

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา การเดินทางของคลื่นในตัวกลางต่างๆ พื้นฐานการกระจายความร้อนในเนื้อเยื่อ การหาค่าการดูดซับความร้อน และสมการความร้อนทางชีววิทยา (Bio-Heat Equation)

ในระบบไมโครเวฟนั้น ขนาดของสายอากาศที่ใช้จะมีขนาดสายอากาศสอดคล้องกับขนาดความยาวคลื่น $\lambda_{eff}/4$ โดยที่ λ_{eff} คือความยาวคลื่นในตัวกลางใดๆมีค่าเท่ากับ

$$\lambda_{eff} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r, tissue}} \quad (2.1)$$

เมื่อ

λ_{eff} คือ ความยาวคลื่นในตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อต่างๆ

c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8

f คือ ความถี่มีค่าเท่ากับ 2.45 GHz

$\epsilon_r, tissue$ คือ ค่าความนำทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ

2.1 ระบบควบคุม

2.1.1 ประวัติความเป็นมาและพัฒนากการของระบบควบคุม

ระบบควบคุมได้ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ ที่พอจะมีหลักฐานปรากฏให้เห็นก็คือระบบชลประทานที่มีการควบคุมระดับน้ำที่แจกจ่ายไปในพื้นที่เกษตรกรรม การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1760 โดยเจมส์ วัตต์ โดยเขาได้นำมาใช้ ในการออกแบบและควบคุมเครื่องจักรไอน้ำ และในงานอื่นๆที่เขาได้พัฒนาขึ้นในภายหลัง พัฒนาการของระบบควบคุมเริ่มเข้มข้นและจริงจังมากขึ้นในช่วงสมัยสงครามโลกครั้งที่สอง เพื่อพัฒนาอาวุธยุทโธปกรณ์ต่างๆให้ก้าวหน้ากว่าประเทศคู่แข่ง พัฒนาการของระบบควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ยุคหลักๆคือ

ระบบควบคุมดั้งเดิม (Classical Control Systems) เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นใน ช่วงแรกๆ ที่มีการนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักมาใช้ควบคุมระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนใหญ่ก็จะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ตัวอย่างของ

ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ ระบบควบคุมพีไอดี (PID Controllers) เสนทางเดินราก (Root Locus) แผนภาพโบด (Bode Plot) และแผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Plot) เป็นต้น

ระบบควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control Systems) เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงหลังๆอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้งานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ที่จำกัดการนำไปใช้งานกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วระบบมักจะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Systems) และแปรเปลี่ยนตาม เวลา (Time-variant Systems) โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมมักมี ข้อจำกัดในการใช้งานกับระบบประเภทนี้ จึงได้มีการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการควบคุมรูปแบบใหม่ๆขึ้นมา ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ระบบที่อาศัยรูปแบบของสมการสเตท (State Variable) ในการคำนวณ ระบบควบคุมความเหมาะสม (Optimal Control) ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ระบบควบคุมลูกผสม (Hybrid Control) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นต้น

2.1.2 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

ระบบ(System) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ ได้รวบรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน

ควบคุม(Control) หมายถึงการบังคับหรือสั่งการ

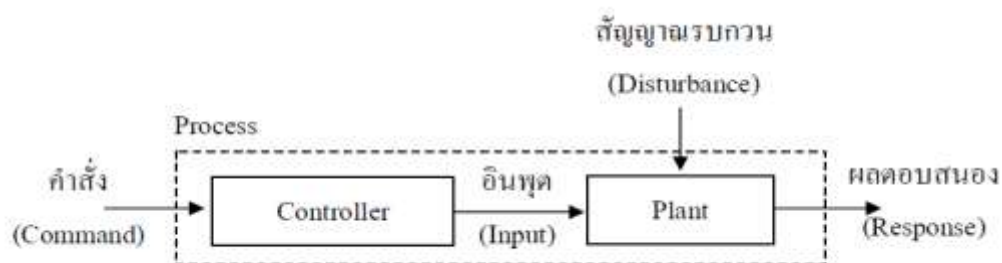
ระบบควบคุม(Control Systems) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ ได้รวบรวมสิ่งต่างๆเข้า ด้วยกัน เพื่อใช้บังคับหรือสั่งการเพื่อให้สิ่งใดสิ่งหนึ่งเป็นไปตามความต้องการ ตัวอย่างเช่นการควบคุมอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การควบคุมอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศ

2.1.3 รูปแบบของการควบคุม

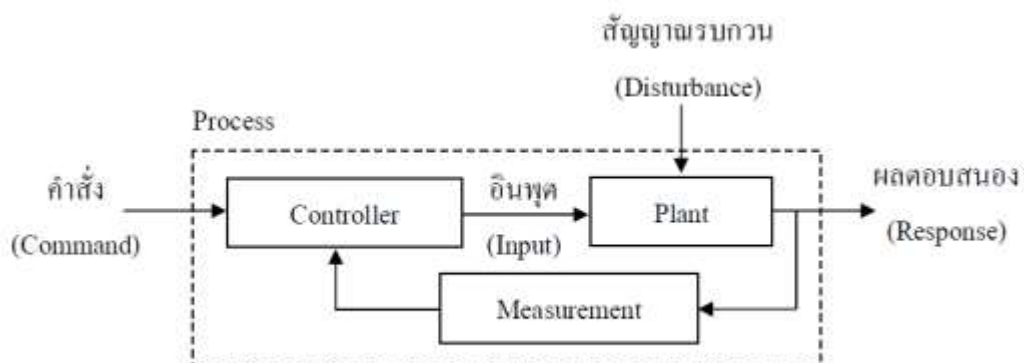
ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control)



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.3 ในการควบคุม แบบวงรอบเปิด ตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or referent) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่าเมื่อสิ่งที่ต้องการควบคุมได้รับสัญญาณป้อนแล้วนั้น ก็จะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้ได้ตามที่คาดหวังไว้โดยไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตจริง ว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่ ตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบเปิด ได้แก่ ตู้อบไมโครเวฟที่มีลักษณะการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า โดยที่ไม่มีการตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมาในรูปของสัญญาณไมโครเวฟนั้นว่าเป็นเท่าใดกันแน่ หรือออกมาได้เท่ากับที่ปรับตั้งไว้หรือไม่ ลักษณะการทำงานจึงเป็นวงรอบเปิด

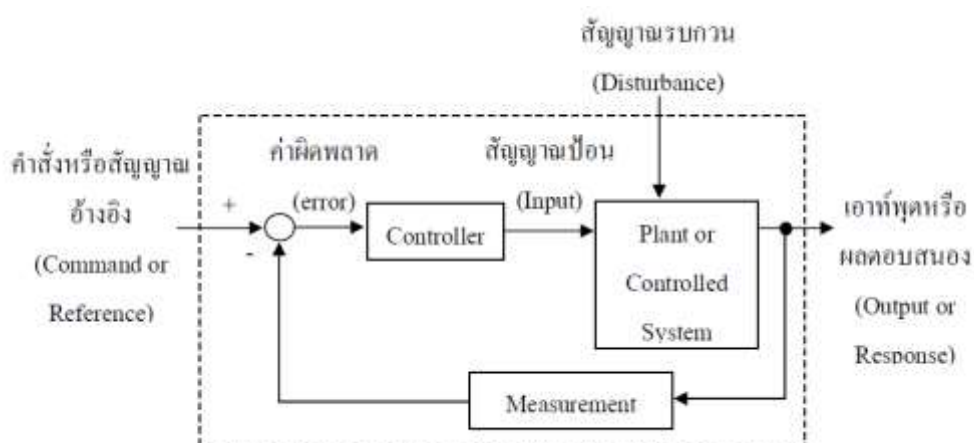
ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control)



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.4 ในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or Sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System under controlled or Plant) เพื่อที่จะให้ผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (Command or Reference)

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดอาจจะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ตามรูปที่ 2.5 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ แล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้ในการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม

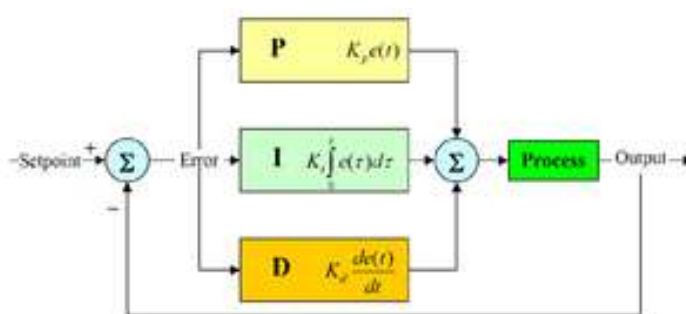


รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ตัวอย่างของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดได้แก่ เตาไรต์ ตู้เย็น หรือ เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น เตาไรต์มีสวิตช์เป็นไบเมทัลที่โก่งตัวเมื่ออุณหภูมิรอบๆตัวมันสูงขึ้น และใช้การโก่งตัวนี้เป็นสวิตช์ตัดต่อการทำงานของฮีตเตอร์ การทำงานจึงเป็นวงรอบปิด ส่วนตู้เย็นหรือ เครื่องปรับอากาศก็เช่นกัน มีเทอร์โมสตัทเป็นตัววัดอุณหภูมิภายในตู้และตัวเทอร์โมสตัทเองก็เป็น สวิตช์ควบคุมการตัดต่อคอมเพรสเซอร์ให้ทำงาน เมื่อคอมเพรสเซอร์ทำงานก็ทำให้เกิดความเย็น เป็นไปตามที่เทอร์โมสตัทตั้งค่าไว้

2.2 ระบบควบคุมพีไอดี

เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่า ความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะ พยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปร ของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี

วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ โดยค่าสัดส่วน จะกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนค่าพื้นฐานของผลรวม ความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไปและค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนค่าพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลง ของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการ ต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความ ผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง

ทฤษฎีการควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการที่ (2.2)

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ (2.3)

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.3)$$

เทอมของปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ (2.4)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

เทอมของอนุพันธ์จะเป็นไปตามสมการ (2.5)

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.5)$$

2.3 แหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟ (power supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด ไฟฟ้า. เป็นคำที่ใช้กันมากที่สุด ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากรูปแบบหนึ่ง ไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง แม้ว่ามันจะยังอาจหมายถึง อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานรูปแบบหนึ่ง (เช่นพลังงานกล, พลังงานเคมี, พลังงานแสงอาทิตย์) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟแบบควบคุมได้สามารถควบคุม แรงดันหรือกระแสเอาต์พุตให้มีค่าที่คงที่แน่นอน แม้ว่าโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงที่พลังงานที่อินพุตก็ตาม

แหล่งจ่ายไฟทุกตัวต้องได้รับพลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอกเพื่อจ่ายให้โหลดและการบริโภคพลังงานของตัวมันเองในขณะที่ปฏิบัติงาน แหล่งพลังงานภายนอกจะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ. แหล่งจ่ายไฟอาจจะได้รับพลังงาน จาก

1. ระบบสายส่งพลังงานไฟฟ้า อาจเป็นกระแสสลับ หรือกระแสตรงที่ได้จากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับให้เป็นกระแสตรง
2. อุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน เช่นแบตเตอรี่ และ เซลล์เชื้อเพลิง
3. ระบบเครื่องกลไฟฟ้า เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานกล เช่น Generator และ Alternator
4. พลังงานแสงอาทิตย์

แหล่งจ่ายไฟอาจถูกนำมาใช้แบบแยกส่วน หรือเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของโหลด เช่น แหล่งจ่ายไฟในคอมพิวเตอร์เดสก์ท็อป และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปสำหรับผู้บริโภค

2.3.1 คุณสมบัติเฉพาะที่ระบุไว้บนแหล่งจ่ายไฟ

1. ปริมาณของแรงดันและกระแสที่จะสามารถจ่ายให้กับโหลดได้
2. วิธีการที่จะทำให้แรงดันหรือกระแสเอาต์พุตมีเสถียรภาพ ภายใต้เงื่อนไขที่กระแสไฟฟ้าอินพุตและสถานะของโหลดที่เปลี่ยนแปลง
3. ระยะเวลาการใช้งานได้นานเท่าใดโดยไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงหรือหรือชาร์จประจุใหม่ (เฉพาะ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้แหล่งพลังงานแบบพกพา)

2.3.2 ประเภทของแหล่งจ่ายไฟ

แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกกว้างๆเป็นแบบความถี่ไฟฟ้าขาเข้า (หรือ "ธรรมดา") และ แบบสวิตชิ่ง แบบความถี่ มักจะมีการออกแบบที่ค่อนข้างง่าย แต่จะมีขนาดใหญ่และหนักสำหรับแหล่งจ่ายไฟกระแสสูง เนื่องจากความจำเป็นที่จะต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขาเข้าที่มีขนาดใหญ่ และวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์ความร้อนสูงที่ต้องการตัวระบายความร้อนขนาดใหญ่ แหล่งจ่ายไฟแบบธรรมดานี้ บางครั้งเรียกว่าแบบ "เชิงเส้น" แต่ที่ เรียกที่ชื่อผิด เพราะการแปลงจากแรงดันไฟฟ้า AC เป็น DC โดยเนื้อแท้แล้ว ไม่ใช่เชิงเส้น เมื่อ วงจรเรียงกระแสจ่ายไฟเข้าไปใน capacitor Linear voltage regulators จะผลิตแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตที่จะถูก regulated โดยวิธี voltage divider ที่บริโภคพลังงาน จึงทำให้มีประสิทธิภาพต่ำ แหล่งจ่ายไฟแบบ switched-mode ที่ให้อาต์พุตเท่ากับแหล่งจ่ายไฟธรรมดาจะมีขนาดเล็กกว่า มีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่จะซับซ้อนมากขึ้น

2.3.3 แหล่งจ่ายไฟ DC

แหล่งจ่ายไฟ DC ที่ไม่ควบคุมปกติจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงดันจากผนัง (ไฟบ้าน) ให้ต่ำลงให้ได้แรงดันที่ต้องการ ถ้าต้องการผลิต แรงดัน DC วงจรเรียงกระแส จะใช้ในการ แปลงแรงดันไฟฟ้าสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตรง(ยังเป็นรูปคลื่นอยู่) ตามด้วยตัวกรองประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน อย่างน้อยหนึ่งตัว และบางครั้งมี ตัวเหนี่ยวนำด้วยเพื่อ ทำการกรอง (ทำให้เรียบ) ของคลื่นเหล่านั้น คลื่นขนาดเล็กที่เหลือจากการกรองหรือที่เรียกว่า ripple นี่เป็นสิ่งที่พึงประสงค์ ซึ่งอาจมีความถี่น้อยหรือมากกว่าความถี่จาก AC input (ขึ้นอยู่กับวิธีเรียงกระแสว่า จะเป็นแบบครึ่งคลื่น หรือ เต็มคลื่น) ripple นี้จะเข้าไปบนแรงดันไฟฟ้าตรง อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ในวัตถุประสงค์ เช่นการชาร์จแบตเตอรี่, ripple ไม่ได้เป็นปัญหาและแหล่งจ่ายไฟที่ง่ายที่สุด อาจเป็นเพียงหม้อแปลงแรงต่ำที่มีไดโอดตัวเดียวกับความต้านทานอีกหนึ่งตัวต่ออนุกรมอยู่ก็ได้

ก่อนที่จะมีการนำอุปกรณ์แบบ solid-state มาใช้, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะใช้วาล์ว (หลอดสุญญากาศ) ซึ่งต้องการแรงดันสูง แหล่งจ่ายไฟจะใช้หม้อแปลงแบบ step-up, วงจรเรียงกระแส และตัวกรอง เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าตรงหลายระดับ หลายร้อยโวลต์ และแรงดันกระแสสลับเพื่อจุดใส่หลอด เฉพาะอุปกรณ์ที่ทันสมัยที่สุดเท่านั้นที่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟควบคุมที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง



รูปที่ 2.7 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

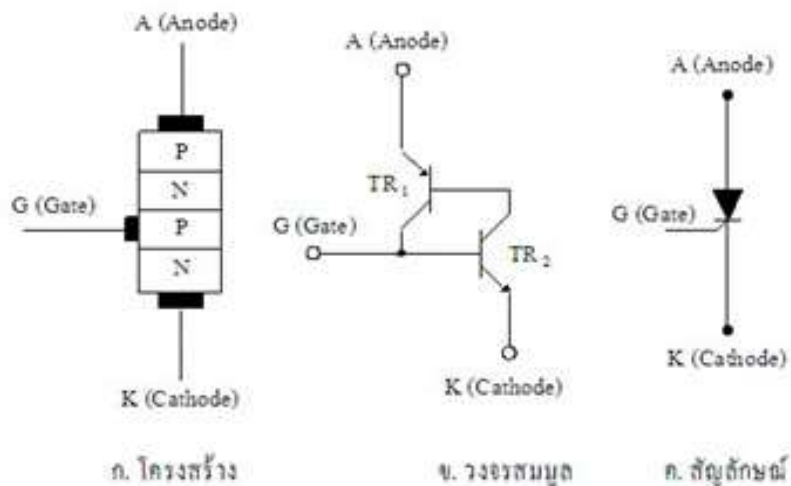
2.3.4 แหล่งจ่ายไฟ AC

แหล่งจ่ายไฟ AC ปกติจะใช้แรงดันไฟฟ้าจากเต้าเสียบ (ไฟบ้าน) และ ลดแรงดันลงในระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ บางครั้ง การกรองก็ต้องการเช่นกัน

แหล่งจ่ายไฟ AC สามารถผลิตไฟฟ้า AC ได้จากไฟ DC วงจรที่ใช้เปลี่ยนไฟ DC ให้เป็นไฟ AC เรียกว่า Inverter อินเวอร์เตอร์ทำงานด้วยอุปกรณ์ power switching ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำที่ควบคุมได้ รูปคลื่น AC ที่เอาต์พุตจึงมีค่าที่ไม่เกาะติดกัน เนื่องจากการแปลงทำงานอย่างรวดเร็ว แทนที่จะเป็นการแปลงอย่างราบรื่น ความสามารถในการสร้างรูปคลื่นใกล้เคียงรูปไซน์ที่มีความถี่ใกล้เคียงความถี่พื้นฐานถูกบังคับโดยใช้เทคนิคการมอดูเลชั่นที่มีการควบคุมตลอดเวลาที่ เพาเวอร์วอลล์เปิดและปิด เทคนิคการมอดูเลชั่นที่ใช้ได้แก่ carrier-based technique, หรือ pulse width modulation, space-vector technique, และ selective-harmonic technique.

2.4 SCR (Silicon Control Rectifier)

เอสซีอาร์ (SCR) ชื่อเต็มคือ ซิลิคอน คอนโทรล เร็คติไฟร์เออร์ (Silicon Control Rectifier) เป็นอุปกรณ์โซลิดสเตท (Solid-State) ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิด – ปิด (On – Off) วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง อีกทั้งเอสซีอาร์ ยังจัดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภท “ไทรสเตอร์” (Thyristor) ข้อดีของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์คือจะไม่มีหน้าสัมผัสหรือเรียกว่าคอนแทค (Contact) ขณะปิด – เปิด จึงไม่ทำให้เกิดประกายไฟที่หน้าสัมผัสจึงมีความปลอดภัยสูงซึ่งสวิตซ์ธรรมดา คือแบบกลไกที่มีหน้าสัมผัสจะไม่สามารถนำไปใช้ในบางสถานที่ได้ สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์บางครั้งเรียกว่า “โซลิดสเตท สวิตซ์” (Solid State Switch)



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

จากรูปโครงสร้างของเอสซีอาร์ (SCR) ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้นคือ พี – เอ็น – พี – เอ็น (P – N – P – N) มีจำนวน 3 รอยต่อ มีขาต่อออกมาใช้งาน 3 ขาคือ

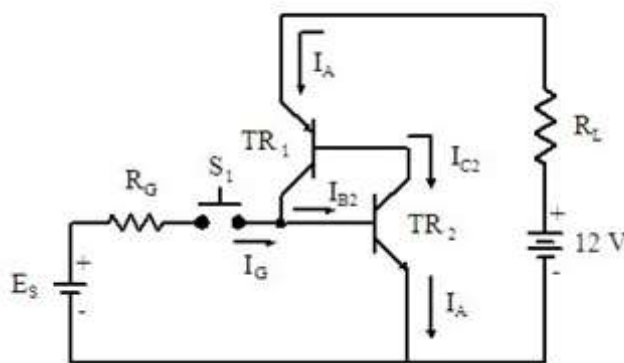
1. แอโนด (A : Anode)
2. แคโทด (k : Cathode)
3. เกต (G : Gate)

สภาวะการทำงานของเอสซีอาร์ (SCR) สามารถแบ่งการทำงานออกได้เป็น 2 สภาวะ คือ

1. สภาวะนำกระแส เรียกว่า ON
2. สภาวะหยุดนำกระแส เรียกว่า O

2.4.1 สภาวะนำกระแสของเอสซีอาร์

พิจารณารูปที่ 2.9 การที่จะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสสามารถทำได้โดยจุดชนวน เรียกว่า “ทริกเกอร์”(Trigger) ด้วยกระแสเกต (IG) ให้แก่เอสซีอาร์ (SCR) และที่ขั้วแอโนด (A) และแคโทด (K) ได้รับไบอัสตรงคือที่แอโนดได้แรงดันบวก (+) และที่แคโทดได้รับแรงดันลบ (-) ทำให้เกิดกระแส IB2 ไหลเข้าขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ TR2 ทำให้ TR2 อยู่ในสภาวะนำกระแส (ON) จะเกิดกระแสคอลเลคเตอร์ (IC2) ไหลผ่าน TR2 ซึ่งก็คือกระแส IB1 ของทรานซิสเตอร์ TR1 นั่นเอง ดังนั้น TR1 จึงนำกระแสด้วย ค่าความต้านทานระหว่างขั้วแอโนด (A) และแคโทด (K) จึงมีค่าต่ำมากเป็นผลให้เกิดกระแสแอโนด (IA) ไหลผ่านอีมิเตอร์ของ TR1 ไปออกที่อีมิเตอร์ของ TR2 สภาวะการทำงานของเอสซีอาร์เปรียบเสมือนสวิตช์ปิดวงจร



รูปที่ 2.9 แสดงการจุดชนวนให้เอสซีอาร์นำกระแส

เมื่อเอสซีอาร์นำกระแสแล้วไม่จำเป็นต้องคงค่ากระแสเกต (I_G) ไว้ตลอดไป สามารถลดค่ากระแสเกตให้เป็นศูนย์ ($I_G = 0$) หรือปลดกระแสเกตออกได้โดยที่เอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไป เพราะ I_{B2} ที่ไหลเข้าเบสของ TR_2 จะไหลมาจากคอลเลคเตอร์ของ TR_1 ดังนั้นถึงแม้จะไม่มีกระแสเกตเอสซีอาร์ก็ยังคงนำกระแสต่อไปได้

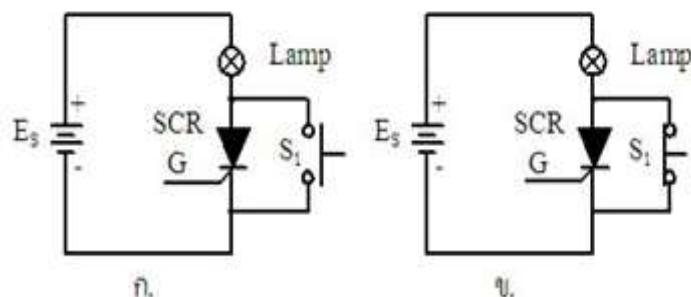
ในสภานำกระแสนี้ถ้าแหล่งจ่ายเป็นไฟกระแสสลับสามารถจะบังคับให้เอสซีอาร์นำกระแสได้มากหรือน้อยได้โดยเลือกมุมจุดชนวนที่เกตให้เหมาะสม

2.4.2 สภาวะหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์

วิธีการทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสมีหลักการคือ ทำให้กระแสแอโนด (I_A) ลดลงจนต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง (I_H : Holding Current คือค่ากระแสต่ำสุดที่ทำให้เอสซีอาร์นำกระแส) หรือ จึงจะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสได้ซึ่งการที่จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสมี 2 วิธีคือ

2.4.2.1 แอโนดเคอร์เรนท์อินเทอร์พชั่น (Anode Current Interruption)

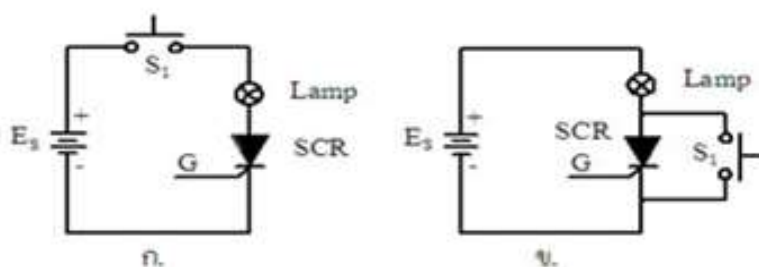
โดยการตัดกระแส I_A ไม่ให้ไหลผ่านแอโนดของเอสซีอาร์ วิธีง่ายๆ ดังรูปที่ 2.10 ก. โดยต่อสวิตช์อนุกรมแอโนด (A) ของเอสซีอาร์และเปิดสวิตช์เมื่อต้องการทำให้เอสซีอาร์หยุดทำงาน (Turn – Off) หรืออีกวิธีในรูปที่ 2.10 ข. โดยต่อสวิตช์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดของเอสซีอาร์เป็นการเปลี่ยนทางเดินของกระแสแอโนด (I_A) ไม่ให้ไหลผ่านเอสซีอาร์



รูปที่ 2.10 การทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธี anode Current Interruption

2.4.2.2 ฟอ์ชคอมมูเทชั่น (Forced Commutation)

วิธีนี้ทำได้โดยบังคับให้เอสซีอาร์ได้รับไบอัสกลับโดยใช้สวิตช์ขนานกับเอสซีอาร์เป็นตัวควบคุมการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ดังรูปที่ 2.11 ถ้าสวิตช์เปิดวงจรเอสซีอาร์ยังคงนำกระแสอยู่ แต่ถ้าสวิตช์ปิดวงจรเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแส เนื่องจากได้รับไบอัสกลับตลอดเวลาที่สวิตช์ยังคงปิดอยู่ โดยระยะเวลาในการบังคับให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยให้ไบอัสกลับนี้จะต้องนานกว่าระยะเวลา Turn Off Time ซึ่งระบุไว้ในคู่มือ โดยทั่วไปค่าเวลานี้จะน้อยมาก (ประมาณไมโครวินาที)

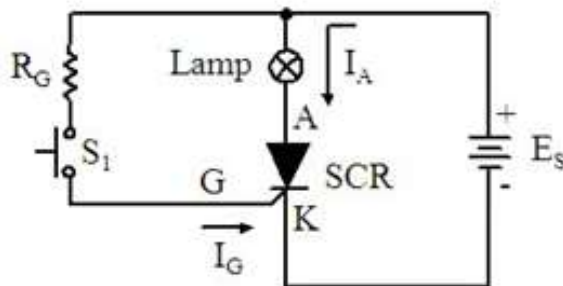


รูปที่ 2.11 การทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยวิธี Forced Commutation

2.4.3 การนำเอสซีอาร์ไปใช้งาน

เอสซีอาร์สามารถนำไปใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวางเช่น วงจรเรียงกระแสที่สามารถควบคุมได้ (Control Rectifier) แต่ส่วนมากจะนิยมนำไปใช้ในการควบคุมหลักๆ 2 ประการ คือ สภาวะนำกระแสและสภาวะหยุดนำกระแส เพื่อให้เกิดการทำงานและหยุดการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ

ตัวอย่างการนำเอสซีอาร์ไปใช้งานอย่างง่ายคือ การนำเอสซีอาร์ไปใช้ในการเปิด - ปิดหลอดไฟซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการนำเอสซีอาร์ไปใช้ในการเปิด-ปิดหลอดไฟ

ในขณะที่สวิตช์ S_1 อยู่ในสภาวะเปิดวงจรเอสซีอาร์จะไม่นำกระแส เพราะไม่มีกระแสไปจุดชนวนที่ขาเกตของเอสซีอาร์ ($I_G = 0$) แรงดันตกคร่อมขาแอโนดและแคโทดมีค่าสูงมาก กระแส I_A จึงไม่สามารถไหลผ่านได้ หลอดไฟจึงไม่ติดสว่าง แต่ถ้าทำการสวิตช์ S_1 (on) จะมีกระแสไปจุดชนวนที่ขาเกตของเอสซีอาร์ ทำให้เอสซีอาร์เกิดการนำกระแส ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาแอโนดและขาแคโทด ลดลงจนมีค่าต่ำมากมีกระแส I_A ไหลเข้าขาแอโนดและออกที่ขาแคโทดได้ครบวงจรเป็นผลให้หลอดไฟติดสว่าง

2.5 ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT)

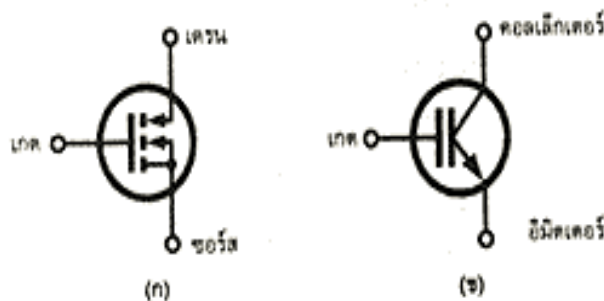
อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรล ที่พอจะคุ้นเคยและใช้งานกันอย่างกว้างขวางในขณะนี้ ก็เห็นจะไม่พ้นเอสซีอาร์ (SCR) ไตรแอค (TRIAC) ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟต โดยเฉพาะ ทรานซิสเตอร์และมอสเฟต ที่จะเป็นจุดพัฒนาการของอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิด ก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ ทรานซิสเตอร์กำลังขณะอยู่ในสภาวะนำกระแสจะมีอัตราการสูญเสียกำลังงานต่ำ มีอัตราแรงดันและขยายกระแสได้สูง แต่ความเร็วในการสวิตช์ทำงานยังต่ำอยู่ โดยเฉพาะช่วงหยุดนำกระแส จะมีช่วงเวลาที่ยาวกว่า ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับเพาเวอร์มอสเฟต ที่มีความเร็วในการสวิตช์ทำงานนำกระแสและหยุดนำกระแสได้เร็วกว่ามาก แต่ก็มีอัตราการสูญเสียกำลังงานสูงมากเช่นกัน

จากเหตุผลที่กล่าวมาของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์และเพาเวอร์มอสเฟตจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ประเภทนี้ จนสามารถได้อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลชนิดใหม่ขึ้นมา โดยคุณสมบัติต่าง ๆ จะรวมเอาข้อได้เปรียบของทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์และมอสเฟตเข้ามารวมไว้ในอุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ โดยมีการตั้งชื่อหรือเรียกชื่ออย่างเป็นทางการว่า ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT)

2.5.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์

IGBT ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ชนิดใหม่อยู่ โดยเฉพาะในตลาดอิเล็กทรอนิกส์เมืองไทย ซึ่งก็พอจะมีใช้กันบ้าง และมีจำหน่ายกันหลายเบอร์ด้วยกันจากความเป็นอุปกรณ์ หน้าที่ใหม่จึงมีสัญญาณ

แทนชนิดและตัว IGBT อยู่หลายรูปแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าจะใช้สัญลักษณ์ใดเป็นสัญลักษณ์ประจำสินค้าที่ผลิตขึ้น จากที่พบมากที่สุดก็มีใช้กันอยู่สองแบบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นสัญลักษณ์และชื่อเรียกขาต่าง ๆ ของ IGBT ชนิดเอ็นแชนเนล



รูปที่ 2.13 สัญลักษณ์และการเรียกชื่อขาของ IGBT ทั้ง 2 แบบ

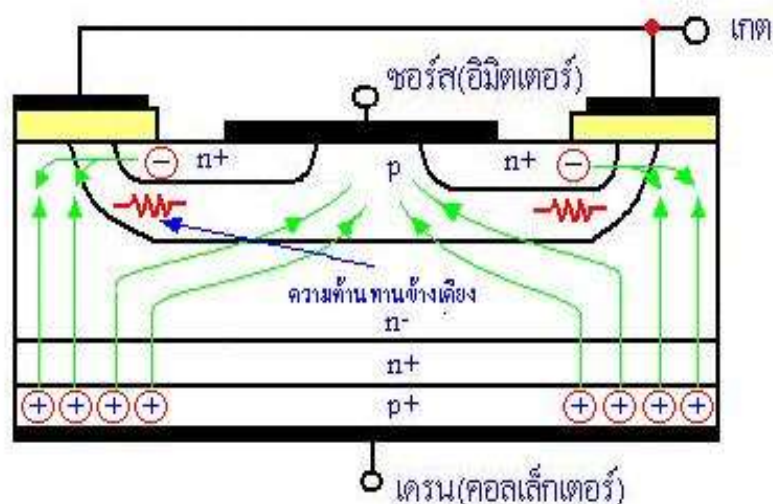
จากรูปที่ 2.13 (ก) จะเห็นว่าสัญลักษณ์คล้ายสัญลักษณ์ของมอสเฟตมาก เพียงแต่ว่าสัญลักษณ์ของ IGBT นั้นจะมีลูกศรเพิ่มขึ้นมาตรงขาเดรนลักษณะของลูกศรจะชี้เข้าหาตัว หรือชี้เข้าหาชั้นของซิลิคอนภายในตัว IGBT ในบทความนี้จะใช้สัญลักษณ์ในรูป 2.13 (ข) จะเหมือนกับสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ แต่ตรงขาเกต (หรือเบสของทรานซิสเตอร์) จะเพิ่มขีดขึ้นมานี้ไม่ได้ต่อถึงกันโดยตรงกับขาที่ต่อออกมาภายนอก

2.5.2 สถานะนำกระแส

ขาเดรนเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงคือเป็นบวกเมื่อเทียบกับซอร์สและแรงดันระหว่งเกตกับซอร์สมีค่าเกิน $V_{GS(th)}$ ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากแรงดันที่ขาเกตจะดึงเอาอิเล็กตรอนให้มารวมกันอยู่ในบริเวณภายใต้เกต ทำให้ชั้นบอดี้ตรงส่วนใต้เกตแปรสภาพเป็น n ทำให้เกิดการต่อกันของบริเวณ n- (drift region) เข้ากับบริเวณซอร์ส n+(source region) ซึ่งการทำงานเช่นนี้เหมือนกับมอสเฟต

กระแสอิเล็กตรอน ที่ไหลจากขาซอร์สผ่านบริเวณใต้เกตมายังบริเวณรอยเลื่อน n- จะรวมกับโฮลที่เป็นพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดมาจากชั้นอินเจกต์ติ้ง p+ เพราะรอยต่อ J1 ได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ IGBT อยู่ในสถานะนำกระแสเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าจากเดรนไปซอร์สได้ การรวมกันของโฮลและอิเล็กตรอนภายในบริเวณ n- เรียกว่า การมอดูเลตสภาพนำ (conductivity modulation)

ผลการมอดูเลตนี้จะทำให้ความต้านทานของบริเวณ n- มีค่าต่ำลงเป็นการเพิ่มความสามารถในการขับผ่านกระแสได้สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ผลของความต้านทานที่ลดลงทำให้แรงดันตกคร่อมที่สถานะนำกระแสลดต่ำลงด้วย การสูญเสียกำลังงานขณะนำกระแสจึงลดลงด้วยทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลแสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลในขณะนำกระแส

2.6 วงจรเรียงกระแส

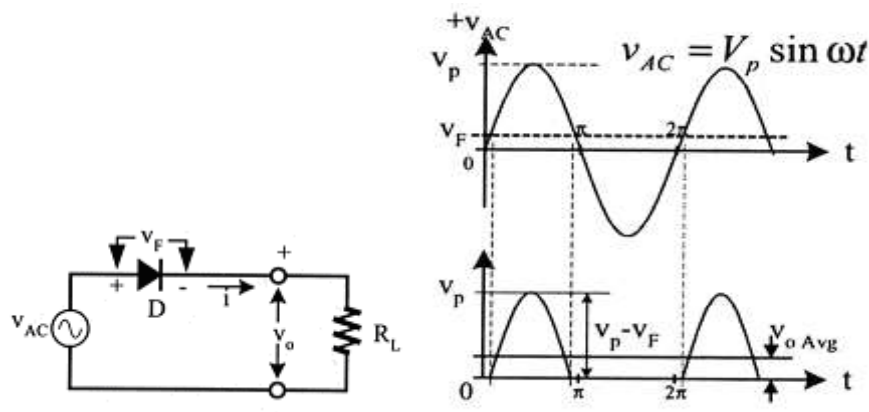
วงจรเรียงกระแส คือ วงจรพื้นฐานของภาคจ่ายไฟทุกรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นวงจรรักษาระดับแรงดันให้คงที่ วงจรเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน หรือวงจรภาคจ่ายไฟกระแสตรงแบบสวิตชิ่ง ซึ่งความหมายของคำว่าวงจรเรียงกระแสก็คือ วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง และมีคุณสมบัติที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโหลดเพียงทิศทางเดียว สามารถแบ่งแยกวงจรออกได้ 2 รูปแบบ คือ วงจรฮาล์ฟเวฟเรกติไฟเออร์ (Half- wave rectifier) และวงจรฟูลเวฟเรกติไฟเออร์ (Full- wave rectifier) แต่วงจรเรียงกระแสที่นิยมใช้กันมากคือ วงจรฟูลเวฟเรกติไฟเออร์ เหตุผลก็เพราะว่าให้แรงดันไฟตรงสูงกว่าและเรียบกว่ามาก เมื่อเทียบกับวงจรฮาล์ฟเวฟเรกติไฟเออร์

วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น จากวงจรในรูปที่ 2.15 เขียนสมการที่ KVL จะได้

$$V_{AC} = V_D + V_0 \quad V \quad (2.6)$$

ในกรณีที่ไฟสลับมีค่าเป็นบวก ($0 < \omega t < \pi$) ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง แรงดันแอ่งที่พ่วงจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} V_0 &= V_{AC} - V_D \quad V \\ v_0 &= V_p \sin \omega t - 0.6 \quad V \quad 0 < \omega t < \pi \end{aligned} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.15 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

ในขณะที่ไฟสลัมีค่าเป็นลบ ($\pi < \omega t < 2\pi$) ไดโอดจะได้รับไบอัสย้อนกลับ จะไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอดแรงดันเข้าที่พุกก็จะมีค่าเป็น 0

$$V_0 = 0 \quad V \quad ; \quad \pi < \omega t < 2\pi \quad (2.8)$$

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสจะไหลผ่าน R_L ในทิศทางเดียวเท่านั้น ถึงแม้ว่าแรงดันที่ R_L และกระแสที่ผ่าน R_L จะเป็นกระแสตรง แต่ก็ยังมีลักษณะคล้ายพัลส์ (Pulsating DC) มีการกระเพื่อมสูงมาก คลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 ลูกคลื่น จะได้ลูกคลื่นของไฟตรง 1 ลูก ดังในรูป 2.15 นั้นคือความถี่ของการกระเพื่อม (Ripple Frequency) จะเป็น

$$F_R \text{ (HW)} = F_{\text{line}} \quad (2.9)$$

ในขณะที่ไฟสลัเป็นซีกลบ ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับจะไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอด แรงดันเข้าที่พุกจะเป็น 0

จากสมการที่ (2.9) จะได้

$$V_D = V_{AC} \quad V \quad [\quad \pi < \omega t < 2\pi \quad] \quad (2.10)$$

แรงดันของไฟสลัทั้งหมดจะตกคร่อมที่ไดโอด ในการเรียงกระแส ไดโอดจะต้องไม่พังทลายไดโอดที่ใช้จะต้องมีค่าแรงดันพังทลายอย่างต่ำเท่ากับค่าสูงสุดของไฟสลั

$$V_{R(\text{MAX})} \geq V_{P(\text{AC})} \quad V$$

ในวงจรทั่วไป ค่าสูงสุดของไฟสลัจะมีค่าสูงกว่าแรงดันไบอัสตรงที่ตกคร่อมไดโอด ($V_F \approx 0.6 \text{ V}$) อย่างมากเราจะถือว่าค่าสูงสุดของไฟตรงมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของไฟสลั ค่าแรงดันเข้าที่พุกของวงจรจะมีค่าเท่ากับ

$$v_{0 \text{ DC}}(t) = \begin{matrix} V_P \sin \omega t & V & ; & 0 < \omega t < \pi \\ 0 & V & ; & \pi < \omega t < 2\pi \end{matrix} \quad (2.11)$$

ถ้าเรากลับขั้วไดโอดก็จะได้ค่าเป็นไฟตรงลบ

$$v_{0\text{DC}}(t) = \begin{matrix} 0 & V \\ V_p \sin \omega t & V \end{matrix} ; \begin{matrix} 0 < \omega t < \pi \\ \pi < \omega t < 2\pi \end{matrix} \quad (2.12)$$

2.6.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์นี้ นิยมใช้งานอย่างมาก (Extremely Popular) โดยการใช้ไดโอด 4 ตัว ไดโอด 2 ตัว ในวงจรสลับกันทำงานให้มีกระแสไหลผ่านในเวลาครึ่งคาบของไฟสลับ และในเวลาอีกครึ่งคาบไดโอดอีก 2 ตัวก็จะทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ในขณะที่ V_{AC} เป็นบวกจะมีกระแสไหลผ่าน D_1, D_3, i_2 จะมีค่าเป็นศูนย์ [ถูกไบอัสย้อนกลับ] และเมื่อ V_{AC} เป็นลบ i_1 จะเป็นศูนย์ กระแสจะไหลผ่าน D_2, D_4

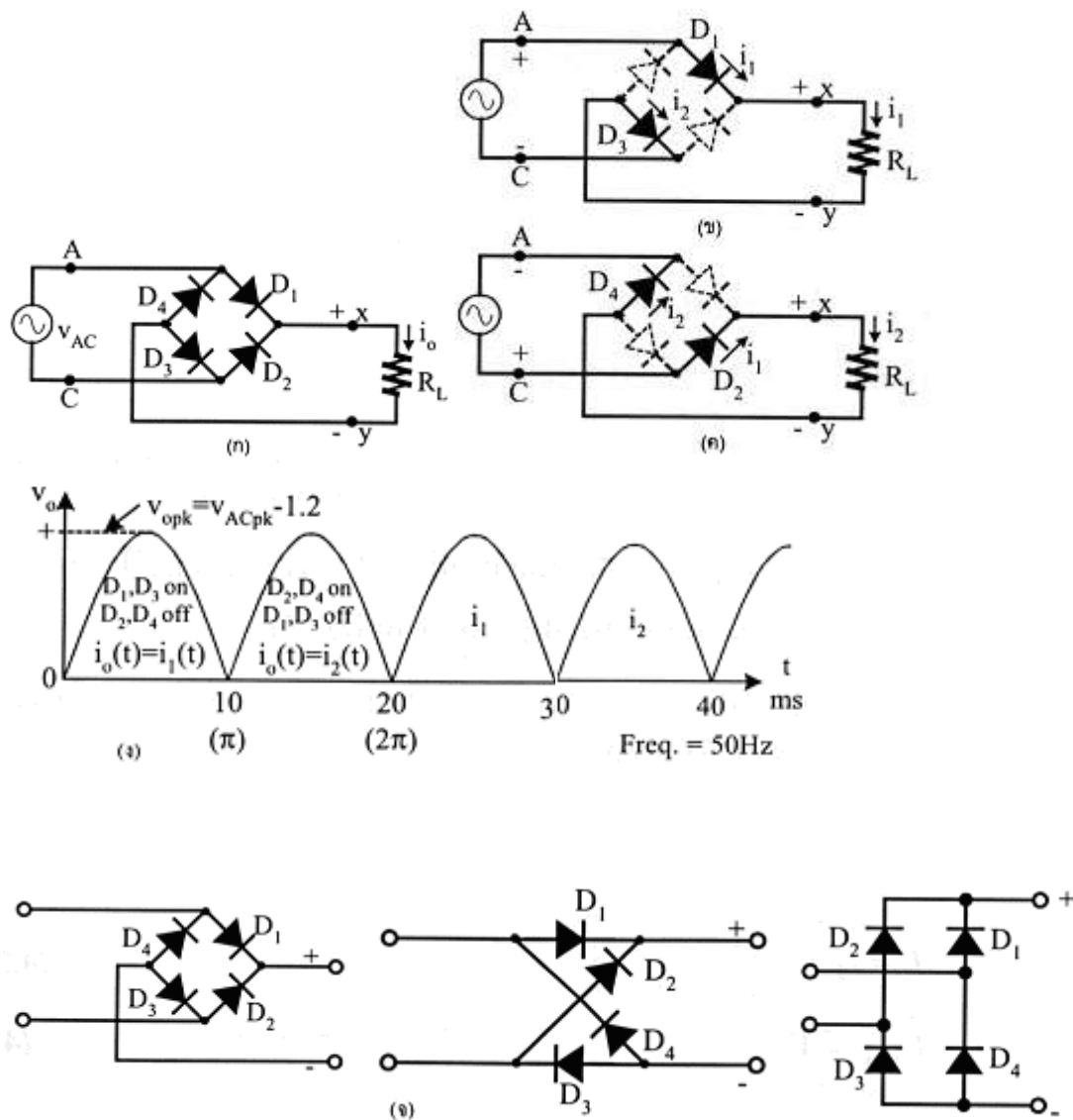
ค่าของกระแส $i_0(t), i_1(t), i_2(t)$ กระแสเฉลี่ย I_0, I_1 , และ I_2 ค่าความถี่ของการกระเพื่อมจะอยู่ในรูปแบบเดียวกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบหม้อแปลงมีแทป คือ

$$I_1 = I_2 = \frac{I_0}{2} \quad A$$

$$V_{0(pk)} = V_{AC(pk)} - 1.2 \quad V$$

$$F_R = 2F_{line} \quad (2.13)$$

ในการสร้างวงจรบริดจ์ของไดโอด เราอาจจะใช้ไดโอดเดี่ยว 4 ตัวมาต่อวงจรหรืออาจจะใช้ไดโอดบริดจ์ซึ่งภายในเป็นไดโอด 4 ตัว ต่อวงจรในลักษณะของบริดจ์เรียบร้อยแล้วสำหรับบริดจ์ไดโอดมีให้เราเลือกใช้งานได้ตั้งแต่ขนาดของกระแสแอทท์พุทเฉลี่ย 0.5 A. ขึ้นไปถึงหลายร้อยแอมป์ และทนแรงดันได้มากกว่า 1000 V



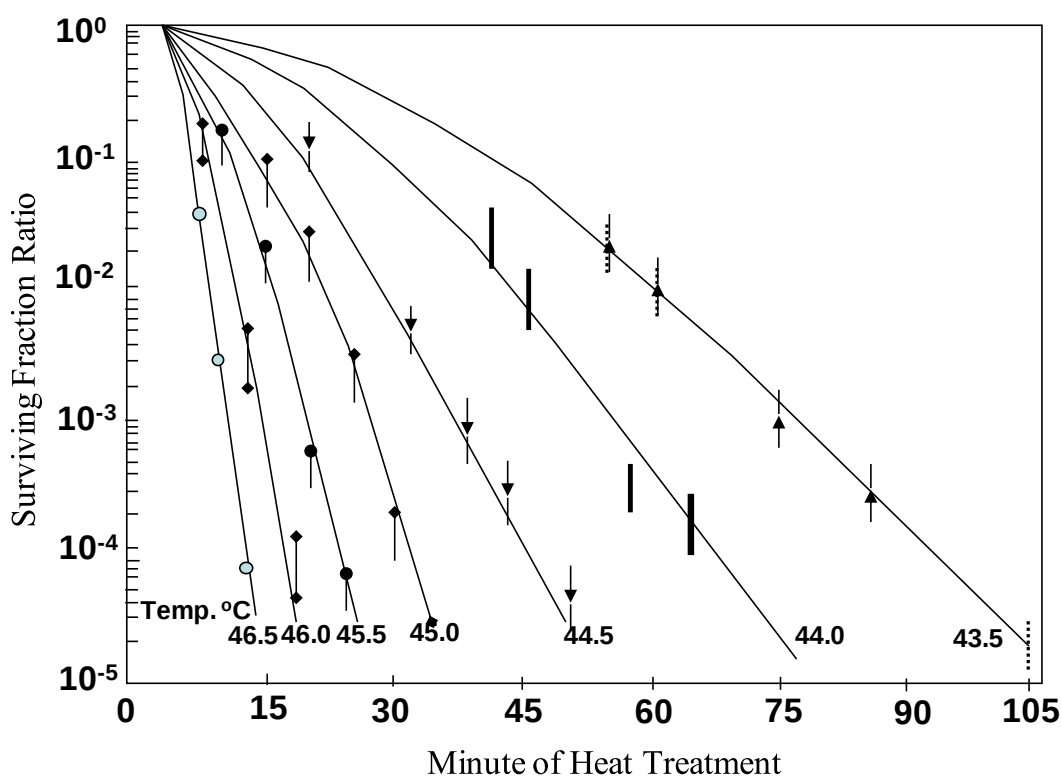
รูปที่ 2.16 (ก) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (ข,ค) ทิศทางของกระแสในขณะ V_{AC} เป็นบวก(ข) เป็นลบ(ค) (ง) รูปคลื่นของ V_O (จ) วงจรบริดจ์เขียนได้หลายรูปแบบ

2.7 พื้นฐานการกระจายความร้อนภายในเนื้อเยื่อ

การใช้ความร้อนในการรักษาโรค เป็นการรักษาที่ทำให้อุณหภูมิ ณ บริเวณนั้น สูงขึ้นเกิน 50 องศาเซลเซียส [8] เซลล์เนื้อเยื่อที่อยู่บริเวณนั้นๆ จะได้รับผลกระทบ และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิการใช้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็งได้มีการพัฒนาเทคนิค ที่เรียกว่า Hyper Thermal Cancer Therapy ซึ่งมีการเริ่มใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ.1960

การรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อน เป็นรูปแบบการรักษาโรคมะเร็งแบบใหม่ ซึ่งมีพื้นฐานและหลักการทางชีววิทยาที่สามารถ พิสูจน์ ทดลอง และสามารถอธิบายได้ซึ่งในปัจจุบันการรักษา

โรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนนี้สามารถรักษาโรคมะเร็งชนิดต่างๆ ได้ทั่วร่างกาย และได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ การรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน อาศัยหลักการให้ความร้อนกับเซลล์มะเร็งอยู่ในช่วง 41 – 46 องศาเซลเซียส และรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ให้คงที่ พื้นฐานของปรากฏการณ์ทางชีววิทยาสำหรับการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน จะมีอยู่สองปริมาณที่มีความสำคัญในการรักษา คือ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งใน รูปที่ 2.17 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่ส่งผลต่อปริมาณเซลล์มะเร็งที่ยังมีชีวิตอยู่จากการให้ความร้อน โดยเมื่อให้อุณหภูมิสูงแก่เซลล์มะเร็งในช่วงเวลาเริ่มต้นเซลล์มะเร็งจะสูญเสียเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิที่ให้แก่เซลล์มะเร็ง ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อให้เซลล์มะเร็งตาย ในการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น แก่เซลล์เนื้อเยื่อ จำนวนเซลล์จะเกิดการสูญเสียมาก และจะทำให้เซลล์ปกติที่อยู่รอบๆ เซลล์มะเร็งได้รับความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นในการเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมนั้น สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้จำนวนมาก และไม่เป็นอันตรายแก่เซลล์ปกติ



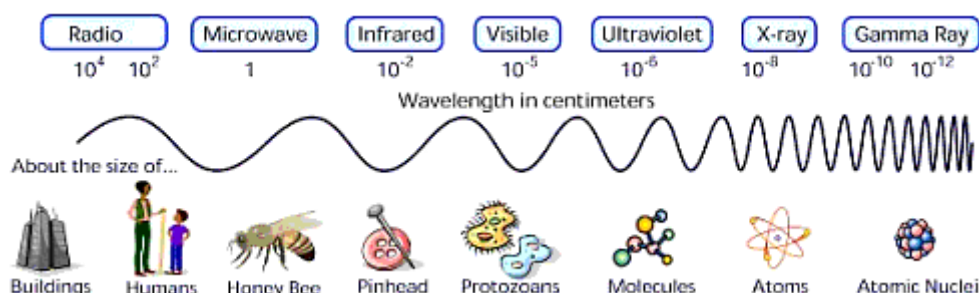
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์มะเร็ง [9]

Brace 2003 [8] สรุปว่า เมื่อให้ความร้อนที่สูงพอ ที่ระดับสูงกว่า 50 องศาเซลเซียสเซลล์เนื้อเยื่อจะถูกทำลายในทันที แต่ถ้าใช้ความร้อนต่ำกว่า ระยะเวลาที่จะทำให้เซลล์ตายนั้นจะต้องใช้ระยะเวลาที่สูงขึ้นและถ้าต้องการให้เซลล์เนื้อเยื่อถูกทำลายในทันที ในเนื้อเยื่อต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ฉะนั้น ที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระดับความร้อนที่แน่ใจได้ว่า เซลล์เนื้อเยื่อถูกทำลาย ซึ่งถ้าเราสามารถออกแบบแหล่งกำเนิดความร้อนที่สามารถสร้างความร้อนเกิดขึ้น

เฉพาะที่ได้ ก็จะสามารถทำลายเซลล์มะเร็งที่อวัยวะต่างๆ ภายในร่างกาย ด้วยวิธีการสอดใส่ ด้วยการแทงเข้าไปในร่างกายโดยไม่ต้องเปิดช่องท้อง ทำให้การรักษาเกิดขึ้นเฉพาะที่ และมีขนาดของบาดแผลหลังผ่าตัดที่เล็ก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้สนใจแนวทางในการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟ เพื่อจะสามารถนำคลื่นความถี่ไมโครเวฟส่งผ่านสู่เนื้อเยื่อที่ต้องการทำลายได้

2.8 ความหมายของคลื่นไมโครเวฟ และความสามารถเกิดความร้อนในเนื้อเยื่อ

ความหมายของคลื่นไมโครเวฟถูกอธิบายด้วย รูปที่ 2.18 แสดงสเปกตรัมของความถี่ในย่านต่างๆ



รูปที่ 2.18 แสดงสเปกตรัมแถบความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ

2.8.1 ความหมายของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับแสงสว่างโดยอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุความถี่สูง (High Frequency Radio Wave) เมื่อคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะลดลง คลื่นที่มีความถี่สูงมากความยาวคลื่นจึงสั้นมาก ดังนั้นคลื่นชนิดนี้จึงได้ชื่อว่าไมโครเวฟซึ่งแปลว่าคลื่นสั้นมาก รังสีอินฟราเรด (Infrared) แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และรังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกันแต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าไมโครเวฟ

ไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง อาจจะทะลุผ่านไปได้ เกิดการสะท้อนหรือถูกดูดกลืนวัตถุที่เป็นโลหะจะสะท้อนไมโครเวฟทั้งหมดส่วนวัตถุที่ไม่ใช่โลหะ เช่น แก้ว หรือพลาสติก ไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้บางส่วน วัตถุที่มีความชื้น เช่น ร่างกายคนเราหรืออาหารจะดูดกลืนพลังงานของไมโครเวฟถ้าพลังงานที่ถูกดูดกลืนเอาไว้มากกว่าพลังงานที่คายออกมาอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น

2.8.2 การนำเอาไมโครเวฟไปใช้งาน

โดยทั่วไปไมโครเวฟมีใช้ในงานด้านการสื่อสารผ่านดาวเทียม โทรศัพท์เคลื่อนที่เรดาร์ อุปกรณ์นำร่องทางการบินและการเดินเรือ นอกจากนั้นยังมีการนำไปใช้ในการให้ความร้อนทางอุตสาหกรรมและการรักษาโดยใช้ความร้อนในช่วงเวลาที่ผ่านมานี้ไม่นาน มีการใช้ไมโครเวฟตาม

บ้านเรือน ทางอุตสาหกรรมและการพาณิชย์เพิ่มขึ้นจำนวนมาก รูปที่ 2.19 แสดงการทำงานบางส่วนของไมโครเวฟ



รูปที่ 2.19 แสดงการนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้งาน

2.8.3 ผลต่อสุขภาพเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟ

ถ้าได้รับไมโครเวฟปริมาณสูงจะทำให้เกิดความร้อนในกรณีที่เป็นเนื้อเยื่อของร่างกาย ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้เป็นอันตราย เช่น เกิดการไหม้ของเนื้อเยื่อที่อยู่ลึกลงไป หรือเรียกว่า Hyperthermia มีงานวิจัยเรื่องนี้กันอย่างกว้างขวางแต่ยังไม่มีที่ยืนยันที่แน่นอนถึงผลกระทบของการได้รับไมโครเวฟว่ามีปริมาณระดับใดที่จะส่งผลให้เกิดมะเร็ง

จากรายละเอียดที่ได้กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟสามารถที่จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อเยื่อได้ โดยถ้ามีการออกแบบส่วนของการนำคลื่นไมโครเวฟที่ดี จะสามารถบังคับจุดปล่อยคลื่นไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้ ซึ่งหมายความว่าสามารถที่จะนำไปจัดทำลายเซลล์มะเร็งที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียสได้ [8] โดยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องส่วนต่อไปคือ รูปแบบของการเดินทางของคลื่น เพื่อให้เราเข้าใจถึงตัวนำที่นำมาใช้ว่ามีรูปแบบของโหมดการเดินทางของคลื่นอย่างไร [10]

2.9 สายนำสัญญาณสำหรับความถี่ไมโครเวฟ

สายนำสัญญาณหรือทรานสมิสชันไลน์ (Transmission line) ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากที่แห่งหนึ่งไปยังที่อีกแห่งหนึ่ง ตัวสายนำสัญญาณอาจจะใช้แท่งตัวนำขึ้นเดียว จำพวกเวฟไกด์ หรือแท่งตัวนำ 2 ชิ้น จำพวกสายคู่ขนาน (Two-wire line), อาจจะเป็นพวกโคแอกเชียล, สตริปไลน์ และไมโครสตริป สายนำสัญญาณซึ่งใช้กันในความถี่ย่านไมโครเวฟสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทด้วยกัน คือ

1. สายนำสัญญาณแบบคู่ขนาน (Two-wire lines)
2. สายโคแอกเชียล (Coaxial)

3. เวฟไกด์ (Waveguide)

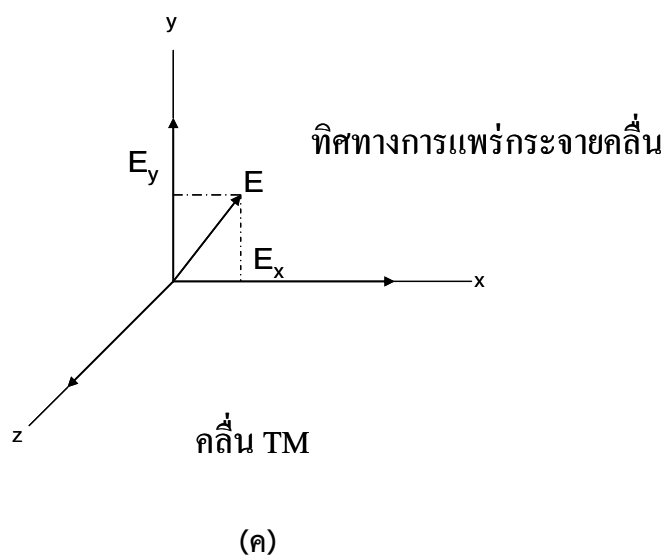
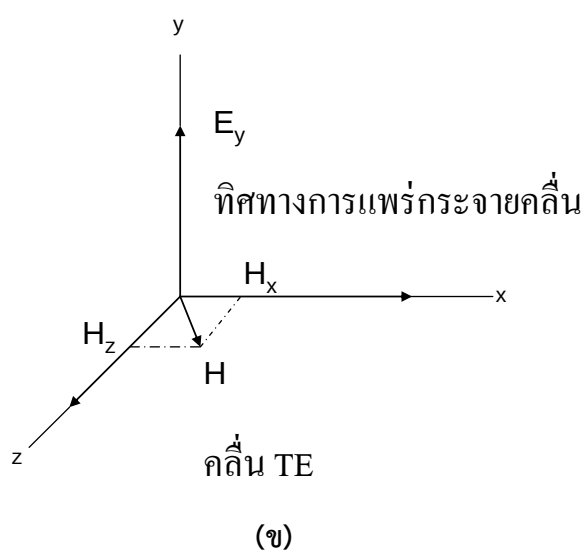
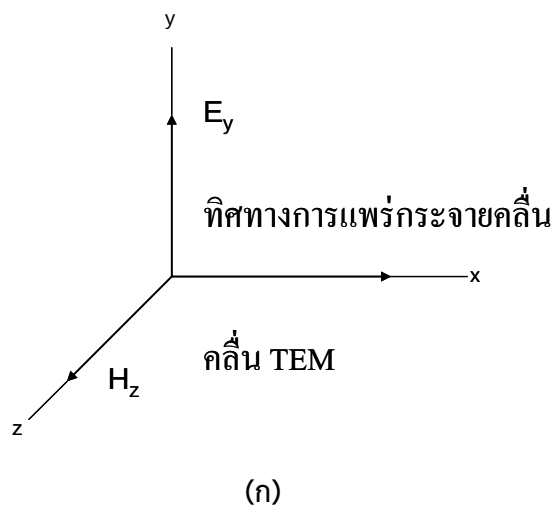
4. สตริปไลน์และไมโครสตริป (Stripline and Microstrip)

สายนำสัญญาณแบบคู่ขนานนั้น นิยมใช้กันในตอนต้น หรือแถบความถี่ย่านต่ำสุดของสเปกตรัมความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้น สายชนิดนี้จะมีการสูญเสียที่เรียกว่า Radiation loss มากขึ้น ซึ่งเป็นความสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากตัวสายนำสัญญาณ ดังนั้นที่ความถี่สูงขึ้นจึงหันมาใช้สายโคแอกเซียลแทน ซึ่งสายโคแอกเซียลได้ขจัดปัญหาของ Radiation loss โดยการชีลด์ตัวมันเองด้วยแผ่นตัวนำล้อมรอบ สายชนิดนี้ประกอบด้วยแท่งตัวนำภายในซึ่งเป็นตัวนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแท่งตัวนำล้อมรอบ ซึ่งอาจใช้เป็นแผ่นตัวนำหรือถักสานด้วยเส้นตัวนำขนาดเล็กเป็นร่างแหล้อมรอบก็ได้ แต่สายโคแอกเซียลก็มีข้อเสียตรงที่สามารถทนกำลังงานได้ต่ำ เมื่อความถี่สูงขึ้นจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากผิวตัวนำหรือที่เรียกว่าสกินเอฟเฟกต์ (Skin effect) เป็นผลให้มีการลดทอนสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านสายโคแอกเซียลมากขึ้น จึงเป็นข้อจำกัดของสายชนิดนี้ทำให้เหมาะสมสำหรับงานสื่อสารระยะใกล้ (Short-line length) ซึ่งความสูญเสียทางกำลังงานระดับนี้ไม่มีผลต่อระบบมากนัก ดังนั้นที่ความถี่สูงมากขึ้นการใช้เวฟไกด์จึงเป็นสื่อกลางที่เหมาะสม เพราะมันสามารถนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังสูงไปได้ โดยเกิดการสูญเสียกำลังงานในตัวมันเองน้อยมาก สำหรับสตริปไลน์และไมโครสตริปนิยมใช้ประกอบในตัวอุปกรณ์ที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ ใช้เป็นสายนำสัญญาณขนาดเล็กเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ชนิดหนึ่งไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเห็นกันก็คือแถบที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ของอุปกรณ์ไมโครเวฟนั่นเอง

เราจะได้ทราบถึงพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อสร้างความเข้าใจในเรื่องการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสื่อกลางที่เป็นสายนำสัญญาณชนิดต่างๆ ความหมายของค่าต่างๆ จำพวกความยาวคลื่น และความถี่คัทออฟ (Cutoff wavelength and frequency), ความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่ม (Phase and group velocity), การนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Wave transmission), การแผ่กระจายของคลื่นในโหมดที่สูงกว่า (Higher mode), คาเรคเตอร์ริสติกอิมพีแดนซ์ รวมทั้งการใช้งานของสายนำสัญญาณทุกแบบ เริ่มจากสายคู่ขนาน, สายโคแอกเซียล, เวฟไกด์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular waveguide), สตริปไลน์ และไมโครสตริป

โหมดการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในสายนำสัญญาณ (Mode of propagation)

ในสภาวะฟรีสเปซคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายออกไปเป็นลักษณะรูปทรงกลม (Spherical configuration) ตามที่เราได้ทราบกันมาแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการแพร่กระจายออกสู่ฟรีสเปซในลักษณะสนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลาเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลา และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลาก็เหนี่ยวนำสร้างสนามไฟฟ้าต่อไปเช่นกัน ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการแพร่กระจายออกไปเรื่อยๆ และค่อยๆ ถูกลดทอนด้วยตัวกลางจนหมดไป (ซึ่งในอุดมคติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องแพร่กระจายออกไปในฟรีสเปซได้เรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุด โดยไม่ถูกลดทอนด้วยตัวกลางเลย)



รูปที่ 2.20 (ก) คลื่น TEM (ข) คลื่น TE (ค) คลื่น TM

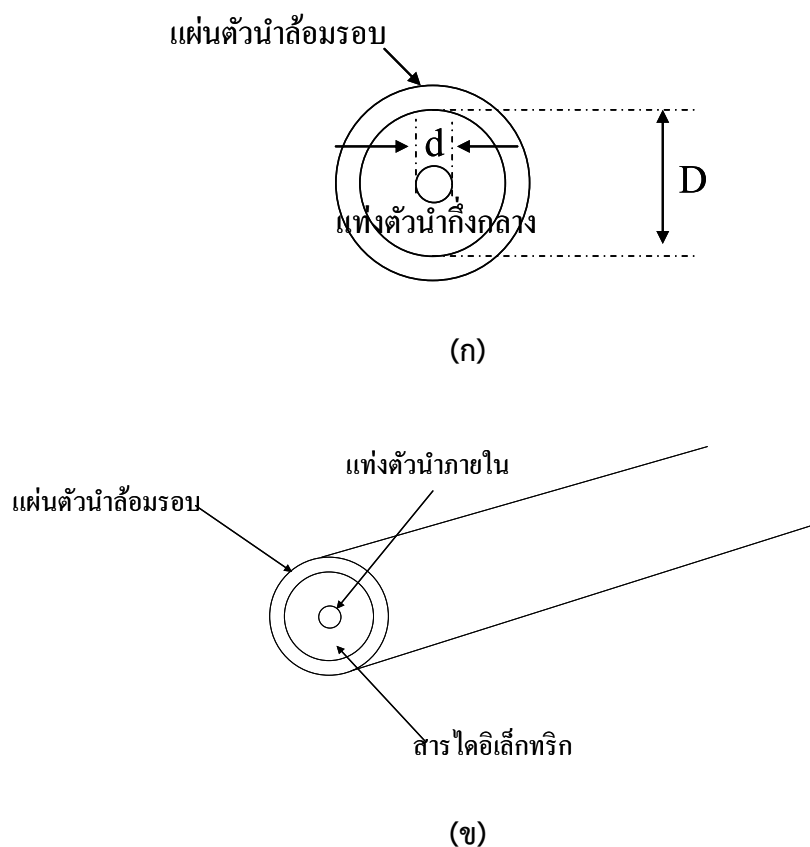
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปเป็นรูปทรงกลม (Spherical wave) เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นมากๆ พื้นที่เล็กๆ บนพื้นผิวทรงกลมสมมติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะกลายเป็นพื้นที่ระนาบแบน การพิจารณาสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H บนพื้นผิวระนาบนี้ จะทำมุมฉากซึ่งกันและกัน ฉะนั้น คลื่นรูปทรงกลมที่ระยะห่างออกไปจากแหล่งกำเนิดมากๆ จะกลายเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นรูปทรงระนาบแบบนี้จะได้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทำมุมฉากซึ่งกันและกัน โดยระนาบของสนามทั้งสองจะตั้งได้ฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นเองด้วย

ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายไปตามสายนำสัญญาณนั้น กลุ่มประจุและกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวนำของสายนำสัญญาณจะมีรูปแบบเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต สำหรับโหมดในการแพร่กระจายคลื่นแบบสายนำสัญญาณแบบคู่ขนานที่เป็นโหมดหลัก (Principal mode) ก็คือ ทรานส์เวอร์สอิเล็กโตรแมกเนติกเวฟ (Transverse electromagnetic wave) หรือจะเรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางก็ได้ โดยที่โหมด (Mode) เป็นคำที่บอกลักษณะการเดินทางหรือการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่น TEM นี้จะเป็นคลื่นที่มีระนาบของคลื่นสนามแม่เหล็ก และคลื่นสนามไฟฟ้ารูปไซน์วางอยู่ในลักษณะตามขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 (ก) กรณีที่ขนาดความยาวคลื่นของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งานมีค่าใกล้เคียงกับขนาด (Dimension) ของสายหรือไกด์ จะทำให้เกิดโหมดการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นต่างๆ กันนี้รวมเรียกว่าโหมดที่สูงกว่า หรือไฮเออร์โหมด (Higher mode) ไฮเออร์โหมดเป็นรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่น ซึ่งมีความถี่สูงกว่าค่าความถี่เฉพาะที่มีชื่อเรียกว่าความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency) ของสายนำสัญญาณ หรือเวฟไกด์ที่ใช้งาน สำหรับความถี่ต่ำสุด (Lowest frequency) และความยาวคลื่นสูงสุด หรือยาวที่สุด (Longest wavelength) ที่สามารถแพร่กระจายไปได้ในขนาดของสายนำสัญญาณหนึ่งๆ จะเป็นความถี่คัทออฟ (Cutoff frequency : f) และความยาวคลื่นคัทออฟ (Cutoff wavelength : cutoff) ของสายนำสัญญาณนั้น รูปแบบการส่งคลื่นในลักษณะดังกล่าว จะเป็นโหมดต่ำสุด (Lowest mode) ในการส่งโดยมีชื่อเรียกโหมดนี้ว่า โหมดหลักของการแพร่กระจาย (Principal propagation mode) ส่วนไฮเออร์โหมด จะเป็นรูปแบบการส่งในโหมดที่สูงกว่า (เทียบกับโหมดหลัก) คลื่นที่แพร่กระจายในเวฟไกด์จะมี 2 โหมดคือ จะเป็นทรานส์เวอร์สอิเล็กตริกเวฟ (Transverse electric wave : TE) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง และทรานส์เวอร์สแมกเนติกเวฟ (Transverse magnetic wave : TM) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง ทรานส์เวอร์สอิเล็กตริกเวฟ (สนาม H มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน x และ z ของสนาม E) แสดงไว้ตามรูปที่ 2.20 (ข) ส่วนทรานส์เวอร์สแมกเนตริกเวฟ (สนาม E มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน x และ y ของสนาม H) แสดงไว้ตามรูปที่ 2.20 (ค) [10]

2.10 สายโคแอกเชียล

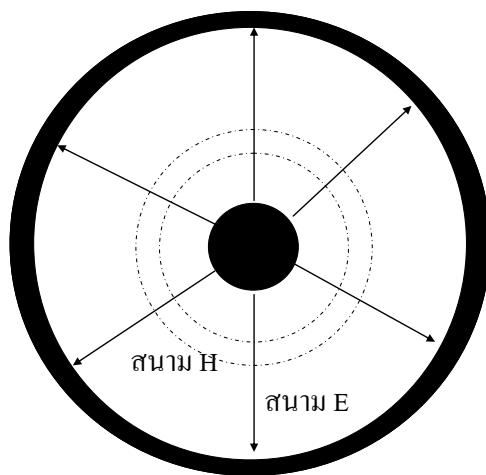
เมื่อความถี่ในการใช้งานสูงขึ้น การใช้สายคู่ขนานแบบเดิมไม่เหมาะสมจึงได้เปลี่ยนมาใช้สายอีกแบบหนึ่งมีชื่อว่า สายโคแอกเชียล สายโคแอกเชียลนี้จะประกอบด้วยตัวนำ 2 เส้นขนานกันเช่นเดิม

แต่ตัวนำภายนอกจะเปลี่ยนรูปเป็นแผ่นตัวนำล้อมรอบแท่งตัวนำที่เหลือนี้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งวางในแนวศูนย์กลางใช้แกนร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) แท่งตัวนำภายในจะถูกจัดให้อยู่ในแนวศูนย์กลางได้ด้วยไดอิเล็กทริกสเปซเซอร์ ดังรูปที่ 2.21 (ข) หรือจะใช้สารไดอิเล็กทริกอัดแน่นเพื่อบังคับให้แท่งตัวนำวางตัวในแนวศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.21 (ค) ก็ได้สายโคแอกเซียลที่ใช้งานมีด้วยกันหลายแบบ แบ่งออกเป็นประเภทหลักๆ ได้ตามลักษณะรูปร่างภายนอก คือแบบ Flexible, Semirigid และ Rigid



รูปที่ 2.21 (ก) สายโคแอกเซียล (ข) แบบใช้โซลิดไดอิเล็กทริก

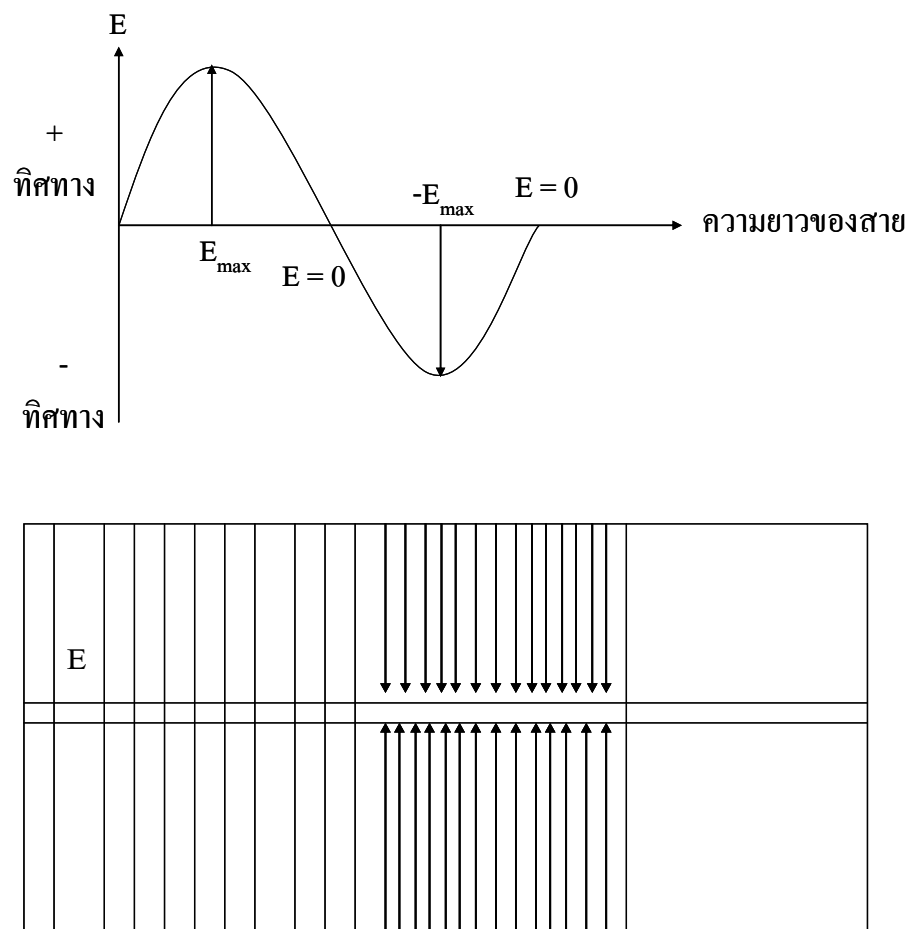
การส่งคลื่นในสายโคแอกเซียล สายโคแอกเซียลนั้นเป็นการดัดแปลงมาจากสายแบบคู่ขนานนั่นเอง ฉะนั้นมันจึงสามารถรับส่งคลื่นแบบ TEM ได้ และเรียกโหมดการส่งคลื่น TEM นี้ว่า โหมดหลัก (Principal mode) หรือโหมดเด่น (Dominant mode)



มองเข้าทางปลายสายโคแอกเชียล

รูปที่ 2.22 แสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายโคแอกเชียล

การส่งกำลังไฟฟ้า (หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ไปในสายโคแอกเชียลนั้นกระทำโดยอาศัยการเดินทางของคลื่นแรงดันและคลื่นกระแส ซึ่งเป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขึ้นในสาย แสดงดังรูปที่ 2.22 เส้นทึบแสดงสนามไฟฟ้า เส้นประแสดงสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า E จะเกิดลักษณะเป็นรัศมีกระจายออกจากแท่งตัวนำศูนย์กลางภายในไปยังตัวนำภายนอกที่ล้อมรอบอยู่ และจากตัวนำภายนอกพุ่งเข้าสู่ตัวนำศูนย์กลางภายในสลับกันไป ส่วนสนามแม่เหล็ก H จะเกิดล้อมรอบแท่งตัวนำศูนย์กลางภายใน ทำมุมฉากกับสนามไฟฟ้า E สนามแม่เหล็กจะเกิดเป็นวงกลม มีศูนย์กลางร่วมกับตัวนำทั้งสองจากแท่งตัวนำภายในขยายออกเป็นวงกว้างไปสู่ตัวนำภายนอก ทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นไปตามยาวของสายนั้น หามาจากพอยน์ติงเวกเตอร์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายไปตามที่ว่างระหว่างตัวนำทั้งสองโดยที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นกับความต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวนำภายในและตัวนำภายนอก ส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ TEM นี้ประกอบจากคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็กที่เป็นรูปไซน์ ดังนั้น สนาม E และสนาม H จึงกลับทิศทางทุกๆ ครึ่งความยาวคลื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงทิศทางสนาม E และ H ที่แพร่กระจายไปตามสายโคแอกเซียล

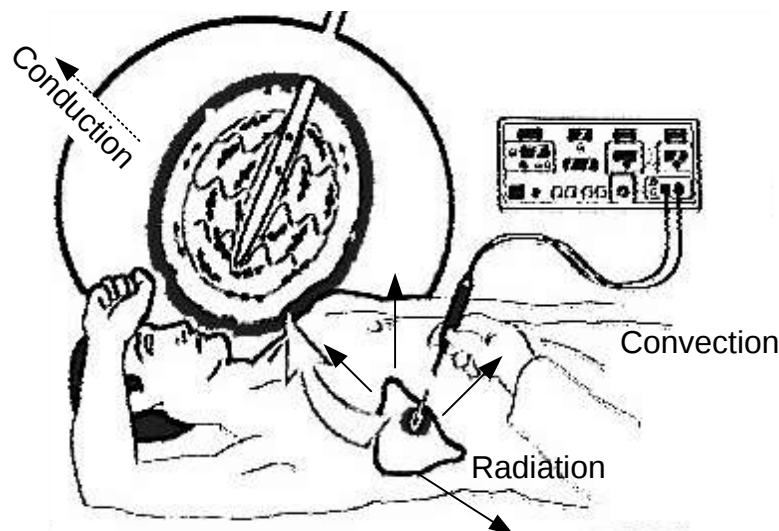
สำหรับค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางไปตามสายนั้น จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของมันเอง และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของสารไดอิเล็กตริก ระหว่างตัวนำทั้งสอง

สายโคแอกเซียลนั้นไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความถี่หรือโหมดการส่งคลื่น TEM จึงสามารถปรับกระแสและแรงดันตามความถี่ที่ใช้กันได้ ดังนั้นสายโคแอกเซียลซึ่งทำงานในโหมดหลักหรือโหมด TEM จึงถือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานในแถบความถี่กว้าง หรืออุปกรณ์บรอดแบนด์ (Broad-band device) และค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายโคแอกเซียล คำนวณได้จากสมการที่ (2.14)

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{r,\text{tissue}}}} \quad (2.14)$$

จากสมการจะเห็นว่า ถ้าสารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในสายเป็นอากาศ ค่าความยาวคลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลง คือเท่ากับค่าความยาวคลื่นในฟรีสเปซ [10]

2.11 สมการความร้อนทางชีววิทยา (The Bio-heat Equation)



รูปที่ 2.24 แสดงการส่งผ่านความร้อนในเนื้อเยื่อ

จากรูปที่ 2.24 เป็นการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรักษาด้วยการจี้ความร้อนจากแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สายอากาศไมโครเวฟแทงลงไปเนื้อเยื่อตับ คลื่นไมโครเวฟจากแหล่งกำเนิด จะส่งผ่านตัวนำไปตามสาย โดยลักษณะของคลื่นที่ออกจากสายอากาศ จะขึ้นอยู่กับ การออกแบบสายอากาศ

คลื่นไมโครเวฟออกจากสายอากาศเข้าสู่เนื้อเยื่อตับ คลื่นไมโครเวฟจะทำให้ น้ำภายในตับเกิดการเสียดสี เกิดความร้อนขึ้นบริเวณสายอากาศ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการส่งผ่านความร้อนในรูปแบบ การนำความร้อนไปรอบๆ บริเวณเนื้อเยื่อ และเกิดการส่งผ่านความร้อนตามการเคลื่อนที่ของเลือดแบบการนำ และมีการระบายความร้อนออกนอกเนื้อเยื่อด้วยการแผ่ความร้อน

จะเห็นว่าหลักการพื้นฐานของการส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer) สามารถนำมาใช้ในเนื้อเยื่อได้ โดยเรียกการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อว่า สมการการส่งผ่านความร้อนทางชีวภาพ (Bio-heat Equation) [11] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \cdot \nabla T) - h_b c_b \omega_b (T - T_b) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (2.15)$$

เมื่อ $h_{b1} = \rho_{b1} c_{b1} \omega_{b1}$ และ

ρ = ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ [kg/m^3]

c = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]

k = ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]

$$\begin{aligned}
h_b &= \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ} \\
\rho &= \text{ความหนาแน่นเลือด [kg/m}^3\text{]} \\
c_b &= \text{ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด [J/kg} \cdot \text{K]} \\
\omega_b &= \text{อัตราฉีดเลือด [1/s]} \\
T_b &= \text{ค่าอุณหภูมิเลือด (37 } ^\circ\text{C)} \\
Q_{met} &= \text{ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเม็ดเลือด [W/m}^3\text{]} \\
Q_{ext} &= \text{ค่าความร้อนจากภายนอก [W/m}^3\text{]}
\end{aligned}$$

โดยในการส่งผ่านความร้อนในเนื้อเยื่อจะพิจารณาเฉพาะการพาความร้อน การนำความร้อน และแหล่งกำเนิดความร้อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย Q_{met} คือ ความร้อนที่เกิดจากการเผาผลาญ และ Q_{ext} เป็นความร้อนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะพิจารณาการเกิดความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพราะฉะนั้นค่าในเทอมของ Q_{ext} จะเป็นความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเกิดจากความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อ แสดงได้ดังสมการ

$$Q_{ext} = \rho \cdot SAR = \sigma \cdot E^2 \quad (2.16)$$

โดย SAR คือ อัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อ และจะเห็นได้ว่า Q_{ext} จะเกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าเท่านั้น [10]

หลังจากที่ทราบถึงค่าทางฟิสิกส์ที่ต้องการนำมาแก้ปัญหาแล้ว เราจะนำเอาวิธีการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการแก้ปัญหา โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงนิยามและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทต่อไป

2.12 ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

การวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ ฯลฯ สำหรับใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรม การสร้างแบบจำลอง หรือการศึกษางานทางด้านวิทยาศาสตร์ด้วยวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) ได้เข้ามามีบทบาท และก่อให้เกิดประโยชน์เป็นอย่างมากในปัจจุบัน วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลผสมผสานกับความรู้ทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) โดยทำการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสมดุลของการไหลนั้นก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่สามารถแสดงได้ด้วยกราฟฟิกส์ ทำให้นักวิเคราะห์สามารถเข้าใจในปรากฏการณ์ของการไหลได้เป็นอย่างดี เป็นผลให้สามารถทำการปรับปรุง ดัดแปลง ในรูปแบบของการออกแบบ การจำลอง จนได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ก่อนนำไปสร้างจริงหรือปฏิบัติการขั้นต่อไปเพื่อต่อยอดความมั่นใจในการออกแบบนั้น

กระบวนการออกแบบหรือสร้างแบบจำลองด้วยการคำนวณพลศาสตร์ของไหลดังกล่าว ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาลงไปอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองแต่เพียงอย่างเดียวที่เคยทำมาในอดีต วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลได้นำมาประยุกต์เข้ากับงานทางด้านวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก ทั้งในระดับวิจัยและพัฒนา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานในทางปฏิบัติ เช่น การศึกษาสภาวะการไหลผ่านใบพัดในปั๊มน้ำเพื่อปรับปรุงรูปทรงของใบพัดก่อให้เกิดกำลังส่งสูงสุด การศึกษาการกระจายของน้ำมันเพื่อการจุดระเบิดที่สม่ำเสมออย่างสมบูรณ์ในห้องลูกสูบ การศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อ การศึกษาการแพร่กระจายของน้ำเสียขณะไหลในแม่น้ำ การศึกษาการระบายอากาศผ่านไมโครชิพในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดอุณหภูมิที่สูงมากเกินไป นอกจากนี้วิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลยังได้นำไปประยุกต์เข้ากับงานทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์อื่นๆ ในอีกหลายแขนงที่ไม่สามารถทำการทดลองได้หรืออาจเป็นอันตรายหากทำการทดลอง เช่น การจำลองการไหลในหลอดเลือดและหัวใจ หรือการไหลผสมกันระหว่างสารเคมีซึ่งมีอันตราย เป็นต้น

จากตัวอย่างของปัญหาต่างๆ ที่ได้อธิบายมาข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าการคำนวณพลศาสตร์ของไหลก่อให้เกิดประโยชน์ในการวิเคราะห์งานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลเป็นจำนวนมาก นับตั้งแต่ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมากในการออกแบบ ช่วยในการวิเคราะห์และลดขั้นตอนที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลองหรือในกรณีที่ไม่สามารถทำการทดลองได้ รวมทั้งยังสามารถวิเคราะห์ลงไปรายละเอียดของการไหลในบางบริเวณ เพื่อหาผลลัพธ์และข้อมูลที่ต้องการความสมบูรณ์ และที่สำคัญที่สุด จากตัวอย่างต่างๆ นี้ จะเห็นได้ว่าการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ยังเปิดโอกาสเพื่อการวิเคราะห์การไหลอื่นๆ ได้อีก เป็นจำนวนมากทั้งทางด้านการใช้ประยุกต์ใช้ และทางด้านการวิจัยและพัฒนา

2.12.1 กระบวนการแก้ปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Me-chanics) เช่น การหาค่าความเค้นในโครงสร้างและชิ้นงานกลใดๆ หรือจะเป็นปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การหาการกระจายของอุณหภูมิในครีระบายความร้อนของหม้อแปลงและมอเตอร์ไฟฟ้า หรือจะเป็นปัญหาทางด้านการไหล เช่น การไหลของอากาศในห้องปรับอากาศ หรือจะเป็นปัญหาในศาสตร์อื่นๆ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหรือองค์ประกอบใหญ่ๆ 3 องค์ประกอบ กล่าวคือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ที่อธิบายความจริงของปัญหานั้น เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษานั้น และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหานั้น ทั้ง 3 องค์ประกอบนี้ หากองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ความเข้าใจโดยลึกซึ้งในองค์ประกอบทั้งสามนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการคำนวณความสำคัญในแต่ละองค์ประกอบที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจสามารถอธิบายในภาพรวมได้ดังต่อไปนี้

2.12.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

ปัญหาในงานวิศวกรรมต่างมีความลึกซึ้งของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แตกต่างกันออกไป สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสามารถจัดได้ว่าเป็นหัวใจซึ่งแสดงถึงความจริงที่เกิดขึ้นในปัญหานั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ของแข็งนั้นจำเป็นต้องเริ่มจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์

ย่อยที่อธิบายความสมดุลของแรงใน 3 ทิศทางซึ่งจำเป็นต้องถูกต้องอยู่เสมอไม่ว่าจะเป็นที่ตำแหน่งใดๆ ในปัญหานั้น การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายความสมดุลของการถ่ายเทความร้อน หรือการวิเคราะห์ปัญหาการไหลนั้นจำเป็นต้องเริ่มจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แสดงถึงการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน เป็นต้น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ล้วนประกอบด้วยพจน์ต่างๆ ที่อยู่ในรูปแบบเชิงอนุพันธ์ (Derivative Terms) ซึ่งใช้สัญลักษณ์คล้าย “เลขหกกลับทาง” ยกตัวอย่างเช่น ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลแบบหนืดภายใต้สภาวะอยู่ตัวสองมิติ โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.12.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์และองค์ประกอบความรู้ที่จำเป็น

ศักยภาพของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณพลศาสตร์ของการไหล มักทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจว่าสามารถใช้โปรแกรมเพื่อหาผลลัพธ์ของการไหลสำหรับปัญหาใดๆ ได้โดยง่าย ในความเข้าใจจริงนั้น เนื่องจากโปรแกรมเหล่านี้ตั้งอยู่บนความรู้ทางคณิตศาสตร์และขั้นตอนการคำนวณที่ค่อนข้างลึกซึ้ง ผู้ที่จะสามารถใช้โปรแกรมเหล่านี้ได้ถูกต้องอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีความรู้ที่เพียงพอ องค์ประกอบของความรู้ที่ต้องการนี้อาจแยกออกเป็น 5 ประการ คือความรู้ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Set of Partial Differential Equation) และความเข้าใจความหมายทางกายภาพ (Physical Meaning) ของสมการเหล่านี้ความรู้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) ความรู้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ความรู้พื้นฐานในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนของ การวิเคราะห์ และประสบการณ์ในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์

ความรู้ทั้ง 5 ประการดังกล่าวข้างต้น จะช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรมเกิดความเข้าใจในกระบวนการแก้ปัญหาและมั่นใจผลลัพธ์ที่คำนวณได้ พื้นฐานความรู้ทั้ง 5 ประการนี้สามารถอธิบายในภาพรวมได้ดังนี้

1. ความรู้ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านการคำนวณพลศาสตร์ของการไหล ล้วนตั้งอยู่บนการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยระบบใดระบบหนึ่งที่กำหนดให้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นถูกสร้างมาเพื่อแก้ปัญหาของการไหลที่ครอบคลุม (Governed) ด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยประเภทใด นอกจากนั้น ความเข้าใจทางกายภาพในแต่ละพจน์ของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้น ก็มีความสำคัญมากเช่นกันในการบ่งบอกศักยภาพ (Capability) และขอบเขตจำกัด (Limitation) ของโปรแกรมเอง พจน์ต่างๆในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนี้ยังบ่งบอกต่อไป การแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ต้องการความลึกซึ้งของระเบียบวิธีการคำนวณมากน้อยเพียงใด และเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณปัญหานั้นๆ อย่างไร ดังนั้นความเข้าใจในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจึงมีความสำคัญที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจก่อนลงมือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น

2. ความเข้าใจในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในปัจจุบันได้กลายมาเป็นวิชาบังคับในการเรียนวิศวกรรมศาสตร์หลายสาขานั้น เป็นความรู้พื้นฐานและองค์ประกอบหนึ่งที่จะจำเป็นสำหรับการคำนวณ ความรู้พื้นฐานในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้ประกอบด้วย ความรู้ของฟังก์ชันของการประมาณภายใน (Interpolation Functions) การดิฟเฟอเรนเชียลและการอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Differentiations and Integrations) ความรู้พื้นฐานในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญ

(Ordinary Differential Equations) รวมทั้งสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) และที่สำคัญที่สุดคือความรู้ในระเบียบวิธีต่างๆ ที่ใช้แก้ระบบสมการพีชคณิต (System of Algebraic Equations)

3. ความรู้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาใดๆ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก 3 ประการ คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ครอบคลุมปัญหานั้น เงื่อนไขขอบเขต และลักษณะรูปร่างปัญหานั้น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่ตอบสนองทำให้องค์ประกอบหลักทั้งสามที่ต้องการนี้มีความสมบูรณ์ [10]