปดีเอสพีอยู่หลายบริษัทและชิปของแต่ละบริษัทยังแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างการไป ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ชิปของบริษัท Analog Device เบอร์ ADMCF326 โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังที่จะกล่าวต่อไป

2.5.1 คุณสมบัติของ ADMCF326BST

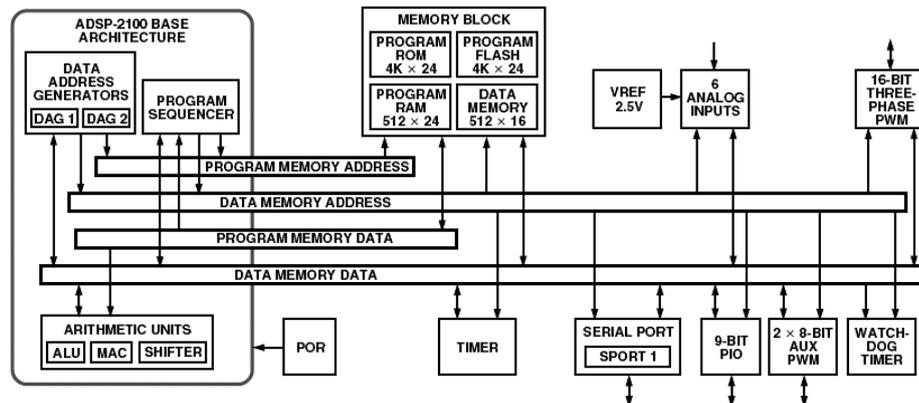
ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST ของบริษัท Analog Device มีโครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบจุดทศนิยมคงที่ขนาด 16 บิต (16 bit fixed-point digital signal processing) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์
- ความเร็วในการประมวลผล 20 MIPS (ล้านคำสั่งในหนึ่งวินาที) ต่อ 1 เมกเฮิรตซ์ไซเคิล
- ฮาร์ดแวร์การคูณแบบขนานขนาด 16 บิต มีผลลัพธ์เป็น 32 บิต
- มี Accumulator ขนาด 32 บิต และ Arithmetic logic unit ขนาด 32 บิต
- มีพอร์ตอินพุท/เอาต์พุตขนาด 24 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแรม ขนาด 512 x 24 บิต แบบบรอม ขนาด 4k x 24 บิต
- หน่วยความจำข้อมูลแบบแรม ขนาด 512 x 16 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 4k x 24 บิต
- ตัวสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม (Pulse width modulation, PWM) ขนาด 16 บิต
- ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง รับค่าอนาล็อกได้ 4 ช่องในเวลาเดียวกัน

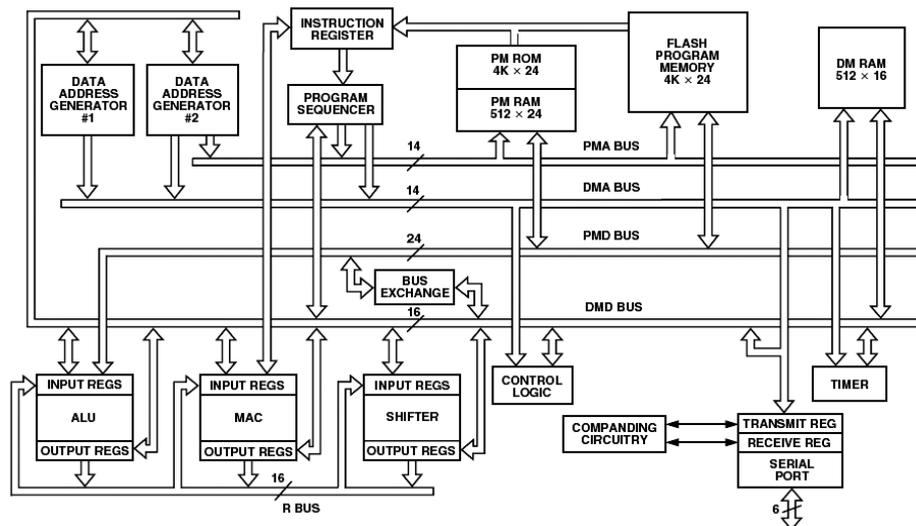


- มีตัวโปรแกรมการประวิงเวลา (Dead time) และตัวยกเลิกพัลส์ที่แคบ (Narrow Pulse Deletion)
- มีขาทรี่ปของพีดับบลิวเอ็มจากภายนอก (External PWM Trip)
- มีย่านอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
- มีปริโปรแกรมฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์
- ติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านทางพอร์ตอนุกรมด้วยบอด (Baud) แบบอัตโนมัติ

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST จะประกอบไปด้วยระบบประมวลผลอิสระ 3 ชุดคือ ส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic and Logic Unit : ALU) ฮาร์ดแวร์การคูณ และฮาร์ดแวร์การบวก (Multiplier/Accumulator : MAC) และฮาร์ดแวร์การชิฟท์ (Shift) โดยกระบวนการประมวลผลจะเป็นแบบ 16 บิต โดยมีหน่วยความจำทั้งแบบรอม แบบแรมและแบบแฟลคติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านพอร์ตอนุกรม



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST



รูปที่ 2.13 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST