

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

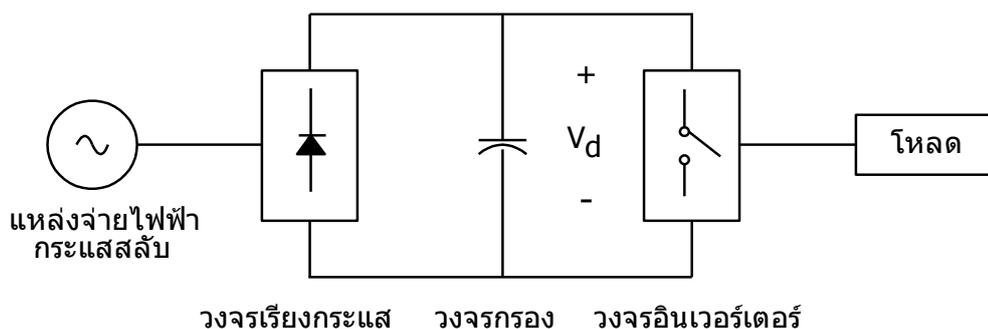
อินเวอร์เตอร์ คือ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Converter) [1] ทำงานโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ตามขนาดและความถี่ที่ต้องการ แรงดันเอาต์พุตสามารถตั้งค่าให้คงที่หรือปรับค่าได้ตามต้องการที่ความถี่ใด ความถี่หนึ่ง หรือเปลี่ยนความถี่ไปก็ได้ หากต้องการเปลี่ยนแรงดัน เอาต์พุต ของอินเวอร์เตอร์ สามารถทำได้โดยการรักษาระดับอัตราขยายของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ด้วยการคงค่าความถี่ แล้วปรับแรงดัน อินพุต ในทางตรงกันข้าม หากคงค่าแรงดัน อินพุต แล้วเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของอินเวอร์เตอร์โดยการปรับค่าความถี่ ก็สามารถปรับเปลี่ยนค่าแรงดัน เอาต์พุต ได้เช่นกัน อัตราการขยายของอินเวอร์เตอร์สามารถหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่า ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เอาต์พุตต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุต

2.2.1 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส , [4]

วงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถแบ่งเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter) และ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter) แต่แบบแหล่งจ่ายกระแสจะถูกจำกัดให้ใช้ควบคุมเฉพาะ ในงานที่มีกำลังสูง ๆ เท่านั้น เช่น ขับมอเตอร์เอชอี ดังนั้นจึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ ส่วนแบบแหล่งจ่ายแรงดันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้คือ [5]

2.2.1.1 อินเวอร์เตอร์มอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) หรือแบบ PWM แรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์รูปแบบนี้ต้องมีค่าคงที่ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งไดโอดจะเรียงกระแสจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่อินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้น PWM จะสร้างสัญญาณที่มีความถี่เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ และขนาดแรงดันเอาต์พุต

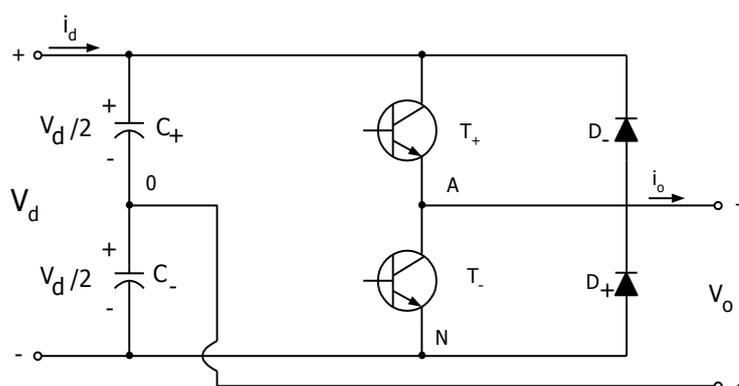
2.2.1.2 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นจตุรัส (Square Wave Inverter) วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ อินพุตได้ถูกควบคุมให้ ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ เอาต์พุต เป็นรูปคลื่นจตุรัสด้วยความถี่ค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 2.1 ไลอะแกรมวงจรอินเวอร์เตอร์แบบทั่วไป

2.2.1.3 อินเวอร์เตอร์แบบยกเลิกแรงดัน (Voltage Cancellation Inverters) เป็น อินเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ แม้ว่าแรงดันอินพุตที่ป้อนจะคงที่ก็ตาม และการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ไม่ได้ใช้แบบ PWM ด้วยเหตุนี้แรงดันเอาต์พุตจึงได้เหมือน แบบรูปคลื่นจตุรัส ดังนั้นวงจรนี้จึงให้คุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบข้างต้นเข้าด้วยกัน

2.2. อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น (Half Bridge Inverter) แสดงโครงสร้างดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น

จากภาพที่ 2.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น โดยมีตัวเก็บประจุ (C) ที่มีค่าเท่ากัน 2 ตัว ต่ออนุกรมกันแล้วคร่อม อยู่กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อินพุต (V_d) ดังนั้นแรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวเท่ากับ $V_d/2$ และจุดที่ตัวเก็บประจุทั้งสองตัวต่อกัน มีชื่อเรียกว่า ความต่างศักย์กลาง (Mid Potential) สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของวงจรนี้ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้แรงดันที่จุด 0 เมื่อเทียบกับจุด N ได้ค่าคงที่

ถ้าไม่คำนึงถึงสถานะสวิตช์ จะเห็นว่า กระแสระหว่างตัวเก็บประจุ 2 ตัว คือ C_+ และ C_- (ซึ่งมีค่ามาก ๆ) จะแบ่งกันอย่างเท่า ๆ กัน โดยพิจารณาดังนี้ คือ เมื่อต้องการให้ T_+ อยู่ในสถานะ

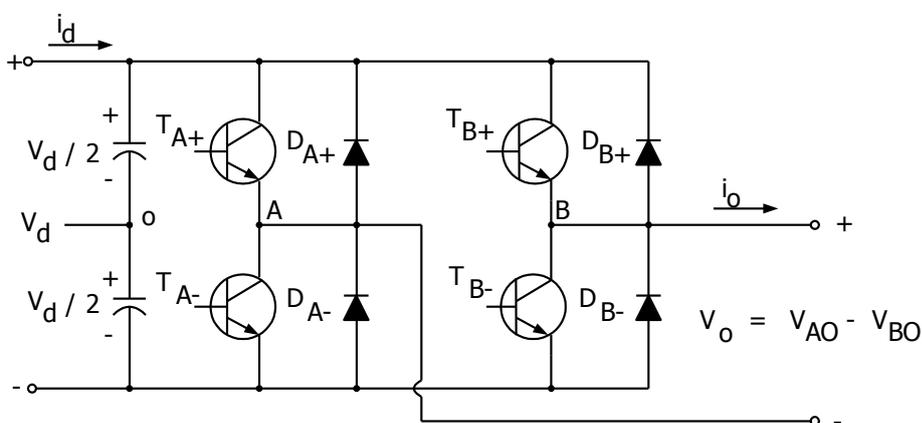
นำกระแส โดย T_+ หรือ D_+ จะนำกระแสได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น และการนำนั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสขาออก i_o และได้กระแส i_o แยกไหลระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองด้วยค่าเท่า ๆ กัน ในทำนองเดียวกัน เมื่อต้องการให้ T_- นำกระแสบ้าง T_- หรือ D_- จะนำกระแสได้เพียงตัวเดียวเช่นกัน และการนำขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแส i_o และ i_o แยกไหลระหว่างตัวเก็บประจุทั้งสองอย่างเท่า ๆ กัน เพราะฉะนั้น ในส่วนการไหลของกระแส i_o ตัวเก็บประจุ C_+ และ C_- ได้ถูกต่อกันอย่างขนาน โดยมีจุด o เป็นจุดร่วมที่ถาวร และทั้งหมดนี้คือเหตุผลที่ว่าทำไมจึงเรียกจุด o ดังภาพที่ 2.2 ว่าเป็นสั๊ก์กลาง

แรงดันและกระแสคายออกของอุปกรณ์ที่ใช้สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่นจะเท่ากับ

$$V_T = V_d \quad (2.1)$$

$$i_T = i_{o,peak} \quad (2.2)$$

2.3 อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น (Full Bridge Inverter)



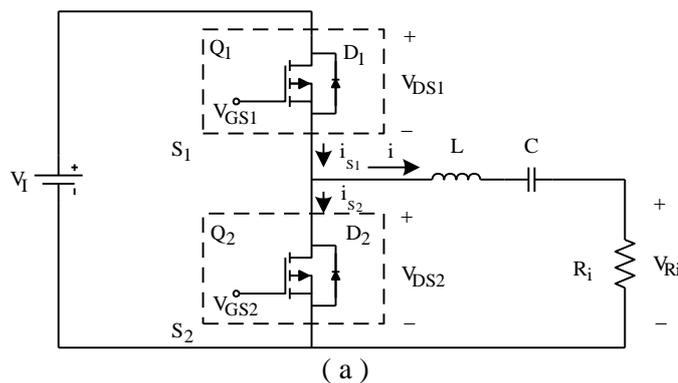
ภาพที่ 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น

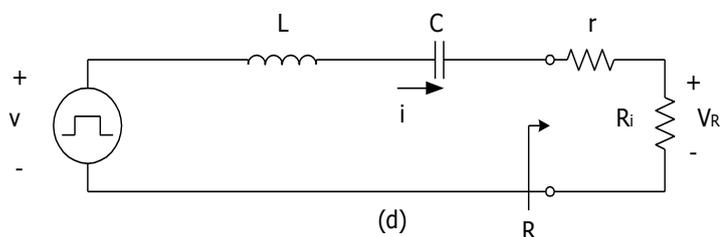
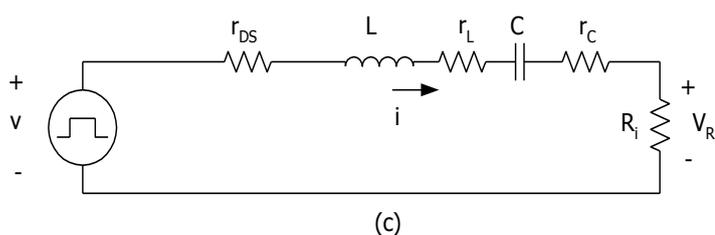
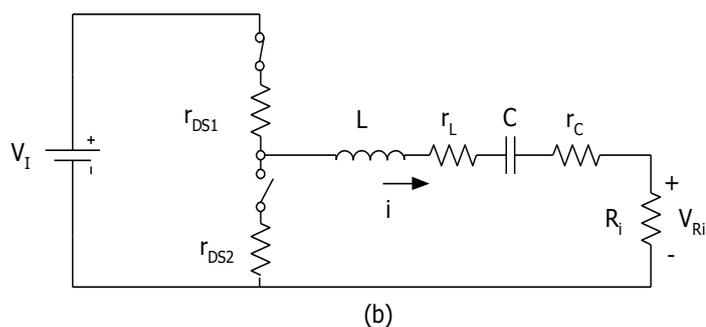
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มตามภาพที่ 2.3 ประกอบด้วยวงจรแบบบริดจ์ครึ่งคลื่นจำนวน 2 ชุดวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถใช้งานกับพิกัดสูง ๆ ได้ดี และด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตค่าเดียวกันจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของวงจรบริดจ์เต็มจะได้ค่าเป็นสองเท่าของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น ดังนั้น ขณะใด ใช้งานด้วยกำลังเท่ากัน กระแส เอาต์พุตซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับกระแสการสวิตช์ จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็มคลื่น

2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์คลาส ดี (Class-D Inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คลาสดีแรงดันสวิทช์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น แสดงไว้ใน ภาพที่ 2.4 (a) ซึ่งประกอบไปด้วยสวิทช์สองทิศทาง คือ S_1 และ S_2 และต่ออนุกรมเข้ากับวงจรเรโซแนนท์ L-C- R_i โดยที่สวิทช์แต่ละตัวประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ และ ไดโอด โดยต่อแบบขนานกลับทิศทางกับ ทรานซิสเตอร์

ในกรณีของอินดักทีฟโหลด สวิทช์สามารถนำกระแสบวกหรือกระแสลบได้อย่างใดอย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตาม สวิทช์สามารถใช้ได้เฉพาะแรงดันที่สูงกว่า -1 โวลต์ เท่านั้น กระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ที่เป็นกระแสบวกหรือลบสามารถไหลผ่านทรานซิสเตอร์ได้ ถ้าทรานซิสเตอร์ตัวนั้น Turn - On อยู่ แต่ถ้าทรานซิสเตอร์ตัวนั้น Turn-Off สวิทช์จะนำได้เฉพาะกระแสลบ โดยที่กระแสจะไหลผ่านไดโอด ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ ที่ถูกขับโดยแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (V_{GS1} และ V_{GS2}) จะทำงานไม่ตรงกันด้วย Dead Time ที่สร้างขึ้น โดยที่ความถี่การทำงาน $f = 1/T$ ซึ่งจะทำให้สวิทช์ S_1 และ S_2 สลับกัน Turn-On และ Turn-Off โดยที่ค่า Duty Ratio เท่ากับ 50 % หรือแทบจะไม่ต่างกันเลย ซึ่งค่า Dead Time เป็นเวลาที่สวิทช์ ทั้งคู่ Turn-Off โดยที่ความต้านทานอินพุต R_i เป็นเอซีโหลด ซึ่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกส่งผ่านไป ที่ความต้านทานทางด้าน อินพุต ถ้าอินเวอร์เตอร์เป็นส่วนหนึ่งของ DC-DC เรโซแนนท์ คอนเวอร์เตอร์ โดยที่ R_i คือ ความต้านทานอินพุตของวงจรเรกติไฟร์



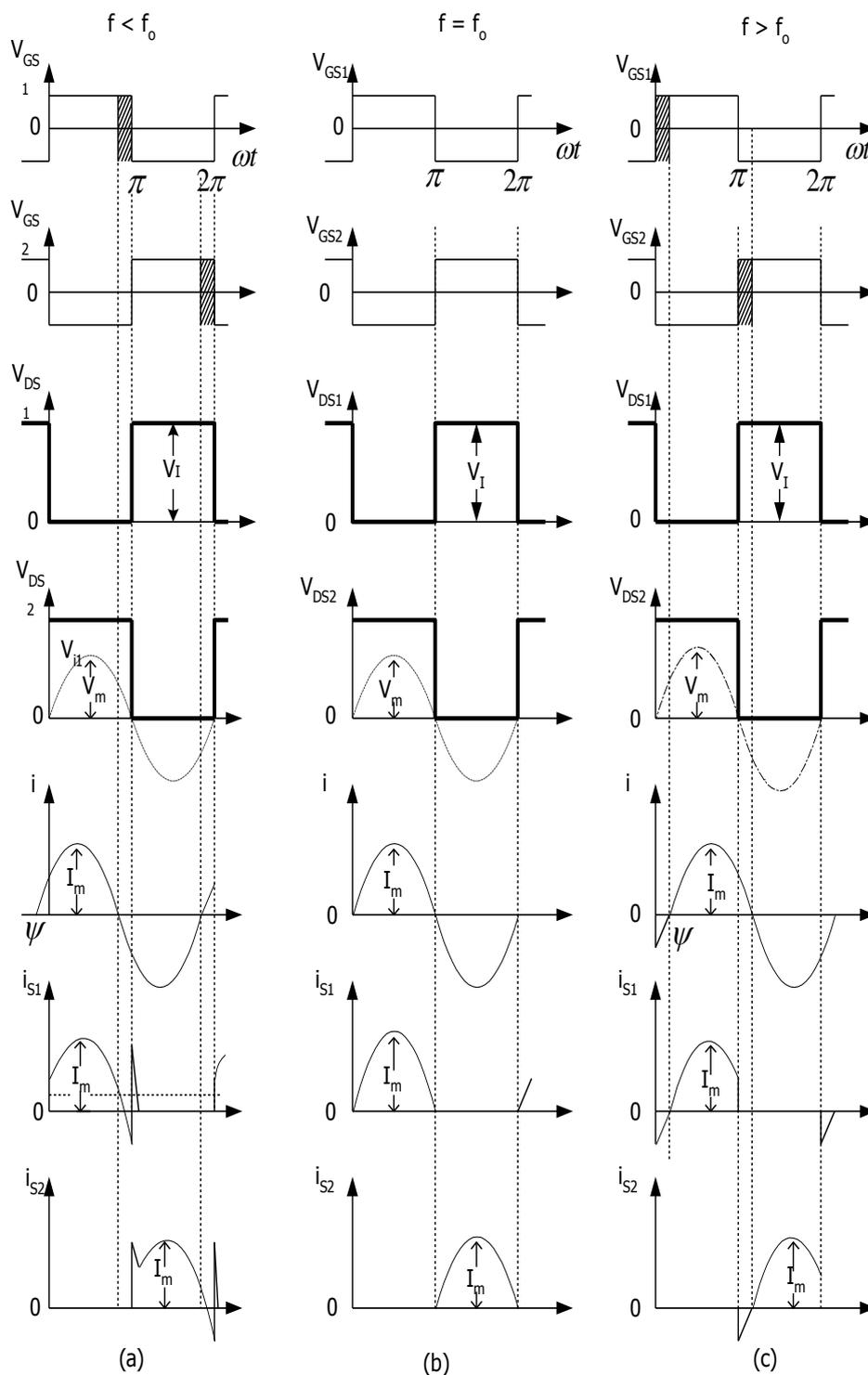


ภาพที่ 2.4 แสดง เรโซแนนท์อนุกรมอินเวอร์เตอร์ คลาส ดี แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น วงจร (a)

(b) - (d) แสดงวงจรสมมูล

วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์คลาส ดี แสดงไว้ใน ภาพที่ 2.4 (b) – (d) ซึ่งภาพที่ 2.4 (b) มอสเฟต จะถูกจำลองเป็นสวิตช์ โดยที่ Turn - On Resistance มีค่าเป็น r_{DS1} และ r_{DS2} ตามลำดับ ความต้านทาน r_L เป็น ความต้านทานอนุกรมสมมูล (Equivalent Series Resistance) ของตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทาน r_C เป็นความต้านทานอนุกรมสมมูล ของตัวเก็บประจุ ในภาพที่ 2.4 (c) $r_{DS} \approx (r_{DS1} + r_{DS2})$ แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยของ Turn-On Resistance ของมอสเฟต ในภาพที่ 2.4 (d) ผลรวมของความต้านทานแฝง แสดงโดย $r \approx r_{DS} + r_L + r_C$ ซึ่งผลของความต้านทานโดยรวมจะมีค่าเท่ากับ $R = R_i + r \approx R_i + r_{DS} + r_L + r_C$

2.5 หลักการพื้นฐานของการทำงานของอินเวอร์เตอร์คลาส ดี , [7]



ภาพที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นในวงจรคลาสดี อินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่น

(a) เมื่อ $f < f_0$, (b) เมื่อ $f = f_0$, (c) เมื่อ $f > f_0$

หลักการการทำงานของ อินเวอร์เตอร์ คลาสดี อธิบายได้โดยรูปคลื่นใน ภาพที่ 2.5 แรงดันทางด้านขาเข้าของวงจรถอนุกรมเรโซแนนท์ เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่มีขนาดเท่ากับ V_I โหลด Quality Factor, $Q_L = \sqrt{LR/C}$ ของวงจรถอนุกรมเรโซแนนท์ มีค่าสูงเพียงพอ ($Q_L \geq 2.5$) กระแสที่ไหลผ่านวงจรถอนุกรมเรโซแนนท์ จะเป็นรูปคลื่นไซน์ เฉพาะที่ $f = f_o$ มอสเฟต Turn-On และ Turn-Off ที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ ผลก็คือการสูญเสียในสวิตช์เป็นศูนย์หรือมีประสิทธิภาพสูง ในกรณีที่ไดโอดต่อขนานกลับทิศทางจะไม่มีกรนำกระแส ในการใช้งานส่วนมากความถี่ทำงาน (f) จะไม่เท่ากับความถี่เรโซแนนท์ (f_o) เพราะที่กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตหรือแรงดันเอาต์พุตส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยการปรับความถี่ที่ใช้งาน (FM Control) ในภาพที่ 2.5 (a), (b) และ (c) แสดงรูปคลื่นของ $f < f_o$, $f = f_o$ และ $f > f_o$ ตามลำดับ ความกว้างของแรงดันขั้วเกต แสดงคั้งพื้นที่แรงงาในรูป 2.5 ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะ Turn-Off ที่ $f < f_o$ หรือ ทรานซิสเตอร์จะ Turn-On ที่ $f > f_o$ ในช่วงที่กระแสสวิตช์เป็นลบ กระแสสวิตช์จะสามารถไหลผ่านไดโอดที่ต่อแบบขนานกับทิศทางได้ วิธีป้องกันการนำกระแสตรงข้ามซึ่งเรียกว่า Shoot-Through Current รูปคลื่นของแรงดันที่ขั้วเกต (V_{GS1} และ V_{GS2}) จะไม่ทับกัน และมีค่า Dead Time เพียงพอ เมื่อทรานซิสเตอร์ Off มอสเฟตมีการหน่วงเวลาและ BJT มีการรักษาวเวลาถ้า Dead Time มีค่าน้อยเกินไป ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง Turn-On ขณะที่ทรานซิสเตอร์ที่อยู่ตรงข้ามก็ Turn-On ที่เวลาเดียวกัน แหล่งจ่ายไฟ (V_I) จะเกิดการลัดวงจร ความต้านทานค่าน้อยๆ ของทรานซิสเตอร์ขณะ Turn-On (r_{DS1} และ r_{DS2}) ในกรณีนี้กระแส Cross-Conduction Pulses [$I_{PK} = V_I / (r_{DS1} + r_{DS2})$] จะไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างเช่น ถ้า $V_I = 200$ โวลต์ และ $r_{DS1} = r_{DS2} = 0.5$ โอห์ม จะได้ $I_{PK} = 200$ A พบว่ากระแสที่มากเกินไปอาจจะทำให้อุปกรณ์เสียหายในทันที นอกจากนั้นค่า Dead Time จะต้องไม่มากเกินไป ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายไว้ใน หัวข้อ 2.5.1 และ 2.5.2 ค่า Dead time สูงสุด เท่ากับ f / f_o และจะเพิ่มขึ้น ถ้า $f > f_o$ หรือ ลดลง ถ้า $f < f_o$ เนื่องจากเวลาระหว่างการสวิตช์มีช่วงของกระแสที่เป็นลบยาวกว่า Dead Time ที่น้อยที่สุด จำเป็นต้องมีค่า $f = f_o$

2.5.1 การควบคุมความถี่ที่ต่ำกว่าเรโซแนนท์

ในกรณี $f < f_o$ วงจรถอนุกรมเรโซแนนท์ซึ่งก็คือ คาปาซิทีฟโหลด หมายถึง กระแสที่ไหลผ่านวงจรถอนุกรมเรโซแนนท์จะนำหน้าแรงดัน V_{IH} ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของ V_{DS2} จะมีมุมเฟส $|\psi|$, ซึ่ง $\psi < 0$ ดังนั้น กระแสสวิตช์จะเป็นบวกหลังจากสวิตช์ Turn-On และจะเป็นลบก่อนสวิตช์ Turn-Off ดังนั้นลำดับการนำของอุปกรณ์กึ่งตัวนำ คือ $Q_1 - D_1 - Q_2 - D_2$ พิจารณาในช่วงที่สวิตช์ $S_2 - On$ โดยก่อนหน้านี้อาจมีกระแส i ไหลผ่านไดโอด D_1 ของสวิตช์ S_1 เมื่อ Q_2 Turn-On เพื่อทำการขับแรงดัน V_{GS2} และ V_{DS2} จะลดลง ทำให้ V_{DS1} เพิ่มขึ้น ดังนั้น ไดโอด D_1 จะ Turn-On

และกระแส i จะแปรผันจาก D_1 ไปยัง Q_2 ซึ่งมีอยู่ 3 สาเหตุที่ทำให้มอสเฟตเป็นอันตรายขณะ Turn-On

- 1) การกลับคืนสู่สภาพของไดโอดที่ต่อตรงข้ามกับสวิตช์
- 2) การคายประจุของตัวเก็บประจุในทรานซิสเตอร์
- 3) Miller ' s Effect (ผลจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงในทรานซิสเตอร์มอสเฟต)

ข้อควรระวังในการใช้งานขณะต่ำกว่าเรโซแนนท์ คือ ถ้าไดโอดถูกต้านทานไม่ให้คืนสู่สภาพในช่วง Turn-Off โดยทั่วไปแล้วภายในมอสเฟตจะมีไดโอดเป็นตัวส่งพลังงานส่วนน้อยโดยไดโอดแต่ละตัวจะ Turn-Off ที่ช่วง dv/dt และ di/dt สูงมาก ซึ่งก็คือ กระแสสไปค์นั่นเอง ซึ่งกระแสสไปค์นี้จะไหลสู่ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง เนื่องจากมันไม่สามารถไหลผ่านวงจรรีโซแนนท์ได้ เพราะกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรรีโซแนนท์ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้ ดังนั้นกระแสสไปค์นี้จะเกิดเป็นรูปคลื่นของกระแสสวิตช์ทั้งช่วง Turn - On และ Turn - Off เท่านั้น และกระแสสไปค์นี้มีค่าสูงกว่ากระแสในขณะสภาวะคงตัวของกระแสสวิตช์ ซึ่งกระแสที่สูงมากอาจไปทำลายทรานซิสเตอร์และจะเป็นผลให้เกิดความ สูญเสียและสัญญาณรบกวน ในช่วงขณะคืนตัวนั้น แรงดันของไดโอดจะเพิ่มจาก -1 โวลต์ ถึง V_f และทั้งแรงดันและกระแสจะมีค่าสูง ณ เวลาเดียวกัน เนื่องจาก กำลังสูญเสียของการคืนตัว ความผิดพลาดของมอสเฟตกำลัง อาจมีผลมาจาก Secondary-Breakdown ของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แฝง (BJT) ซึ่งเกิดขึ้นในโครงสร้างของมอสเฟตกำลัง โดยที่ขาเกต แทนขาเบสของ BJT ขาแหล่งจ่ายแทนด้วยอิมิตเตอร์ ของ BJT และ ขาเดรนแทนขาคอลเลกเตอร์ ของ BJT หากว่าไดโอด ที่ขาเกต และ เดรน ถูกจ่าย ไบอัส ตรง ในขณะที่เกิดแรงดันที่ขาเดรนอย่างฉับพลัน กระบวนการ Turn - On ของ BJT จะถูกป้อนโดยกระแสย้อนกลับของไดโอดขนานกลับทิศทาง ทำให้เกิด Secondary - Breakdown โดยปกติมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อุปกรณ์ทนได้ ซึ่งผู้ผลิตจะกำหนดมาให้ใช้แทนด้วย V_{dss}

การลดกระแสสไปค์ทำได้โดยการเพิ่มไดโอด Schottky ต่อแบบขนานกลับทิศทาง ในกรณีนี้ V_f ต่ำๆ เพราะมีแรงดัน Breakdown ต่ำกว่า 100 โวลต์ เนื่องจากแรงดันที่ป้อนของ Schottky มีค่าต่ำกว่าแรงดันของไดโอดที่อยู่ในมอสเฟตจึงเป็นการลดกระแสย้อนกลับของไดโอดภายในมอสเฟตได้ อีกวิธีหนึ่งก็คือ การเพิ่มไดโอดโดยการต่ออนุกรมกับมอสเฟตและต่อไดโอดชนิด Ultra Fast ขนานระหว่างมอสเฟตและไดโอดที่ต่ออนุกรมกันอยู่ ซึ่งจะทำให้ไดโอดแฝงในมอสเฟตไม่สามารถนำกระแสได้และจะไม่เกิดการสะสมของประจุเกินความจำเป็น ข้อเสียก็คือจะมีราคา แพงขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดที่ต่ออนุกรมเข้าไปนั้นเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพลดลง

เนื่องด้วยเหตุผลดังกล่าว วงจรสับเบอริงจึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อชะลอ ขบวนการสวิตช์ ทำให้กระแสสไปล์ลดลงโดยการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมเข้ากับมอสเฟทกำลัง

ในช่วงที่ $f < f_o$ การสูญเสียขณะ Turn - Off ที่ตัวสวิตช์เป็นศูนย์ แต่ขณะที่ Turn - On ยังมีการสูญเสีย และที่ทรานซิสเตอร์ขณะ Turn - On ที่แรงดันสูงซึ่งเท่ากับ V_i ในขณะที่ Turn - On ตัวเก็บประจุที่อยู่ทางด้านเอาต์พุตจะคายประจุ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียในตัวสวิตช์ สมมติให้มอสเฟทที่อยู่ด้านบน Turn - On และ C_{out} ของมอสเฟทตัวบนคายประจุ เมื่อ Turn - Off พลังงานที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายแรงดัน กระแสตรงขาเข้า (V_i) ไปชาร์จให้กับ C_{out} จาก 0 ถึง V_i คือ

$$W_I = \int_0^T V_i i_{C_{out}} dt = V_i \int_0^T i_{C_{out}} dt = V_i Q \quad (2.3)$$

$i_{C_{out}}$ คือ กระแสที่ชาร์จให้กับ C_{out}

Q คือ ประจุที่ส่งผ่านจาก V_i ไปยังตัวเก็บประจุ

ถ้า C_{out} ของทรานซิสเตอร์เป็นเชิงเส้นจะได้ว่า $Q = C_{out} V_i$ และสมการ (2.3) จะได้เป็น

$$W_I = C_{OUT} V_i^2 \quad (2.4)$$

พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุจะเป็น

$$W_C = \frac{1}{2} C_{OUT} V_i^2 \quad (2.5)$$

กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานซึ่งประกอบไปด้วย ตัวต้านทานที่ปลายของมอสเฟทขณะ Turn - On และที่ตัวนำของตัวต้านทาน พลังงานที่ได้จะเป็นดังสมการ

$$W_R = W_I - W_C = \frac{1}{2} C_{OUT} V_i^2 \quad (2.6)$$

เนื่องจากพลังงานที่สะสมในตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเป็นตัวเดียวกันเราจะได้ว่า

$$W_{sw} = C_{OUT} V_i^2 \quad (2.7)$$

ดังนั้น กำลังงานการสูญเสียขณะ Turn - On ของทรานซิสเตอร์ จะได้เป็น

$$P_{ion} = \frac{W_C}{T} = \frac{1}{2} f C_{OUT} V_i^2 \quad (2.8)$$

ผลรวมของกำลังสูญเสียของการเก็บประจุและคายประจุของ C_{out} ในมอสเฟทแต่ละตัวคือ

$$P_{sw} = \frac{W_{sw}}{T} = fC_{out}V_I^2 \quad (2.9)$$

ในความเป็นจริงแล้ว C_{out} ไม่เป็นเชิงเส้น

ผลกระทบอีกอันหนึ่งซึ่งมีความสำคัญ ณ ช่วง Turn – On ของมอสเฟต ก็คือ Miller ‘ s Effect ในขณะที่ V_{GS} เพิ่มขึ้น V_{DS} ก็จะลดลง ในสภาวะ Turn – On Miller ‘ s Effect จะมีผลกระทบอย่างยิ่งคือ จะทำให้ค่าความเก็บประจุทางด้านขาเข้าเพิ่มขึ้นและประจุที่ Gate Drive จึงต้องจ่ายกำลังมากขึ้นเพื่อให้ขาเกตทำงานและความเร็วของการสวิตช์จะลดลง การควบคุมขณะต่ำกว่าเรโซแนนซ์ทำได้โดยการ Turn – Off สวิตช์ที่แรงดันเข้าใกล้ศูนย์ ยกตัวอย่างเช่น $V_{DS1} = -1$ โวลต์ ต่อกับไดโอด D_1 แบบขนานกลับทิศทาง ขณะที่ I_{S1} เป็นลบ ในช่วงเวลานี้ทรานซิสเตอร์จะ Turn – Off โดย V_{GS1} และ V_{DS1} เกือบจะเป็นศูนย์ กระแสที่ขาเดรนจะต่ำมาก ในขณะที่มอสเฟต Turn – Off ส่งผลให้ค่าความสูญเสียในการ Turn – Off ของสวิตช์เป็นศูนย์ เนื่องจาก V_{DS1} คงที่ Miller ‘ s Effect ก็จะไม่มีการ Turn – Off ค่าความเก็บประจุทางด้าน อินพุตของทรานซิสเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วในการ Turn – Off ของสวิตช์เพิ่มขึ้นด้วย สรุปก็คือ ในช่วง $f < f_o$ จะเกิดค่าความสูญเสียในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ Turn – On เท่านั้น และในช่วงที่ทรานซิสเตอร์ Turn – Off จะไม่เกิด ค่าความสูญเสียใดๆ ทั้งสิ้น จากที่กล่าวมาแล้ว V_{GS1} และ V_{GS2} จะไม่เกิดการทับซ้อนกันและจะเกิดมี Dead Time เกิดขึ้นซึ่งไม่ก็ควรให้มีค่ามากเกินไป ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_1 Turn – Off เร็วเกินไป กระแส I_{S1} ยังคงเป็นบวกอยู่และไดโอด D_1 ยังไม่สามารถนำกระแสได้ ในขณะที่ไดโอด D_2 นำกระแสแล้วนั้น V_{DS2} จะลดลงจนมีค่าเท่ากับ -0.7 โวลต์ และ V_{DS1} จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ V_I กระแสที่ไหลผ่าน D_2 เป็นศูนย์ ไดโอด D_1 ทำงาน V_{DS1} ลดลงจนมีค่าเท่ากับ -0.7 โวลต์ และ V_{DS2} จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ V_I สองสถานะนี้ที่แรงดันสวิตช์ของแต่ละตัวจะเป็นผลให้เกิดค่าความสูญเสียในการสวิตช์ ในช่วง Turn – On ของทรานซิสเตอร์เราสามารถควบคุมได้โดยตรงโดยใช้ภาคขับ ในแต่ละช่วงที่ Turn – Off จะขึ้นอยู่กับช่วง Turn – On ของทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง การประยุกต์ใช้งานที่ต้องการกำลังสูงๆ จะนำทรานซิสเตอร์ต่อกับไดโอดแบบขนานกลับทิศทาง นำไปใช้ใน คลาสดี ซึ่งในช่วงที่สวิตช์ Turn – Off กระแสจะเป็นศูนย์และวงจรที่ใช่จะซับซ้อนขึ้น กำลังขับสูงขึ้นและความถี่จะถูกจำกัดไว้ที่ 20 กิโลเฮิร์ต เนื่องจากความถี่ต่ำทำให้ขนาดและน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดค่าความสูญเสียเพิ่มขึ้น

2.5.2 การควบคุมความถี่ที่สูงกว่าเรโซแนนซ์

ในช่วง $f > f_o$ วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมแทนด้วยโหลดเหนี่ยวนำ และกระแส I ที่ตามหลัง V_{i1} ด้วยมุมเฟส ψ ที่ $\psi > 0$ ดังนั้น กระแสสวิตช์จะเป็นลบหลังจาก Turn – On และจะเป็นบวก

ก่อนที่จะ Turn – Off ช่วงเวลาการนำกระแสจะเป็นดังนี้ $D_1 - Q_1 - D_2 - Q_2$ ควบคุม S_1 ให้ Turn – Off โดยแรงดันขับ V_{GS1} จะเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ V_{DS2} ลดลงเป็น -0.7 โวลต์ เมื่อ D_2 Turn – On กระแส i จะไหลจาก Q_1 ไปยัง D_2 ทำให้ Turn – Off ของสวิตช์รับแรงดันโดยภาคขับ จากสถานะที่เราสามารถควบคุมได้เพียงช่วง Turn – Off ในแต่ละ Turn – On นั้นจะเกิดการ Turn – Off ของทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่ง

ทรานซิสเตอร์จะถูก Turn – On ที่แรงดันเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติจะมีแรงดันค่าลบน้อย ๆ ของไดโอดที่ต่อแบบขนานกลับทิศทางแต่แรงดันตัวนี้สามารถตัดออกได้เมื่อเทียบกับ V_1 ตัวอย่างเช่น Q_2 Turn – On โดย V_2 เมื่อ I_{S2} เป็นลบ แรงดัน V_{DS2} (รักษาแรงดันที่ -1 โวลต์) โดยไดโอด D_2 ระหว่างทรานซิสเตอร์ Turn – On ดังนั้น ค่าความสูญเสียจากการ Turn – On ของสวิตช์ จะถูกขจัดออกไปและผลของ Miller ‘ s Effect ก็จะไม่เกิดขึ้น ส่วนกำลังที่ภาคขับเกทต่ำความเร็วในการ Turn – On จะสูงขึ้น กระแส Turn – On ของไดโอดต่ำมากเป็น di/dt ช่วงสถานะคืนตัวของกระแสขึ้นอยู่กับ รูปคลื่นขาขึ้นและเป็นสัดส่วนกับกระแสของสวิตช์ ในช่วงที่กระแสสวิตช์เป็นบวก ดังนั้น สามารถทำให้ไดโอดที่ต่อแบบขนานกลับทิศทางช้าลงได้ และไดโอดที่อยู่ในมอสเฟตช้าเท่ากับช่วงเวลา คืนตัวที่น้อยกว่าครึ่งลูกคลื่น

ตอนที่ทรานซิสเตอร์ Turn – On จะมีแรงดันตกคร่อมไดโอดประมาณ 1 V ทำให้เพิ่มกำลังสูญเสียในช่วงคืนตัวของไดโอด ทรานซิสเตอร์สามารถ Turn – On ได้ทั้งช่วงที่กระแสผ่านสวิตช์เป็นลบและเป็นบวกซึ่งไดโอดยังคงนำกระแสเนื่องจากอยู่ในช่วงเวลาคืนตัว ดังนั้น ช่วงเวลา Turn – On ของ V_{GS} และ Dead Time จะกว้างขึ้น ถ้า Dead Time มาก ๆ กระแสก็จะไหลจากไดโอด D_2 ไปยังไดโอด D_1 ของทรานซิสเตอร์ตัวที่อยู่ตรงข้ามกัน จนกระทั่ง Q_2 Turn – On เป็นผลทำให้เกิดสถานะพิเศษของแรงดันสวิตช์ , กระแสไปค้ และค่าการสูญเสียในการสวิตช์

สำหรับ $f > f_0$ ค่าความสูญเสียในการ Turn – On ของสวิตช์เป็นศูนย์ แต่สภาพนั้นเป็นค่าความสูญเสียขณะ Turn – Off ในทรานซิสเตอร์ รูปคลื่นแรงดันและกระแสทั้งคู่จะทับกันในระหว่างช่วง Turn – Off ก่อให้เกิดค่าความสูญเสียในการ Turn – Off ของสวิตช์โดยเฉพาะ Miller ‘ s Effect จะมีผลค่อนข้างมากกับการเพิ่มค่าความเก็บประจุทางด้านขาเข้าของทรานซิสเตอร์ ความต้องการในการขับเกทและความเร็วในการ Turn – Off จะลดลงคล้ายกับการวิเคราะห์ค่าความ สูญเสียในการ Turn – Off ของสวิตช์ สรุปก็คือ เมื่อ $f > f_0$ แล้วไดโอดจะเกิดค่าความสูญเสีย ค่าความสูญเสียในการ Turn – Off ของสวิตช์สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุและใช้เวลาในการขับแรงดัน

2.6 การวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ คลาส ดี

การวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ คลาส ดี นั้นจะกำหนดวงจรสมมูลให้มีค่าดังต่อไปนี้

- กำหนดค่าความต้านทานขณะ Turn – On ของสวิตช์เป็นเชิงเส้นไม่คิดค่าตัวเก็บประจุแฝงของสวิตช์และเวลาในการสวิตช์เป็นศูนย์
- องค์ประกอบของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะไม่มีอุปกรณ์จำพวกกริแอกทีฟ แฝงอยู่
- ถ้าองค์ประกอบคุณภาพของโหลด (Q_L) ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม กำหนดให้มีค่าสูงเพียงพอที่จะให้กระแสไหลผ่านวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเป็นคลื่นไซน์

2.6.1 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

พารามิเตอร์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมอธิบายได้ดังนี้

- ความถี่เรโซแนนท์

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.10)$$

- ลักษณะเฉพาะของความต้านทานกระแสสลับ

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (2.11)$$

- ตัวประกอบคุณภาพขณะมีโหลด (Loaded Quality Factor, Q_L)

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (2.12)$$

- ตัวประกอบคุณภาพขณะไม่มีโหลด (Unloaded Quality Factor, Q_0)

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{Z_0}{r} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$r = r_{DS} + r_L + r_C \quad (2.14)$$

และ

$$R = R_I + r \quad (2.15)$$

- ตัวประกอบคุณภาพขณะมีโหลด Q_L หาได้จาก

$$Q_L = 2\pi \frac{W_S}{T_0 P_R} = 2\pi \frac{f_0 W_S}{P_R} = \frac{\omega_0 W_S}{P_{R_i} + P_r} = \frac{Q}{P_R} \quad (2.16)$$

เมื่อ W_S คือ พลังงานทั้งหมดที่เก็บไว้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ $f_0 = 1/T_0$

$Q = \omega W_S$ คือ รีแอกทีฟ เพาเวอร์ ของตัวเหนี่ยวนำ หรือ ตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ พลังงานทั้งหมดที่เก็บไว้ที่ความถี่ใด ๆ หาได้จาก

$$w(\omega, t) = w_L(\omega, t) + w_C(\omega, t) = \frac{1}{2}LI_m^2 \sin^2(\omega t - \psi) + \frac{1}{2}CV_{CM}^2 \sin^2(\omega t - \psi - 90^\circ)$$

$$w(\omega, t) = \frac{1}{2} [LI_m^2 \sin^2(\omega t - \psi) + CV_{CM}^2 \cos^2(\omega t - \psi)] \quad (2.17)$$

เนื่องจากการทำงานช่วงสภาวะคงตัวที่ความถี่เรโซแนนซ์ พลังงานทั้งหมดจะถูกเก็บอย่างฉับพลัน ในวงจรเรโซแนนซ์เป็นค่าคงที่และเท่ากับพลังงานสูงสุดที่ถูกเก็บไว้ในตัวเหนี่ยวนำ

$$W_S = W_{LMax} = \frac{1}{2}LI_m^2 \quad (2.18)$$

หรือใช้สมการ (2.10) แทนในพลังงานในตัวเก็บประจุ

$$W_S = W_{Cmax} = \frac{1}{2}CV_{CM}^2 = \frac{1}{2}C \frac{I_M^2}{(\omega_0 C)^2} = \frac{1}{2} \frac{I_M^2}{(C\omega_0^2)} = \frac{1}{2}LI_M^2 \quad (2.19)$$

แทนค่าสมการ (2.18) และ (2.19) ใน (2.16) จะได้

$$Q_L = \frac{\pi f_0 LI_M^2}{P_R} = \frac{\pi f_0 CV_{CM}^2}{P_R} \quad (2.20)$$

รีแอกทีฟเพาเวอร์ของตัวเหนี่ยวนำที่ f_0 คือ $Q = (\frac{1}{2})V_{Lm}(I_m^2) = (\frac{1}{2})\omega_0 L(I_m^2)$ และของตัวเก็บประจุคือ $Q = (\frac{1}{2})I_m V_{Cm} = (\frac{1}{2})\omega_0 C(V_{Cm}^2)$ ดังนั้น Quality Factor สามารถหามาจากอัตราส่วนของรีแอกทีฟ เพาเวอร์ของตัวเหนี่ยวนำหรือของตัวเก็บประจุต่อกำลังที่จ่ายออกจริง ในรูปของพลังงานความร้อนในตัวต้านทาน กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายใน $R = R_I + r$ คือ

$$P_R = \frac{1}{2}RI_M^2 = \frac{1}{2}(R_i + r)I_m^2 \quad (2.21)$$

แทนค่าสมการ (2.8) หรือ (2.9) และ (2.21) ใน (2.16) จาก (2.12)

แทน $R_I = 0$ ก็จะได้

$$P_R = P_r = \frac{1}{2} r I_m^2 \quad (2.22)$$

และขณะไม่มีโหลด ตัวประกอบคุณภาพ Q_0 หาได้จาก

$$Q_0 \equiv \frac{\omega_0 W_s}{P_r} \quad (2.23)$$

จากสมการ 2.12 ตัวประกอบคุณภาพของตัวเหนี่ยวนำ คือ

$$Q_{L0} \equiv \frac{\omega_0 W_s}{P_{rL}} = \frac{\omega_0 L}{r_L} \quad (2.24)$$

และตัวเก็บประจุ คือ

$$Q_{C0} \equiv \frac{\omega_0 W_s}{P_{rC}} = \frac{1}{\omega_0 C r_C} \quad (2.25)$$

2.6.2 อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมมีค่าเท่ากับ

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R \left[1 + j Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right] \quad (2.26)$$

$$Z = Z_0 \left[\frac{R}{Z_0} + j \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right] = Z e^{j\psi} = R + jX$$

ซึ่ง
$$Z = Z_0 \sqrt{Q_L^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2} \quad (2.27)$$

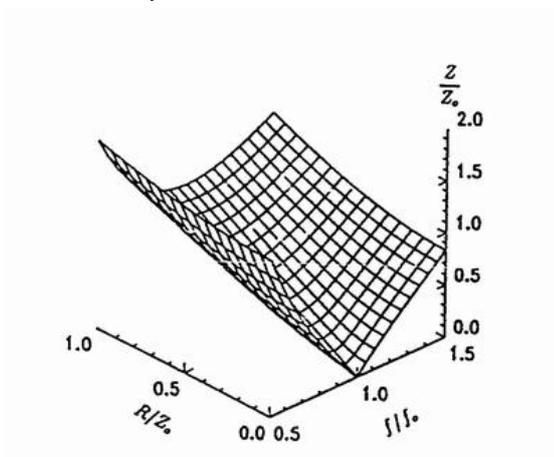
$$\psi = \arctan \left[Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right] \quad (2.28)$$

$$R = Z \cos \psi \quad (2.29)$$

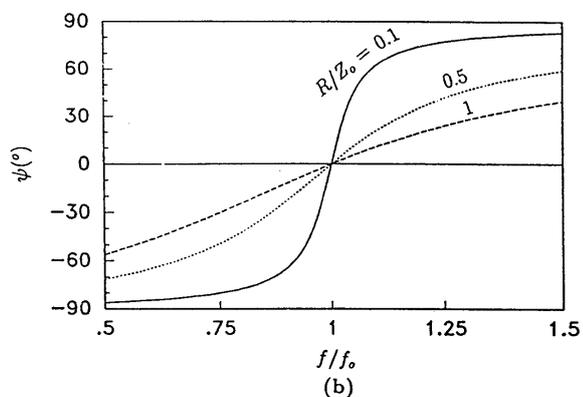
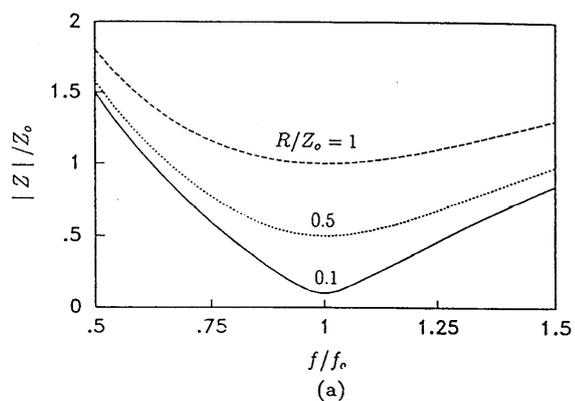
$$X = Z \sin \psi \quad (2.30)$$

หมายเหตุ : อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์จะเป็นศูนย์ที่ความถี่เรโซแนนซ์เสมอ จาก (2.28)

$$\cos \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.31)$$



ภาพที่ 2.6 ขนาดของ Z/Z_0 ในฟังก์ชันของ f/f_0 และ $R/Z_0 = 1/Q_L$



ภาพที่ 2.7 ขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมกับ f/f_0 ที่ค่า R/Z_0 คงที่ เท่ากับ $1/Q_L$ รูป (a) โมดูลัสของ Z/Z_0 กับ f/f_0 ที่ค่าคงที่ของ R/Z_0 รูป (b) เฟสของ อิมพีแดนซ์ขาเข้า กับ f/f_0 ที่ค่าคงที่ของ R/Z_0 เท่ากับ $1/Q_L$

2.6.3 กระแส แรงดัน และกำลังของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

จากรูป 2.4 (d) แรงดันอินพุตของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีสมการเป็น

$$\begin{aligned} v &= V_I, \text{for } -0 < \omega t \leq \pi \\ v &= 0, \text{for } -\pi < \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \quad (2.32)$$

แรงดันนี้สามารถกระจายในอนุกรมฟูเรียร์ได้เป็น

$$\begin{aligned} v &= \frac{V_I}{2} + \frac{2V_I}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{2n} \sin(n\omega t) \\ v &= V_I \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \omega t + \frac{2}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots \right) \end{aligned} \quad (2.33)$$

องค์ประกอบมูลฐานของแรงดัน V คือ

$$v_{i1} = V_m \sin \omega t \quad (2.34)$$

ซึ่งแอมพลิจูด คือ

$$V_m = \frac{2V_I}{\pi} \approx 0.637V_I \quad (2.35)$$

ค่า rms ของแรงดัน V_{II} คือ

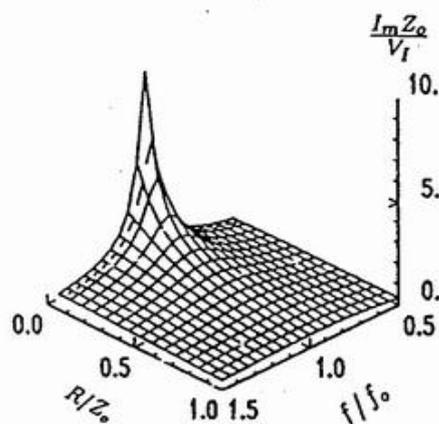
$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}V_I}{\pi} \approx 0.45V_I \quad (2.36)$$

ถ้าความถี่ที่ทำงาน f ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ f_0 อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์จะมีค่าสูงมาก ๆ สำหรับฮาร์โมนิกที่สูงมาก ๆ และด้วยเหตุนี้กระแสที่ผ่านวงจรเรโซแนนซ์จะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ เท่ากับองค์ประกอบมูลฐาน

$$i = I_m \sin(\omega t - \psi) \quad (2.37)$$

จาก (2.30) , (2.31) และ (2.35)

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{V_m}{Z} = \frac{2V_I}{\pi Z} = \frac{2V_I \cos \psi}{\pi R} = \frac{2V_I}{\pi R \sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \\ I_m &= \frac{2V_I}{\pi Z_0 \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \end{aligned} \quad (2.38)$$



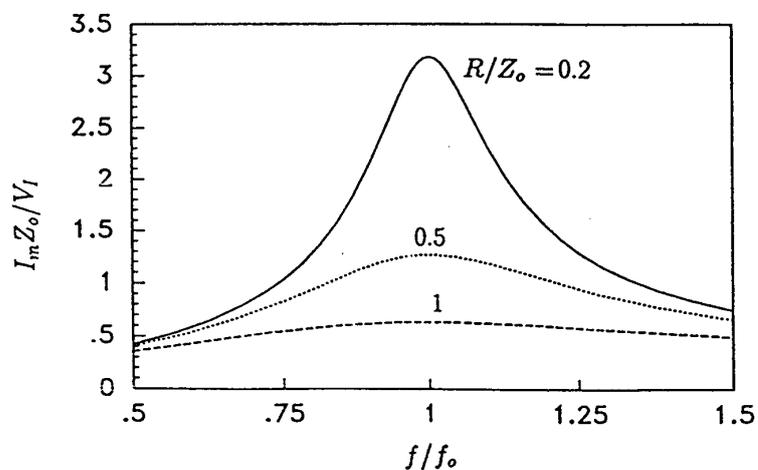
ภาพที่ 2.8 ขนาดของ $I_m Z_o / V_I$ ของกระแสที่ไหลผ่านวงจรรีโซแนนท์
ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ f/f_o และ $R/Z_o = 1/Q_L$

จากภาพที่ 2.9 จะพบว่า $I_m Z_o / V_I$ จะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่เรโซแนนท์และมีความ
ต้านทานต่ำที่สุดด้วย และแรงดันเอาต์พุตก็จะเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย ดังสมการ

$$v_{R_i} = iR_i = V_{R_{im}} \sin(\omega t - \psi) \quad (2.39)$$

กระแสอินพุตของอินเวอร์เตอร์ i_I จะเท่ากับกระแสที่ผ่านสวิตช์ S_1 ได้มาจาก

$$\begin{aligned} i_I &= i_{s_1} = I_m \sin(\omega t - \psi), 0 < \omega t \leq \pi \\ i_I &= i_{s_1} = 0, \pi < \omega t \leq 2\pi \end{aligned} \quad (2.40)$$



ภาพที่ 2.9 ขนาดของ $I_m Z_o / V_I$ ของกระแสในวงจรรีโซแนนท์ กับ f/f_o และ $R/Z_o = 1/Q_L$

ดังนั้น จาก (2.27) , (2.30) และ (2.35) ประกอบด้วของค้ประกอบของกระแสอินพุต

$$I_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{s1} d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} \int_0^\pi \sin(\omega t - \psi) d(\omega t) = \frac{I_m \cos \psi}{\pi} = \frac{V_m \cos \psi}{\pi Z}$$

$$I_1 = \frac{2V_1 \cos \psi}{\pi^2 Z} = \frac{2V_1 \cos^2 \psi}{\pi^2 R} = \frac{2V_1 R}{\pi^2 Z^2} = \frac{I_m}{\pi \sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

$$I_1 = \frac{2V_1}{\pi^2 R \left[1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (2.41)$$

ที่ความถี่ $f = f_0$

$$I_1 = \frac{I_m}{\pi} = \frac{2V_1}{\pi^2 R} \approx \frac{V_1}{5R} \quad (2.42)$$

DC Input Power สามารถแสดงได้เป็น

$$P_i = I_1 V_1 = \frac{2V_1^2 \cos^2 \psi}{\pi^2 R^2} = \frac{2V_1^2}{\pi^2 R \left[1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]}$$

$$P_i = \frac{2V_L^2 R}{\pi^2 Z_0^2 \left[\left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (2.43)$$

ที่ความถี่ $f = f_0$

$$P_i = \frac{2V_1^2}{\pi^2 R} \approx \frac{V_1^2}{5R} \quad (2.44)$$

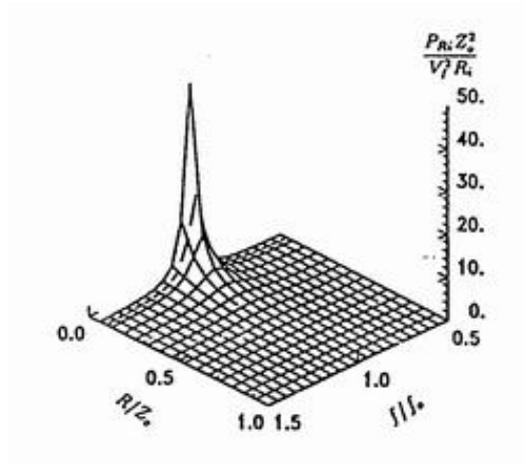
ใช้ (2.38) แทนในกำลังเอาต์พุต

$$P_{Ri} = \frac{I_m^2 R_i}{2} = \frac{2V_1^2 R_i \cos^2 \psi}{\pi^2 R^2} = \frac{2V_1^2 R_i}{\pi^2 R^2 \left[1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]}$$

$$P_{Ri} = \frac{2V_1^2 R_i}{\pi^2 Z_0^2 \left[\left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (2.45)$$

ที่ความถี่ $f=f_0$ สมการ (2.45) ก็จะกลายเป็น

$$P_{Ri} = \frac{2V_I^2 R_i}{\pi^2 R^2} \approx \frac{V_I^2 R_i}{5R^2} \tag{2.46}$$

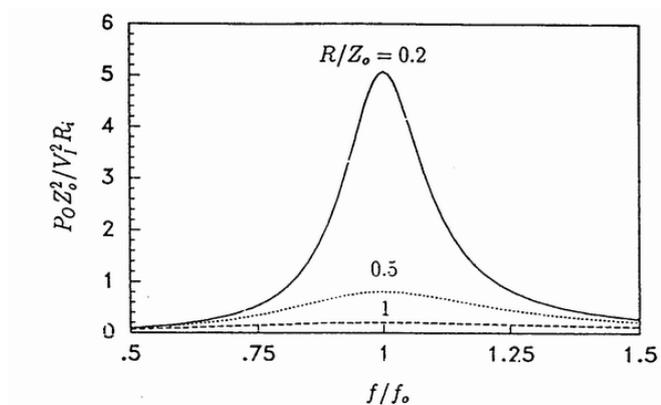


ภาพที่ 2.10 ขนาดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต $P_{Ri} Z_o^2 / V_I^2 R_i$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ f/f_0 และ $R/Z_o = 1/Q_L$

2.6.4 กระแส และแรงดันของสวิตช์ในวงจรเรโซแนนซ์ อินเวอร์เตอร์

แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมสวิตช์แต่ละตัวมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า

$$V_{SM} = V_I \tag{2.47}$$



ภาพที่ 2.11 ขนาดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต $P_{Ri} Z_o^2 / V_I^2 R_i$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ f/f_0 ที่ค่าคงที่ของ $R/Z_o = 1/Q_L$

ค่าสูงสุดของกระแสฟีดที่สวิตช์ และค่าแอมพลิจูดสูงสุดของกระแสที่ไหลผ่านวงจรเรโซแนนท์เกิดขึ้นที่ $f=f_0$ ดังนั้น จาก (2.38)

$$I_{SM} = I_{mr} = \frac{2V_I}{\pi R} \quad (2.48)$$

แอมพลิจูดสูงสุดของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C ที่ได้มาจาก (2.38)

$$V_{CM} = \frac{I_m}{\omega C} = \frac{2V_I}{\pi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.49)$$

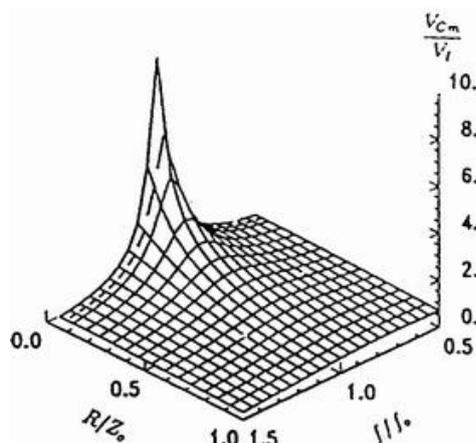
รูปสามมิติแสดงค่า V_{CM} / V_I ดังในรูป 2.12 และ 2.13 อธิบาย V_{CM} / V_I ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ f / f_0 ที่ค่าคงที่ของ R / Z_0

$$V_{Lm} = \omega L I_m = \frac{2V_I \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)}{\pi \sqrt{\left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.50)$$

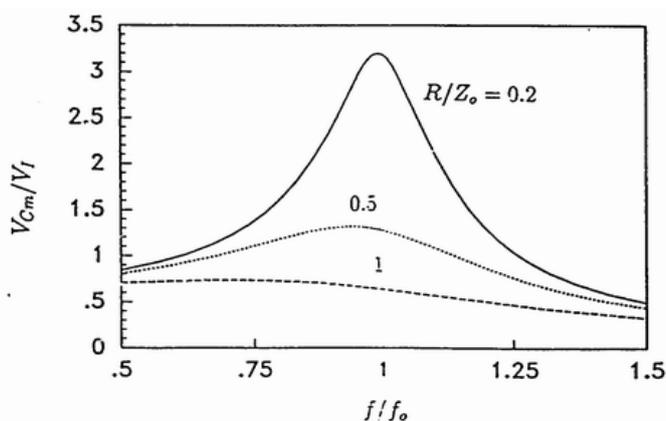
ที่ค่า $f=f_0$ จะได้

$$V_{Cm(\max)} = V_{Lm(\max)} = Z_0 I_{mr} = Q_L V_m = \frac{2V_I Q_L}{\pi} \quad (2.51)$$

ค่าแรงดันกระตุ้นสูงสุดที่องค์ประกอบของเรโซแนนท์เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนท์ที่ $f \approx f_0$ ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อินพุตสูงสุด $V_I = V_{Imax}$, และค่าโหลดสูงสุดคือ ตัวประกอบ Q_L ในความเป็นจริง ค่าสูงสุดของ V_{Lm} เกิดขึ้นสูงกว่าค่า f_0 เล็กน้อยและ V_{Cm} ต่ำกว่า f_0 เล็กน้อย ที่ความถี่ เรโซแนนท์แอมพลิจูด สูงสุด ของแรงดันที่คร่อมตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์และตัวเก็บประจุเรโซแนนท์เป็น Q_L มีค่าสูงกว่าแอมพลิจูด V_m ขององค์ประกอบหลักมูลของแรงดัน อินพุตของวงจรเรโซแนนท์ซึ่งเท่ากับแอมพลิจูดของแรงดันเอาต์พุต V_{Rim}



ภาพที่ 2.12 ขนาดของ V_{Lm} / V_I ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์ C ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ f/f_0 และ $R/Z_0 = 1/Q_L$



ภาพที่ 2.13 ขนาดของ V_{Lm} / V_I ของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเรโซแนนท์กับ f/f_0 ที่ค่าคงที่ของ $R/Z_0 = 1/Q_L$

2.7 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของแรงดัน

อินเวอร์เตอร์ คลาสซี สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนสวิตซ์ซิ่งและส่วนเรโซแนนท์ บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์แสดงไว้ในรูป 2.14 ในส่วนสวิตซ์ซิ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้านขาเข้า V_I และชุดของสวิตซ์ สวิตซ์ถูกควบคุมโดยแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม v เนื่องจากวงจรเรโซแนนท์สร้างกระแสที่เป็นไซน์พลังงานที่ถูกส่งจากส่วนของสวิตซ์ซิ่งไปยังส่วนของเรโซแนนท์จะมีเพียงความถี่เดียวคือ องค์ประกอบหลักมูล (Fundamental Component) ดังนั้น การพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบหลักมูลของแรงดัน v จากสมการ (2.34) ก็

เพียงพอแล้ว ฟังก์ชันการถ่ายโอนของแรงดันในส่วนของสวิตช์ซึ่งสามารถกำหนดได้จากสมการสมมูล

$$M_{V_s} = \frac{V_{rms}}{V_1} \quad (2.52)$$

ซึ่ง V_{rms} เป็นค่า rms ขององค์ประกอบหลักมูล V_{II} ของแรงดัน v ในส่วนเรโซแนนซ์ของอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม v ไปเป็น ไซน์ ทั้งสัญญาณแรงดันและกระแส เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ด้านขาเข้า V_1 และสวิตช์ S_1 , S_2 จะใกล้เคียงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในอุดมคติ วงจรเรโซแนนซ์ส่วนมากสามารถต่อแบบขนาน ถ้าโหลดของวงจร เรโซแนนซ์เป็นความต้านทาน R_1 ฟังก์ชันการถ่ายโอนของแรงดันในส่วนของเรโซแนนซ์ คือ

$$M_{V_r} = \frac{V_{Ri}}{V_1} = M_{V_r} e^{j\theta} \quad (2.53)$$

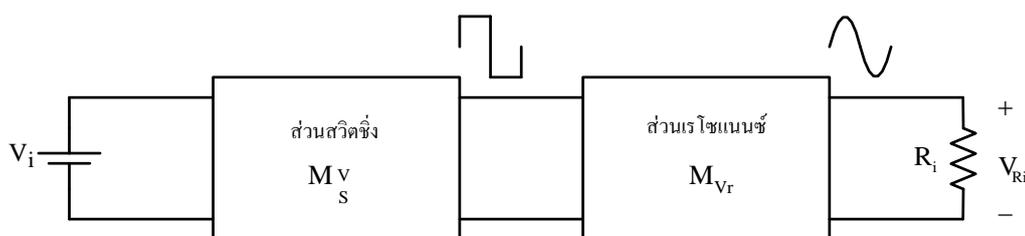
เมื่อ V_1 เป็นเฟสเซอร์ของแรงดัน V_{II} และ V_{Ri} เป็นเฟสเซอร์ของแรงดัน ไซน์ขาออก V_{Ri} ครอบคลุม R_1 สัมประสิทธิ์ของ M_{V_r} คือ

$$M_{V_r} = \frac{V_{Ri}}{V_{rms}} \quad (2.54)$$

เมื่อ V_{Ri} เป็นค่า rms ของ V_{II} ฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงดันทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์หาได้จากผลของสมการ (2.52) และ (2.54)

$$M_{V_1} = M_{V_s} M_{V_r} = \frac{V_{Ri}}{V_1} \quad (2.55)$$

พิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์ครึ่งคลื่นใช้สมการ (2.36) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแรงดันจากขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ไปถึงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม



ภาพที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์ คลาส ดี

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแรงดันจากขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ไปยังขาเข้าของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม เป็นดังสมการ

$$M_{Vs} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} = 0.45 \quad (2.56)$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปยังไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมคือ

$$M_{Vr} = \frac{V_{Ri}}{V_1} = \frac{R_i}{R_i + r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\eta_{ir}}{1 + jQ_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (2.57)$$

$$M_{Vr} = M_{Vr} e^{j\varphi}$$

ซึ่ง

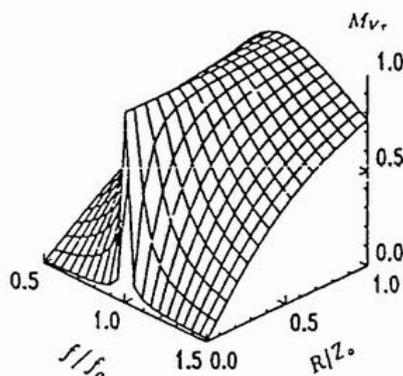
$$M_{Vr} = \frac{V_{Ri}}{V_{rms}} = \frac{\eta_{lr}}{\sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.58)$$

$$\varphi = -\arctan \left[1 + Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right] \quad (2.59)$$

ซึ่ง $\eta_{lr} = R_i / (R_i + r) = R_i / R$ คือ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ซึ่งสูญเสียขณะนำเท่านั้น ในภาพที่ 2.15 แสดงให้เห็นในแกน 3 มิติ จัดสมการ (2.58) จะได้

$$\frac{f}{f_0} = \frac{\sqrt{1 - (M_{Vr}/\eta_{lr})^2} + 4Q_L^2 (M_{Vr}/\eta_{lr})^2 - \sqrt{1 - (M_{Vr}/\eta_{lr})^2}}{2Q_L^2 (M_{Vr}/\eta_{lr})^2}, \quad \text{for } \frac{f}{f_0} \leq 1 \quad (2.60)$$

$$\frac{f}{f_0} = \frac{\sqrt{1 - (M_{Vr}/\eta_{lr})^2} + 4Q_L^2 (M_{Vr}/\eta_{lr})^2 + \sqrt{1 - (M_{Vr}/\eta_{lr})^2}}{2Q_L^2 (M_{Vr}/\eta_{lr})^2}, \quad \text{for } \frac{f}{f_0} \geq 1 \quad (2.61)$$



ภาพที่ 2.15 รูปสามมิติของ M_{Vr} เป็นฟังก์ชันของ f/f_0 และ R/Z_0

สมการ (2.58) , (2.60) และ (2.61) เป็นฟังก์ชันของตัวแปร Q_L , f/f_0 และ M_{Vr} ฟังก์ชันนี้มีค่าประกอบในภาพที่ 2.16 ภาพที่ 2.16 (a) แสดง M_{Vr} แปรตามค่า f/f_0 ที่ $\eta_r = 95\%$ และแปรตามค่าของ $R/Z_0 = 1/Q_L$ รูปนี้เป็นเคอร์ฟของเรโซแนนท์ M_{Vr} จะเพิ่มขึ้นเมื่อ $f \leq f_0$ และจะลดลงเมื่อ $f \geq f_0$ ทั้งสองกรณีที่กล่าวมาแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.16 (b) และ 2.16 (c) ภาพที่ 2.16 (b) แสดง M_{Vr} เป็นฟังก์ชันของ R/Z_0 โดยการกำหนดค่าของ f/f_0 ในขณะที่ R/Z_0 เพิ่มขึ้นและ f/f_0 คงที่ M_{Vr} เพิ่มขึ้น ภาพที่ 2.16 (c) พล็อตค่า f/f_0 เทียบกับ R/Z_0 โดยให้ M_{Vr} เป็นค่าคงที่ เพื่อรักษาค่าของ M_{Vr} ในขณะที่ R/Z_0 เพิ่มขึ้น ให้ลด f/f_0 คุณลักษณะที่ $f \geq f_0$ พล็อตได้ดังภาพที่ 2.16 (d) และ (e) ภาพที่ 2.16 (d) อธิบายความสัมพันธ์ของ M_{Vr} กับ R/Z_0 ให้ f/f_0 เป็นค่าคงที่ เมื่อ R/Z_0 เพิ่มขึ้นด้วย ค่าคงที่ตาม f/f_0 ค่า M_{Vr} จะเพิ่มขึ้น ภาพที่ 2.16 (e) พล็อต f/f_0 เทียบกับ R/Z_0 ที่ M_{Vr} เปลี่ยนแปลงไป ในการรักษาค่าของ M_{Vr} ให้คงที่โดยการเพิ่ม R/Z_0 สิ่งที่น่าสนใจคือ ช่วงความต้องการรักษาระดับ M_{Vr} ให้คงที่ตลอดย่านโหลด ความต้านทานปกติ R/Z_0 ถูกจำกัด ณ ค่า M_{Vr} สูง ๆ ทั้ง $f \leq f_0$ และ $f \geq f_0$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.38) กับ (2.58) จะได้

$$: \quad I_m = \frac{2V_1 M_{Vr}}{\pi R \eta_r} \quad (2.62)$$

มองได้ว่า ณ ค่า M_{Vr} คงที่ ขนาดของกระแสขาออกของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์แบบอนุกรม I_m จะเป็นส่วนกลับกับค่า R

รวมสมการ (2.56) และ (2.58) กำหนดขนาดของฟังก์ชันการโอนถ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับของเรโซแนนท์อินเวอร์เตอร์คลาส ดี แบบอนุกรม

$$M_{V1} = \frac{V_{Ri}}{V_{rms}} = \frac{V_{rms}}{V_1} = M_{Vs} M_{Vr} = \frac{\sqrt{2}\eta_r}{\pi \sqrt{1 + Q_L^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (2.63)$$

ค่าสูงสุดของ M_{V1} เกิดขึ้นที่ $f/f_0 = 1$ และเท่ากับ $M_{V1max} = \sqrt{2} \eta_r / \pi = 0.45 \eta_r$ ดังนั้นค่าของ M_{V1} อยู่ในช่วง 0 - 0.45 η_r

2.8 ธรรมชาติของคลื่นเสียง

การที่คลื่นเสียงสามารถแพร่กระจายผ่านอากาศจากจุดหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่ง อาจจะเป็นคนตรี หรือ เสียงพูดของมนุษย์ หรือเสียงอื่น ๆ ก็ตาม เราจำเป็นต้องศึกษาเรื่องของคลื่นเสียงก่อน คลื่นเสียงถูกส่งผ่านหูเข้าสู่ประสาทส่วนหนึ่งของมนุษย์เรา เรียกว่า การได้ยิน สภาพอากาศภายใน ห้องปกติกจะหยุดนิ่งหรือไม่มีการเคลื่อนที่ เสียงที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ หรือเสียงคนตรี หรือเสียงอื่น ๆ จะทำให้เกิดการสั่นในอากาศและไปสั่นเยื่อหูของมนุษย์เช่นเดียวกันและโสตประสาทจะส่งคลื่น เสียงซึ่งเป็นพลังงานกลที่มีการยืดหยุ่น เช่นเสียงไวโอลิน กลอง ปี่ ระนาด หรือเกิดจากการสั่นของ ลำโพงวิทยุทำให้เกิดคลื่นเสียงขนาดต่าง ๆ กัน คลื่นเสียงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับ การ สั่นสะเทือนจำนวนของคลื่นที่สั่นสมบูรณ์เราเรียกว่า ความถี่ของเสียงเทียบกับเวลาเป็นวินาที เช่น คลื่นเสียงอาจสั่น 2,000 ครั้งต่อวินาที เราเรียกว่าความถี่ 2,000 ไซเคิลต่อวินาที หรืออาจจะกล่าว ได้ว่าเกิดคลื่นเสียงขึ้น 2,000 ไซเคิล เสียงที่หูมนุษย์ได้ยินเราเรียกว่า คลื่นเสียง แแถบของคลื่นจะ เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ถ้าคลื่นสูงแถบคลื่นก็สูง ถ้าคลื่นต่ำแถบคลื่นก็ต่ำ

ช่วงความถี่ของคลื่น ช่วงที่มนุษย์เราสามารถได้ยิน เป็นช่วงความถี่ต่ำตั้งแต่ 20 ไซเคิล ถึง 20,000 ไซเคิล แต่บุคคลบางคนอาจได้ยินเสียงต่ำ แต่ไม่ได้ยินเสียงสูง บางคนได้ยินเสียงสูงแต่ ไม่ได้ยินเสียงต่ำ และบางคนอาจได้ยินช่วงความถี่ที่กว้างมากก็เป็นได้

ตัวอย่างเสียงที่มนุษย์ได้ยินได้

เสียงมนุษย์	75 - 3,000	ไซเคิล
เปียโน	27 - 8,000	ไซเคิล
ทอมโบน	200 - 3,000	ไซเคิล
คลาสิเนต	150 - 1,500	ไซเคิล
ขลุ่ย	250 - 2,300	ไซเคิล
พิคโกโล	500 - 4,500	ไซเคิล

ช่วงความถี่ของ คลื่นเสียงปกติมีช่วงความถี่ประมาณ 30 - 20,000 ไซเคิล คลื่นเสียง สามารถเดินทางได้ 346 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หลักทางฟิสิกส์ อัลตราซาวด์ (Ultrasound) หมายถึง การสั่นสะเทือนทางเชิงกลที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คลื่นเสียง และหูของมนุษย์ไม่สามารถรับความถี่ ในช่วงนี้ได้ คือมีความถี่มากกว่า 20 Hz - 20 kHz ในการสั่นสะเทือนนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

คลื่นเสียง (Audible Sound) 20 Hz - 20 kHz หูมนุษย์สามารถได้ยิน
คลื่นใต้น้ำ (Infra Sound) มีความถี่น้อยกว่าคลื่นเสียง

คลื่นเหนือเสียง (Ultrasound) มีความถี่มากกว่า 20 kHz ซึ่งในที่นี้ได้นำเอาคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้งาน

2.9 การกำเนิดความถี่ (Frequency Generation)

อัลตราซาวด์ (Ultrasound) หรืออัลตราโซนิก (Ultrasonic) เป็นการสั่นสะเทือนที่มีความถี่เหนือเสียง ความถี่อัลตราโซนิก (Ultrasonic Frequency) ที่ใช้งานในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกต่าง ๆ โดยที่จะไม่ทำให้ผิวของวัตถุเสื่อมสภาพ นั้นมีความถี่ตั้งแต่ 20 MHz ขึ้นไป ความถี่ขนาดนี้สูงกว่าความถี่คลื่นเสียง (Audible Sound) ที่หูของมนุษย์สามารถได้ยิน แต่ต่ำกว่าคลื่นวิทยุ

ดังนั้นความถี่อะไรจะระบุได้ว่าเป็นความถี่อัลตราโซนิก หรือความถี่อัลตราซาวด์ ในธรรมชาตินั้น ค้างคาวเป็นสัตว์ที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิก (Ultrasonic Signals) ที่มีความถี่ประมาณ 100 kHz ออกมาใช้ในการจับแมลง

เมื่อความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ ในเนื้อเยื่อมีค่าเท่ากับ $b = 1540$ เมตรต่อวินาที ความยาวคลื่นประมาณ 1.54 เซนติเมตร ความยาวคลื่นที่คำนวณออกมาได้นี้ค้างคาวสามารถรับคลื่นที่สั่นสะเทือนกลับมา

ดังนั้นความถี่ 100 kHz ไม่เพียงพอที่จะระบุได้ว่าเป็นคลื่นความถี่อัลตราซาวด์ ในกายภาพบำบัดและเวชศาสตร์ฟื้นฟู การรักษา เซลล์กล้ามเนื้อที่มีเซลล์ของเนื้อเยื่อขนาด 1 มิลลิเมตรหรือเล็กกว่านี้ เมื่อความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับขนาดของเซลล์เนื้อเยื่อ ฉะนั้นความถี่ที่จะระบุว่าเป็นความถี่อัลตราซาวด์ คือความถี่ประมาณ 1.54 MHz

จะเห็นได้ว่าความถี่ในระดับ MHz สามารถให้กำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์ ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1 มิลลิเมตร หรือเล็กกว่านี้ได้ ซึ่งให้ผลในการรักษาเป็นอย่างดี จากข้อเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นจะพอระบุได้ว่า คลื่นอัลตราโซนิกจะมีความถี่อยู่ในระดับ kHz ส่วนคลื่นอัลตราซาวด์จะควรมีความถี่อยู่ในระดับ MHz

2.10 ทฤษฎีอัลตราซาวด์ (Ultrasound Theory) [2]

ธรรมชาติของเสียง คือ การสั่นกลที่ส่งผ่านไปในตัวกลางในลักษณะคล้ายคลื่นตามยาว คลื่นดังกล่าวถ้ามีความถี่อยู่ในช่วงที่หูของมนุษย์สามารถได้ยิน เรียกว่า คลื่นเสียง ซึ่งจะมีความถี่อยู่ในช่วง 20 Hz – 20 kHz ถ้าความถี่ต่ำกว่าคลื่นเสียงเรียกว่าคลื่นใต้น้ำ แต่ถ้าสูงกว่าความถี่นี้ เรียกว่า คลื่นเหนือเสียง ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น

2.10.1 การแพร่ของคลื่นอัลตราซาวด์

คลื่นอัลตราซาวด์มีการแพร่กระจายในแบบของการสั้น ของอนุภาคตัวกลางที่มันผ่านไป กล่าวคือ เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ออกจากแหล่งกำเนิด ด้วยคุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวกลาง ทำให้อนุภาคของตัวกลางสั้นกลับไปกลับมา รอบตำแหน่งสมดุลของสภาวะปกติของตัวกลางและเนื่องจากอนุกรมของตัวกลางแต่ละตัวเกิดการสั้นไม่พร้อมกัน ดังนั้นระยะห่างระหว่างอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงจึงไม่ คงที่ ถ้าพิจารณาที่ขณะใดขณะหนึ่งจะพบว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคมากที่สุดเรียกว่าส่วนอัด และบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคน้อยที่สุดเรียกว่าส่วนขยาย เกิดขึ้นตลอดเวลาที่คลื่นอัลตราซาวด์เดินทางผ่านไป

ความดันในบริเวณต่าง ๆ ของตัวกลางเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของอนุภาคที่บริเวณนั้น

2.10.2 ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์

อัตราการแพร่ของคลื่นอัลตราซาวด์ผ่านตัวกลางหรือความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ (C) จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติสองอย่างของตัวกลางคือ ความยืดหยุ่น (E) และความหนาแน่น (ρ) ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามเป็นไปตามสมการ

$$C^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2.64)$$

ความยืดหยุ่นหมายถึง การยืดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาคของตัวกลางชนิดนั้น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของตัวกลาง ว่าเป็นของแข็ง ของเหลว หรือว่าเป็นก๊าซ และชนิดของคลื่นที่แพร่ไปในตัวกลาง สำหรับคลื่นตามยาวที่แพร่ในของเหลวหรือก๊าซ ค่าของ Adiabatic Bulk Modulus (K_a) สามารถใช้แทนค่าความยืดหยุ่น (E) ในสมการได้ Bulk Modulus (K) หรือ Modulus of Volume Elasticity นิยามว่าเป็นขนาดของแรงดันที่เพิ่มขึ้นต่อสัดส่วนเปรียบเทียบของปริมาตรที่ลดลงกับปริมาณเทอม Adiabatic ของของแข็งทำให้อนุภาคมีการสั้นในลักษณะของคลื่นตามยาวพร้อมกันในแบบคลื่นตามยาวด้วย ดังนั้นค่า Modulus ที่ใช้ในการคำนวณจึงขึ้นกับค่า Shear Modulus นี้ด้วย ซึ่งนิยามว่าเป็นขนาดของความดันที่เพิ่มขึ้นต่อสัดส่วนเปรียบเทียบของความยาวที่เพิ่มขึ้นกับความยาวเดิม ซึ่งพบว่า

$$E = K + \frac{2}{3}G \quad (2.65)$$

เมื่อ E คือ ความยืดหยุ่น

K คือ Bulk Modulus

G คือ Shear Modulus

2.10.3 ความถี่และความยาวคลื่น

ความถี่อัลตราซาวด์หรือความถี่ที่มีอนุภาคตัวกลางสั้น ซึ่งเมื่อเทียบกับคลื่นความดัน ความถี่อัลตราซาวด์จะหมายถึง จำนวนคลื่นความดันสูงสุดที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่กำหนดภายใน 1 วินาที คือ จำนวนรอบคลื่นความดันที่เกิดขึ้นในตัวกลางต่อหนึ่งวินาทีที่มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือเฮิรตซ์ (Hz)

ความยาวของคลื่นอัลตราซาวด์ คือ ระยะห่างจากยอดคลื่นความดันหนึ่งถึงยอดคลื่นถัดไปที่อยู่ติดกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในวัสดุต่างๆ ที่อุณหภูมิ 17 - 25 องศาเซลเซียสและที่ความดันบรรยากาศ

Material	Density (kg/m ³)	Velocity (m/s)	Acoustic impedance (kg/m ³ .sec x 10 ⁻⁶)
Air	1.2	330	0.0004
Water (20°C)	1000	1480	1.48
Mercury	13600	1450	20.0
Soft tissue			
Average	1060	1540	1.63
Liver	1060	1550	1.64
Muscle	1080	1580	1.70
Fat	925	1459	1.38
Bone	1912	4080	7.8
PZT ^b	7650	3791	29.0

Average tissue (e.g., abdomen)
Lead zirconate titanate

ความหนาแน่นและความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วจะเป็นตามสมการ

$$C = \rho\lambda \quad (2.66)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (Density), λ คือความยาวคลื่น

2.10.4 ความเข้มและกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์

ความเข้ม (Intensity) ของคลื่นอัลตราซาวด์ หมายถึง พลังงานของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ส่งผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ของตัวกลางในหนึ่งเวลา พลังงานนี้คือพลังงานที่เป็นผลมาจากการสั่นของอนุภาคตัวกลาง เมื่อถือว่า อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นแบบ Simple Harmonic พลังงานที่เกิดจากสั่นของอนุภาคตัวกลางจะเป็นผลรวมของพลังงานจล และพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่ตำแหน่งของการสั่นที่ผ่านตำแหน่งสมดุล

พลังงานที่เกิดจากการสั่นจะเท่ากับพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่คือ

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.67)$$

เพราะมวลของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของตัวกลาง จะได้ว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากการสั่นของอนุภาคทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตรตัวกลาง (Energy Density , E_v)

$$E_v = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (2.68)$$

ถ้าพลังงานนี้ถ่ายทอดไปในตัวกลางด้วยความเร็วของการแพร่ของคลื่นอัลตราซาวด์ จะเป็นว่าพลังงานที่ส่งผ่านต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตัวกลาง ในหนึ่งหน่วยเวลาหรือความเข้ม (I) มีค่าเท่ากับพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการสั่นของอนุภาคในปริมาตรที่มีพื้นที่หนึ่งหน่วยและมีความเร็วเท่ากับความเร็วของการแพร่ของคลื่นอัลตราซาวด์ นั่นคือ

$$I = c.E_v \quad (2.69)$$

หรือ
$$I = \frac{1}{2}c\rho v^2 \quad (2.70)$$

สำหรับการสั่นของอนุภาค ที่ทำให้เกิดการแพร่ของคลื่นความดัน ด้วยความเร็วของการแพร่ของคลื่นอัลตราซาวด์ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย (ρ) จะได้ความเร็วสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และแอมพลิจูด P_o คือ

$$P_o = c\rho v \quad (2.71)$$

ดังนั้น

$$I = \frac{1}{2}\left(\frac{P_o^2}{\rho c}\right) \quad (2.72)$$

หน่วยความเข้ม (Intensity) ของคลื่นอัลตราซาวด์ จะเป็น หน่วยของกำลังต่อหน่วยพื้นที่ (วัตต์ / ตารางเซนติเมตร) หาได้จากสมการ

$$\text{กำลังของอัลตราซาวด์} = \text{ความเข้ม} \times \text{พื้นที่ตัดขวางของลำคลื่นอัลตราซาวด์} \quad (2.73)$$

2.11 คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Wave) , [3]

อัลตราโซนิก (Ultrasonic) หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่ามนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วมนุษย์โดยเฉลี่ยได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 kHz เท่านั้น แต่พวกที่ยังอายุน้อยๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้น ปกติแล้วคำว่า อัลตราโซนิก จึงมักจะหมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไปจะสูงจนถึงเท่าใดไม่ใ้ระบุจำกัดเอาไว้

สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านความถี่อัลตราโซนิกมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจงเรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นก็ยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ทำให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวที่ทำให้กำเนิดเสียงความถี่นั้นเช่นคลื่นความถี่ 300 kHz ใน อากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ทำให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมาย คลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกจากตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่น แต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิก อย่างเช่น 40 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มิลลิเมตรเท่านั้น ซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ทำให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มาก คลื่นเสียงจะไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ หรือที่เราเรียกว่า มีทิศทางนั่นเอง

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกทำให้เรานำไปใช้งาน ได้หลายอย่างเช่น นำไปใช้ในการควบคุมระยะไกล (Ultrasonic Remote Control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic Cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยส่งแกว่งระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมาเครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นกับการใช้งาน เช่น ถ้าคลื่น เสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 kHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นไปกว่านี้ อากาศจะ ดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไป ลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีการทำ งานสั้น ๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz (10^9 Hz) ก็มีใช้กันในหลายอย่างการใช้งานที่ตัวกลาง ที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่ในอากาศ

อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกล โดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียง ย่านอัลตราโซนิกกระจายไปในอากาศได้ หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น มีชื่อเรียกเป็นภาษาเทคนิคว่า “อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์” (Ultrasonic Transducer) ในปัจจุบันอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์มีหลายแบบ ขึ้นกับหลักการที่ใช้แบบที่นิยมใช้กันมากได้แก่ แบบ piezoelectric (Piezo-electric Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกล โดยมีความถี่เรโซแนนท์คงที่อยู่ค่าหนึ่ง แบบแมกนีโตรสตริกทิฟ (Magnetostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่ สวมขดลวดนั้นอยู่ และแบบอิเล็กโตรสตริกทิฟ (Electrostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล

2.12 ทรานสดิวเซอร์ (Transducer)

ทรานสดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์หรือสิ่งประดิษฐ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานอย่างหนึ่งให้กลับกลายเป็นพลังงานอีกอย่างหนึ่ง ทรานสดิวเซอร์ทำให้ขอบเขตการทำงานของวิชาการทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กว้างขวางขึ้นซึ่งก็หมายถึง การทำให้เกิดประโยชน์มากขึ้นนั่นเอง จะขอยกตัวอย่างการทำงานของเครื่องขยายเสียงซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทุกคนรู้จักกันดีและใช้กันเป็นประจำ ในชีวิตประจำวันเครื่องขยายเสียงประกอบด้วยไมโครโฟน , ออดิโอแอมพลิไฟเออร์ และลำโพง เสียงไมโครโฟนทำหน้าที่รับเสียงพูด และเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและด้วยเสียงพูดธรรมดา นั้นไมโครโฟน จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียง ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.5 - 1 โวลต์ สัญญาณไฟฟ้านี้จะถูกขยายโดยออดิโอแอมพลิไฟเออร์ให้มีพลัง ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น คือมีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มเป็นจำนวน 10 หรือ 100 โวลต์ แล้วจึงทำหน้าที่ไปขับลำโพงให้ทำงานจนเป็นเสียงพูดที่ถูกขยายให้ดังขึ้นมากมายหลายเท่า จะเห็นได้ว่า ถ้าปราศจากทรานสดิว- เซอร์ คือ ไมโครโฟน และลำโพงเสียงแล้วจะไม่สามารถมีเครื่องขยายเสียงได้ ปัจจุบันทรานสดิว- เซอร์มีบทบาทมาก สามารถแปลงหรือเปลี่ยนพลังงานนาาชนิดให้เป็นพลังงานอีกอย่างหนึ่ง

2.12.1 ส่วนประกอบของทรานสดิวเซอร์

โดยทั่วไป ทรานสดิวเซอร์จะประกอบด้วยส่วนใหญ่ ๆ 2 ส่วน คือ

2.12.1.1 ส่วนที่รับพลังงาน (Receiving Part) ส่วนนี้ทำหน้าที่รับพลังงานแล้วทำหน้าที่ปรับปรุง หรือเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสม ตัวอย่างเช่น ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดความดันโดยอาศัยกลไกการเปลี่ยนแปลงอินดักเตนซ์ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยไดอะเฟรมสำหรับรับความดันจากไดอะเฟรมจะมีก้านไปต่อกับแกนของหม้อแปลง เมื่อความดันเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ แกนของหม้อแปลงเคลื่อนที่ จึงเป็นผลให้อินดักเตนซ์เปลี่ยนแปลง ส่วนต้นของทรานสดิวเซอร์ คือ ส่วนของไดอะเฟรมนั้น ถือได้ว่าเป็นส่วนที่รับพลังงาน เพราะทำหน้าที่รับการเปลี่ยนแปลง ความ ดัน และขยายหรือปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงของความดันให้เป็นการเคลื่อนที่ ซึ่งยังเป็น พลังงานชนิดเดียวกันอยู่ซึ่งไม่ได้ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลของความดันให้เป็นพลังงาน อย่างอื่น

2.12.1.2 ส่วนที่เปลี่ยนแปลงพลังงาน (Transducer Part) ส่วนนี้ของทรานสดิวเซอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนหรือแปลงพลังงาน จากตัวอย่างของทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดความดัน ที่กล่าวถึงข้างต้นนั้น ส่วนของหม้อแปลงคือทั้งแกนและทั้งขดลวด ถือได้ว่าเป็นส่วนที่เปลี่ยนแปลงพลังงาน เนื่องจากส่วนนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนจากพลังงานกลของความดันให้เป็นพลังงานไฟฟ้า คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอินดักเตนซ์ของหม้อแปลง จะทำให้เกิดคุณสมบัติอย่างหนึ่งของไฟฟ้า คือ ศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.12.2 การแบ่งชนิดของทรานสดิวเซอร์

เนื่องจากทรานสดิวเซอร์มีบทบาทกว้างขวางมากในการทำงาน ดังนั้นการแบ่งชนิดจึงมีได้หลายอย่างเช่นกัน ทั้งนี้อาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ กันในการแบ่ง

2.12.2.1 แบ่งตามความต้องการพลังงานของทรานสดิวเซอร์

- Active Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่สามารถสร้างพลังงานได้เอง เช่น โฟโตอิเล็กทริกเซลล์บางชนิด เมื่อได้รับพลังงานแสงจะสามารถปล่อยพลังงานไฟฟ้าได้เองเป็นต้น

- Passive Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ไม่สามารถสร้างพลังงานได้เอง ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก เช่น อินดักแทนซ์ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้หม้อแปลง จะไม่สามารถทำงานได้เอง ต้องจ่ายพลังงาน ไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดของทรานสดิวเซอร์ที่ใช้หม้อแปลง ทำให้ศักย์ไฟฟ้าทางเอาท์พุตสามารถเปลี่ยนแปลงได้

อย่างไรก็ดีการแบ่งเป็นแอ็คทีฟทรานสดิวเซอร์ อาจอาศัยหลักการที่อธิบายอีกอย่างหนึ่งได้ เช่นอาศัยว่าพลังงานของสัญญาณทางด้านอินพุตนั้น ถูกป้อนโดยอินพุตหรือไม่ ถ้าถูกป้อนจะเรียกว่า เป็นพาสทีฟทรานสดิวเซอร์ หรือถ้าพลังงานเอาท์พุตไม่ถูกป้อนโดยอินพุต จะเรียกว่าเป็น แอ็คทีฟทรานสดิวเซอร์ ดังนั้น ตามหลักการดังกล่าวนี้ แอ็คทีฟทรานสดิวเซอร์จึงเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการ พลังงานภายนอก แม้ว่าจะถูกควบคุมโดยสัญญาณอินพุตก็ตาม ตัวอย่างของทรานสดิวเซอร์ดังกล่าวคือ (Resistive Displacement Transducer) ซึ่งศักย์ไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุตถูกเลี้ยงโดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าไปยังรีซิสเตอร์ และการเคลื่อนที่ของหน้าคอนแทกเคลื่อนที่ (Sliding Contact) จะเป็นตัวกำหนดศักย์ไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุต ส่วนพาสทีฟ-ทรานสดิวเซอร์นี้ นั้นต้นตอของพลังงานทางด้านเอาท์พุตก็คือ สัญญาณอินพุตนั่นเอง ตัวอย่างเช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จัดได้ว่าเป็นพาสทีฟทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่าง รอยต่อของโลหะจะเป็นตัวสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า อีกนัยหนึ่งเทอร์มิสเตอร์ถือได้ว่าเป็นแอ็คทีฟทรานสดิวเซอร์ ทั้งนี้เนื่องจากต้องการพลังงานภายนอก เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจรบริดจ์เป็นตัวกำหนดเอาท์พุต

2.12.2.2 แบ่งตามกลไกการทำงาน ตัวอย่างของการแบ่งเช่นนี้ได้แก่

-Variable Resistance Transducer เป็น ทรานสดิวเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า ในขณะที่ทำงาน เช่น ทรานสดิวเซอร์ วัดความดันที่ใช้เส้นลวด ซึ่งเรียกว่า สเตรนเกจทรานสดิวเซอร์ (Strain-gage Transducer) เมื่อความดันเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เส้นลวดถูกยืดออกเป็นผลให้ ความต้านทานเพิ่มขึ้นและทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของ สัญญาณไฟฟ้าในที่สุด

- Variable Inductance Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงอินดักแตนซ์ในขณะที่ทำงาน ตัวอย่างเช่น ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดความดันซึ่งประกอบด้วย ไดอะเฟรมซึ่งต่อกับแกนของหม้อแปลง เมื่อความดันเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้แกนของหม้อแปลงเคลื่อนไป ทำให้อินดักแตนซ์เปลี่ยนแปลงไปในที่สุด

-Variable Capacitance Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของคาปาซิเตอร์ในขณะที่ทำงาน ตัวอย่างเช่น Displacement Transducer ที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ เมื่อมีการเคลื่อนที่จะทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงไป จึงมีผลทำให้ ค่า Dielectric ของคาปาซิเตอร์นั้นเปลี่ยนแปลงไปจึงเป็นผลให้คาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงไป

2.12.2.3 แบ่งตามชนิดของการเปลี่ยนพลังงาน

การแบ่งชนิดนี้ขึ้นอยู่กับว่าทรานสดิวเซอร์นั้นเปลี่ยนพลังงานชนิดหนึ่งให้เป็นพลังงานอีกชนิดหนึ่ง

- Mechano-Electric Transducer เป็น ทรานสดิวเซอร์ ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ไมโครโฟน ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลของคลื่นเสียงให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือ ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดความดัน จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลของความดันให้เป็นพลังงาน ไฟฟ้าเช่นกัน

- Electromechanical Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ตัวอย่างเช่น ลำโพง ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลของคลื่นเสียง

- Thermo-electrical Transducer เป็น ทรานสดิวเซอร์ที่เปลี่ยนพลังงานอุณหภูมิจากเป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เทอร์มิสเตอร์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่ารีซิสแตนซ์เปลี่ยนแปลงไปด้วย หรือ เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปทำให้ศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย

- Photo-electric Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น โฟโต -อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อได้รับแสงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า หรือ อนุภาคอาจเปลี่ยนความต้านทานหรืออาจเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าได้

นอกจากตัวอย่างดังกล่าวแล้ว ยังมีทรานสดิวเซอร์ต่าง ๆ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานอย่างหนึ่งให้กลายเป็นพลังงานอีกอย่างหนึ่งอีกมากมาย นอกจากนี้ ทรานสดิวเซอร์หลายชนิดยังอาศัยการเปลี่ยนแปลงพลังงานอีกอย่างหนึ่งให้เป็นอีกอย่างหนึ่ง แต่เป็นเพียงกลไกระหว่างทาง

เท่านั้น ตัวอย่างเช่น Displacement Transducer ซึ่งเป็นตัวต้นตอของแสงสว่างเพื่อส่องไปยังโฟโตเซลล์มีซัตเตอร์ซึ่งสามารถทำให้เคลื่อนที่ปิดกั้นทางเดินของแสงระหว่างดวงไฟกับโฟโตเซลล์ เมื่อจะวัดการเคลื่อนที่จะอาศัยผลจากการเคลื่อนที่นั้นไปเคลื่อนซัตเตอร์ด้วย ซึ่งหมายความว่าจำนวนแสงที่ส่องโฟโตเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้น ทรานสดิวเซอร์นี้จึงจัดอยู่ในชนิด Mechano-electric Transducer แต่มีกลไกการทำงานในส่วนกลางทางเป็นชนิด Photo-electric Transducer ด้วย

2.12.2.4 แบ่งตามการใช้ที่เป็นส่วนประกอบ

- Input Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่เป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งทางด้านอินพุทของระบบเครื่องมือ เช่น ไมโครโฟน ถือได้ว่าเป็นอินพุท ทรานสดิวเซอร์ของระบบเครื่องเสียง เป็นต้น

- Output Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่เป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งทางด้านเอาต์พุทของระบบเครื่องมือ เช่น ลำโพงถือได้ว่าเป็น เอาต์พุท ทรานสดิวเซอร์ของระบบเครื่องเสียง เป็นต้น

2.12.2.5 แบ่งตามชนิดของสัญญาณที่ใช้

- Analog Transducer ทรานสดิวเซอร์ส่วนใหญ่จะให้สัญญาณเอาต์พุทเป็นอนาล็อก

- Digital Transducer ทรานสดิวเซอร์ประเภทนี้จะให้สัญญาณเอาต์พุทเป็นดิจิทัล อย่างไรก็ตามไม่ได้ หมายถึง อนาล็อก ทรานสดิวเซอร์ (Analog to Analog Transducer) ที่มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter) เป็นส่วนประกอบ แต่หมายถึงทรานสดิวเซอร์ที่เป็นดิจิทัลจริง ๆ โดยมีเอาต์พุทเป็นดิจิทัลหรือในรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงใน ความถี่เรโซแนนท์ ของผลึกควอตซ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในความถี่นั้น สามารถแสดงได้โดยใช้การนับแบบตัวเลข (Digital Counter) ตัวอย่างที่ชัดเจนอีกอย่างหนึ่งคือ Displacement Transducer ที่มีแผ่นหมุนซึ่งสร้างรหัสไว้เป็นช่องทึบและช่องโปร่ง ถ้าหมุนแผ่นดังกล่าวให้ผ่านตัวตรวจจับทางแสง (Optical Detectors) จะสามารถได้เอาต์พุทเป็นดิจิทัล ซึ่งได้สัดส่วนกับการเคลื่อนที่ซึ่งต้องการวัดทรานสดิวเซอร์นี้ ทรานสดิวเซอร์นี้นิยมใช้กันมาก สำหรับวัดการหมุนของแกนของเครื่องบางอย่าง

2.12.2.6 แบ่งตามข้อมูลหรือความต้องการที่ใช้วัด เช่น Displacement

Transducer เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดการเคลื่อนที่นอกจากนี้ยังมีทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ, อัตราเร็ว, อัตราเร่ง, แรง, ความดัน และการไหล เป็นต้น

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแล้วมี 2 แบบ คือ Piezo-electric Transducer และ Magneto-stictive Transducer การที่จะเลือกใช้ทรานสดิวเซอร์ แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ ถ้าความถี่สูงกว่า 100Hz ควรจะเลือกใช้ทรานสดิวเซอร์แบบ Piezo - electric ทั้งเปียโซอิเล็กทริกและแมกนีโตสติกทิกที่เป็นที่ยอมรับกันว่าความแข็งแรงของช่องว่าง หรือ โพรงอากาศ (Cavittation) จะเพิ่มขึ้นขณะที่ความถี่ของอัลตราโซนิกจะลดลง และด้วยสาเหตุนี้เอง เครื่องทำความสะอาดแบบที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) จะมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ความถี่ต่ำ ๆ

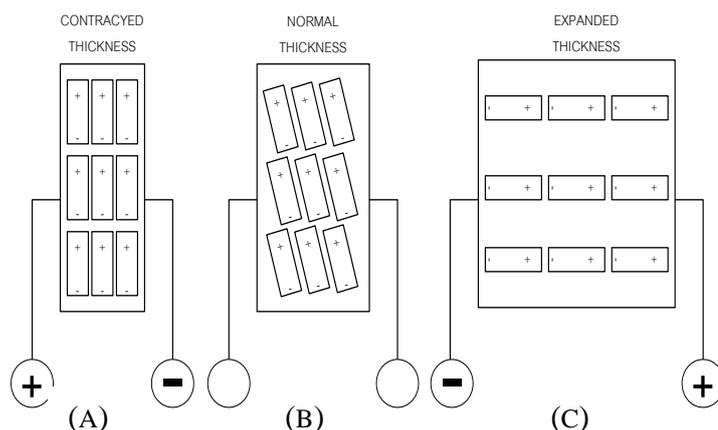
Magneto-stictive มีข้อได้เปรียบในด้านความแข็งแรงและยังมี High-curie Point ซึ่งสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูง Piezo-electric มีข้อจำกัดสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส และมีข้อได้เปรียบที่มีค่า Low-curie Point

2.12.3 คุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริก

เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแข็งประเภทของแข็งผลึก (Crystalline Solid) คือของแข็งเนื้อเดียวที่มีโครงสร้างของผลึกตามแบบรูปทรงเรขาคณิต ผิวหน้าเรียบและมีขอบตัดมุมระหว่างผิวหน้าเป็นมุมที่แน่นอน ลักษณะที่สำคัญของผลึก คือ มีการจัดเรียงของอนุภาคในผลึกที่ซ้ำกันไปทั่วทั้งผลึก

โครงสร้างภายในของผลึก (Crystalline Solid) หน่วยอนุภาคภายในโครงสร้างผลึกของของแข็งประเภทนี้เป็นโมเลกุล แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เรียกว่า แรงวานเดอร์วาลส์ (Vander-weals Force) และแรงดึงดูดระหว่างหน่วยอนุภาคจึงเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวกกับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ เรียกว่า แรงคูลอมบิก (Coulumbic Force) หรือแรงไฟฟ้าสถิตซึ่งมีการดึงดูดอย่างแรง โดยปกติแล้วโมเลกุลของผลึกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นของแข็งประเภทนี้ถึงแม้จะประกอบด้วยอนุภาคไฟฟ้าหรือไอออนทั้งโครงสร้างก็ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อใดที่อุณหภูมิของผลึกสูงกว่าอุณหภูมิที่เรียกว่า Curie Temperature ไอออนไฟฟ้าของโมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ คือ ไอออนที่มีประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน

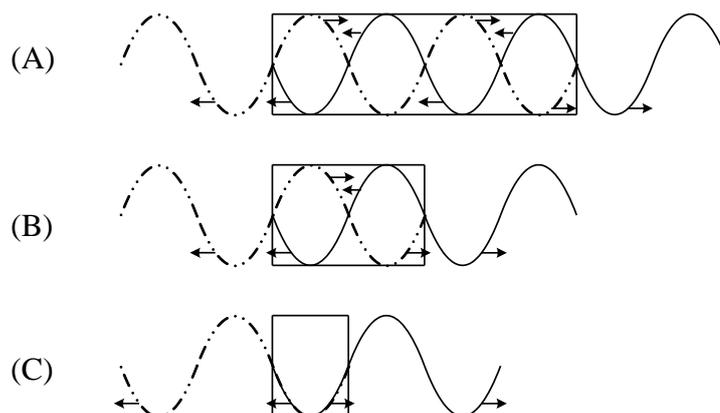
เวลานี้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลภายในผลึกได้โดยการตีแผ่แผ่นตัวนำเข้าที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของผลึก เมื่อใดที่มีแรงดันให้กับแผ่นตัวนำ โมเลกุลจะเกิดการบิดตัวไปอยู่ในแนวเส้นตรง โดยจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าและความหนาของผลึก ดู ภาพที่ 2.16 ประกอบ



ภาพที่ 2.16 การตอบสนองทางแรงดันของโมเลกุลภายในผลึกเมื่อความหนาของผลึกมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อกลับขั้วไฟฟ้าที่แผ่นตัวนำจะทำให้โมเลกุลบิดกลับไปทางตรงกันข้าม และเมื่อให้ขั้วไฟฟ้าของแผ่นตัวนำสลับไปมา โมเลกุลภายในผลึกและที่ผิวหน้าของผลึกก็จะเคลื่อนที่กลับไปกลับ มาเช่นเดียวกัน โดยเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า การสั่นทางกล (Mechanical Vibration) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นตัวนำจะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในทางกลของโมเลกุลและทำให้เกิดการสั่นสะท้อนกลับที่ Backing Material ทำให้ทรานสดิวเซอร์กำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิก (Pressure Waves) ออกมาขบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในทรานสดิวเซอร์ เรียกว่า Piezo-electric หรือ Electric-pressure Effect

ภายในผลึกคลื่นอัลตราซาวด์ จะเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง แล้วก็จะสะท้อนกลับในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ชนกับผิวของผลึก ตามธรรมดาแล้ว ความถี่ที่เกิดขึ้นภายในผลึกจะมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างผิวหน้าทั้งสองของผลึก ดังภาพที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์ภายในผลึกและความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ภายในผลึก

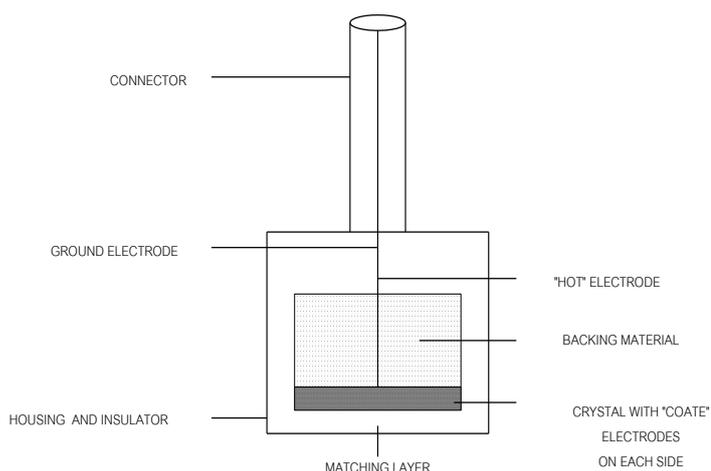
จากภาพที่ 2.17 จะเห็นว่าภายในผลึกจะมีคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งเคลื่อนที่สวนทางกันมีลักษณะคล้ายห่วงซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นภายในผลึก เรียกว่า ตัวเข้ม ทิศทางลูกศรใช้แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นตำแหน่งที่มีการสวนทางกันของลูกศร เรียกว่า ำ ตัวเข้มระยะห่างระหว่างผิวหน้าทั้งสองของผลึก จะต้องเท่ากับครึ่งของความยาวคลื่น หรือความหนาของผลึก จะต้องเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เกิดภายในผลึก จึงทำให้คลื่นอัลตราซาวด์ที่เกิดขึ้นภายในผลึกมีเฟสเดียวกัน และได้คลื่นอัลตราโซนิกที่สม่ำเสมอออกมา ตัวอย่างเช่น ถ้าเราป้อนความถี่ 1.5 MHz และความเร็วยของคลื่นที่เดินทางในผลึกมีค่าเท่ากับ 4000 m/s ให้กับทรานสดิวเซอร์ จากสูตร $\lambda = v/f$ ดังนั้นจะได้ความยาวคลื่น 2.7 มิลลิเมตรเกิดขึ้นภายในผลึก ดังนั้นที่ความถี่เดียวกันและความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำจะมีค่าเท่ากับ 0.98 มิลลิเมตร ดังนั้นความแตกต่างของความยาวคลื่นระหว่างในผลึกและในน้ำ เกิดขึ้นเพราะความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านตัวกลางทั้งสองแตกต่างกันเพื่อให้ได้คลื่นอัลตราโซนิกคงที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จะต้องให้ความหนาแน่นของผลึกเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นภายในผลึก และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งานก็จะต้องเปลี่ยนหัวทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากค่าความสัมพันธ์กับความหนาของผลึก ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่า ทำไมเครื่องล้างอุปกรณ์จึงต้องมีความถี่ใช้งานในช่วงหนึ่งเท่านั้น

โดยทั่วไปวัสดุที่กำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์จะเป็นพวก PZT (Lead Zirconate Titanate) ได้แก่ Barium Titanate และ Lithium Sulfate เป็นต้น

2.12.4 โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์

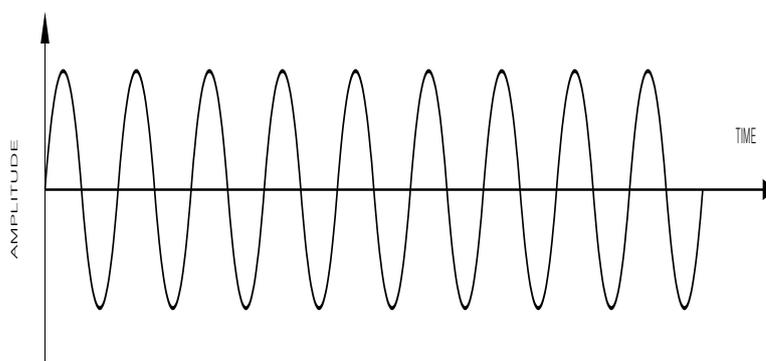
จะเห็นว่าป็นเหมือนกระป๋องใบหนึ่งภายในประกอบด้วยธาตุ คริสตัล (Crystal) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezo electric) อาจทำได้ด้วย Quartz หรือ Lithium Titanate ก็ได้

ที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของผลึก (Crystal) ถูกฉาบด้วยแผ่นตัวนำ (Electrodes) และบรรจุในวัสดุที่สามารถป้องกันเสียงสะท้อนได้ดีและห่อหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน อีกทีหนึ่ง ดูภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้เป็นชนิด Barium Titanate เป็นผลึกซึ่งจะต้องการแรงดันทางด้านอินพุตประมาณ 20 Vac พลังงานที่ทรานสดิวเซอร์ปล่อยออกมาต่อหน่วยพื้นที่ จะเท่ากับ 3 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ลักษณะของรูปสัญญาณที่ทรานสดิวเซอร์ปล่อยออกมา จะสอดคล้องกับผลทางธรรมชาติ คือ ได้คลื่นอัลตราซาวด์ ดังภาพที่ 2.19

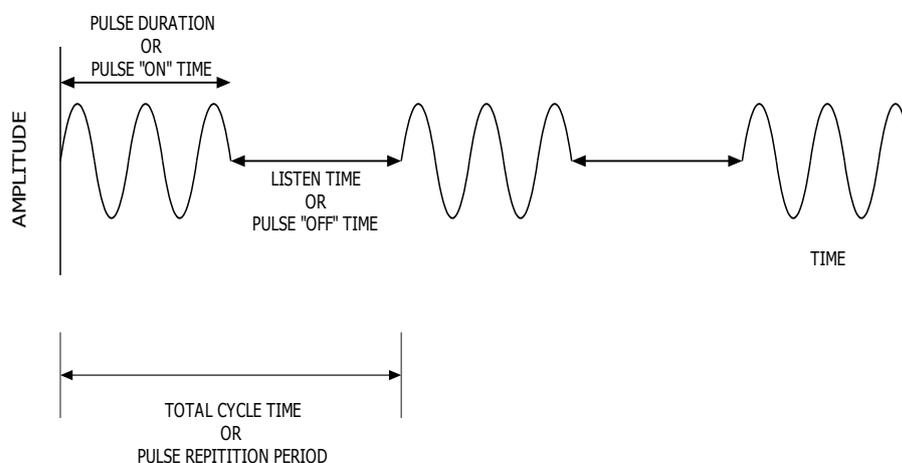


ภาพที่ 2.19 ลักษณะสัญญาณที่ออกมาจากหัวทรานสดิวเซอร์ทางอุดมคติ

ลักษณะการเกิดของคลื่นอัลตราซาวด์ที่เอาท์พุทของทรานสดิวเซอร์ จะมีจังหวะเดียวกับการสั่นของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในผลึก (Crystal) การสั่นจะเกิดขึ้นสูงสุดที่ตำแหน่งเชื่อมต่อระหว่าง Backing Material กับผลึก

Backing Material ทำมาจากการนำเอาภาวยางสนผสม กับผงทั้งสแตนท์ที่ระหว่าง Backing Material กับผลึกมีห้องเล็ก ๆ ภายในบรรจุอากาศ ให้คลื่นอัลตราซาวด์สะท้อนออกมา เสียงที่ได้ยินในขณะที่เครื่องกำลังทำงาน จะเกิดมาจากห้องเล็ก ๆ นี้ ความไวของทรานสดิวเซอร์จะลดลงเมื่อ ค่า Damping เพิ่มขึ้น (Low frequency) และความเข้มและกำลังของ คลื่นอัลตราซาวด์ (Intensity of Ultrasound) จะเพิ่มขึ้น และเมื่อ Damping ลดลง

(High Frequency) คลื่นอัลตราซาวด์จะสะท้อนได้ดีถ้ามีอากาศเป็นตัวกลาง แต่อากาศเป็นตัวกลางที่เลว สำหรับการเดินทางของคลื่นอัลตราซาวด์ไป ยังวัตถุของแข็งและของเหลวจะเป็นตัวกลางที่ดี ดังนั้นในการทำความสะอาดวัตถุจำเป็นต้องให้วัตถุจมอยู่ในของเหลว



ภาพที่ 2.20 ลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นภายในทรานสดิวเซอร์

จากภาพที่ 2.20 เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ถูกปล่อยออกมาจากหัวทรานสดิวเซอร์ ทรานสดิวเซอร์จะปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ช่วงสั้น ๆ ออกมามีความยาว 1 Cycle ตามด้วยคาบเวลา ขณะที่ไม่เกิดเสียงสะท้อนกลับ (Pulse Duration) อนุกรมกับเวลาที่เกิดเสียงสะท้อน และเรียกขบวนการทั้งหมดว่า Pulsed System

2.12.5 Pulse Repetition Frequency , Pulse Duration ,Pulse Length ,On Off Time และ Duty Factor

จำนวนครั้งที่ผลึกถูกกระตุ้นด้วยแรงไฟฟ้าต่อ 1 วินาที เรียกว่า Pulse Repetition Frequency (PRF) ค่าของ PRF มีความสัมพันธ์กับความเร็วของคลื่นอัลตรา-ซาวด์ในตัวกลางกับระยะทางที่คลื่นอัลตราซาวด์จะเดินทางไปถึงวัตถุตั้งสมการ

$$PRF = \frac{V}{D} \quad (2.74)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในตัวกลาง

D คือ ระยะทางที่คลื่นอัลตราซาวด์เดินทางไปถึงวัตถุ

Pulse Duration หรือ Temporal Pulse Length คือ ค่าของเวลาระหว่างระยะห่างจากยอดคลื่นความดันหนึ่งถึงยอดคลื่นถัดไปที่อยู่ติดกัน หรือ เรียกว่า เวลาของความยาวของคลื่นอัลตราซาวด์ Pulse Duration เป็นค่าเวลาจริงในช่วงเวลาที่ทรานสดิวเซอร์กำเนิด

คลื่นอัลตราโซนิกตำแหน่งของ Pulse Duration จะกำหนดโดยจุด Cut-off ที่ -20dB ซึ่งต่ำกว่าจุดที่มีขนาดความดันสูงสุด แสดงโดยลูกศร รูปที่ 2.20 ประกอบ

Pulse duration สามารถหาได้จากสูตร

$$\text{Pulse Duration} = N.\tau \quad (2.75)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของคาบเวลาใน 1 pulse wave output , τ คือ period

Spatial Pulse Length คือ ความยาวทั้งหมดของ Pulse Repetition สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Spatial Pulse Length} = N.\lambda \quad (2.76)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวของคลื่นอัลตราซาวด์

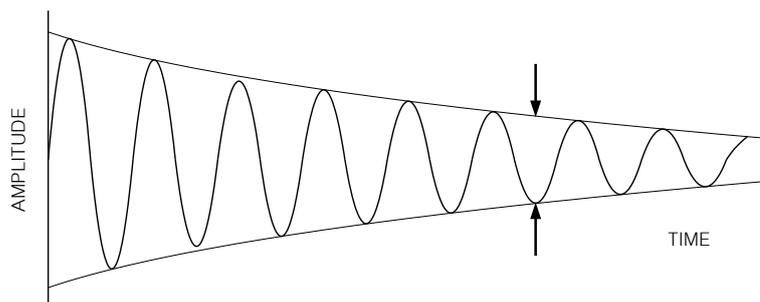
เวลาทั้งหมด (Pulse On Time) ของคลื่นอัลตราโซนิก สามารถหาได้จาก

$$\text{Pulse On Time} = N.PRF \quad (2.77)$$

Listen Time หรือ Pulsed Off Time สามารถหาได้จาก

$$\text{Total Cycle Time} = \text{Off Time} + \text{On Time} \quad (2.78)$$

เมื่อ Total Cycle Time มีค่าเท่ากับ 1 μSec



ภาพที่ 2.21 ลักษณะการกำหนดตำแหน่งของ Pulse Duration ที่จุด Cut-off

2.12.6 ทรานสดิวเซอร์แฟคเตอร์

ปัจจัยที่ทำให้เกิดกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ ของทรานสดิวเซอร์มีดังนี้

k คือ Electromechanical Coupling Coefficient

d คือ Transmission Coefficient

g คือ Reception Coefficient

ϵ คือ Dielectric Constant

z คือ Acoustic Impedance

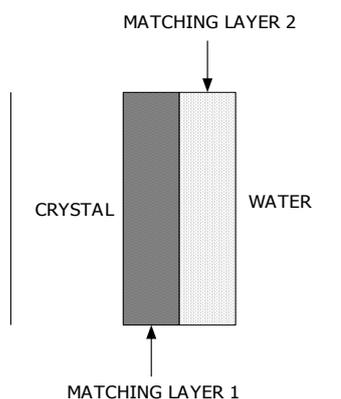
Q คือ Mechanical coefficient

ปัจจัยทั้งหมดมีผลกระทบต่อความสามารถของทรานสดิวเซอร์ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าคลื่นอัลตราโซนิก คือ z และ Q

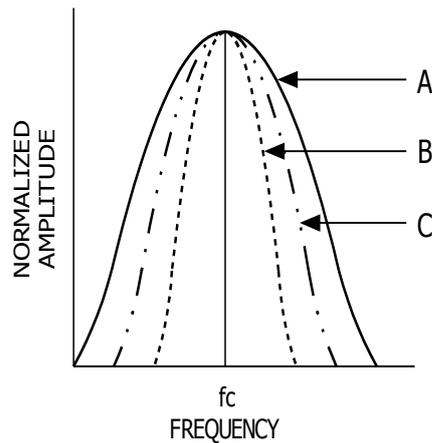
z (Acoustic Impedance) คือ การทำให้เกิดการ Matching กันและค่าคลื่นอัลตรา-โซนิกที่จะต้องเดินทางออกจากผลึก ไปยังวัตถุโดยผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำบริสุทธิ์ เพราะว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางที่คลื่นจะต้องเดินทางผ่านไป ดังนั้นที่รอยต่อระหว่างทรานสดิวเซอร์กับภาชนะ (Tank) และภาชนะกับน้ำ จะเกิดการผิผื่นของค่าคลื่นอัลตราโซนิก ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

ทางแก้ไขโดยการใส่ อุปกรณ์ที่เรียกว่า Matching Layer เข้าไประหว่างทรานสดิวเซอร์กับภาชนะดังภาพที่ 2.22 สามารถช่วยในการปรับลดความผิผื่นของค่าคลื่นอัลตราโซนิก ทำให้การส่งผ่านของค่าคลื่นอัลตราโซนิกที่ออกจากทรานสดิวเซอร์ไปยังวัตถุ โดยผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ Match กันมากที่สุด

การนำเอา Matching Layer มาต่อดังภาพที่ 2.22 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทาง Bandwidth จากภาพที่ 2.22 เมื่อช่วงกว้างของแถบความถี่ ขยายออกทางด้านข้าง ทรานสดิวเซอร์จะมีผลตอบสนองทางความถี่ได้ดี



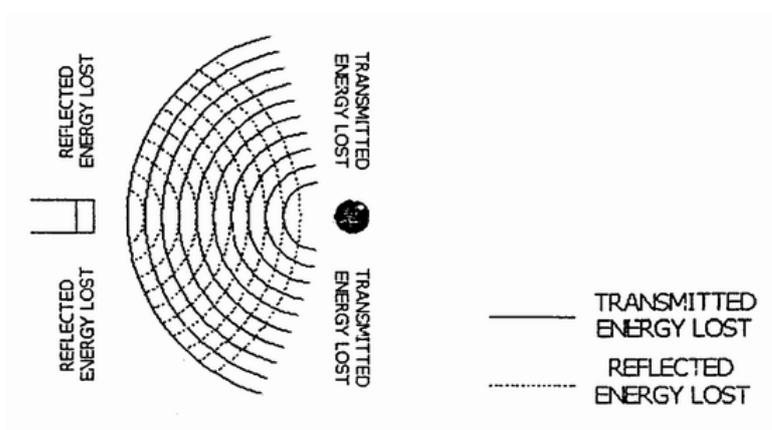
รูปที่ 2.22 การนำเอา Multiple Matching Layers เข้ามาช่วยปรับลดความผิผื่นของสัญญาณ



ภาพที่ 2.23 Frequency Spectrum (A) Ideal Transducer, (B) Single Matching Layer (C) Multiple Matching Layer

การแพร่ออกของลำคลื่นอัลตราโซนิก เป็นเหตุให้ความแรงของสัญญาณลดลง และเมื่อจำนวนพลังงานที่แพร่ออกกว้างเกินไป เกินกว่าขนาดของวัตถุตั้งนั้นจำนวนของพลังงานที่ตกกระทบลงพื้นที่ 1 หน่วย จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับและความแรงของสัญญาณที่สะท้อนกลับจะลดลง ถ้าระยะทางระหว่างทรานสดิวเซอร์กับวัตถุเพิ่มขึ้น หรือ ความถี่ต่ำลง กำลังงานที่สะท้อนกลับมายังมีลักษณะการกระจายออก เหมือนกันกับเมื่อตอนที่ออกจากหัวทรานสดิวเซอร์อีกด้วย เรียกพลังงานที่สะท้อนกลับนี้ว่า “ Miss “ ของคลื่นอัลตราโซนิก แสดงดังภาพที่ 2.24

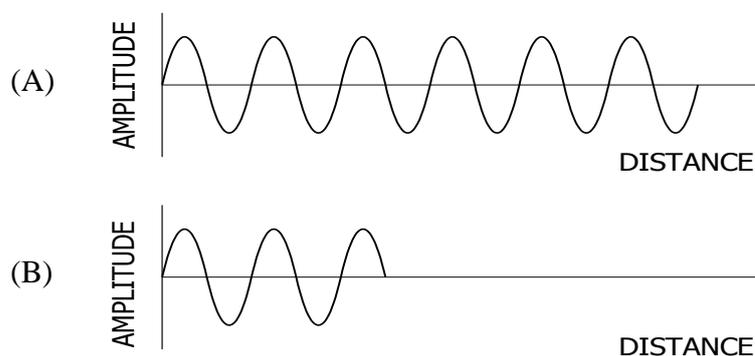
จากภาพที่ 2.24 จะเห็นว่ากรการกระจายออกของลำคลื่นเป็นสาเหตุให้ค่าความหนาแน่นของคลื่นอัลตราโซนิก ระหว่างหัวทรานสดิวเซอร์กับวัตถุที่ลดลง



ภาพที่ 2.24 ลักษณะการแพร่ออกของลำคลื่นอัลตราโซนิก และการลดทอนของสัญญาณ เนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิก

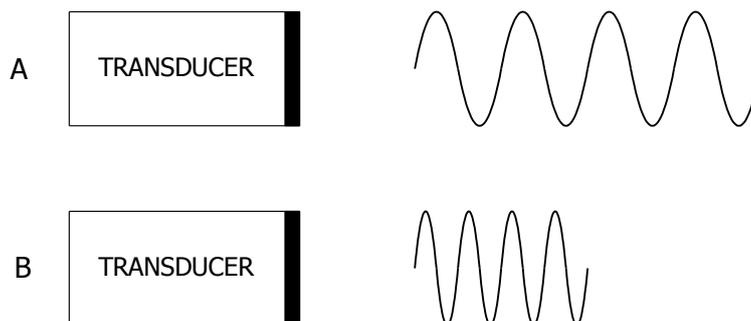
ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า Matching Layer ที่ต่อดังภาพที่ 2.22 สามารถช่วยแก้ปัญหาการกระจายออกของลำคลื่น และทำให้การส่งผ่านของลำคลื่นอัลตราโซนิกออกจากทรานสดิวเซอร์ไปยังวัตถุ โดยผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ Match กันมากที่สุด

Q (Mechanical coefficient) คือ การตอบสนองความถี่ของทรานสดิวเซอร์ ค่าของ Q จะเกี่ยวกับลักษณะพิเศษ Damping กับระยะทางหรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าของ Q หมายถึงการเก็บกำลังงานต่อคาบเวลาแยกกันโดยกำลังงานที่ลดลงไปต่อคาบเวลาที่ ค่า Q สูงๆ หมายความว่า พลังงานส่วนใหญ่จะถูกเก็บไว้และมีการสูญเสียน้อยมากในแต่ละคาบเวลา ดังภาพที่ 2.25 A ที่ความถี่สูง ค่าของ Q จะมีค่าต่ำลง จะได้อัลตราโซนิกคลื่นสั้นออกมา และพลังงานส่วนใหญ่สูญเสียไปในแต่ละคาบเวลา ดังภาพที่ 2.25 B



ภาพที่ 2.25 ลักษณะความยาวคลื่น (รูป A) 6 ลูกคลื่นขณะที่ค่า Mechanical Coefficient สูงที่ความถี่ต่ำ (รูป B) 2.5 ลูกคลื่นขณะที่ค่า Mechanical Coefficient ต่ำที่ความถี่สูง

ประโยชน์ของอัลตราโซนิก ที่ความถี่ต่ำจะใช้ได้ดีมากในการรักษากล้ามเนื้อ เนื่องจากมีพลังงานต่อหน่วยพื้นที่สูง Mechanical Coefficient จะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่าง Backing Material กับ Crystal โดยที่ค่าความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดค่าของ Damping และการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ คือ ค่าความถี่สูง ความยาวของคลื่นอัลตรา - โซนิกจะลดลง ดังภาพที่ 2.26



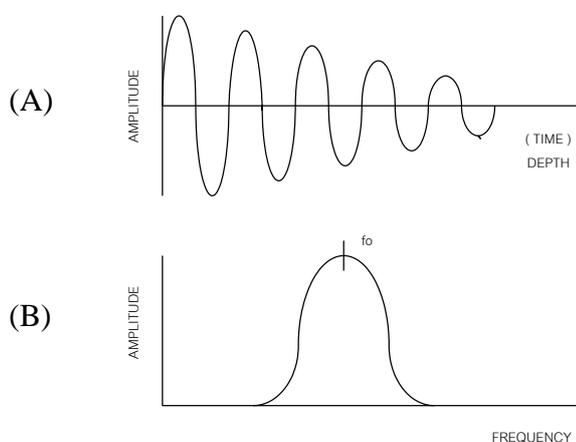
ภาพที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นขึ้นอยู่กับค่าความถี่

ที่ความถี่สูงจะเกิดการกระจายออกทางด้านข้างของคลื่นอัลตราโซนิก และเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางไปกระทบกับวัตถุจะเกิดการสะท้อนกลับในทิศทางตรงกันข้าม และมีลักษณะการกระจายออก ทำให้พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ลดลง

Frequency Spectrum สามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาขนาดของแอมพลิจูดกับเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิก ใช้เดินทางไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมายังแหล่งกำเนิดโดยการแปลงฟูเรียร์ในการวิเคราะห์ที่ความถี่กลาง คือแสดงลักษณะการตอบสนองของความถี่ทรานสดิวเซอร์ อย่างสอดคล้องโดยจะขึ้นอยู่กับความหนาของผลึกช่องของความถี่ที่กำหนดโดยค่าของ Q ตามสูตร

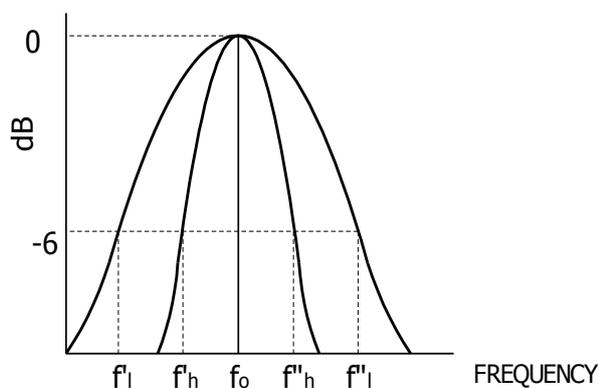
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2.79)$$

เมื่อ Δf คือ ช่วงกว้างของแถบความถี่ที่ 6 dB ในแต่ละข้างของ f_0



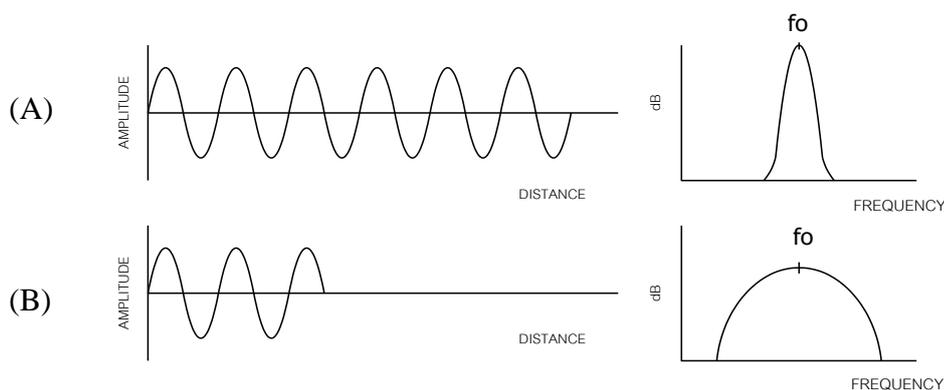
ภาพที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลื่นอัลตราซาวด์เดินทางกับ Frequency Spectrum

จะเห็นว่าจากสูตร Q มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงกว้างของแถบความถี่ จะแคบลงในทางกลับกันค่า Q มีค่าต่ำลงจะทำให้ช่วงกว้างของแถบความถี่ ขยายออกทางด้านข้างและจะทำให้ทรานสดิวเซอร์กำเนิดคลื่นสั้นซึ่งทำให้ง่ายต่อการ Match กับส่วนอื่น ๆ ของระบบอัลตราโซนิก ในขณะที่ความไวของระบบจะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.28 สเปกตรัมช่วงของความถี่ที่ถูกกำหนดโดยค่าของ Mechanical Coefficient

จากภาพที่ 2.28 จะเห็นว่า ถ้าค่า Q ต่ำ Bandwidth จะกว้าง และถ้า Q มีค่าสูง Bandwidth จะแคบลง



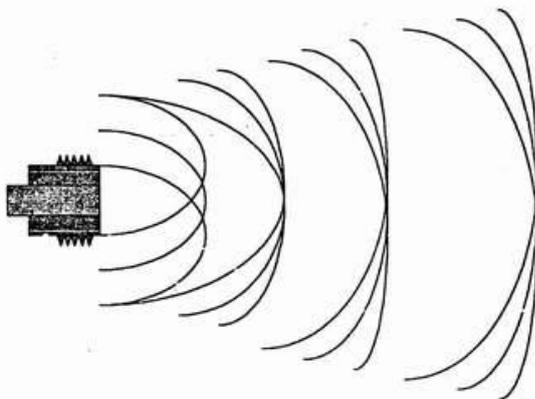
ภาพที่ 2.29 แสดงสเปกตรัม

(A) High-Q (ความถี่ต่ำ) , (B) Low-Q (ความถี่สูง)

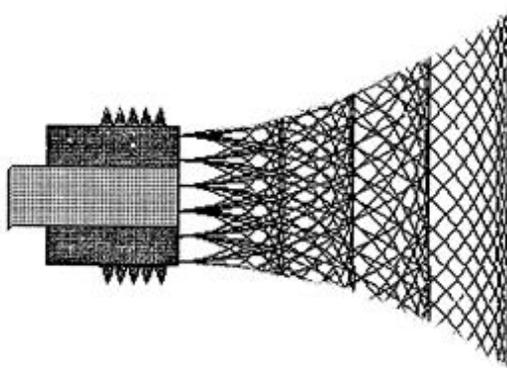
เมื่อค่า Q ลดลง ทรานสดิวเซอร์จะให้กำเนิดความยาวคลื่นสั้น จาก ภาพที่ 2.29 จะสังเกตเห็นว่า ช่วงกว้างของแถบความถี่จะขยายออกทางด้านข้าง และในทางตรงกันข้าม Q จะเพิ่มมากขึ้นทรานสดิวเซอร์ให้ช่วงกว้างของแถบความถี่ลดลงวัตถุจะมีการดูดกลืนพลังงานน้อยกว่าและช้ากว่าที่ความถี่สูง

2.12.8 สนามอัลตราโซนิก

ถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก มีลักษณะเป็นทรงกลมความยาวคลื่น 1 ลูกคลื่นจะเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมของ แหล่งกำเนิดลำคลื่นอัลตราโซนิก จะถูกส่งออกมาอย่างรวดเร็ว และมีการกระจายทางด้านข้าง ดังภาพที่ 2.30 ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่าของความยาวเดิม ดังภาพที่ 2.31



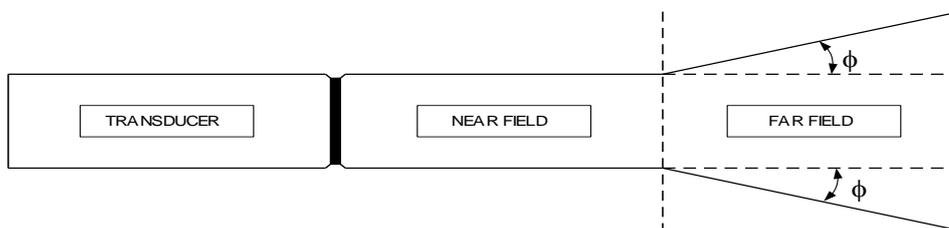
ภาพที่ 2.30 ลักษณะคลื่นอัลตราซาวด์ที่แพร่ออกจากแหล่งกำเนิดขนาด 1 หน่วย



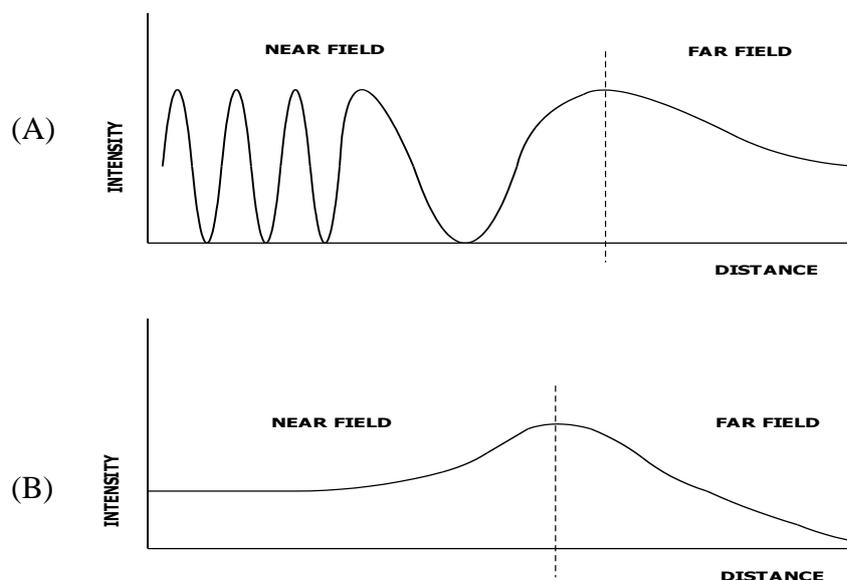
ภาพที่ 2.31 ลักษณะคลื่นอัลตราซาวด์ที่แพร่ออกจากแหล่งกำเนิดขนาด 10 หน่วย

เมื่อพิจารณาในแต่ละหน่วยเล็ก ๆ จะสังเกตเห็นว่าทุกหน่วยได้ให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก รูปทรงกระบอกออกมาข้อกำหนดนี้เป็นกฎของ Huygen ลำคลื่นเหล่านี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วแทรกแซงเข้าไป ในลักษณะลวดลายของลำคลื่นที่แสดงในภาพที่ 2.31 เกิดขึ้นเนื่องจากเหตุผลหลายประการ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วและจาก ภาพที่ 2.31 สังเกตพื้นที่ที่ไม่มีมีการกระจายออกของลำคลื่นทางด้านข้างเป็นบริเวณที่มีการไขว้ผ่านกันของคลื่นบางลง และจะเกิดการกระจายออกด้านข้าง เป็นบริเวณที่มีการไขว้ผ่านกันของคลื่นอย่างหนาแน่น บริเวณนี้เรียกว่า

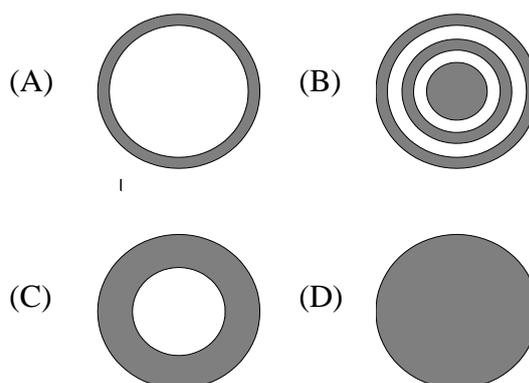
Near Field ที่ระยะห่างออกไป การไขว้ผ่านกันของคลื่นบางลงและเกิดการกระจายออกทางด้านข้างเพิ่มมากขึ้นบริเวณนี้เรียกว่า Far Field ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 ลักษณะ Diagram ของช่วง Near Field และ Far Field



ภาพที่ 2.33 การเกิดคลื่นความดันสูงในบริเวณ Near Field ที่ความถี่ต่ำ (รูปB) แสดงให้เห็นการลดลงของคลื่นความดันในบริเวณ Near Field ที่ความถี่สูง



ภาพที่ 2.34 ภาพตัดขวางจากด้านบนของการอัดตัวและขยายตัวของน้ำที่ความถี่ต่ำ (A , B)

จากภาพที่ 2.34 แสดงถึงบริเวณ Near Field ที่มีการไขว้ผ่านกันของคลื่นอย่างหนาแน่น ทำให้น้ำเกิดการอัด และขยายตัว (รูป C) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของน้ำ ในช่วงของ Far Field (รูป D) แสดงลักษณะการไขว้ผ่านกันของคลื่นลดลงทำให้เกิดการอัดตัวของน้ำลดลง

จากภาพที่ 2.34 (A) ถ้าความดันเกิดขึ้นตามแกนตั้งที่ความถี่ต่ำลำคลื่นอัลตราโซนิกจะเกิดการสลับกันระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดในบริเวณ Near Field และในเวลาเดียวกันหลังจากที่ ลำคลื่นเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุดก็จะลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งจะเป็นการเริ่มต้นของช่วงการเกิด Far Field ภาพที่ 2.34 (A) และ (B) ประกอบ ในบริเวณ Near Field โมเลกุลของน้ำจะมีการเคลื่อนตัวที่ เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบขอกเกี่ยวซึ่งอาจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ต่อ 100 หรือ 1 ต่อ 10 ของการเกิดการไขว้ผ่านกันของคลื่นอัลตราโซนิกทั้งหมด ที่ความถี่สูงจะทำให้เกิด Near Field มีการไขว้ผ่านกันของคลื่นลดลง ทำให้น้ำเกิดการอัดตัวกันลดลง หรือเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณ Near Filed ดังภาพ 2.34 (B)

เมื่อความลึกของบริเวณ Near Field ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกและความยาวคลื่น ดังนั้นสามารถคำนวณหาความลึกหรือ บริเวณการเกิด Near Field ได้จากสูตร

$$D = \frac{r^2}{\lambda} = \frac{d^4}{4\lambda} = \frac{d^2 f}{4v} \quad (2.80)$$

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น
 r คือ รัศมีของผลึกทรงกลม
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกทรงกลม
 v คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง
 f คือ ความถี่

ถ้าความยาวคลื่นลดลงจะทำให้ความลึก หรือบริเวณของการเกิด Near Filed เพิ่มขึ้น

2.13 เปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezo-electric Transducer)

เปียโซอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Piezo-electric Effect) ถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880 แต่เปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezo-electric Transducer) ได้มีใช้กันทั่วไปเมื่อประมาณ 30 ปี มาแล้ว ได้มีการสร้างทรานสดิวเซอร์ใหม่ๆ เพื่อวัดการเคลื่อนไหวของแรงและความดันโดยการใช้เปียโซอิเล็กทริกคอนสแตนต์ (Piezo-electric Constant) ของวัสดุกับความเครียดที่ได้รับค่าคงที่นั้นขึ้นอยู่กับการนำมาใช้งาน ถึงแม้ จะได้มีการนำผลึกควอทซ์มาใช้งาน แต่ยังมีเซรามิกที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น ได้นำมาใช้

เนื่องจากมีค่าคงที่ของ เพียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric Constant) สูงกว่า , ให้เอาที่พูดมากกว่า และมีผลกระทบที่น้อยต่อสถานะแวดล้อม เช่น ความถี่ของแรงและการเคลื่อนไหว เซรามิก พวกลอด เซอร์คอนเนท ไตทานเนท (Lead Zirconate Titanate) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางรวมทั้งเซรามิกอื่น ๆ ที่ใช้สร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในทางอิเล็กทรอนิกส์ของสิ่งที่มีชีวิต อิเล็กเตรทไมโครโฟน (Electret Microphones) ก็ได้ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมโดยเฉพาะทางการติดต่อสื่อสารด้วย

เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีทรานสดิวเซอร์ซึ่งมีน้ำหนักเบาไว้เพื่อใช้วัดข้อมูลทางสรีรวิทยา โดยใช้ผลึกควอทซ์เพื่อทำหน้าที่วัดความดันที่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย พบว่ามีความแข็งแรงกว่าและคงทนกว่าทรานสดิวเซอร์ ซึ่งใช้กันแต่เดิมซึ่ง ใช้ ทินเมททอล ไดอะแฟรม (Thin-metal Diaphragm) ทรานสดิวเซอร์ที่ทำด้วยผลึกควอทซ์ดังกล่าวนี้มีความทนทาน สามารถฆ่าเชื้อโรคโดยใช้ก๊าซ หรือแม้แต่ใช้แปรงหรือผงซักฟอกทำความสะอาดได้ โดยไม่ทำให้ความแม่นยำของทรานสดิวเซอร์เปลี่ยนแปลงไป ทางด้านลักษณะรูปร่างนี้ นทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ผลึกควอทซ์ มีลักษณะเป็นแผ่นแบนมากกว่าจะเป็นรูปทรงกระบอกที่ใช้กันอยู่ ดังนั้นจึงสามารถติดกับแขนขาของผู้ป่วยได้สะดวก ได้มีการสร้างดิสโพสเอเบิลโดม (Disposable Dome) ที่ติดกับทรานสดิวเซอร์โดยอาศัยการลีดที่เพียงแต่ใช้การบิดอย่างง่ายเท่านั้น โดมดังกล่าวทำด้วยพลาสติกใส เพื่อให้สามารถมองเห็นฟองอากาศได้ง่าย เมื่อทำการวัดความดันของหลอดเลือด ทรานสดิวเซอร์ดังกล่าวสามารถต่อกับเพรสเชอร์แอมพลิไฟเออร์ (Pressure Amplifier) เพื่อใช้ในห้องผู้ป่วยหนัก ห้องผ่าตัด และห้องปฏิบัติการสำหรับการค้นคว้าหลายอย่าง อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกโพรบทำให้เกิดคลื่นการสั่นสะเทือนในร่างกายมนุษย์ ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางในการรักษาและวินิจฉัยโรค