บทที่ 2

อาร์คพลาสมาและทฤษฎีเครื่องไมโครอาร์คพลาสมา

2.1 พลาสมา

พลาสมา(plasma)ในความหมายทางฟิสิกส์ เป็นสถานะที่สี่ของสสารนอกเหนือจากของแข็ง ของเหลว แกส พลาสมาเป็นภาวะที่แกสได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกิดการแยกตัวของอะตอมและไอออไนซ์ เมื่อภาวะแกสเหล่านี้คืนสู่สภาวะปกติจะให้พลังงานความร้อนมาทันทีทันใด ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดพลาสมาได้แก่ แกสที่กำลังแตกตัวในหลอดฟลูออเรสเซนต์และความร้อนจากดวงอาทิตย์ เป็นต้น ต้นกำเนิดความร้อนจากพลาสมาสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานต่างๆได้หลายอย่าง เช่น การเชื่อมโลหะ (plasma welding) การเคลือบผิวด้วยพลาสมา (plasma spraying) การเคลือบผิวแข็ง (hard surface) งานโลหกรรมพลาสมาเป็นการใช้ประโยชน์จากพลาสมาที่สำคัญยิ่ง พลาสมาที่ใช้ในงานโลหกรรมได้จากการที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลำแกสที่กำลังไอออไนซ์ ซึ่งเรียกว่าอาร์คพลาสมา (arc plasma) และสามารถพัฒนาต้นกำเนิดความร้อนจากอาร์คพลาสมาในรูปเตาถลุงพลาสมา (plasma furnance) รวมทั้งวิธีการถลุงโลหะต่างๆด้วยพลาสมาเพื่อให้ได้โลหะค่อนข้างบริสุทธิ์ในแชมเบอร์ที่มีบรรยากาศแกสเฉื่อย และโลหะผสมที่มีคุณภาพดีตามต้องการ

เทอร์มัลพลาสมา (thermal plasma) ใช้เรียกแกสที่แยกตัวเป็นอะตอมอิสระและแกสที่ถูกไอออไนซ์ ซึ่งสสารในสถานะที่สี่จะให้แสงสว่างและเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ ในแกสที่ร้อนจัดประกอบด้วยโมเลกุล อะตอม ไอออน และ อิเล็กตรอน ที่เคลื่อนไหวไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบ ทั้งนี้เพราะแกสถูกทำให้ร้อนโมเลกุลของแกสจะเคลื่อนไหวเร็วขึ้นและมีโอกาสที่จะชนกันและแยกตัวเป็นอะตอมเป็นอะตอมอิสระ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า"การแยกตัว (dissociation)" เนื่องจากโมเลกุลของแกสมีความเร็วที่ต่างกัน การแยกตัวของแกสจะไม่เกิดที่อุณหภูมิที่แน่นอน แต่จะเกิดในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง สำหรับแกสแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิหนึ่งซึ่งสูงพอจะทำให้โมเลกุลของแกสมีพลังงานจลน์สูงพอที่เมื่อเกิดการชนระหว่างโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลแยกตัวเป็นอะตอมอิสระ

เมื่อแกสถูกทำให้ร้อนขึ้นไปอีกอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบแกนของอะตอมจะหลุดจากวงโคจรโดยจะไปอยู่ในชั้นพลังงานที่มีพลังงานสูงขึ้น เมื่อพลังงานที่แกสได้รับสิ้นสุดลง อิเล็กตรอนที่กล่าวถึงกลับไปสู่วงโคจรเดิมและปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของความร้อนและแสง

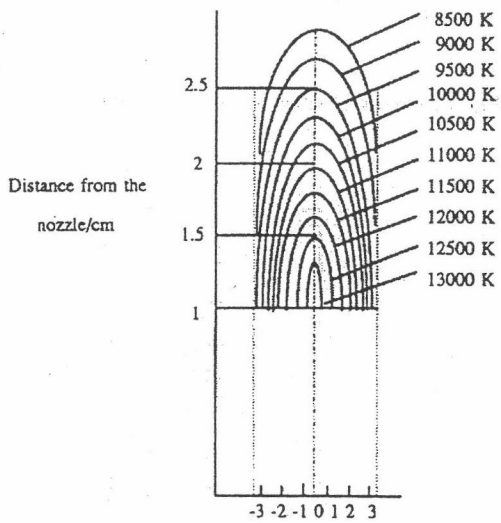
ในกรณีที่กลุ่มแกสได้รับพลังงานสูงพอในสภาพเช่นนี้จะถูกไอออไนซ์ และมีสภาวะเป็นไอออนในแกสที่ร้อนจัดดังกล่าวประกอบด้วยโมเลกุล อะตอมอิสระ ไอออนและ อิเล็กตรอนเกิด

ขึ้นตลอดเวลา และขณะเดียวกันอะตอมที่สิ้นสุดการรับพลังงานจะคายพลังงานออกมา ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะรักษาความสมดุลย์ในพลาสมาให้เกิดอย่างต่อเนื่อง

2.2 การผลิตอาร์คพลาสมา (Plasma arc production)

อาร์คพลาสมา คือ พลาสมาที่ทำให้เกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนด้วยอาร์คไฟฟ้าเมื่อแกสผ่านอาร์คไฟฟ้าจะมีอุณหภูมิประมาณ 6000-11000 °K ขึ้นกับกระแสอาร์ค แกสจะถูกทำให้ร้อนและโมเลกุลของแกสบางส่วนจะแยกตัวและถูกไอออไนซ์

พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีอุณหภูมิสูงมาก อุณหภูมิในคบพลาสมา (plasma torch) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของลำพลาสมา กระแสที่ไหลผ่านอาร์คและความเร็วของแกสที่ไหลผ่าน ตามปกติอุณหภูมิในลำพลาสมาจะอยู่ระหว่าง 7000 กับ 10000 °K โดยที่อุณหภูมิที่แกนกลางของลำพลาสมาอาจสูงถึง 20000-30000°K และอุณหภูมิรอบนอกลำพลาสมาอาจลดลงเหลือ 4000-5000 °K



รูปที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิบริเวณต่าง ๆรอบลำอาร์คพลาสมาของแกสอาร์กอน

2.2.1 การทำให้เกิดอาร์ค

การทำให้เกิดอาร์คเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่งในเทคโนโลยีอาร์คพลาสมา เพราะพลาสมาเกิดไม่ได้ถ้าไม่เกิดอาร์ค วิธีที่ทำให้เกิดอาร์คมี 2 วิธีคือ

ก. วิธีการลัดวงจร เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่มีข้อจำกัดในการใช้ กระทำโดย ใช้แคโทดที่ทำด้วยโลหะทังสเตนมีธอเรียมปนประมาณ 3 % ถูกฝนปลายให้แหลมแตะกับแท่งแอโนดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า V ไหลผ่านระหว่างจุดสัมผัสระหว่างแอโนดและ

แคโทด ความต้านทาน R ปรับค่าได้จะเป็นตัวกำหนดกระแสที่ไหลผ่านจุดสัมผัส สมมุติว่า R_c เป็นความต้านทาน ณ จุดสัมผัส และให้ I เป็นกระแสที่ไหลผ่าน กำลังสูญเสีย ณ จุดสัมผัสเท่ากับ [1]

$$P = I^2 R_c \qquad \text{..... 2.1}$$

กำลังงานสูญเสียนี้จะทำให้จุดสัมผัสร้อนจัดมากและทำให้ปลายแหลมบางส่วนเป็นไอระเหยไป พร้อมกับอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากปลายแหลมของแคโทด และเกิดความแน่นของกระแสไฟฟ้าตามกฎของริชาร์ดสัน (Richardson)

$$J = AT^2 e^{\frac{-w}{kT}} \qquad \text{..... 2.2}$$

โดยมี W = เวอร์คฟังก์ชันของโลหะที่ใช้ทำแคโทด

k = ค่าคงที่โบลซ์มันน์(Boltzman)

A = ค่าคงที่เฉพาะโลหะ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ปลายแหลมของแคโทด

อิเล็กตรอนที่ปลายแหลมจะถูกเร่งไปยังแอโนดและระหว่างทางจะชนกับโมเลกุลของแกสที่ได้รับความร้อนทำให้เกิดการแยกตัวเป็นอะตอมอิสระ ไอออน และโมเลกุล การแยกตัวนี้จะทำให้เกิดพลาสมาเริ่มต้นจากการนำกระแสของกลุ่มพาหะในแกสระหว่างแอโนดและแคโทด เมื่อเคลื่อนแอโนดและแคโทดให้ห่างกันอาร์คที่เกิดแต่แรกจะยังคงรักษาสภาพได้ตราบเท่าที่ศักดาไฟฟ้าระหว่างปลายขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพียงพอที่จะทำให้อะตอมแกสอยู่ในสภาวะไอออไนซ์ต่อเนื่อง อาร์คพลาสมาเริ่มต้น (pilot arc) ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้อาร์คเกิดง่ายขึ้นเนื่องจากพลาสมาจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

การทำให้เกิดอาร์คด้วยวิธีลัดวงจรใช้มากในการประยุกต์พลาสมาเทคโนโลยีที่ไม่อาจใช้ศักดาไฟฟ้าแรงสูง ความถี่สูงช่วยให้เกิดอาร์ค เช่นการเชื่อมหรือตัดด้วยพลาสมาใต้น้ำหรือการสร้างเตาถลุงพลาสมาโดยใช้ไดเรคอาร์ค (direct arc)

ข. วิธีกระตุ้นศักดาไฟฟ้าสูงความถี่สูง (high voltage - high frequency exciter)

การทำให้เกิดอาร์คโดยวิธีนี้ใช้กันโดยทั่วไปในเครื่องกำเนิดพลาสมาในกรณีที่แอโนดและแคโทดไม่สะดวกในการที่จะเคลื่อนที่เข้ามาแตะกันเพื่อให้เกิดอาร์ค จำเป็นต้องใช้เครื่องกำเนิดศักดาสูงความถี่สูงเข้าช่วยเพื่อให้เกิดอาร์คบริเวณช่องว่างระหว่างแคโทดและแอโนด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของแกสโดยทั่วไปมีโอกาสจะเกิดการดิสชาร์จ (discharge) ได้ง่ายเมื่อรับ

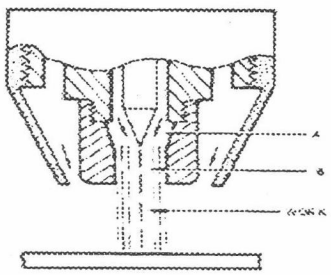
ศักดาไฟฟ้าแรงสูง ความถี่สูงในช่วงล้านเฮิร์ต (MHz) ขึ้นไป อาร์คความถี่สูงจะทำให้แกสปริมาณหนึ่งเกิดไอออไนซ์และทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดอาร์คเริ่มต้นรอบบริเวณแอโนดและแคโทด เมื่อเกิดอาร์คหลักของพลาสมาแล้วไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกำเนิดศักดาสูงความถี่สูงอีกต่อไป แต่ในกรณีที่บริเวณที่เกิดลำพลาสมามีขนาดเล็กมากไม่สามารถรักษาสมดุลย์ของพลาสมาหลักได้จำเป็นต้องให้ศักดาสูงความถี่สูงต่อเนื่องเพื่อรักษาอาร์คพลาสมาให้เกิดต่อเนื่อง

2.3 การใช้พลาสมาในการเชื่อมโลหะ

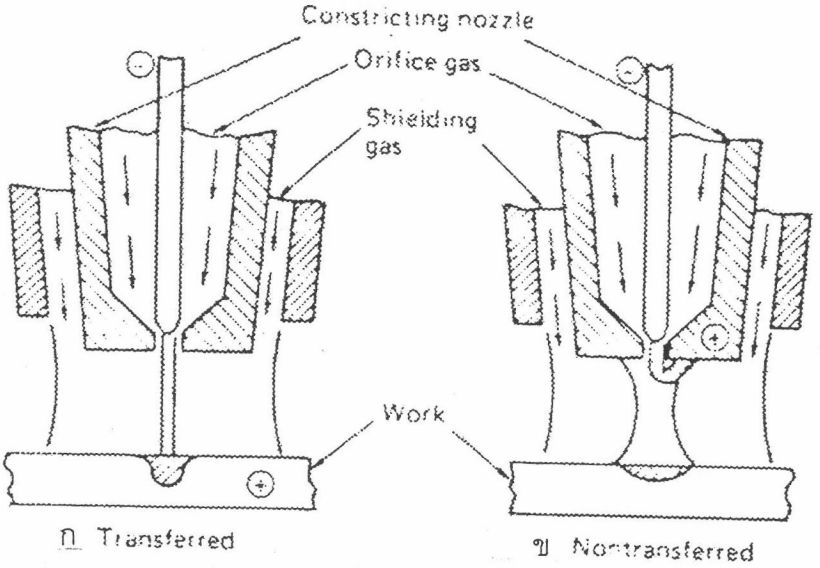
การเชื่อมแบบอาร์คพลาสมา เป็นการเชื่อมโดยใช้ลำพลาสมา โดยลำพลาสมาเกิดได้จากแกส (argon, nitrogen, mixed gas) ที่ถูกไอออไนซ์ด้วยอาร์คไฟฟ้า (electric arc) ซึ่งผ่านออกมาจากหัวเชื่อมขนาดเล็กที่ออกแบบพิเศษต่างกับหัวเชื่อมไฟฟ้าทั่วๆไป ลำพลาสมาที่เกิดขึ้นมาประกอบด้วยลำของอาร์คไฟฟ้ารวมกับลำพลาสมาทำให้มีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงมีความสามารถที่จะส่งพลังงานความร้อนที่สูงไปสู่พื้นที่ที่ต้องการเชื่อมได้รวดเร็ว

ข้อดีของ การเชื่อมแบบอาร์คพลาสมาเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมแบบอื่น ๆ

ก. มีความเร็วในการเชื่อมสูง
ข. ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีกระแสไม่สูง
ค. รอยเชื่อมมีความสะอาดเนื่องจากมีแกสเฉื่อยมาคลุมผิวงานขณะร้อน
ง. การเปลี่ยนระยะการเชื่อมมีผลต่อการการเชื่อมน้อยมากหรือไม่มีเลย



รูปที่ 2.2 แสดงการเชื่อมแบบอาร์คพลาสมา โดยมีแกสไหลอยู่รอบอิเล็กโทรด
ที่จุด A มีแกสไหลอยู่รอบอิเล็กโทรดซึ่งเป็นบริเวณ ที่ไม่ร้อน
ที่จุด B เกิดการไอออไนซ์จากภาวะนำกระแสของแกสและถูกขับออกมาจากหัวเชื่อมกลายเป็นลำพลาสมาอาร์ค



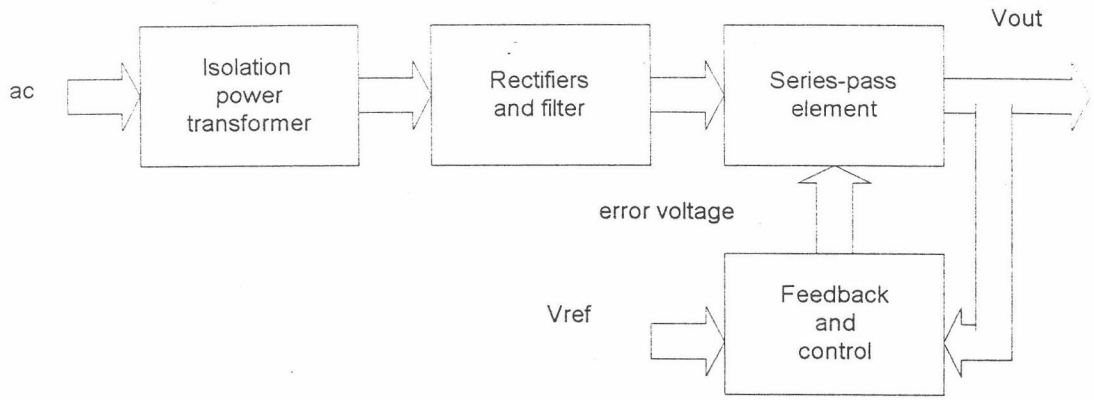
รูปที่ 2.3 การเชื่อมแบบtransfered และ nontransfered

ในรูปที่ 2.3 การเชื่อมด้วยลำพลาสมาทำได้ 2 ลักษณะคือการต่อขั้วบวกไว้ที่ชิ้นงาน เทียบกับขั้วลบดังในรูป 2.3 ก. เรียกว่าเชื่อมแบบ " transfered" ความร้อนจากลำพลาสมาจะลงสู่แนวลึกทำให้รอยเชื่อมแคบ อีกลักษณะหนึ่งคือการจัดขั้วบวกไว้ที่แอโนดภายในหัวเชื่อม และปล่อยลำพลาสมาออกลงมายังชิ้นงาน บริเวณลำอาร์คพลาสมาจะกระจายเป็นบริเวณกว้างกว่าและผิวเชื่อมจะอยู่ตื้น ทั้งนี้การจะเลือกแบบใดขึ้นกับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

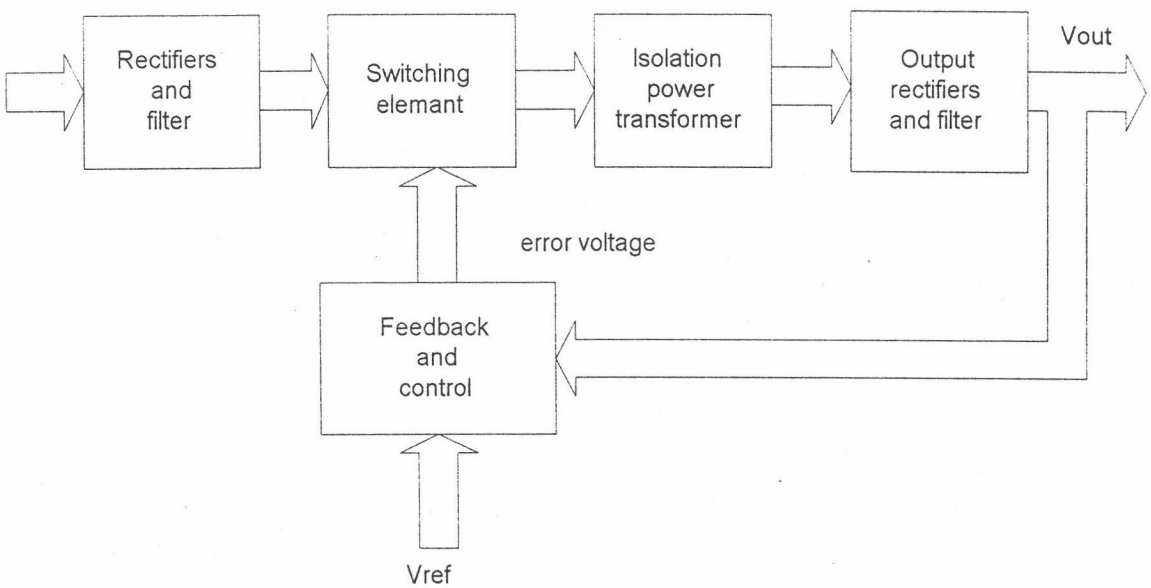
2.4 รูปแบบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.4.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบเชิงเส้นและแบบสวิตซ์

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบกระแสตรงสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆที่ใช้ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้น (linear power supply) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ (switching power supply) ซึ่งมีรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกันดังแผนภาพการทำงานรูปที่ 2.4 และ 2.5[2] ในตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ



รูป 2.4 แสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้น



รูป 2.5 แสดงการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์

จากรูปที่ 2.4 การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำ 50 Hz ซึ่งจัดกำลังไฟฟ้าไว้ตามต้องการมาแปลงศักดาไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ มาแปลงเป็นศักดาไฟฟ้าต่ำ และเรียงกระแสไฟฟ้าพร้อมทั้งกรองกระแสไฟฟ้าได้ไฟฟ้ากระแสตรง โดยจัดศักดาไฟฟ้ากระแสตรงก่อนเข้า series pass element ให้สูงกว่าทางออกเพื่อรักษาระดับศักดาไฟฟ้าทางออกให้คงที่ ด้วยการป้อนศักดาไฟฟ้าทางออกย้อนกลับไปเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิง พร้อมทั้งนำผลต่างจากการเปรียบเทียบ (error voltage) ไปควบคุม series pass element ให้ปรับศักดาไฟฟ้าให้คงที่ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นจะมีกำลังสูญเสียบน series pass element ตลอดเวลาที่โหลดทำงาน

ในรูป 2.5 การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ จะนำศักดาไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ มาเรียงกระแสพร้อมกรองกระแสและมาป้อนกลับ switching element ซึ่งทำการตัด

ต่อไฟฟ้าเป็นจังหวะตามที่โหลดต้องการ ส่งให้กับหม้อแปลงแกนเฟอร์ไรท์ซึ่งออกแบบไว้ให้มีกำลังตามต้องการ ศักดาไฟฟ้ากระแสตรงทางออกจะถูกป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าอ้างอิง พร้อมทั้งนำผลต่างจากการเปรียบเทียบไปควบคุมจังหวะการตัดต่อกระแสไฟฟ้าของ switching element เพื่อปรับศักดาไฟฟ้าทางออกให้คงที่ จะเห็นว่าการควบคุมแบบสวิตซ์ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ switching element จะมีน้อยกว่าเนื่องจากวงจรจะเปิดปิดเป็นจังหวะตามความต้องการของโหลด

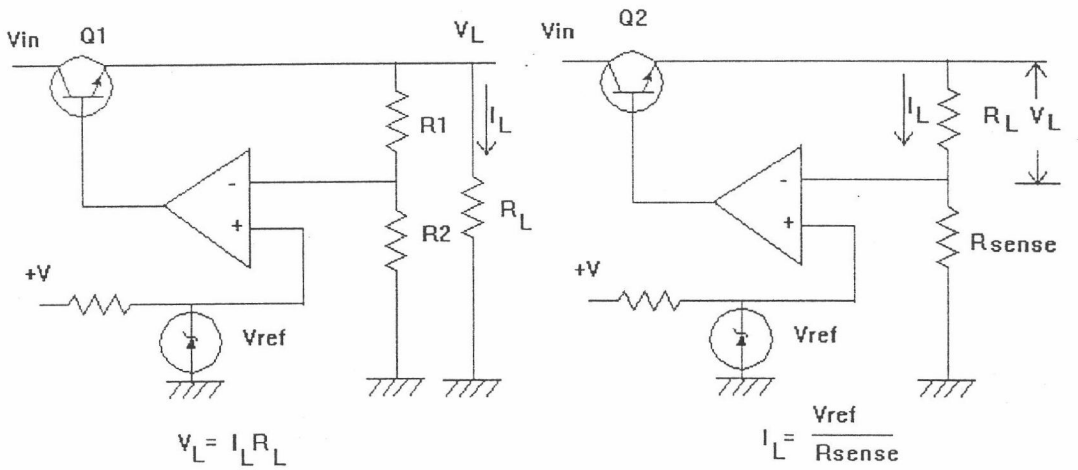
ตาราง2.1 แสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์และคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้นและแบบสวิตซ์

อุปกรณ์และคุณลักษณะ	แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบเชิงเส้น	แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์
ISOLATION TRANSFORMER	ใช้ศักดาไฟฟ้าแบบ AC ลักษณะแบบsine ความถี่ 50 Hz, ใช้แกนทำด้วยเหล็ก	ศักดาไฟฟ้ามีลักษณะเป็น square wave ใช้ความถี่ 20 kHz ถึง 1 MHz ใช้แกนทำด้วยสารเฟอร์ไรท์
น้ำหนักและขนาด	น้ำหนักมากและขนาดใหญ่	น้ำหนักเบาและขนาดเล็ก
เปอร์เซ็นต์ศักดาไฟฟ้าด้านเข้าเปลี่ยนแปลงที่ยังสามารถควบคุมศักดาไฟฟ้าด้านออกได้	+ หรือ - 10 %	มากกว่า + หรือ - 20 %

จากคุณสมบัติในตารางที่ 2.1จะเห็นได้ว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องการกระแสสูงน้ำหนักเบาและขนาดเล็กจะเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า

2.4.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบศักดาคงที่และกระแสคงที่

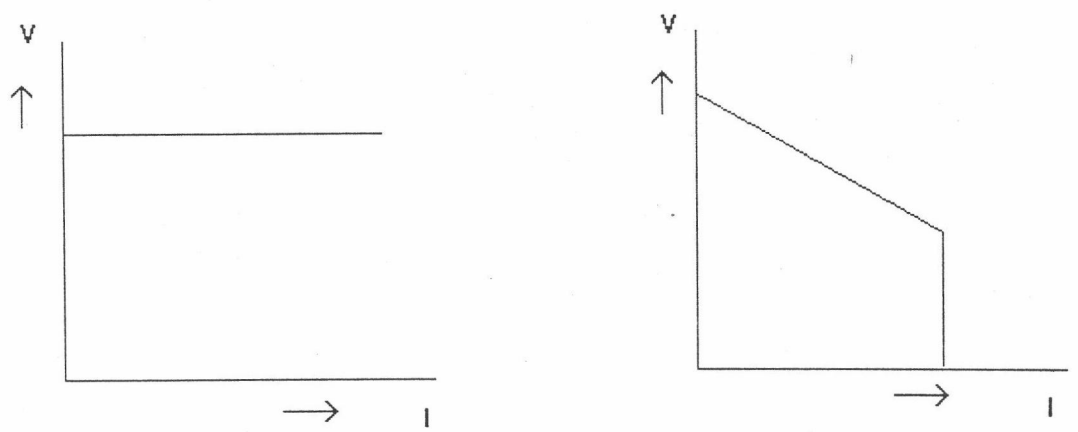
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมลักษณะของกระแสไฟฟ้าทางออกได้ 2 ลักษณะคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบศักดาไฟฟ้าทางออกคงที่และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบกระแสทางออกคงที่ ดังแสดงรูปแบบของวงจรเบื้องต้นในรูปที่ 2.6 ก. และ ข. ตามลำดับ



ก. แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าทางออกคงที่ ข. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทางออกคงที่

รูปที่ 2.6 รูปแบบของวงจรแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางออกคงที่

ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบศักดาไฟฟ้าทางออกคงที่ในขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลงกระแส I_L จะเปลี่ยนแปลงแต่ศักดาไฟฟ้าทางออก V_L จะคงที่ ขณะที่วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้กระแสทางออกคงที่ขณะที่โหลดเปลี่ยนแปลงแต่กระแส I_L จะคงที่ ทำให้ได้เส้นกราฟคุณลักษณะของแหล่งจ่ายในรูปที่2.7 ก. และข. ตามลำดับ สำหรับเครื่องเชื่อมไฟฟ้าจะออกแบบให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ เนื่องจากกระแสจะเป็นสัดส่วนกับกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่จะเชื่อม



ก. แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าคงที่ ข. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่

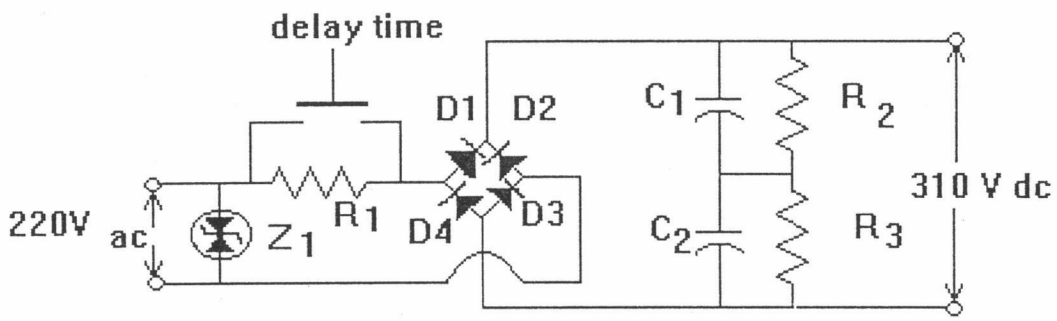
รูปที่ 2.7 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.5 ทฤษฎีการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์

2.5.1 วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (rectifier and filter circuit)

ส่วนประกอบจากแผนภาพการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์ส่วนแรกสุดคือ วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงประกอบด้วยวงจรหลัก 2 วงจรคือ วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองกระแส (rectifier and filter circuit)

วงจรเรียงกระแสจะใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (bridge rectifier) และวงจรกรองกระแสจะใช้ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นตัวกรองกระแสให้เรียบนอกจากนี้ยังมีวงจรที่ทำหน้าที่ป้องกันการทำงานผิดปกติได้แก่ inrush current , input transient ที่ Z_1 ในวงจรส่วนนี้ด้วย ดังวงจรรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

การหาขนาดตัวเก็บประจุกรองกระแสด้านเข้า(Input filter capacitor)[2]

จากสูตร $C = \frac{It}{\Delta V}$ 2.3

โดยที่

C = capacitance , μF

I = load current , A

t = เวลาที่ตัวเก็บประจุต้องจ่ายกระแส, μs

ΔV = ขนาดของศักดาไฟฟ้าริปเปิล, V

2.5.2 วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับ

(DC to AC Converter Circuit)

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตช์แบ่งออกได้หลายรูปแบบตามลักษณะของการจัดหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งมีซึ่งมีวงจรพื้นฐานตามรูป 2.9 ได้แก่

ก. Flyback converter

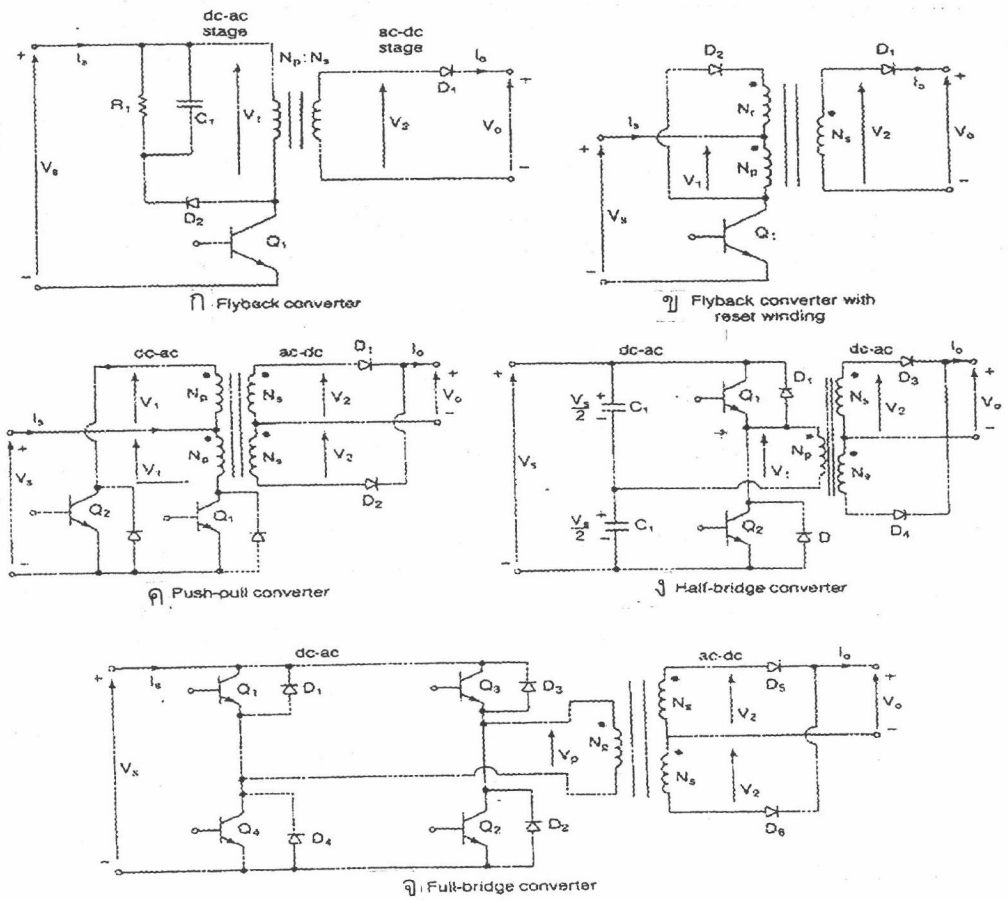
ข. Flyback converter with reset winding

ค. Push-pull converter

ง. Half bridge converter

จ. Full bridge converter

ลักษณะเฉพาะของวงจรแปลงกระแสแบบต่าง ๆนี้ทำให้พิกัดกำลังที่สามารถรับได้แต่ละแบบไม่เท่ากัน วงจรในแบบแบบ half bridge สามารถรับพิกัดกำลังได้ถึง 1000 W ซึ่งใกล้เคียงกับความต้องการงานวิจัยนี้จึงเลือก half bridge converter โดยลักษณะของวงจรแปลงกระแสแบบนี้เป็นไปตามรูปที่ 2.9 ง.



รูป 2.9 รูปแบบของวงจรแปลงกระแสแบบต่าง ๆ

การขับหม้อแปลงความถี่สูงในวงจร half bridge นี้อาจใช้ชิ้นส่วนสวิตช์กำลังในตระกูลทรานซิสเตอร์ได้แก่ BJT,MOSFETหรือ IGBT อย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวงจรที่ออกแบบนั้น ในข้อที่ 2.5.4 แสดงคุณลักษณะของชิ้นส่วนกำลังในตระกูลทรานซิสเตอร์

2.5.3 การเลือกชิ้นส่วนที่ใช้ในการสวิตช์

ชิ้นส่วนที่สามารถนำมาใช้ในการสวิตช์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับความถี่สูงสามารถเลือกได้มีอยู่ 3 ชนิดคือ power transistor , power MOSFET , IGBT ซึ่งแต่ละแบบมีลักษณะพิกัดดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3[3]

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของชิ้นส่วนสวิตช์

Type	Voltage/current rating	Upper frequency (Hz)	Switching time (μs)	On-state resistance
Power BJT transistors	400 V/250A	20k	9	4m
	400 V/40 A	20k	6	31m
		25k	1.7	15m
Power MOSFETS	500 V/8.6 A	100 k	0.7	0.6
	1000 V/ 4.7 A	100 k	0.9	2
	500 V/ 50 A	100 k	0.6	0.4m
IGBT	1200 V/ 400 A	20 k	2.3	60m

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของชิ้นส่วนสวิตช์

Device	Power Capacity	Switching Speed
BJT/MD	Medium	Meduim
MOSFET	Low	Fast
GTO	High	Slow
IGBT	Medium	Medium
MCT	Medium	Medium

คุณลักษณะที่สำคัญในการพิจารณาตารางที่ 2.2 ได้แก่

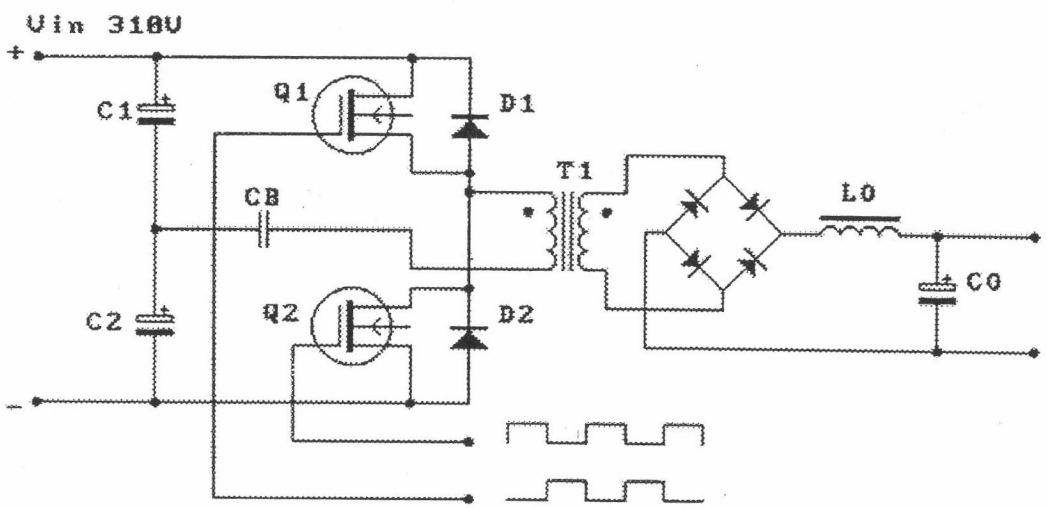
ก. อัตราทนศักดาไฟฟ้าและกระแสสูงสุด (voltage / current rating) ที่ชิ้นส่วนแต่ละชนิดทนได้ ในการใช้งานมักใช้ที่ 80 % ของค่าสูงสุด โดยเผื่อความปลอดภัยในการทำงาน (safety factor) ไว้ 20 %

ข. ความถี่สูงสุดที่ชิ้นส่วนแต่ละชนิดสามารถทำงานได้

ค. เวลาในการสวิตช์ ซึ่งบ่งบอกความไวในการตอบสนองสภาวะของคลื่นสัญญาณรูปเหลี่ยมที่ป้อนเข้าขับทางวงจรด้านเข้า

ง. ความต้านทานภายในของชิ้นส่วน เมื่ออยู่ในสภาวะกระแสอิ่มตัว ซึ่งสามารถคำนวณหาศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นส่วนที่อยู่ในภาวะอิ่มตัวได้

2.5.4 หลักการทำงานของ half bridge converter



D01-D04 = ultra-fast recovery diode

Q_1-Q_2 = power MOSFET

รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของวงจร half bridge converter

วงจร half bridge converter ในรูปที่ 2.10 นี้ใช้ MOSFET 2 ตัวสลับกันขับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 โดยสัญญาณขับที่ขาเกตของ Q_1 จะบังคับให้ Q_1 นำกระแสในครึ่งคาบเวลา ขณะที่ Q_2 หยุดนำกระแสอยู่ จากนั้น Q_2 จะสลับกันนำกระแสในครึ่งคาบเวลาที่เหลือ ขณะที่ Q_1 หยุดนำกระแสดังแสดงภาวะการทำงานในรูปที่ 2.11 สลับกันทำงานเช่นนี้ต่อเนื่อง

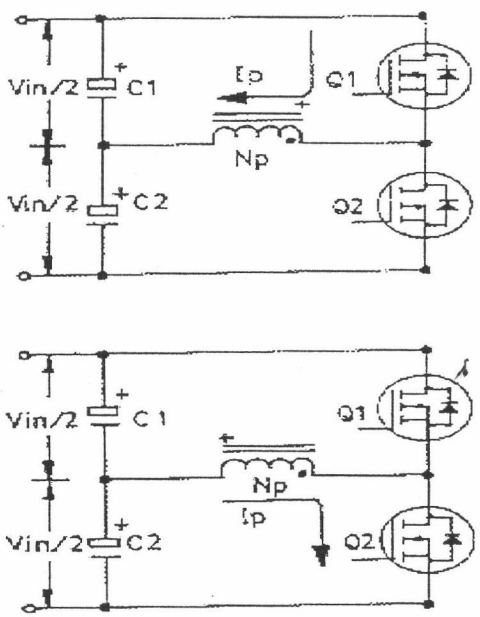
กันไปซึ่งจะทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเท่ากับ $\frac{V_{in}}{2} - V_{ce(sat)}$ และเกิดกระแสเหนี่ยวนำไปยังขดลวดทุติยภูมิของขด T1 ตามสมการหม้อแปลงไฟฟ้าดังนี้

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad \text{.....2.4}$$

เมื่อ N_P และ N_S เป็นจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ

V_P และ V_S เป็นศักดาไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

I_P และ I_S เป็นกระแสไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

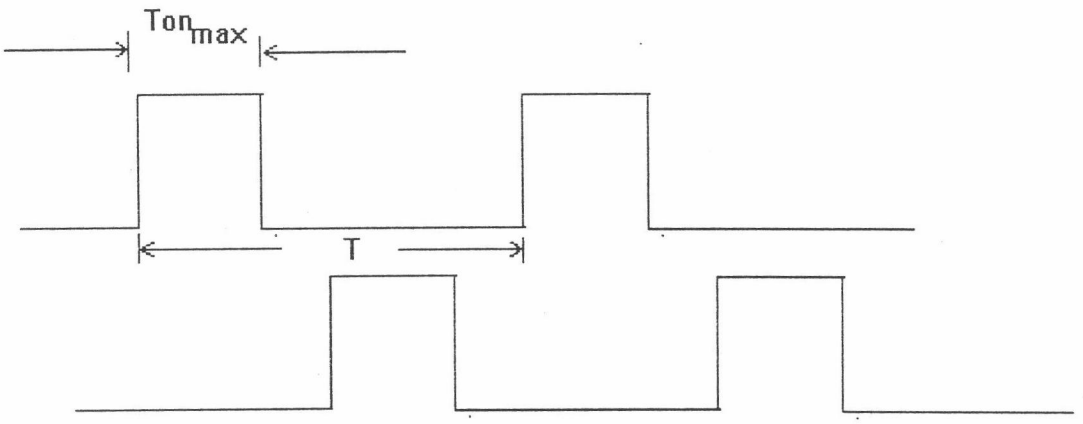


รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการทำงานของวงจร half bridge converter

ศักดาไฟฟ้าทางออกที่ขดทุติยภูมิจะได้รับการปรับเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากไดโอด D_{01}-D_{04} ที่จัดวงจรแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองแบบ LC

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรสวิตช์จะเห็นได้ว่า Q_1 และ Q_2 นำกระแสพร้อมกันไม่ได้จะทำให้เกิดการลัดวงจรทำให้ MOSFET และอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้าเสียหายทันที จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันโดยจำกัดช่วงเวลานำกระแสสูงสุดไว้ไม่เกิน 80 % ของครึ่งคาบเวลาซึ่งเขียนสมการได้เป็น

$$T_{on}\ (\ Max\ ) = 0.8\ (\ T/2\ ) = 0.4\ T \quad \text{.....2.5}$$

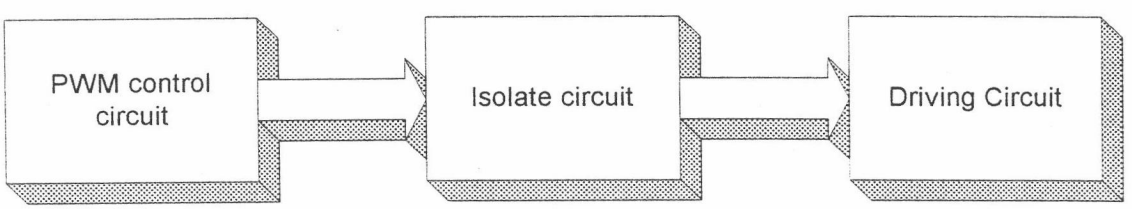


รูปที่ 2.12 แผนภาพเวลาของสัญญาณขับเกตของวงจรสวิตช์

ในกรณีที่ความถี่ของวงจรสูงไม่เกิน 20 kHz สามารถเลือกใช้ IGBT ทำงานแทนในวงจรสวิตช์ที่ออกแบบไว้ด้วย power MOSFET ที่มีอัตราทนศักดาไฟฟ้าและกระแสเท่ากันได้ เนื่องจากชิ้นส่วนทั้งสองมีความแตกต่างกันที่ความต้านทานภายในทางออกขณะที่นำกระแสอิ่มตัวและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

2.5.5 การออกแบบวงจรขับ power MOSFET

วงจรขับ power MOSFET จะรับสัญญาณขับขาเกตของ power MOSFET มาจากวงจรควบคุมซึ่งจำเป็นต้องเป็นวงจรแยกกราวนด์ตามรูปที่ 2.13



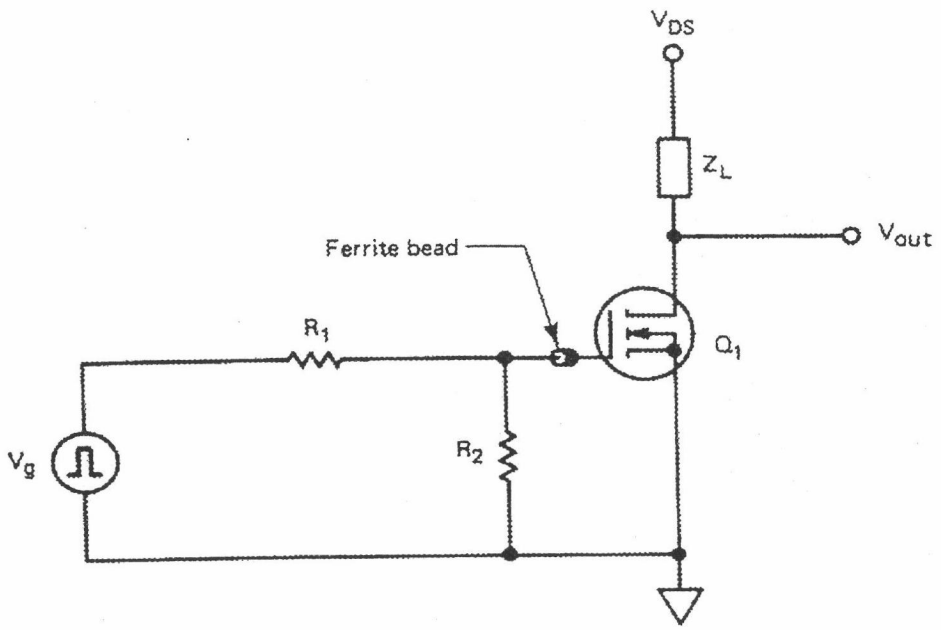
รูปที่ 2.13 แผนภาพของวงจรขับ power MOSFET ที่รับสัญญาณมาจากวงจรควบคุมโดยผ่านวงจรแยกกราวนน์

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการป้องกันการเกิดการ oscillation ของวงจรขับ power MOSFET เมื่อใช้งานที่ความถี่สูง

ก) ต้องพยายามจัดวางชิ้นส่วนในวงจรให้ระยะทางจากวงจรขับไปถึง ขั้วต่อของ power MOSFET สั้นที่สุดเพื่อให้เดินสายเป็นระยะทางสั้นที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายสัญญาณขับเกตต้องพยายามให้สั้นที่สุดและตีเกลียวสายเพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณเหนี่ยวนำ

ข) ในกรณีทีทำตามข้อ(ก) ไม่ได้จำเป็นต้องใช้ ferrite bead ร้อยขาเกตและขาเดรนหรือความต้านทานค่าต่ำๆอนุกรมกับ power MOSFET ดังรูปที่ 2.14

ค) เนื่องมาจาก power MOSFET มีอิมพีแดนซ์ทางเข้า (input impedance) สูงมาก ดังนั้นมีอิมพีแดนซ์ทางออกของวงจรขับจะต้องมีค่าต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด oscillation และเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (fall time) ของ power MOSFET ขึ้นอยู่กับ อิมพีแดนซ์ของวงจรขับและสามารถคำนวณได้ตามสูตรในสมการที่ 2.6[2]



รูปที่ 2.14 รูปแบบวงจรสวิตช์ของ power MOSFET

การประมาณค่า rise time หรือ fall time ใช้สูตรที่ 2.6

$$t_r \text{ or } t_f = 2.2 R_g C_{iss} \quad \text{.....2.6}$$

โดยที่ t_r = MOSFET rise time , ns

t_f = MOSFET fall time , ns

R_g = ความต้านทานภายในของวงจรขับ , Ω

C_{iss} = MOSFET input capacitance , μF

วงจรกำเนิดสัญญาณที่ใช้ขับแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ ดังนี้

ก) วงจรขับที่ออกแบบมาจากวงจรรวมประเภทเกต TTL

ข) วงจรขับที่ออกแบบมาจากวงจรรวมประเภท CMOS วิธีนี้ ให้เวลาขาขึ้นและขาลงที่ต่ำจะทำให้สามารถขับ power MOSFET ที่ความถี่สูงได้

ค) linear circuit เช่น op-amp วิธีนี้ใช้งานได้ดีที่ความถี่ต่ำกว่า 25 kHz

ง) วงจรขับที่ออกแบบด้วยวงจรแยกส่วนประเภท JFET หรือ BJT เป็นต้น

2.5.6 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

2.5.6.1 การออกแบบหม้อแปลงสำหรับวงจร Half Bridge converter[4]

ขั้นตอนของการคำนวณหารอบของขดลวดเริ่มจาก

ก) คาบเวลาการทำงาน (T)

$$T = 1/f \quad \text{.....2.7}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ (Hz)

ข) ใช้สมการ 2.5 คำนวณหาค่า T_{on}(Max) จะได้

$$T_{on}\ (\text{Max}) = 0.4\ T \quad \mu s \text{ .....2.8}$$

ค) กำหนดจำนวนรอบขด primary (N_p)

$$N_p = \frac{V_p \times t_{on}}{\Delta B \times A_{cp}} \quad \text{.....2.9}$$

โดยที่ N_p = จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ (primmary turn)

V_P = ศักดาไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (primary voltage) , V_{dc}

t_{on} = ช่วงเวลานำกระแส (on time) , μs

ΔB = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (total flux density) , mT

A_{cp} = พื้นที่หน้าตัดของแกน (minimum core area), mm^2

ง) ใช้สมการที่ 2.4 คำนวณจำนวนรอบขด secondary (N_s)

$$N_S = N_P \times \frac{V_s}{V_P} \quad \text{.....2.10}$$

2.5.6.2 เทคนิคการประกอบหม้อแปลง

ตัวหม้อแปลงสวิตช์จะต้องติดตั้งฉากกั้น EMI เพื่อลดการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ทำได้โดยใช้แผ่นทองแดงที่มีความกว้างประมาณ 30 % ของความกว้างของบอบบิ้น พันรอบแกนเฟอร์ไรท์ และบัดกรีเชื่อมจุดเริ่มต้นและจุดปลายเข้าด้วยกันวิธีนี้จะสามารถลดการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวน EMI ลงได้ ฉากกั้น EMI ควรมีความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด ดังนั้นจึงควรใช้แผ่นทองแดงที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 0.25 mm.ขึ้นไปและแกนของหม้อแปลงต้องอัดแน่นเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วของสนามแม่เหล็กและเกิดเสียงคราง รบกวน

2.5.7 การออกแบบและเลือกชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเรียงกระแสและกรองกระแสด้านออก

อุปกรณ์ที่ใช้เรียงกระแสด้านออกใช้ไดโอดซึ่งจะต้องตอบสนองการเรียงกระแสซึ่งมีความถี่สูง (20 kHz) ดังนั้นจึงต้องใช้ไดโอดชนิด ultrafast recovery ซึ่งไดโอดแบบนี้จะมี reverse recovery time, t_{rr} ต่ำทำให้เรียงกระแสได้ถูกต้องไม่นำกระแสในภาวะไบอัสกลับทาง

ส่วนการกรองกระแสด้านออกให้มีความเรียบมากขึ้นใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (inductor) ซึ่งต้องใช้แบบที่เป็นแกนทำด้วยสารเฟอร์ไรท์เพราะสามารถตอบสนองความถี่สูงได้ดีกว่าแกนเหล็กและการออกแบบเป็นไปตามสมการสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$L = \frac{E_{out} t_{off}}{0.25 I_{out}} \quad \text{.....2.11}$$

L คือ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ , H

E_{out} คือ ศักดาด้านออก , V

t_{off} คือ ช่วงเวลาที่ไม่นำกระแส , s

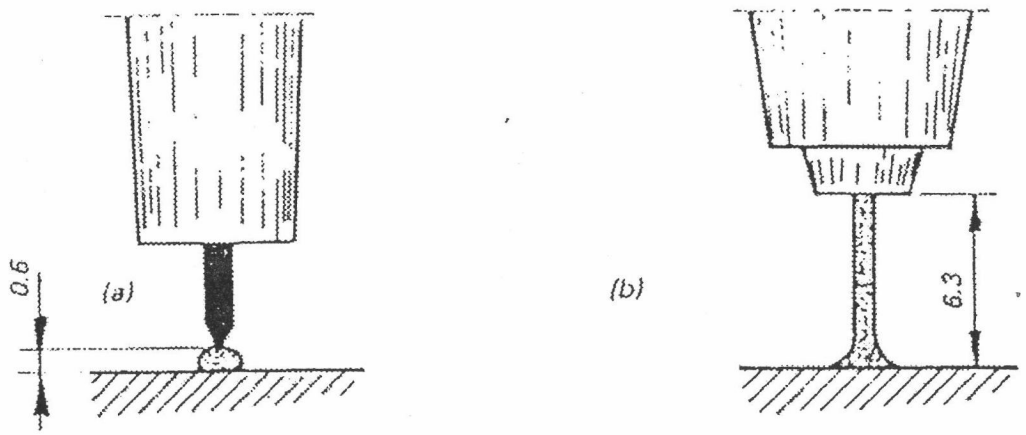
I_{out} คือ กระแสด้านออก , A

$$t_{off} = \frac{1 - \left(E_{out} / E_{in} \right)}{2 f} \quad \text{.....2.12}$$

f คือ ความถี่ , Hz

2.6 การเชื่อมด้วยไมโครอาร์คพลาสมา

โดยทั่วไปอาร์คพลาสมาที่ใช้กระแสต่ำ 0.1 ถึง 15 แอมแปร์ จะจัดอยู่ในประเภทไมโครอาร์คพลาสมา การรักษาอาร์คพลาสมาให้คงที่อยู่ได้จะต้องมีศักดาไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าประมาณ 50 -60 โวลต์ขณะอาร์ค[4] การใช้ไมโครอาร์คพลาสมาเชื่อมโลหะจะคล้ายกับการเชื่อมแบบทังสเตนอินเนอร์ตแกส (TIG) ต่างกันที่หัวเชื่อมแบบ TIG เป็นแบบอาร์คโดยตรง ส่วนโครงสร้างของหัวเชื่อมแบบไมโครอาร์คพลาสมาจะมีช่องบังคับแกสภายในดังรูปที่ 2.2 จึงทำให้งานเชื่อมที่ใช้หัวอาร์คพลาสมามีช่วงอาร์คไกลกว่า ดังภาพเปรียบเทียบในรูป 2.15 เมื่อใช้กระแสอาร์คของหัวเชื่อม 10 แอมแปร์เท่ากัน



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบลักษณะของอาร์คที่เกิดจากการเชื่อม
แบบ TIG และแบบไมโครอาร์คพลาสมา

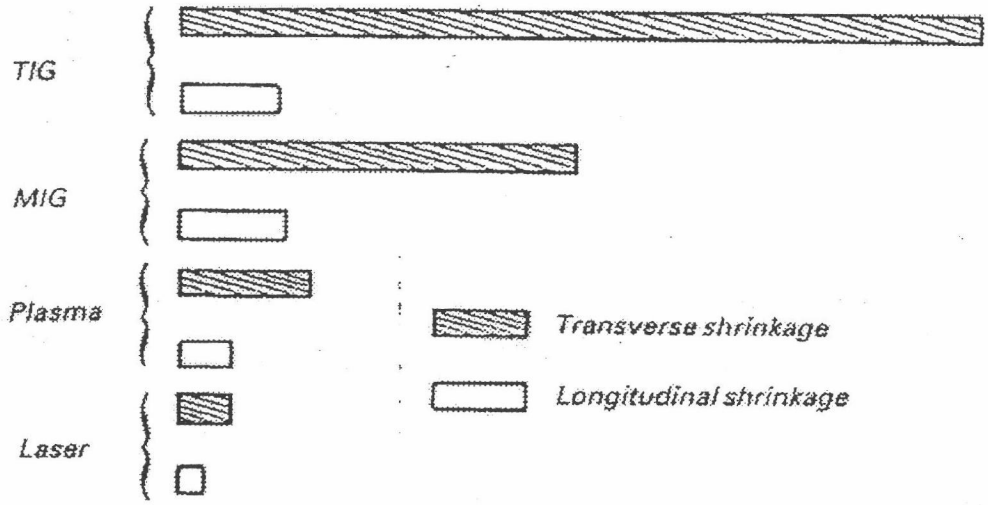
เมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) โดยวิธีการเชื่อมแบบไมโครอาร์คพลาสมากับเทคนิคการเชื่อมที่ใกล้เคียงกันไมโครอาร์คพลาสมาจะเชื่อมชิ้นงานโลหะชนิดนี้ได้บางกว่าดังนี้

ก. การเชื่อมแบบไมโครอาร์คพลาสมาเชื่อมได้หนา 0.01 -1.5 mm.

ข. การเชื่อมแบบ TIG เชื่อมได้หนา 1 - 4 mm.

ค. การเชื่อมแบบพลาสมากระแสสูง เชื่อมได้หนา 3 - 8 mm.

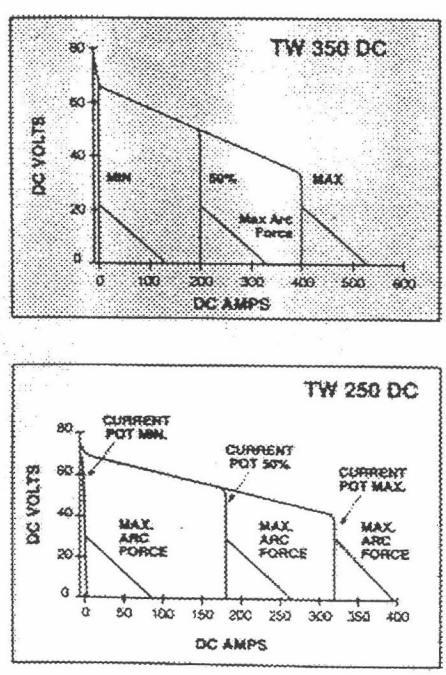
นอกจากนี้การเชื่อมโลหะจากแหล่งผลิตความร้อนไมโครอาร์คพลาสมาจะมีผลให้เกิดการหดตัวของรอยเชื่อมน้อยกว่าการเชื่อมแบบ TIG และ แบบ MIG ดังภาพเปรียบเทียบการหดตัวของการเชื่อมเทคนิคต่าง ๆดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบการหดตัวของแนวเชื่อมหลังจากการเชื่อมด้วยวิธีต่าง ๆ

2.7 คุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับงานเชื่อมด้วยอาร์คพลาสมา

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับงานเชื่อมด้วยอาร์คพลาสมา จะต้องมีศักดาไฟฟ้าทางออกวงจรเปิด 40 -100 โวลต์ และขณะทำงานจะตกลงมาเหลือเพียงพอให้สามารถรักษาอาร์คพลาสมาให้ทำงานอยู่ได้ ในอาร์คพลาสมาแบบไมโครศักดาไฟฟ้าทางออกจะไม่ลดลงมากนัก ลักษณะการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับงานเชื่อมแบบอาร์คพลาสมาจะมีรูปแบบของการจ่ายกระแสแบบคงที่ และมีการควบคุมศักดาไฟฟ้าทางออกไม่ให้ลดลงมาก ดังแสดงเส้นกราฟคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับงานเชื่อมอาร์คพลาสมาในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.7 เส้นกราฟคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในงานเชื่อมอาร์คพลาสมา