หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

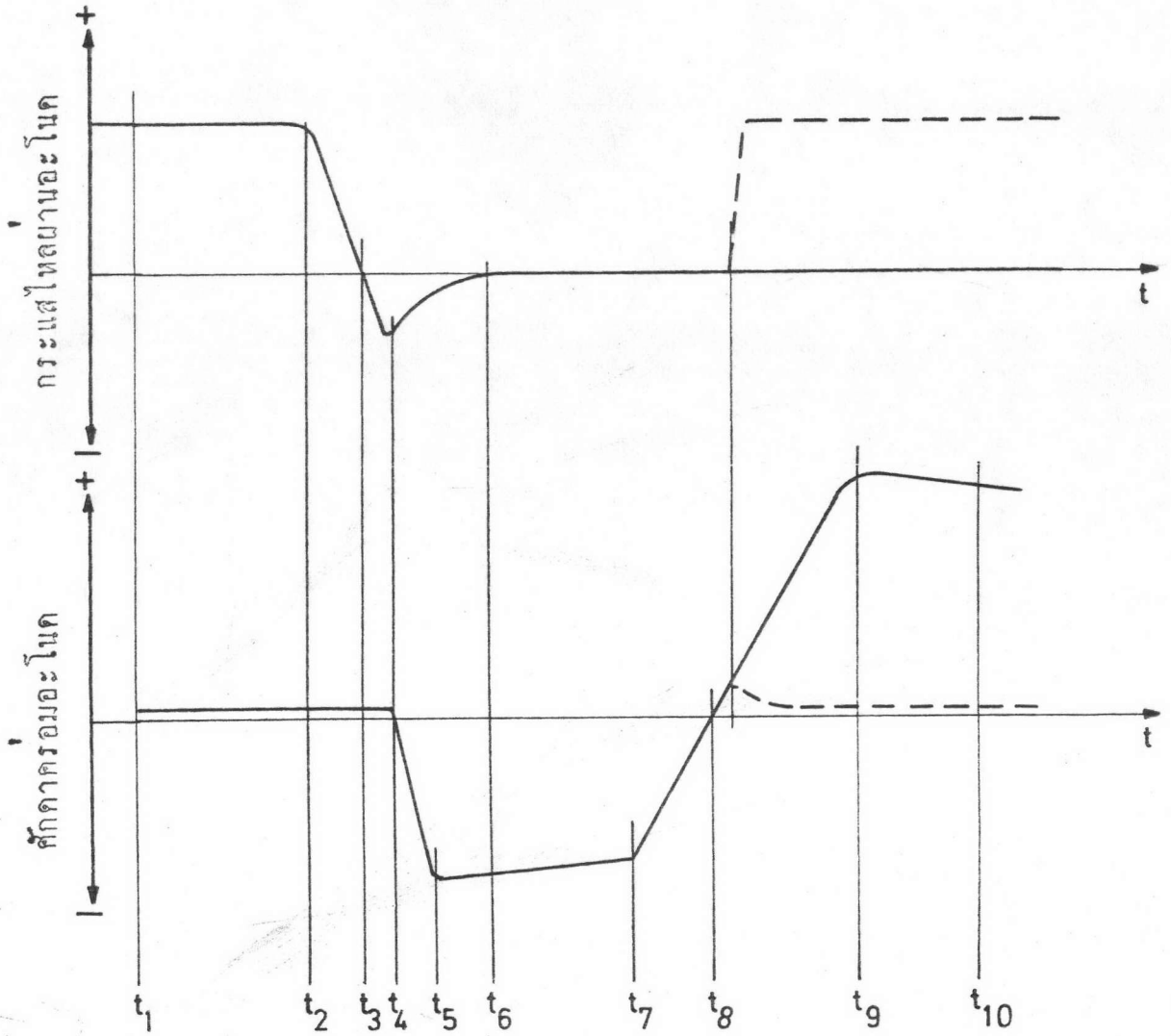
บทที่ 2

ทฤษฎีการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เอสซีอาร์

เนื้อหาที่จะกล่าวในบทนี้แบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ ๆ ได้สองส่วนคือ ส่วนแรกกล่าวถึงขีดจำกัดของเอสซีอาร์ที่เกี่ยวกับเวลาการหยุดนำกระแสและปัญหาต่อเนื่องในวงจรอินเวอร์เทอร์ ส่วนหลังจะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เทอร์แบบพื้นฐาน และแบบที่ใช้ทดลองศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

2.1 สภาวะนำกระแส – ไม่นำกระแส และเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์

ในวงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เอสซีอาร์นั้น เอสซีอาร์จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสให้ไหลตามจังหวะที่ต้องการ ในขณะที่เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะไม่นำกระแส (off) สามารถทำให้มันเปลี่ยนไปสู่สภาวะนำกระแส (On) ได้โดยให้ศึกษาไฟฟ้าบวกที่ขั้วอะโนด (Anode) เทียบกับขั้วคาโทด (Cathode) แล้วป้อนกระแสไฟฟ้าขนาดที่เอสซีอาร์นั้นต้องการที่ขั้วเกท (Gate) เพื่อทำหน้าที่จุดชนวน เอสซีอาร์ก็จะนำกระแสได้ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มใส่สัญญาณจุดชนวนจนถึงเวลาที่กระแสอะโนดสามารถไหลได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของกระแสที่ไหลเต็มที่ เรียกว่า เวลาการเปิดกระแสของเอสซีอาร์ (S.C.R. Turn on time) เท่าที่เป็นมาเวลาการเปิดกระแสนี้น้อยมาก ไม่ทำให้เกิดปัญหาในการสร้างวงจรอินเวอร์เทอร์ ส่วนการเปลี่ยนสภาวะของ เอสซีอาร์ จากสภาวะนำกระแสไปเป็นหยุดนำกระแสนั้น ไม่อาจควบคุมได้โดยตรง นอกจากจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์หยุดไหลหรือไหลย้อนกลับชั่วระยะเวลาหนึ่งที่นานเพียงพอ เอสซีอาร์จึงจะหยุดนำกระแสได้ ระยะเวลาสั้นที่สุดตั้งแต่กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์เป็นศูนย์จนกระทั่งศักดาไฟฟ้าที่อะโนดเริ่มเป็นบวกใหม่ แล้วเอสซีอาร์ยังสามารถหยุดนำกระแสได้ คือเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้อย่างละเอียดดังรูป 2.1 เริ่มตั้งแต่เวลา t_1 ถึง t_2



รูป 2.1 รูปคลื่นกระแสและศักดาไฟฟ้าที่ขั้วอะโนดของเอสซีอาร์ในขณะถูกทำให้หยุดทำงาน (เส้นประในรูปคลื่นของกระแสและศักดาจากเวลา t_8 เป็นต้นไป แสดงให้เห็นกรณีเอสซีอาร์ถูกแรงดันกลับ นานไม่พอทำให้มันกลับมานำกระแสอีก เมื่อแรงดันกลับเป็นบวกอีกครั้งหนึ่ง)

คือ ช่วงที่เอสซีอาร์นำกระแสจะเห็นว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วอะโนด เมื่อเทียบกับคาโทด เป็นบวกเล็กน้อยเกือบเท่ากับศูนย์ ขณะเวลา t_2 เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนด้วยแรงดันจากภายนอก ทำให้กระแสที่ไหลผ่านอะโนดของเอสซีอาร์ลดลง และเปลี่ยนเป็นลบ (คือ ไหลย้อนทางเดิม) ในช่วง t_3 ถึง t_4 ทั้งนี้เนื่องจากเอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไปอีกระยะหนึ่ง เนื่องจากผลของประจุใน Space charge region (5) ประจุส่วนนี้จะค่อย ๆ ค่อยออกมาจนเหลืออยู่เท่ากับขนาดสมดุลย์ใหม่ของมัน ขณะที่ยังคงประจุอยู่นี้กระแสยังคงไหลย้อนทาง และเมื่อถึงเวลา t_4 เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสน้อยลง ในขณะเดียวกันแรงดันที่อะโนดเริ่มเปลี่ยนเป็นลบตามแรงดันภายนอก t_5 เป็นเวลาที่ศักดาไฟฟ้าลดลงต่ำสุด t_6 เป็นเวลาที่กระแสเพิ่มจากลบเป็นศูนย์ t_7 เป็นเวลาที่แรงดันจากภายนอกเริ่มเพิ่มขึ้นใหม่ ทำให้ศักดาคร่อมเอสซีอาร์เพิ่มขึ้นตาม t_8 คือเวลาขณะที่ศักดาเพิ่มขึ้นถึงศูนย์ t_9 เป็นเวลาที่ศักดาเพิ่มเป็นบวกมากที่สุด t_{10} เป็นเวลาที่ศักดาเข้าสู่ Steady state ตามรูป 2.1 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลา t_3 ถึง t_8 นานพอที่จะทำให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแสโดยสมบูรณ์ คือ เอสซีอาร์ไม่นำกระแสเมื่อแรงดันที่อะโนดเปลี่ยนเป็นบวกใหม่

ระยะเวลาสิ้นสุดของ t_3 ถึง t_8 (t_q) ที่เอสซีอาร์ยังสามารถหยุดนำกระแสได้ เราเรียกระยะเวลานี้ว่า เวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์

เวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ

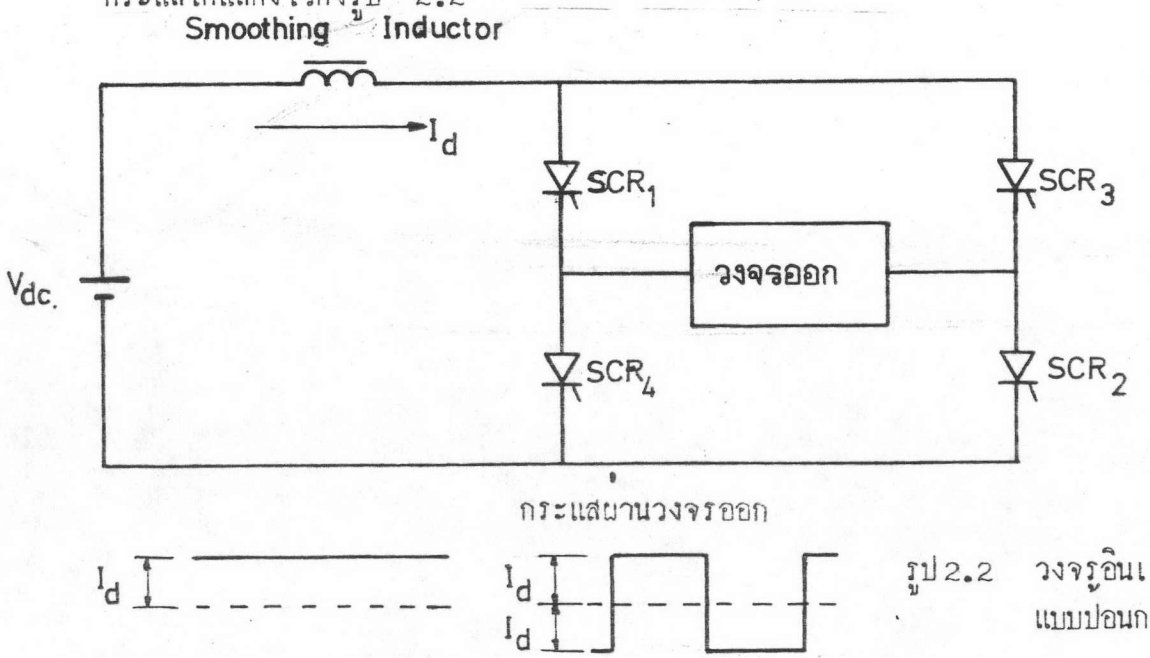
1. เพิ่มตามอุณหภูมิภายในเอสซีอาร์
2. เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสตาม (Forward currentเพิ่ม (กระแสช่วง t_1 ถึง t_2)
3. เพิ่มเมื่ออัตราการลดของกระแสรวดเร็วขึ้น (ช่วง t_2 ถึง t_3)
4. เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสต่ำสุดในช่วงลบมีขนาดน้อยลง (กระแสขณะ t_4)
5. เพิ่มขึ้นเมื่อศักดาตอนช่วงลบเป็นลบน้อยลง (ศักดาในช่วง t_5 ถึง t_7)
6. เพิ่มขึ้นตามอัตราการเพิ่มของ Blocking Voltage (ช่วงเวลา t_8 ถึง t_9)

7. เพิ่มขึ้นตาม Blocking Voltage (ศักดาขณะ t_{10})
8. เพิ่มขึ้นตามศักดาบวกที่ไบอัส (bias) ขั้วเกท

ดังนั้นค่าเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ที่ชัดเจนและมีความหมายจะต้องบอกเงื่อนไขของปัจจัยเหล่านี้ในขณะทดสอบด้วย

2.2 วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เอสซีอาร์ (S.C.R. Inverter)

วงจรเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เอสซีอาร์ ที่กล่าวถึงเป็นแบบป้อนกระแส (Current Fed Inverter) (2) เหตุที่ใช้วงจรแบบนี้เพราะเป็นวงจรที่ใช้ได้ดีที่ความถี่และกำลังไฟฟ้าออกสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เทอร์แบบอื่น เช่น แบบ McMurray (4) ปรากฏว่าวงจรอินเวอร์เทอร์แบบ McMurray มีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่า และให้ความถี่ของสัญญาณออกต่ำกว่า ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เทอร์แบบ Bridge (4) ปรากฏว่าวงจรแบบ Bridge ให้กำลังงานออกน้อยกว่า คือศักดาออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมและไม่เต็มครึ่งคาบเวลา ลักษณะรูปร่างของวงจรอินเวอร์เทอร์แบบป้อนกระแสได้แสดงไว้ดังรูป 2.2



รูป 2.2 วงจรอินเวอร์เทอร์แบบป้อนกระแส

วงจรประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Smoothing Coil) เอสซีอาร์ 4 ตัว คือ SCR_1, SCR_2, SCR_3 และ SCR_4 และวงจรออก (Output Circuit)

ขดลวดเหนี่ยวนำนี้มีหน้าที่ทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านเรียบและไหลอย่างต่อเนื่อง ลดสัญญาณเข็มเล็ก ๆ (Spike) และยังช่วยป้องกันมิให้เอสซีอาร์เสียหายอันเกิดจากกระแสกระชาก (Surge Current)

เอสซีอาร์ 4 ตัวจะทำงานสลับกันทีละคู่ คือคู่ SCR_1 กับ SCR_2 และ SCR_3 กับ SCR_4 เมื่อจุดชนวนเอสซีอาร์คู่ใดคู่หนึ่งสมมติว่าคู่ SCR_1 กับ SCR_2 กระแสไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผ่านขดลวดเหนี่ยวนำผ่าน SCR_1 ผ่านวงจรออกและผ่าน SCR_2 เข้าขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และถ้าจุดชนวนเอสซีอาร์อีกคู่ให้ทำงาน คือ SCR_3 กับ SCR_4 โดยให้ SCR_1 กับ SCR_2 หยุดนำกระแส กระแส็จะไหลผ่าน SCR_3 ผ่านวงจรออกแล้วผ่าน SCR_4 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรออกจะกลับทิศทางไหลเมื่อสลับการจุดชนวนเอสซีอาร์แต่ละคู่ ดังนั้นกระแสไฟที่ไหลผ่านวงจรออกก็จะไหลไปมาดังรูปคลื่น Square Wave ซึ่งเอสซีอาร์แต่ละคู่จะทำงานที่ละครึ่งคาบของเวลา

วงจรออกจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

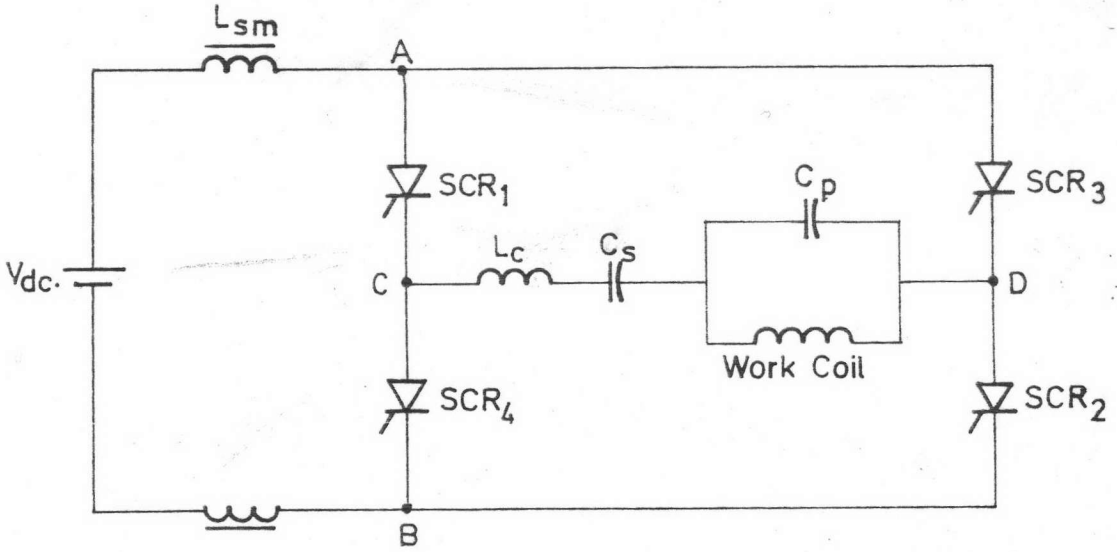
1. ที่ความถี่พื้นฐาน (Fundamental) ของรูปคลื่นกระแสนั้นมุมเฟส (Phase angle) ของวงจรออกจะต้องปรากฏนำหน้า (Leading) ในขนาดเพียงพอสำหรับการเปลี่ยนทิศทางไหลของกระแสจากเอสซีอาร์คู่หนึ่งไปสู่เอสซีอาร์อีกคู่หนึ่ง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือในขณะที่จุดชนวนเอสซีอาร์คู่ใหม่ เอสซีอาร์คู่เดิมสามารถหยุดนำกระแสได้โดยการจัดให้อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของวงจรออกมี Power factor เป็น Leading มากพอ ศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคร่อมวงจรออกในขณะนั้นจะทำหน้าที่ไบอัสย้อนทาง (Reverse Bias) เอสซีอาร์คู่เดิมนานเพียงพอที่สามารถทำให้เอสซีอาร์คู่เดิมหยุดนำกระแสได้

2. ที่ความถี่ฮารโมนิก (Harmonic) อื่น ๆ ของรูปคลื่นกระแส ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรออกจะต้องมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ Fundamental หรืออีกนัยหนึ่งค่า Q แฟคเตอร์ของวงจรออกจะต้องสูงพอ เพื่อให้รูปคลื่นกระแส Square Wave ที่เข้าวงจรออกแล้วได้กระแสใช้งานเป็นรูป Sine Wave ที่สมบูรณ์

2.3 อินเวอร์ทเทอร์แบบป้อนกระแสที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานชดเชยโหลด

(Current - fed inverter with series and parallel capacitor compensate load)

วงจรอินเวอร์ทเทอร์ที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรอินเวอร์ทเทอร์แบบป้อนกระแสซึ่งวงจรออกมีรูปแบบเฉพาะ คือ มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานกับโหลด เช่นเดียวกันกับวงจรอินเวอร์ทเทอร์แบบป้อนกระแสทั่วไป วงจรออกนี้ต้องมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดสำคัญ 2 ข้อ ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2 วงจรมีรูปลักษณะดังแสดงไว้ในรูป 2.3



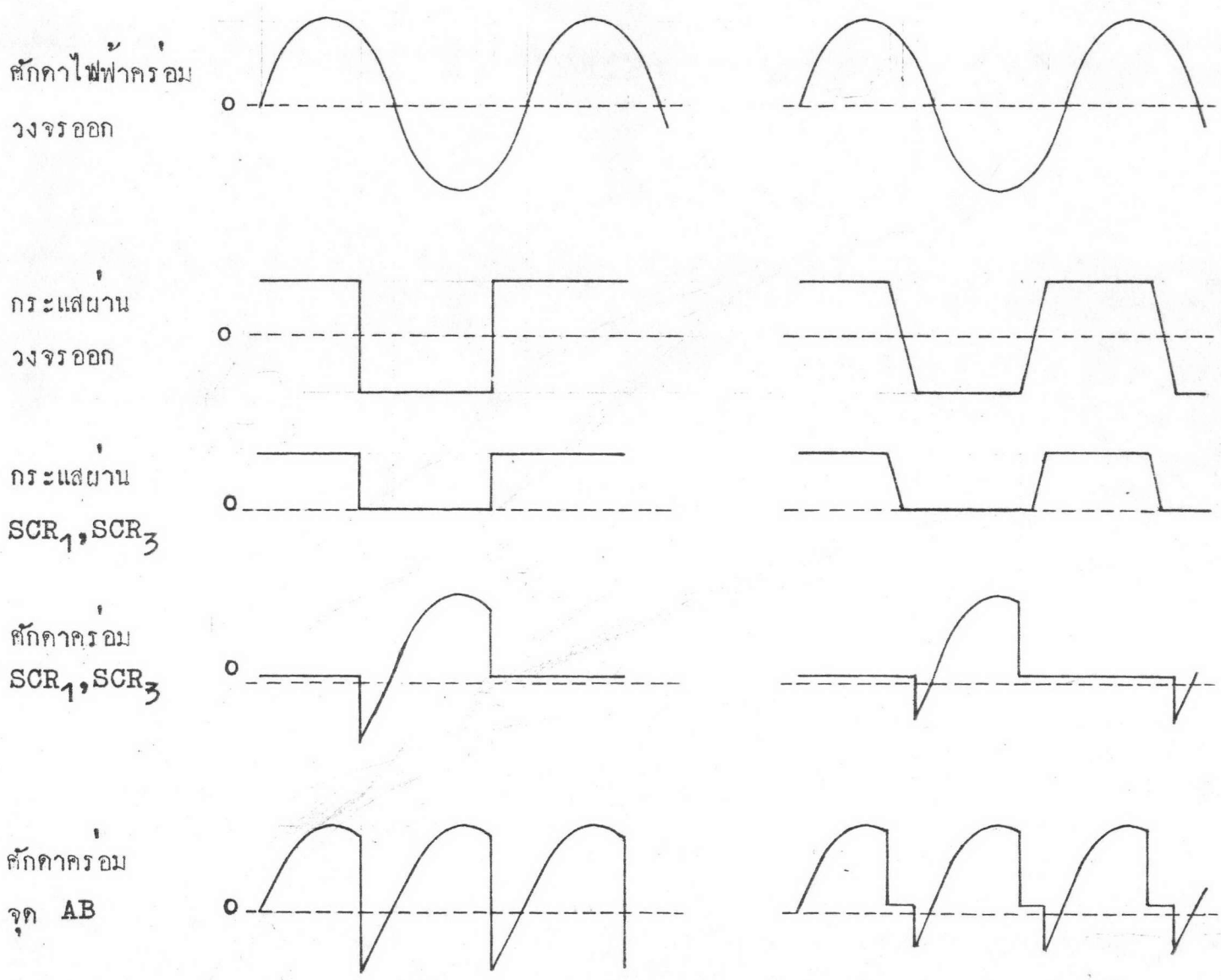
หมายเหตุ C_p = ตัวเก็บประจุต่อขนานกับโหลด

C_s = ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับโหลด

L_c = Stray Inductance

L_{sm} = Smoothing coil

รูป 2.3 วงจรอินเวอร์ทเทอร์แบบป้อนกระแสซึ่งมีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานชดเชยโหลด



(ก) เมื่อไม่มี Stray inductance (ข) เมื่อมี Stray inductance

รูป 2.4 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทำงานของวงจรอินเวอร์เทอร์แบบป้อนกระแสที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานชดเชยโหลด

จากรูป 2.3 โหลดเป็นขดลวดที่พันอยู่รอบโลหะที่ต้องการให้ความร้อน มักจะมีหม้อแปลงตอร่วมเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของขดลวดให้เหมาะสมกับวงจร (Matching) ดังนั้นโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์เป็น Inductive ซึ่งมี Power factor เป็นแบบ Lagging ที่ความถี่ใช้งาน เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรออกเป็นแบบ Leading และเพื่อลด Reactive Load ให้มีค่าต่ำสุด จำเป็นต้องมีตัวเก็บประจุต่อขนานกับโหลด (จากรูปคือ C_p) ส่วน C_s เป็นตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับโหลดซึ่งมีผลกระทบน้อยมากต่ออิมพีแดนซ์ของวงจรออกและความถี่ที่เหมาะสมสำหรับวงจรอินเวอร์ทเทอร์ แต่จะมีผลดีในแง่การเริ่มเปิดวงจรให้ทำงาน (Starting) และประโยชน์อีกข้อขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน คือ ทำให้ความสามารถในการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ (หลังจากที่เอสซีอาร์อีกคู่เริ่มนำกระแส) ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสอย่างเดียวไม่ขึ้นกับขนาดศักดาของโหลดซึ่งทำให้อินเวอร์ทเทอร์สามารถทำงานได้ที่กระแสเต็มที่ (Full rated current) ในทุกระดับของศักดาไฟฟ้า ปกติค่า C_s ควรโตกว่า C_p ทั้งนี้เพื่อให้ Impedance ของ C_s ต่ำกว่า Impedance ของ Load ขนานกับ C_p ซึ่งจะทำให้แรงดันส่วนใหญ่ครอมโหลดนั่นคือกำลังงานส่วนใหญ่จะถูกส่งผ่านไปที่โหลด ส่วน L_c ใช้แทนความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงจร เรียกความเหนี่ยวนำนี้ว่า Stray Inductor

รูป 2.4 เป็นรูปคลื่นของสัญญาณที่ได้จากการทำงานตามทฤษฎีของวงจรอินเวอร์ทเทอร์แบบนี้ โดยถือว่า ค่า Q - factor ของโหลดมีค่าสูงพอ ที่ทำให้รูปคลื่นกระแส Square wave เข้าวงจรออกแล้วได้กระแสใช้งานเป็นรูป sine wave ที่สมบูรณ์ ส่วนรูป 2.4 (ก) เป็นรูปคลื่นในขณะที่ Stray inductor มีค่าน้อยมาก รูป 2.4 (ข) แสดงถึงรูปคลื่นในขณะที่มี Stray inductor ปรากฏในวงจร ซึ่งเห็นได้ว่าผลของ Stray inductor ที่มีต่อวงจรคือ ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรลดลงและศักดาไฟฟ้าตอนช่วงลบ (Peak reverse voltage) ครอมเอสซีอาร์มีค่าลดลง ซึ่งทำให้วงจรสามารถทำงานที่ความถี่ต่ำลงและประสิทธิภาพของวงจรลดลงด้วย

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จะพิจารณาการทำงานของวงจรตามรูป 2.3 และ 2.4 (ก) ควบคู่กันไป โดยเริ่มต้นที่ SCR_1 และ SCR_2 นำกระแส กระแสจะไหลผ่าน SCR_1 วงจรออกและ SCR_2 ในขณะนำกระแสศักดาไฟฟ้าคร่อมเอสซีอาร์ทั้งสองเกือบเท่ากับศูนย์ สมมติให้เท่ากับ Δv ในขณะ SCR_1 และ SCR_2 นำกระแสจะได้

$$v_A = v_C + \Delta v$$

$$v_B = v_D - \Delta v$$

$$v_{AB} = v_{CD} + 2\Delta v \quad \text{.....(2.1)}$$

ตัวเก็บประจุ C_s และ C_p จะเก็บประจุทำให้ v_{CD} เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นบวก เมื่อจุดชนวน SCR_3 กับ SCR_4 ให้นำกระแส ศักดาไฟฟ้าคร่อม SCR_3 และ SCR_4 จะลดลงเท่ากับ Δv ทันที ดังนั้นศักดาที่ A และ B จะเปลี่ยนทันทีเช่นกัน (ศักดาคร่อมAB เปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงมีอิมพีแดนซ์ภายใน คือ ไม่ได้เป็น Voltage Source และมี Smoothing Coil คั่นระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับจุด A,B ด้วย) ดังนั้นในขณะที่ SCR_3 และ SCR_4 นำกระแส จะได้

$$v_A = v_D + \Delta v$$

$$v_B = v_C - \Delta v$$

$$v_{AB} = v_{CD} + 2\Delta v \quad \text{.....(2.2)}$$

$$v_{SCR_1} = v_{AC}$$

$$= v_A - v_C$$

$$= v_D + \Delta v - v_C$$

$$v_{SCR_1} = -v_{CD} + \Delta v \quad \text{.....(2.3)}$$

$$v_{SCR_2} = v_{DB}$$

$$= v_D - v_B$$

$$= v_D - v_C + \Delta v$$

$$v_{SCR_2} = v_{CD} + \Delta v \quad \text{.....(2.4)}$$

เนื่องจาก v_{CD} เปลี่ยนแปลงทันทีไม่ได้จึงยังคงเป็นบวก เพราะเป็นศักดาคร่อมตัวเก็บประจุ และ Δv มีค่าน้อยมาก จากสมการ(2.3) และ(2.4) จะได้ศักดาไฟฟ้าคร่อม SCR_1 และ SCR_2 เป็นลบทันที นั่นคือเอสซีอาร์ทั้งสองถูกไบอัสย้อนทาง ซึ่งทำให้กระแสที่ไหลผ่านเอสซีอาร์ทั้งสองหยุดไหลทันที กระแสที่ไหลในวงจรอินเวอร์เทอร์จะเปลี่ยนเป็นไหลผ่าน SCR_3 วงจรออกและ SCR_4 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรออกจะเปลี่ยนทิศทางไหลไปเป็นตรงข้ามกับเดิม ส่วนตัวเก็บประจุ Cs และ Cp ก็จะเริ่มคายประจุจนหมดแล้วสะสมประจุในทิศทางตรงข้าม ทำให้ v_{CD} ค่อย ๆ เปลี่ยนจากบวกเป็นลบและศักดาคร่อม SCR_1 และ SCR_2 จะค่อย ๆ เปลี่ยนจากลบเป็นบวก ระยะเวลาที่ศักดาไฟฟ้าคร่อมเอสซีอาร์ทั้งสองเป็นลบ คือระยะเวลาที่เอสซีอาร์ทั้งสองถูกไบอัสย้อนทาง ระยะเวลานี้จะต้องมากกว่าเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ทั้งสอง มิฉะนั้นในขณะที่ศักดาคร่อมเอสซีอาร์ทั้งสองเพิ่มเป็นบวก เอสซีอาร์ทั้งสองหรือตัวใดตัวหนึ่งไม่สามารถหยุดนำกระแส คือ เกิดการลัดวงจรในทำนองเดียวกันถ้าจุดชนวนคู่ SCR_1 กับ SCR_2 ให้ทำงานใหม่ SCR_3 และ SCR_4 จะหยุดนำกระแสได้ กระแสที่ไหลผ่านวงจรออกจะกลับทิศทางไหลใหม่ ดังนั้นถ้าสลับจุดชนวนเอสซีอาร์ที่ละคู่เช่นนี้ไปจะได้กระแสที่ไหลผ่านวงจรออกกลับทิศทางไหลเกือบทันทีทันใดซึ่งรูปคลื่นที่ได้จะเป็น Square wave ส่วนศักดาคร่อมจุด CD คือ ศักดาคร่อมวงจรออกจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากบวกเป็นลบและลบเป็นบวก ดังเช่น Sinewave ศักดาคร่อมจุด AB จะเป็นไปตามสมการที่(2.1) และ(2.2) ซึ่งสอดคล้องกับในรูป 2.4 (ก) ศักดาคร่อมเอสซีอาร์จะเกือบเท่ากับศูนย์ในขณะที่เอสซีอาร์คู่นั้นนำกระแส และจะเป็นไปตามสมการที่(2.3) และ(2.4) ในขณะที่เอสซีอาร์นั้นหยุดนำกระแส ส่วนสำคัญที่พึงสังเกต คือ ระยะเวลาที่กระแสผ่านวงจรออกนำหน้าศักดาคร่อมวงจรออก (v_{CD}) มีค่าเกือบเท่ากับระยะเวลาที่ศักดาคร่อมเอสซีอาร์เป็นลบ และถ้าศักดาคร่อมเอสซีอาร์ขณะที่นำกระแสเป็นศูนย์ ($\Delta v=0$) ระยะเวลาทั้งสองจะเท่ากันพอดี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรออก

สำหรับวงจรออกที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานกับโหลด มีผลตอบสนองความถี่ของวงจรดังรูป 2.5 ในรูป 2.5 (a) เป็นผลตอบสนองความถี่ของอิมพีแดนซ์และรูป 2.5 (b) เป็นผลตอบสนองความถี่ของเฟส (Phase)โดยที่ f_{01} คือความถี่กำธร จุดที่ 1 f_{02} คือ ความถี่กำธรจุดที่ 2

จากขอกำหนดของวงจรออกในหัวข้อ 2.2 ว่า มุมเฟสของวงจรออกจะต้องปรากฏนำหน้า (Leading) ในขนาดที่เพียงพอสำหรับการเปลี่ยนทิศทางไหลของเอสซี-อาร์คู่หนึ่งไปสู่เอสซีอาร์อีกคู่หนึ่ง ดังนั้นช่วงความถี่ตั้งแต่ f_{01} ถึง f_{02} วงจรไม่สามารถทำงานได้ และจากขอกำหนดของวงจรออกข้อที่ 2 ว่า คาอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ Harmonic จะต้องต่ำกว่าที่ความถี่ Fundamental ของกระแส จะได้ความถี่ที่วงจรสามารถทำงานได้ดี คือ ความถี่ที่สูงกว่า f_{02} ในที่นี้คือ f_1 ถึง f_2 ดังนั้นความถี่ใช้งานของวงจรขึ้นอยู่กับความถี่ f_{02} แต่ความถี่ f_{02} นี้ขึ้นอยู่กับความถี่กำธรของ C_p ขนานกับโหลดและแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของ C_s จะได้

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}}$$

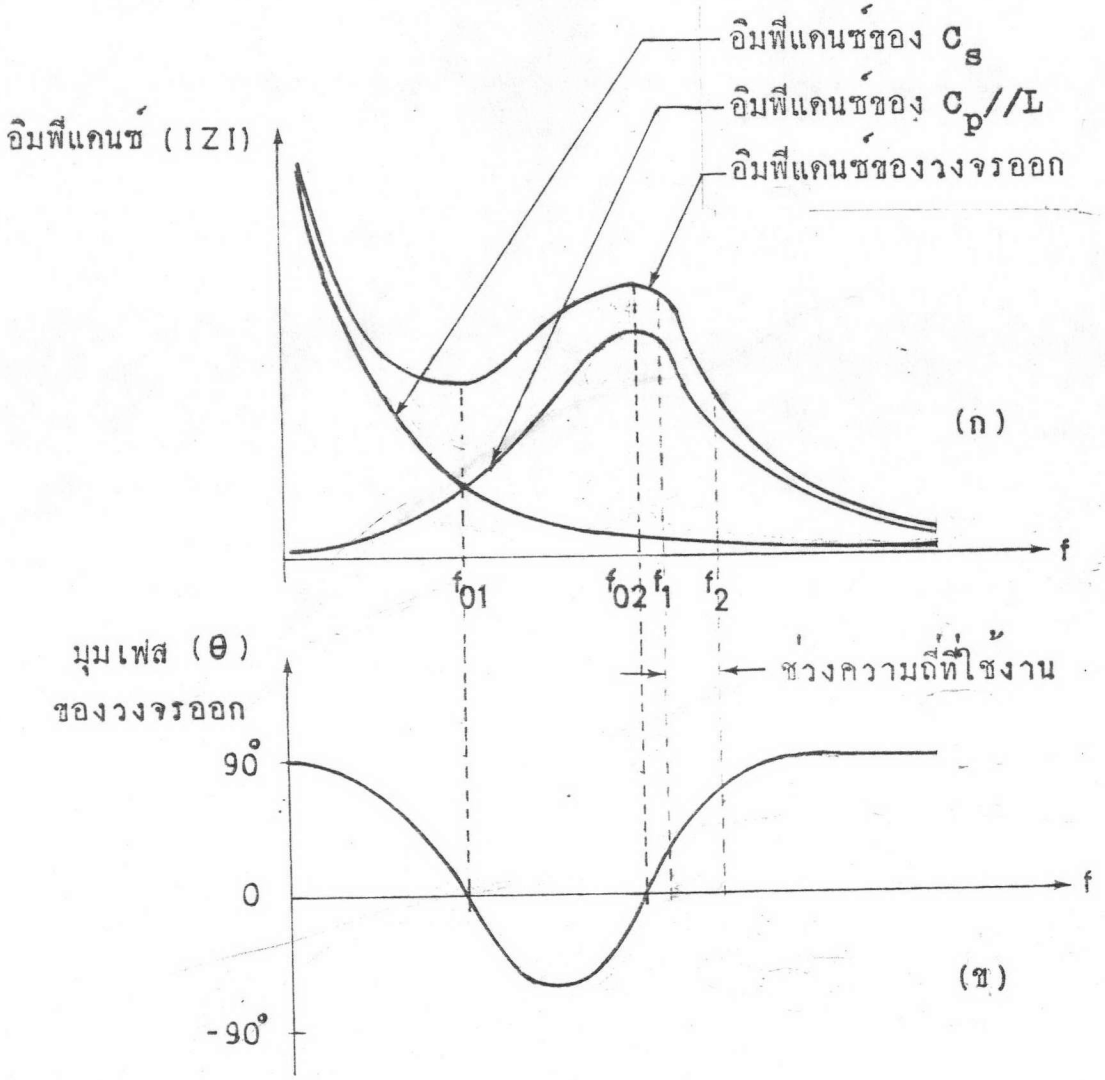
003981

และความถี่ที่วงจรสามารถทำงานได้ $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}}$ .....(2.5)

โดย L = ความเหนี่ยวนำของโหลด หน่วย (Henry)

C_p = ตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับโหลด (Farad)

จากสมการ (2.5) เมื่อทราบค่าความเหนี่ยวนำของโหลดและความถี่ที่จะให้วงจรทำงาน สามารถหาค่าประมาณของตัวเก็บประจุ C_p ได้ ส่วนค่า C_s ควรมากกว่า C_p ประมาณ 2 – 10 เท่า ดังที่ให้เหตุผลไว้ในหัวข้อ 2.2.1



รูป 2.5 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรออก

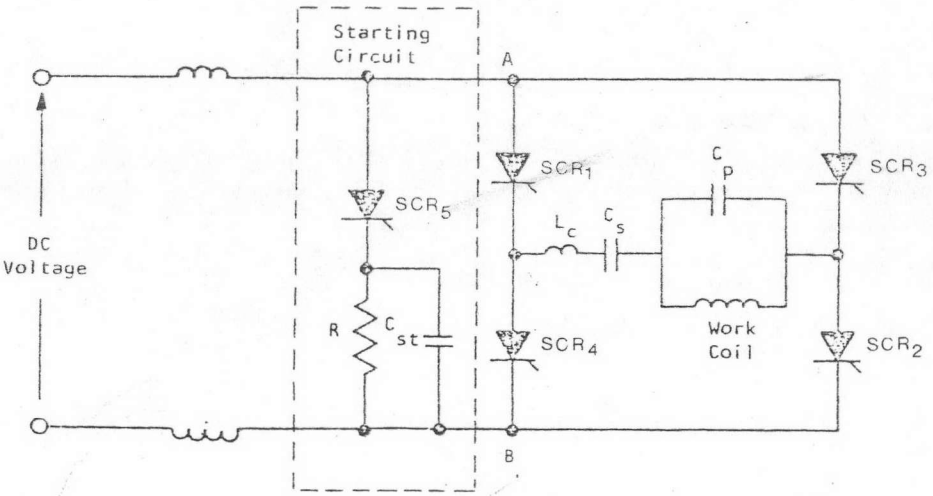
2.3.2 การเริ่มต้นเปิดวงจรอินเวอร์เทอร์ให้ทำงาน

(Starting Inverter)

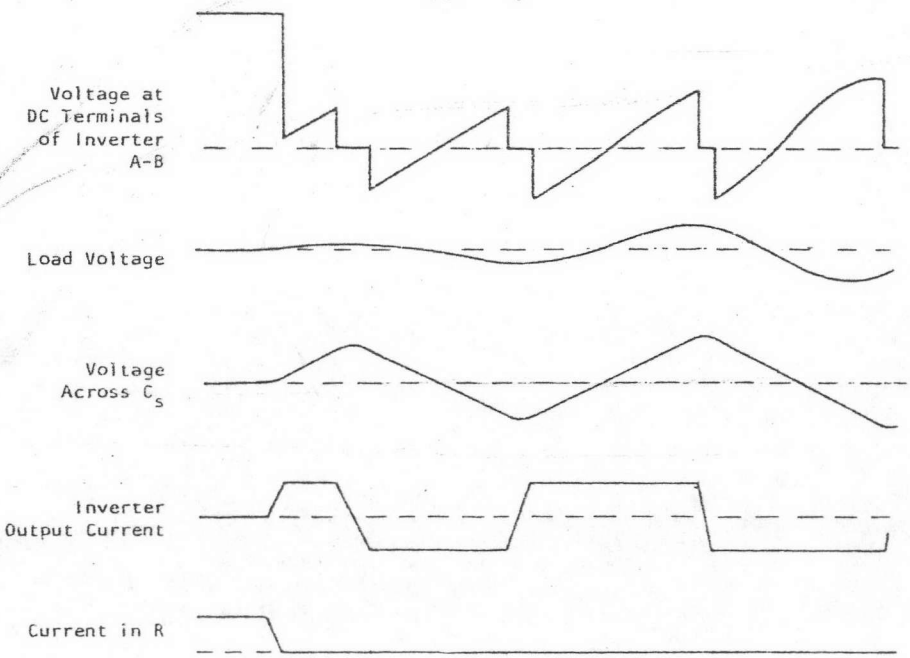
ก่อนเริ่มเปิดวงจรอินเวอร์เทอร์ให้ทำงาน ตัวเก็บประจุ C_s และ C_p ไม่มีประจุไฟฟ้าเหลืออยู่ ศักดาไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุเป็นศูนย์ หลังจากวงจรทำงานได้ในครึ่งรอบแรก เมื่อจุดชนวนเอสซีอาร์คู่ใหม่ให้นำกระแส ศักดาคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองจะสูงไม่มากพอที่จะไบอัสเอสซีอาร์คู่เดิมให้หยุดนำกระแส เป็นผลให้วงจรทำงานล้มเหลว และอีกประการคือ วงจรมี Smoothing Coil ต่อร่วมอยู่ด้วย ทำให้กระแสที่ไหลผ่านวงจรในตอนแรกน้อยกว่าปกติ ซึ่งเป็นอุปสรรคอีกประการหนึ่งที่ทำให้ศักดาไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองเพิ่มขึ้นน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรช่วยในการเริ่มเปิดวงจร สำหรับวงจรอินเวอร์เทอร์แบบป้อนกระแสที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานกับโหลด การเริ่มเปิดวงจรง่ายขึ้นเพราะมีตัวเก็บประจุ C_s ช่วยในการสร้างศักดาในการไบอัสย้อนทาง วงจรสำหรับช่วยในการเริ่มเปิดวงจรให้ทำงานจึงไม่ซับซ้อน ดังแสดงไว้ในรูป 2.6 และรูปคลื่นแสดงการทำงานของวงจรอินเวอร์เทอร์ในรอบต้น ๆ แสดงไว้ในรูป 2.7

การทำงานเริ่มต้นด้วยจุดชนวนให้ SCR_5 นำกระแส กระแสจะไหลผ่าน Smoothing coil, SCR_5 และตัวเก็บประจุ C_{st} ตัวเก็บประจุ C_{st} จะเริ่มเก็บประจุทำให้ศักดาคร่อมตัวเก็บประจุสูงขึ้น กระแสก็จะเปลี่ยนทิศทางเป็นไหลผ่าน R_{st} ขนาดของกระแสที่ไหลขณะนี้ จะถูกจำกัดด้วย R_{st} จากนี้ก็เปิดวงจรอินเวอร์เทอร์ให้ทำงาน เอสซีอาร์คู่หนึ่งคู่ใดจะถูกจุดชนวนให้นำกระแสศักดาที่จุด A จะลดลงเกือบเท่ากับศูนย์ ทำให้ SCR_5 ถูกไบอัสย้อนทางด้วย ศักดาคร่อม C_{st} กระแสจะหยุดไหลผ่าน SCR_5 แต่กระแสที่ไหลผ่าน Smoothing coil จะหยุดไหลทันทีไม่ได้จึงเปลี่ยนทิศทางไหลเป็น SCR_1 วงจรออกและ SCR_2 (หรือ SCR_3 วงจรออก SCR_4) กระแสนี้สามารถกำหนดขนาดได้ด้วยค่า R_{st} ที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นศักดาคร่อมตัวเก็บประจุ C_s และ C_p สามารถเพิ่มให้สูงพอสำหรับไบอัสย้อนทางเอสซีอาร์คู่เดิมให้หยุดนำกระแส เมื่อเอสซีอาร์คู่ใหม่ถูกจุดชนวนให้นำกระแส เมื่อวงจรสามารถทำงานในรอบแรกได้แล้ว

ศักดาสูงสุดคร่อมวงจรออก (C_s และ C_p) จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลย์ดังแสดงไว้ในรูป 2.7 ส่วน SCR_5 ที่ถูกไบอัสย้อนทางสามารถหยุดนำกระแสได้ ถ้าค่าคงที่ของเวลา C_{st} R_{st} สูงพอที่จะให้ไบอัสย้อนทางแก่ SCR_5 นานกว่าเวลาการหยุดนำกระแสของ SCR_5



รูป 2.6 วงจรควบคุมการเริ่มเปิดสำหรับอินเวอร์เทอร์แบบป้อน-กระแสที่มีตัวเก็บประจุต่ออนุกรมและต่อขนานชดเชยโหลด



รูป 2.7 แสดงถึงรูปคลื่นที่ได้ตามทฤษฎีจากการทำงานของวงจรอินเวอร์เทอร์ในช่วงแรก

2.3.3 การควบคุมช่วงเวลาจุดชนวน (Firing Time Control)

ตั้งแต่อินเวอร์ทเทอร์เริ่มทำงานอุณหภูมิของโหลดจะเพิ่มขึ้นสูงมาก ทำให้อิมพีแดนซ์ของโหลดเปลี่ยนไป ความถี่กำธร และผลตอบสนองความถี่ของวงจรออก ก็เปลี่ยนตาม(ในบางกรณีความถี่กำธรอาจเปลี่ยนถึง 100% ในขณะที่อินเวอร์ทเทอร์ทำงานได้ ประมาณ 200 รอบ) เป็นผลให้มุมที่รูปคลื่นกระแสนำหน้าศักดาของวงจรออกเปลี่ยน นั่นคือ ระยะเวลาที่เอสซีอาร์ในวงจรอินเวอร์ทเทอร์ถูกไบอัสย้อนทาง เปลี่ยนไปด้วย หากระยะเวลานี้ลดลงต่ำกว่าระยะเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ในอินเวอร์ทเทอร์ แล้ว จะเกิดกระแสลัดวงจร เพราะการจุดชนวนของเอสซีอาร์คู่ใหม่ ไม่สามารถทำให้เอสซีอาร์ คู่ที่นำกระแสอยู่เดิมหยุดนำกระแสได้ อินเวอร์ทเทอร์จึงไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ในทางกลับกันถ้าระยะเวลาที่เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนทางเพิ่มขึ้น Power factor ของ วงจรก็จะต่ำลง เป็นผลให้กำลังงานที่ได้ลดลงด้วย

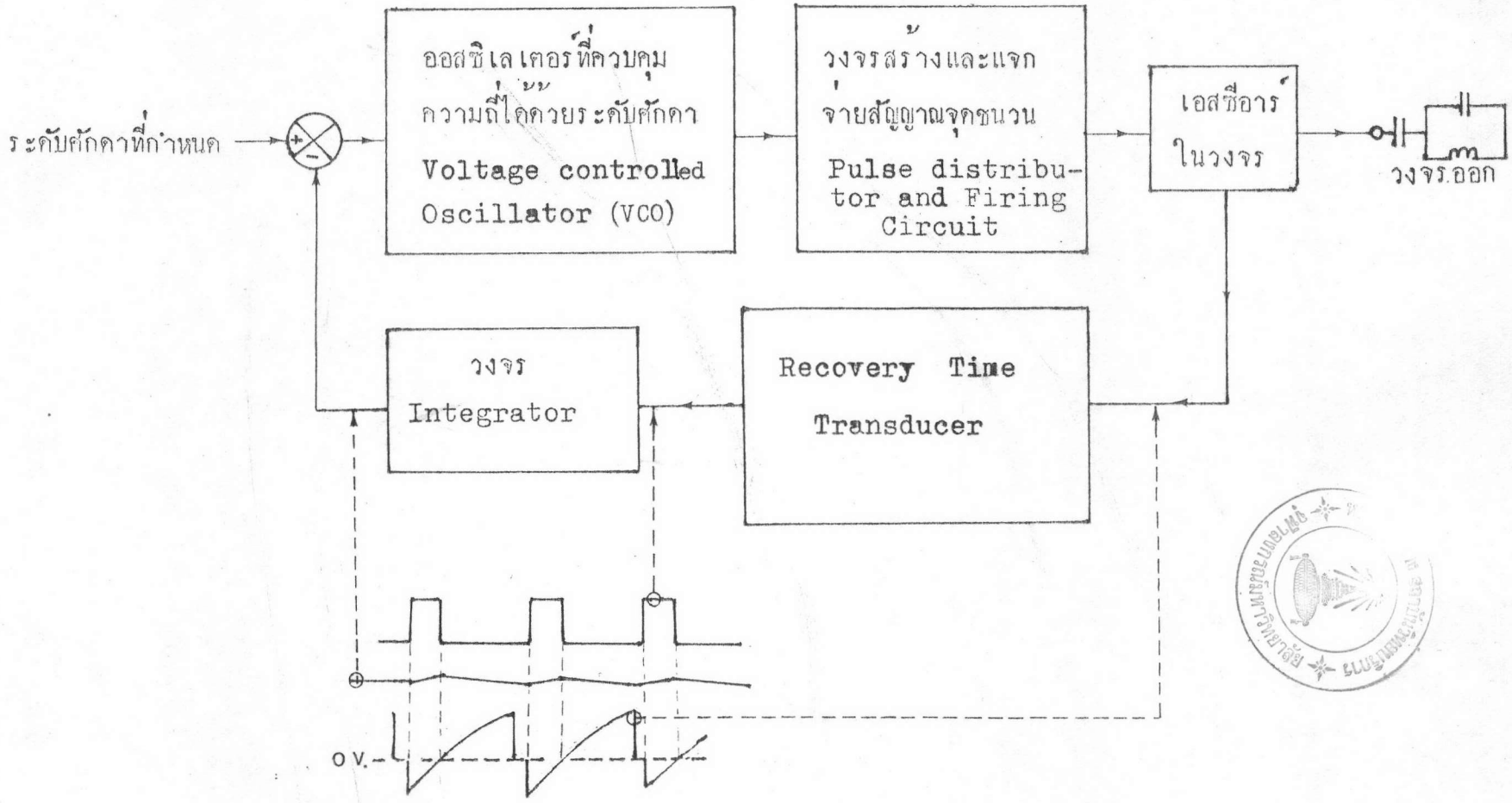
การแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้วงจรทำงานได้ดี และมีกำลังงานสูง สามารถ ทำได้ด้วยวิธีปรับระยะเวลาที่เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนทางให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ไม่น้อย กว่าระยะเวลาการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ในวงจรอินเวอร์ทเทอร์ และไม่มากเกิน ไปจนทำให้กำลังงานที่ได้ลดลง โดยการควบคุมช่วงเวลาจุดชนวนเอสซีอาร์ในวงจร

ผังของการควบคุมช่วงเวลาจุดชนวนให้วงจรอินเวอร์ทเทอร์ทำงานตามที่ กล่าวแสดงไว้ในรูป 2.8 โดยที่วงจรกำเนิดความถี่สำหรับสัญญาณจุดชนวนต้องเป็นแบบ ควบคุมความถี่ได้ด้วยระดับศักดา ในที่นี้คือ Voltage Controlled Oscillator จากนี้นำสัญญาณที่ได้ไปสร้างสัญญาณจุดชนวนและแจกจ่ายไปจุดชนวนเอสซีอาร์ในวงจร ทั้งสี่ตัวด้วยวงจร Firing circuit and pulse distributor ในขณะที่อินเวอร์ท เทอร์ทำงานจะมีวงจรป้อนกลับ ทำหน้าที่รับรู้ระยะเวลาที่เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนทาง แล้วเปลี่ยนเป็นระดับศักดาไฟฟ้า เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระดับศักดาที่กำหนดไว้ ผลที่ ได้จากการเปรียบเทียบจะนำไปควบคุมความถี่ของวงจรกำเนิดความถี่ต่อไป วงจรป้อน กลับมีวงจรย่อยคือ Recovery Time Transducer จะรับสัญญาณไฟฟ้าคร่อม เอสซีอาร์ในวงจร (ในที่นี้ใช้ศักดาคร่อม AB ในรูป 2.7) มาเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณ

รูป Pulse ซึ่งระดับศักดาของ Pulse คงที่ ความกว้างของ Pulse เท่ากับระยะเวลาที่สัญญาณคร่อม AB เป็นลบ จากนั้นนำสัญญาณ Pulse ที่ได้ผ่านวงจร Integrator ปรับสัญญาณให้เรียบ จะเห็นว่าระดับสัญญาณที่ได้นี้ขึ้นอยู่กับความกว้างของ Pulse หรือระยะเวลาที่เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนทาง

ในขณะวงจรทำงานความถี่คงที่ค่าหนึ่ง Power factor ของโหลดจะเพิ่ม เนื่องจากโหลดร้อนขึ้น เป็นผลให้มุมเฟสของวงจรออกลดลง และระยะเวลาที่เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนทางสั้นลง ศักดาที่ได้จากวงจร Integrator จะต่ำ ศักดานี้จะทำหน้าที่ไปควบคุมให้ความถี่ของสัญญาณจุดชนวนสูงขึ้น เพื่อให้มุมเฟสของวงจรออกเพิ่มขึ้น (ดูรูป 2.5) จะเห็นว่าวงจรป้อนกลับสามารถช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรขึ้น

ถ้าความถี่ของวงจรมากเกินไป Power factor ของวงจรต่ำ ระยะเวลาที่เอสซีอาร์ถูกไบอัสย้อนทางจะยาว ศักดาที่ได้จากวงจร Integrator จะสูง ศักดานี้จะทำหน้าที่ไปควบคุมให้ความถี่ของสัญญาณจุดชนวนวงจร Voltage controlled oscillator ลดลงในทางตรงกันข้าม ถ้าความถี่ต่ำเกินไป ศักดาที่ได้จากวงจร Integrator จะต่ำ ซึ่งทำให้ความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น นั่นคือ ผลของวงจรป้อนกลับ จะทำให้วงจรอินเวอร์เทอร์ทำงานในช่วงความถี่ที่เหมาะสม



รูป 2.8 ผังของการควบคุมระยะเวลาจุดชนวนสำหรับวงจรอินเวอร์เทอร์แบบป้อนกระแสที่มีตัวเก็บประจุออนุกรมและต่อขนานชดเชยโหลด