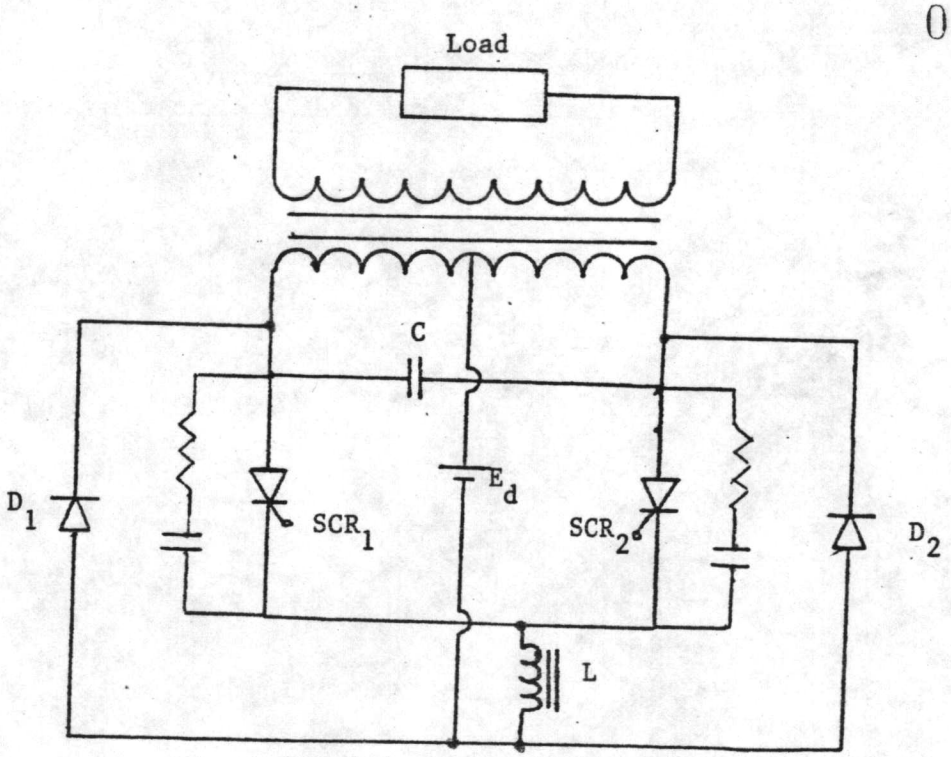
บทที่ 3

การวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์ คลาส C

3.1 คำนำ

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์ คลาส ซี แบบแมคเมอร์เรย์-เบดฟอร์ด (Class-C McMurray-Bedford inverter) ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันมาก วงจรของอินเวอร์เตอร์ แบบนี้เป็นดังที่แสดงในรูปที่ 3.1

004086



รูปที่ 3.1 แมคเมอร์เรย์-เบดฟอร์ดอินเวอร์เตอร์

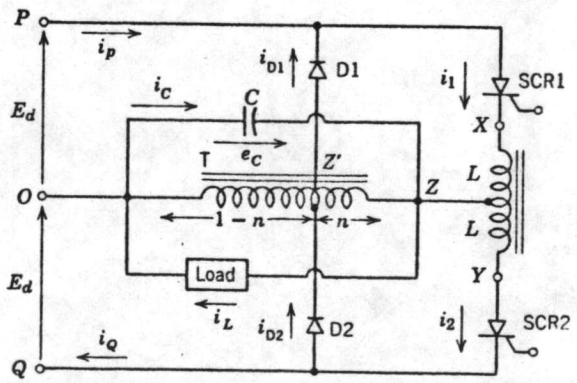
อินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 3.1 มีหลักการทำงานดังนี้ คือ สมมุติว่า SCR1 นำกระแส (Conducting) และ SCR2 ปิดกั้นกระแส (Blocking) กระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะไหลผ่านทางด้านซ้ายของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน $2E_d$ ขึ้นที่ขั้วอาโนดของ SCR2 และเกิดการอัดประจุที่ตัวเก็บประจุ C จนได้แรงดัน $2E_d$ ต่อมาเมื่อ SCR2 ถูกจุดชนวน (Triggering) ให้นำกระแส จุด A จะมีแรงดันประมาณ $2E_d$ SCR1 จะถูกไบแอสย้อน (Reverse bias) เป็นเวลานานกว่าช่วงเวลาหยุดนำกระแสของ SCR2 SCR1 จะปิดกั้นกระแส ต่อมาเมื่อ SCR1 ถูกจุดชนวนให้นำกระแสอีกครั้งหนึ่ง อินเวอร์เตอร์ก็จะทำงานเหมือนตอนแรก จะเห็นได้ว่า กระแสจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะไหลสลับกันในทั้งสองซีกของขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นสี่เหลี่ยมทางขดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

ไดโอด D1 และ D2 จะป้อนกลับกำลังปฏิกริยา (Reactive power) เมื่อโหลดเป็นแบบคาพาซิตีฟ และอินดักตีฟ ในกรณีที่โหลดเป็นแบบอินดักตีฟพลังงานจะถูกเก็บสะสมไว้ในโหลดตอนปลายของครึ่งรอบ (Half cycle)แรกของแรงดันกระแสสลับ และถูกป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟเมื่อถึงตอนต้นของครึ่งรอบหลัง ในทางกลับกันเมื่อโหลดเป็นแบบคาพาซิตีฟพลังงานจะถูกเก็บสะสมไว้ในโหลดตอนต้นของครึ่งรอบและถูกป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ เมื่อถึงตอนปลายของครึ่งรอบเดียวกัน

3.2 การวิเคราะห์วงจร[1]

3.2.1 วงจรไฟฟ้าและสมมุติฐาน

ในการอธิบายและวิเคราะห์ เราจะใช้วงจรตามรูปที่ 3.2 แทนรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบวงจรแบคเมอร์เรย์-เบดฟอร์ดชนิดฮาล์ฟบริดจ์

วงจรตามรูปที่ 3.1 และ 3.2 มีลักษณะการทำงานแบบเดียวกัน ถ้าไม่มีไดโอด D1 และ D2 แล้ว วงจรอินเวอร์เตอร์ทั้งสองจะกลายเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบขนาน (Parallel inverter) ในวงจรตามรูปที่ 3.2 แหล่งจ่ายกระแสตรงจะต้องมีจุดต่อกลาง แต่ถ้าไม่มี เราก็สามารถทำขึ้นได้โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ 2 ตัวต่อกัน

เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น เราตั้งสมมุติฐานขึ้นดังต่อไปนี้

(1) คาบเวลา (Period) ของแรงดันกระแสสลับด้านออกยาวกว่าช่วงเวลาหยุดนำกระแสของไทรีสเตอร์มาก

(2) ความเหนี่ยวนำอนุกรม (Series inductance) ที่จะต่ออนุกรมกับโหลดจะรักษากระแสโหลด (I_L) ให้มีค่าเกือบคงตัวตลอดช่วงการคอมมิวเตตของไทริสเตอร์ ความเหนี่ยวนำอนุกรมเป็นผลรวมของความเหนี่ยวนำของโหลด ส่วนของตัวกรอง (Filter) ความเหนี่ยวนำเนื่องจากฟลักซ์รั่ว (Leakage inductance) ของหม้อแปลงไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำอนุกรมนี้จะต้องมีค่ามากกว่าความเหนี่ยวนำคอมมิวเตต (Commutating inductance) L

(3) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโตที่ใช้ในวงจร เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติ

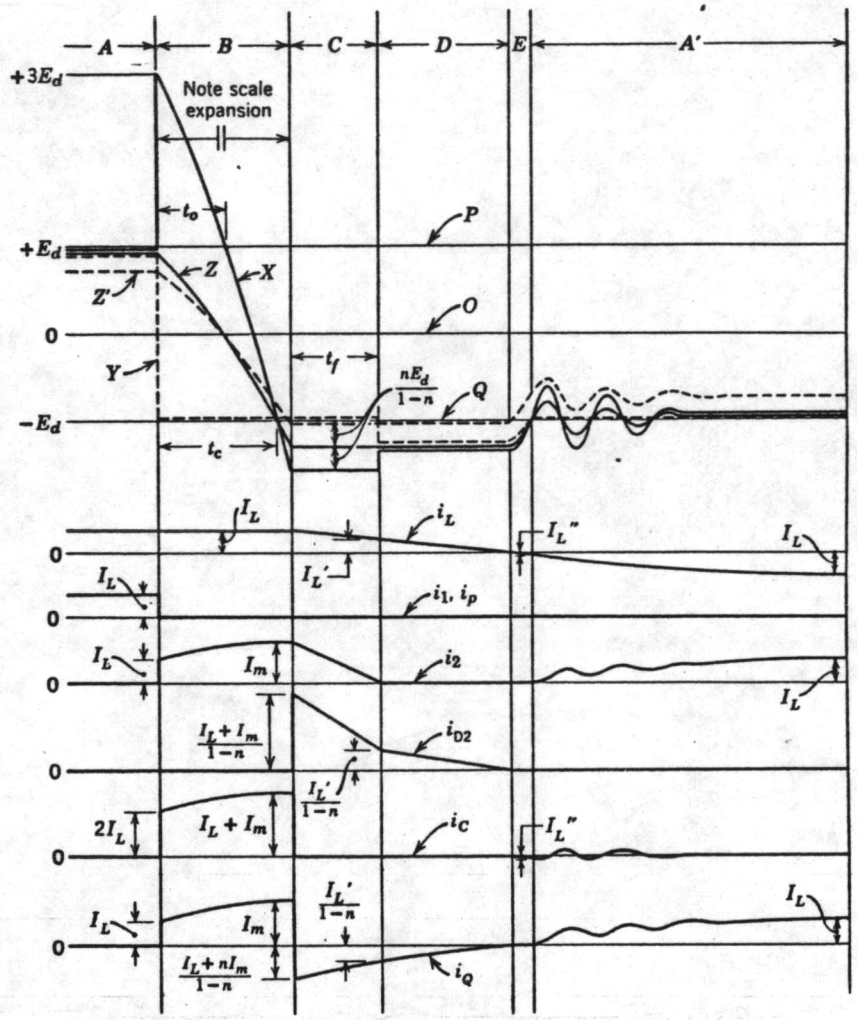
(4) ทั้งสองส่วนของตัวเหนี่ยวนำคอมมิวเตตพันบนแกนเดียวกันและอยู่ใกล้กันมาก

(5) เวลาการทำให้นำกระแส (Turn on time) ของไทรีสเตอร์ และค่ากระแสย้อนระหว่างการหยุดนำกระแสมีค่าน้อยมาก

(6) กำลังสูญในส่วนต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยมาก

(7) แหล่งจ่ายไฟมีอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์

3.2.2 การทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดมีตัวประกอบกำลังล้าหลัง (Lagging power factor load)



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นต่างๆ สำหรับกรณีที่โหลดมีตัวประกอบกำลังแบบล้าหลัง

รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวงจรในช่วงเวลาครึ่งรอบ แรงดันที่จุด P, Q, X, Y, Z และ Z' ที่แสดงในรูปเป็นค่าที่วัดเทียบกับจุดกลาง 0 แรงดันคร่อมชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งของวงจรก็คือ ความต่างศักย์ ระหว่างจุดปลายทั้งสองของชิ้นส่วนนั้น เช่น ค่าแรงดันตกคร่อม SCR1 คือผลต่างของระดับแรงดันระหว่างจุด P และ X ตำแหน่งที่อยู่ของกระแสที่สเกตซ์ในรูปที่ 3.3 มีเขียนไว้ในรูปที่ 3.2 แล้ว หัวลูกศรแสดงทิศทางบวกของกระแส

ส่วนหัวลูกศรของแรงดันแสดงถึงขั้วบวกของแรงดัน

แต่ละครึ่งรอบของการทำงานจะแบ่งออกเป็น 5 ช่วงคือ A, B, C, D และ E ซึ่งจะแสดงการเปลี่ยนสถานะของไทรีสเตอร์หรือไดโอด จากการไม่นำกระแสเป็นการนำกระแส ช่วง B ซึ่งเป็นช่วงของคอมมิวเตติงอิมพัลส์ (Commutating impulse) จะเป็นช่วงที่สำคัญมากในการออกแบบวงจร เนื่องจากช่วงเวลานี้สั้นมาก ดังนั้นเพื่อให้เห็นได้ชัดเจนเราจึงขยายสเกลของช่วง B ในรูปที่ 3.3 ออกไปประมาณ 10 เท่า ในช่วงเวลาครึ่งรอบแรกอินเวอร์เตอร์จะมีการทำงานเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ

ช่วง A SCR1 นำกระแส และจ่ายกระแสไปให้โหลดทั้งนี้โดยใช้กำลังไฟฟ้าจากขั้วบวก P ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสของโหลดมีค่าน้อย แรงดันคร่อม L ก็จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ E_d ดังนั้นจุด Z จึงมีศักย์ใกล้กับขั้วบวก P และตัวเก็บประจุ C จะถูกอัดประจุจนได้แรงดัน E_d ตอนปลายของช่วง A กระแสโหลดจะมีค่าเท่ากับ I_L

ช่วง B ในการทำให้ SCR1 หยุดนำกระแส SCR2 จะถูกจุดชนวนที่เกต (Gate) เพื่อให้นำกระแส ทำให้ศักย์ของจุด Y ลงลงเหลือเท่ากับศักย์ที่ขั้วลบ Q ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เนื่องจากแรงดันของตัวเก็บประจุ ไม่อาจเปลี่ยนค่าโดยทันทีทันใดได้ ดังนั้นแรงดัน $2E_d$ จึงตกคร่อมขดลวด ZY ของตัวเหนี่ยวนำ L SCR1 จึงมีแรงดันไบแอสย้อนกลับเท่ากับ $2E_d$ มาตกคร่อม ทำให้มันหยุดนำกระแส กระแสโหลด I_L ซึ่งตอนแรกไหลผ่าน SCR1 และขดลวด XZ ต้องถูกผันไปยัง SCR2 และตัวเก็บประจุ C จึงต้องจ่ายกระแส $2I_L$ ผ่านโหลด และ SCR2

เมื่อขั้วโหลดที่ Z มีศักย์เท่ากับขั้วลบ Q ของแหล่งจ่ายไฟ แรงดันคร่อมตัวความเหนี่ยวนำคอมมิวเตต จะเท่ากับศูนย์ และกระแส i_2 จะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด I_m ถ้าเราต่อไดโอดป้อนกลับที่ขั้ว Z แทนที่จะเป็นที่ขั้ว Z' D2 จะนำกระแส และกระแส I_m จะไหลผ่านขดลวด ZY, SCR2 และ D2 และพร้อมกันนั้นก็กักเก็บพลังงานสะสม $1/2\ L\ I_m^2$ ไว้ในขดลวด ZY ไดโอดป้อนกลับ D2 จะนำกระแสโหลดด้วย และป้อนพลังงานจากโหลดกลับเข้าขั้วลบของแหล่งจ่ายไปจนกระทั่งกระแสโหลดไหลกลับทาง อย่างไรก็ตามในตอนท้ายพลังงานที่ถูกกักเก็บเอาไว้จะกลายเป็นพลังงานสูญเสียในขดลวด ZY, SCR2 และ D2 ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ที่กล่าวมานี้จะต้องมีขนาดโตและประสิทธิภาพของวงจรจะต่ำ

ช่วง C โดยการต่อไดโอดป้อนกลับเข้าที่จุดแยก Z' พลังงานที่ถูกกักไว้จะสามารถป้อนกลับไปที่แหล่งจ่ายไฟได้ จุดเริ่มของช่วง C จะถูกหน่วงเวลาไว้จนกระทั่งจุด Z' มีศักย์เท่ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ กระแส i_2 จะลดลงจากค่า I_m แต่ถ้าเศษส่วน n (ดูรูปที่ 3.3) มีค่าระหว่าง 0.1 ถึง $0.2i_2$ จะลดลงเพียงเล็กน้อย แรงดัน $nE_d/(1-n)$ ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขดลวด Z'Z จะปรากฏบนส่วน YZ ของตัวความเหนี่ยวนำคอมมิวเตต และจะลดกระแสที่ถูกกักอยู่แบบเชิงเส้นจากค่า I_m เป็นศูนย์ในเวลา t_f

$$t_f = \frac{L I_m (1-n)}{E_d n} \qquad (3.1)$$

กระแสนี้จะไหลผ่านขดลวด Z'Z และแปลงไปเป็นกระแสในขดลวด Z'O แล้วป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ระหว่างนี้แรงดันที่โหลดจะเท่ากับ $E_d/(1-n)$ และแรงดันคร่อมตัวความเหนี่ยวนำคอมมิวเตตจะเพิ่มแรงดันเดินหน้า (Forward voltage) ของ SCR1 เป็น $2E_d/(1-n)$

ช่วง D ช่วงนี้เกิดขึ้นหลังจากที่กระแสซึ่งถูกกักให้ไหลวนอยู่ลดลงเป็นศูนย์ แต่การป้อนกลับอย่างต่อเนื่องของพลังงานจากโหลดแบบอินดักตีฟยังคงทำให้ไดโอด D2 นำกระแสต่อไป แรงดันของโหลดจะคงมีค่าเท่ากับ $E_d/(1-n)$ แรงดัน $nE_d(1-n)$ ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในส่วน Z'Z ของขดลวด จะกลายเป็นแรงดันย้อนของ SCR2

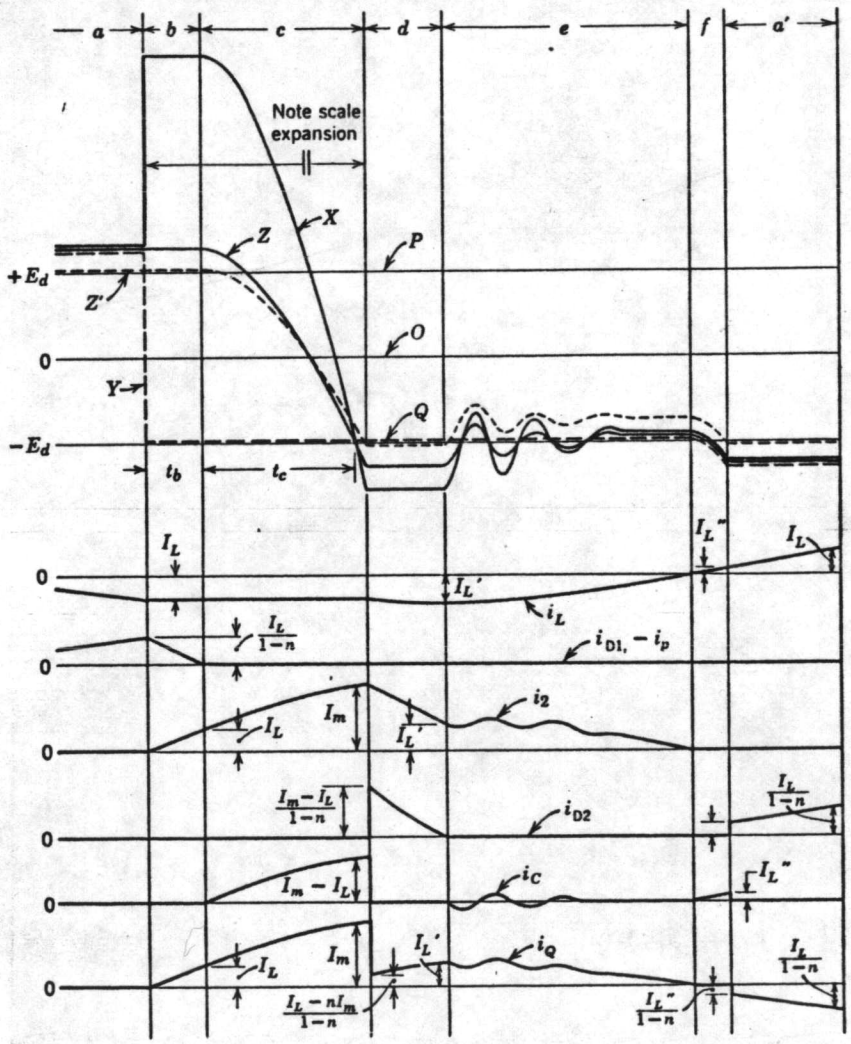
ช่วง E เมื่อกระแสโหลดกลับทิศทาง ไดโอด D2 จะหยุดนำกระแส กระแสโหลดที่เพิ่มขึ้นในทิศทางใหม่มาจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C อยู่จนกระทั่งศักย์ของขั้ว Z เพิ่มขึ้นถึงระดับศักย์กระแสตรงของสาย Q

ช่วง A' SCR2เริ่มนำกระแสอีกหลังจากที่ถูกไบแอสย้อนในช่วง D และ E เพื่อให้ SCR2 สามารถนำกระแสได้ เราจะต้องป้อนสัญญาณเกตที่เป็นบวกให้กับ SCR2 ในตอนเริ่มช่วง A' นี้ หรือมิฉะนั้นเราก็จะต้องใช้สัญญาณเกตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยเริ่มตั้งแต่ตอนเริ่มช่วง B

เนื่องจากกระแสโหลดที่สร้างขึ้นในช่วง E ไม่สามารถผ่านตัวเหนี่ยวนำ L ได้ทันที ดังนั้นในตอนแรกตัวเก็บประจุ C จะยังคงคายประจุต่อไป และเริ่มทำให้เกิดการสั่นไหว (Ringing) ของกระแสใน L และ C ค่าสูงสุดของแรงดันสั่นไหวมีค่าน้อยกว่า $nE_d/(1-n)$ ในที่สุดการสั่นไหวจะถูกหน่วงให้สลายไปโดยโหลดและการสูญเสีย ในตอนปลายของช่วง A' กระแสโหลดจะมีค่าเท่ากับ I_L เช่นเดียวกับในช่วง A ซึ่งเป็นช่วงที่ SCR1 นำกระแส

ปรากฏการณ์เช่นเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นในครึ่งรอบซึ่งมีตามมาหลังจากการผันกระแสจาก SCR2 ไป SCR1 ถ้าโหลดมีตัวประกอบกำลังสูญ ช่วง D และ E จะไม่เกิดขึ้น กระแสโหลดจะกลับทิศทางระหว่าง ช่วง C และไดโอด D2 จะหยุดนำกระแสเมื่อกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้นในทิศทางใหม่บรรจบกับกระแสที่ถูกกักให้ไหลวนซึ่งกำลังมีค่าลดลง ดังนั้น ช่วง C จะรวมเข้ากับ ช่วง A' และ SCR2 จะนำกระแสตลอดเวลา สภาพไร้โหลด (No load condition) ถือว่าเป็นกรณีพิเศษอย่างหนึ่งซึ่งเราให้ i_2 และ I_L มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์เมื่อโหลดมีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า (Leading power factor load)



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นต่างๆ สำหรับกรณีที่โหลดมีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า

รูปที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของวงจรในช่วงเวลาครึ่งรอบเมื่อโหลดมีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า ช่วงเวลาครึ่งรอบนี้แบ่งออกเป็น 6 ช่วง คือ a, b, c, d, e และ f ในช่วงของการคอมมิวเตต คือ ช่วง b และ c นั้น สเกลของกราฟได้ถูกขยายออกไปประมาณ 10 เท่า การทำงานของอินเวอร์เตอร์ในช่วงครึ่งรอบในกรณีนี้อาจวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้คือ

ช่วง a กระแสของโหลดเป็นลบและไดโอด D1 นำกระแสพร้อมทั้งป้อนพลังงานจากโหลดกลับไปยังขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ แรงดันของโหลด และตัวเก็บประจุ C มีค่าสูงขึ้นเป็น $E_d/(1-n)$ โดยผลจากการแปลงไฟของหม้อแปลงแบบออโต T SCR1 ถูกไบแอสย้อนด้วยแรงดัน $nE_d/(1-n)$ ซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขดลวด Z'Z ในตอนปลายของช่วงนี้กระแสโหลดมีค่าเท่ากับ $-I_L$ และกระแสของไดโอด D1 เท่ากับ $I_L/(1-n)$.

ช่วง b การคอมมิวเตตเริ่มขึ้นโดยการจุดชนวน SCR2 ให้นำกระแสซึ่งก็มีผลเท่ากับว่าเราต่อจุด Y เข้ากับขั้วลบ Q ของแหล่งจ่ายไฟ ตัวเก็บประจุ C จะรักษาแรงดันของจุด Z ให้มีค่าเท่าเดิม ดังนั้นแรงดัน $E_d(2-n)/(1-n)$ จะปรากฏคร่อมขดลวด ZY ของตัวเหนี่ยวนำคอมมิวเตติง แรงดันเดียวกันนี้จะเหนี่ยวนำให้ขดลวด XZ เกิดมีแรงดัน $2E_d/(1-n)$ ซึ่งเป็นแรงดันย้อนของ SCR1 อย่างไรก็ตามในกรณีที่โหลดเป็นแบบคาพาซิตีฟ การทำให้ SCR1 หยุดนำกระแสนี้เป็นเรื่องไม่จำเป็น

ในช่วง b นี้ กระแส i_2 จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากศูนย์ไปเป็น I_L ในเวลา t_b โดยที่

$$t_b = \frac{L\, I_L(1-n)}{E_d(2-n)} \qquad (3.2)$$

ในเวลาเดียวกันนี้ กระแส D1 จะลดลงเป็นศูนย์ และ D1 จะไม่นำกระแส เหตุผลก็คือ กระแสโหลดได้เปลี่ยนทางเดินจากทางที่ผ่าน D1 ไปเป็นทางที่ผ่าน SCR2

ช่วง c ในช่วงนี้ตัวเก็บประจุ C จะเข้ามามีส่วนร่วมในคอมมิวเตติงทรานเซียนต์โดยการสร้างอิมพัลส์ซึ่งจะเพิ่มกระแส i_2 จากค่า I_L ไปเป็นค่าสูงสุด I_m ขณะที่ตัวเก็บประจุ C ถูกอัดประจุในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการอัดประจุครั้งก่อน

ช่วง d ช่วงนี้คล้ายกับช่วง c ของกรณีที่โหลดเป็นแบบอินดักตีฟ ไดโอด D2 จะนำกระแส และหม้อแปลงซึ่งมีจุดต่อแยกทำให้สามารถนำพลังงานที่กักไว้ในตัวเหนี่ยวนำ L กลับคืนสู่แหล่งจ่ายไฟได้ กระแส i_2 จะลดลงแบบเชิงเส้นจากค่าสูงสุด I_m ในอัตรา $nE_d/(1-n)L$ แอมแปร์ต่อวินาที จนกระทั่งเหลือเท่ากับ I_L

ช่วง e ในช่วงนี้ ไดโอด D2 หยุดนำกระแส และขนาดของแรงดันที่โหลดลดลงจาก $E_d/(1-n)$ เหลือเพียงประมาณเท่ากับ E_d ภายหลังจากที่ได้มีการสั่นไหวของกระแสในตัวเก็บประจุ C และตัวเหนี่ยวนำ L แล้ว เหตุการณ์ในช่วงนี้เหมือนกับช่วง A' ของกรณีที่โหลดเป็นแบบอินดักตีฟ

ช่วง f เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนทิศทาง SCR2 จะปิดกั้นกระแส และกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้นในทิศทางใหม่ จะอัดประจุเข้าตัวเก็บประจุ C จนได้แรงดันเท่ากับค่าเดิม คือ $E_d/(1-n)$

ช่วง a' ไดโอด D2 เริ่มนำกระแสอีก และป้อนพลังงานจากโหลดกลับเข้าขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ สภาพการทำงานในช่วงนี้จะกลับกันกับช่วง a

3.3 การวิเคราะห์คอมมิวเตติงอิมพัลส์

3.3.1 ช่วง B เมื่อโหลดมีตัวประกอบกำลังแบบล้าหลัง

ในรูปที่ 3.2 และ 3.3 เราเริ่มวัดเวลาจากตอนที่ SCR2 เริ่มนำกระแส และเลือกให้ i_2 ซึ่งไหลผ่าน SCR2 เป็นตัวแปรอิสระ

เงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อเวลา $t = +0$ คือ

กระแสในตัวเหนี่ยวนำ L : $i_2(+0) = I_L$

แรงดันของตัวเก็บประจุ C : $e_c(+0) = E_d$

สมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งอธิบายคอมมิวเตติงทรานเซียนต์อาจเขียนได้จากวงจรรอบ OZYQ คือ

$$E_d = L\frac{di_2}{dt} - e_c(+0) + \int_o^t \frac{i_2 + I_L}{C} d\tau \qquad (3.3)$$

เมื่อใช้การแปลงลาปลาซ (Laplace transform) เข้าช่วยเราได้

$$\frac{2E_d}{s} = Lsi_2(s) - LI_L + \frac{i_2(s)}{sC} + \frac{I_L}{s^2C} \tag{3.4}$$

แก้สมการ (3.4) ได้

$$i_2(s) = \frac{\frac{2E_d}{L} + sI_L - \frac{I_L}{sLC}}{s^2 + \frac{1}{LC}} \tag{3.5}$$

$$i_2 = \frac{2E_d}{\omega L}\sin\omega t + I_L(2\cos\omega t - 1) \tag{3.6}$$

โดยที่ $$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3.7}$$

ถ้าเลขเศษส่วน n มีค่าน้อย ช่วงการคอมมิวเตต B จะสิ้นสุดลงเร็วมากหลังจากที่แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำ L เปลี่ยนแปลงผ่านค่าศูนย์ หรือเมื่อ

$$e_{yz} = L\frac{di_2}{dt} = 0 \tag{3.8}$$

ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป t_c โดยที่

$$\tan\omega t_c = \frac{E_d}{\omega L I_L} \tag{3.9}$$

หรือ $$t_c = \sqrt{LC}\,\tan^{-1}x \tag{3.10}$$

เมื่อ $$x = \frac{E_d}{I_L}\sqrt{\frac{C}{L}} \tag{3.11}$$

เราอาจถือได้ว่า x เป็นอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของโหลดขณะที่มีการคอมมิวเตตคือ E_d/I_L ต่ออิมพีแดนซ์ลักษณะ (characteristic impedance) ของวงจรคอมมิวเตตคือ $\sqrt{L/C}$

ค่าสูงสุด I_m ของกระแส i_2 นั้น เราสามารถหาได้โดยการแทนค่า $t = t_c$ ลงในสมการ (3.6) ผลก็คือ

$$I_m = 2\sqrt{\frac{C}{L}E_d^2 + I_L^2} - I_d \qquad (3.12)$$

เราอาจแสดงอัตราส่วน I_m/I_L เป็นฟังก์ชั่น $f(x)$ ของพารามิเตอร์ x ได้เป็น

$$\frac{I_m}{I_L} = f(x) = 2\sqrt{x^2 + 1} - 1 \qquad (3.13)$$

ช่วงเวลา t_o ซึ่งเป็นช่วงที่ SCR1 มีแรงดันย้อน อาจเขียนเป็นเศษส่วนตามเวลาธรรมชาติ (Natural period) ของวงจรคอมมิวเตต ($\sqrt{LC}$ วินาทีต่อเรเดียน) ได้ คือ

$$\frac{t_o}{\sqrt{LC}} = g(x) = \sin^{-1}\frac{x}{\sqrt{x^2 + 1}} - \sin^{-1}\frac{x}{2\sqrt{x^2 + 1}} \qquad (3.14)$$

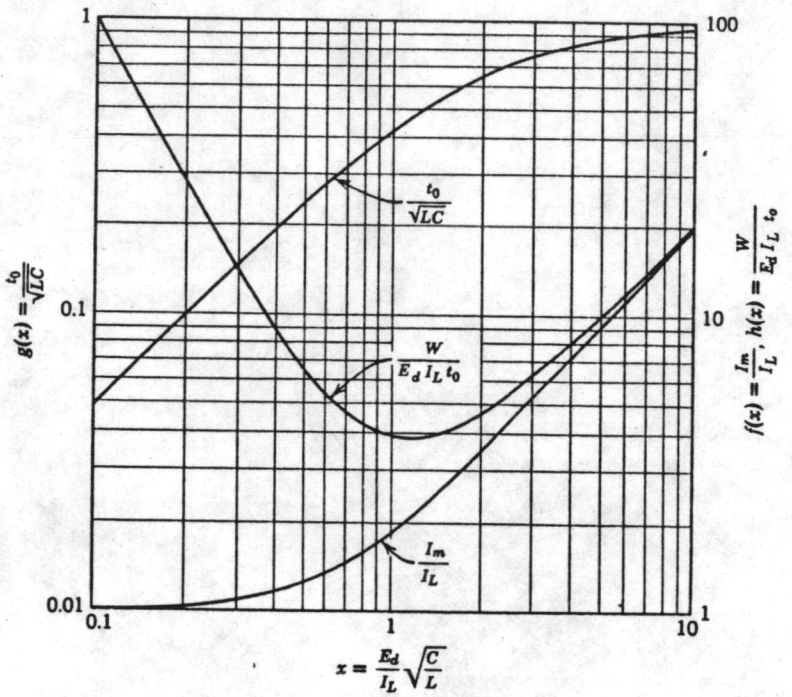
พลังงาน W ที่ถูกกักอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ L หลังจากมีการคอมมิวเตต มีค่าเป็น

$$W = \frac{1}{2}LI_m^2 = \frac{1}{2}LI_L^2\left[f(x)\right]^2 \qquad (3.15)$$

$$\frac{W}{E_d I_L t_o} = h(x) = \frac{[f(x)]^2}{2xg(x)} = \frac{(2\sqrt{x^2+1}-1)^2}{2x\left(\sin^{-1}\frac{x}{\sqrt{x^2+1}} - \sin^{-1}\frac{x}{2\sqrt{x^2+1}}\right)} \qquad (3.16)$$

ในสมการ (3.16) $E_d I_L t_o$ คือพลังงานที่ถูกผันจาก SCR1 ในช่วงเวลาที่ SCR1 มีไบแอสย้อน ส่วน W คือพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากคอมมิวเตติงอิมพัลส์ คอมมิวเตติงพารามิเตอร์ที่กำหนดในสมการ (3.13), (3.14) และ (3.16) เขียนเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 3.5

การวิเคราะห์ทั้งหมดข้างต้นนี้ใช้ได้กับทุกๆ กรณีซึ่ง SCR นำกระแสก่อนมีการคอมมิวเตตเล็กน้อย รวมทั้งในกรณีที่โหลดเป็นอินดักตีฟ ในกรณีที่โหลดเป็นแบบรีซิสตีฟ ผลที่ได้ก็ยังคล้ายกับในกรณีที่โหลดเป็นแบบอินดักตีฟ



รูปที่ 3.5 คอมมิวเตติงพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์

3.3.2 คอมมิวเตติงอิมพัลส์ในภาวะไร้โหลด

ในภาวะไร้โหลด คือ I_L มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ x มีค่าเป็นอนันต์ (Infinite) สมการ (3.6) จะกลายเป็น

$$i_2 = \frac{2E_d}{\omega L} \sin \omega t \qquad (3.17)$$

และ

$$t_c = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC} \qquad (3.18)$$

$$t_o = \frac{2}{3} t_c = \frac{\pi}{3}\sqrt{LC} \qquad (3.19)$$

$$I_m = 2E_d \sqrt{C/L} \qquad (3.20)$$

$$W = 2CE_d^2 \tag{3.21}$$

สมการข้างต้นนี้ใช้ได้ไม่เฉพาะในภาวะไร้โหลดเท่านั้น แต่ยังใช้กับภาวะซึ่งกระแสโหลดมีค่าใกล้ศูนย์ในช่วงระหว่างการคอมมิวเตตด้วย ยกตัวอย่างกรณีที่โหลดแบบรีซิสตีฟต่ออนุกรมกับตัวกรองชนิด L-C ซึ่งปรับให้ทำงานที่ความถี่พื้นฐาน (Fundamental frequency) โหลดนี้จะดึงกระแสซึ่งร่วมเฟส (In phase) กับแรงดันความถี่พื้นฐาน ดังนั้นกระแสจะเป็นศูนย์เมื่อแรงดันเป็นศูนย์ ซึ่งก็เป็นการคอมมิวเตตนั่นเอง

3.3.3 ช่วง C เมื่อโหลดมีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า

ในรูปที่ 3.2 และ 3.4 เราเริ่มนับเวลาเมื่อไดโอด D1 เริ่มปิดกั้นกระแส

เงื่อนไขเริ่มต้นเมื่อเวลา $t = +o$

กระแสในตัวเหนี่ยวนำ $L : i_2(+0) = I_L$

แรงดันของตัวเก็บประจุ $C : e_c(+o) = E_d/(1-n)$

สมการคิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งแสดงถึงคอมมิวเตติงทรานเซียนต์ อาจเขียนได้จากวงรอบ OZYQ ดังนี้

$$E_d = L\frac{di_2}{dt} - \frac{E_d}{1-n} + \int_o^t \frac{i_2 - I_L}{C}\,d\tau \tag{3.22}$$

เมื่อใช้การแปลงลาปลาซเข้าช่วยเราได้

$$\frac{E_d}{s}\left(\frac{2-n}{1-n}\right) = Lsi_2(s) - LI_L - \frac{i_2(s)}{sC} - \frac{I_L}{s^2C} \tag{3.23}$$

สมการ (3.23) ให้

$$i_2(s) = \frac{\frac{E_d}{L}\left(\frac{2-n}{1-n}\right) + sI_L + \frac{I_L}{sLC}}{s^2 + \frac{1}{LC}} \tag{3.24}$$

$$i_2 = \frac{E_d}{\omega L}\left(\frac{2-n}{1-n}\right)\sin\omega t + I_L \qquad (3.25)$$

ผลจากนี้ก็คือ

$$t_c = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2}\sqrt{LC} \qquad (3.26)$$

และ

$$I_m = I_L + E_d\left(\frac{2-n}{1-n}\right)\sqrt{\frac{C}{L}} \qquad (3.27)$$

ผลการวิเคราะห์นี้ใช้ได้ทั่วไปกับทุกกรณีซึ่งไดโอดป้อนกลับยังคงนำกระแสอยู่ก่อนหน้าที่จะมีการคอมมิวเตตเล็กน้อย รวมทั้งกรณีที่โหลดมีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้าด้วย ยกตัวอย่างว่ากระแสฮาร์โมนิกที่มีค่าสูงพออาจทำให้เกิดกรณีเช่นนี้ขึ้น แม้ว่ากระแสโหลดที่ความถี่พื้นฐานอาจมีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งหรือเป็นแบบล้าหลังอยู่ก็ตาม

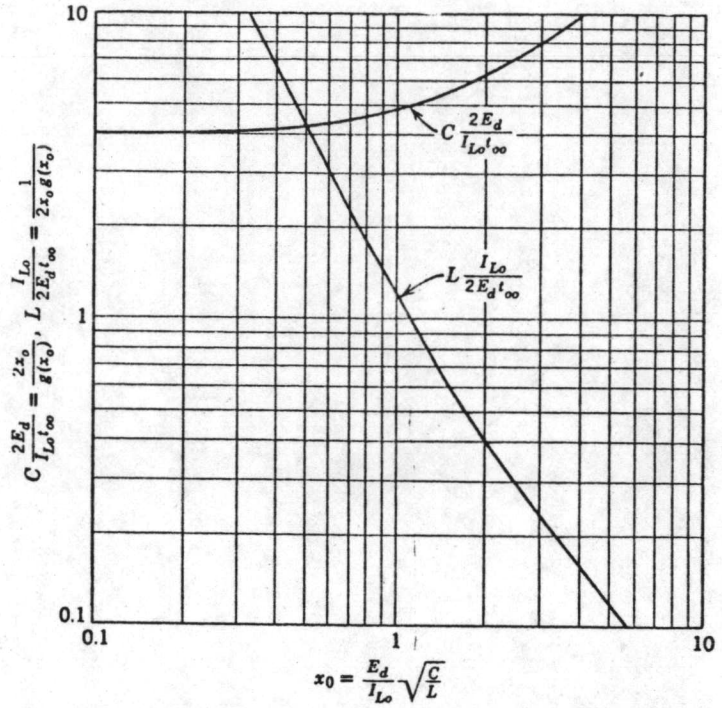
3.3.4 การเลือกค่าความจุและความเหนี่ยวนำสำหรับการคอมมิวเตต

การคอมมิวเตตที่หนักที่สุดเกิดขึ้นเมื่อกระแส I_L ที่ไหลผ่านไทรีสเตอร์มีค่าสูงสุด I_{Lo} ก่อนมีการคอมมิวเตตเล็กน้อย ถ้าแรงดันของแหล่งจ่ายไปกระแสตรง $2E_d$ มีค่าเปลี่ยนไป ค่าต่ำสุดของแรงดันจะเป็นค่าวิกฤต ช่วงเวลาที่เกิดแรงดันย้อน คือ t_o จะต้องไม่สั้นกว่าช่วงเวลาหยุดนำกระแสสูงสุด t_{oo} ของไทรีสเตอร์ ถ้าพารามิเตอร์ x ในสมการ (3.11) มีค่าต่ำสุดเป็น x_o ซึ่งผู้ออกแบบอาจเลือกใช้ตามความเหมาะสม เมื่อแทนค่าเหล่านี้ในสมการ (3.11) และ (3.14) แล้วจัดเรียงพจน์ต่างๆ เสียใหม่เราจะได้ค่าความจุ C และค่าความเหนี่ยวนำ L เป็น

$$C\frac{2E_d}{I_{Lo}t_{oo}} = \frac{2x_o}{g(x_o)} \qquad (3.28)$$

$$L\frac{I_{Lo}}{2E_d t_{oo}} = \frac{1}{2x_o g(x_o)} \qquad (3.29)$$

ถ้าเขียนกราฟของฟังก์ชันตามสมการ (3.28) และ 3.29) แราจะได้รูปที่ 3.6 ค่าของ C และ L คู่ใดๆ ที่ได้จากรูปที่ 3.6 จะให้คอมมิวเตติงอิมพัลส์ที่เพียงพอ



รูปที่ 3.6 การแปรของ C และ L กับพารามิเตอร์ x_o

ค่าต่ำสุดของความจุ C นั้นเราสามารถประมาณได้โดยสังเกตว่ามันจะต้องจ่ายกระแสอย่างน้อย 2 เท่าของกระแสโหลดระหว่างช่วงเวลาหยุดนำกระแสของไทรีสเตอร์ อันเป็นช่วงที่ตัวเก็บประจุคายประจุออกและลดค่าแรงดันจากค่า E_d ลงเป็นศูนย์ ถ้าให้ CE_d เท่ากับ $2I_{Lo}t_{oo}$ แล้วจัดให้เข้ารูปแบบของสมการ (3.28) เราจะพบว่า $C\frac{2E_d}{I_{Lo}t_{oo}}$ มีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่เราสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 3.6 ค่า $C\frac{2E_d}{I_{Lo}t_{oo}}$ จะต้องสูงกว่า 4 เพื่อเผื่อไว้สำหรับกระแสเพิ่มเติมในตัวเหนี่ยวนำระหว่างที่มีการคอมมิวเตต ถ้าความเหนี่ยวนำมีค่าน้อย ส่วนเพิ่มของกระแสก็จะมีค่ามาก และค่าความจุก็จะต้องมากด้วยเช่นกัน พารามิเตอร์ x_o จะเป็นตัวบอกถึงขนาดสัมพัทธ์ของ C และ L ดังนั้นเราจึงต้องเลือกใช้ค่าที่ดีที่สุดของ x_o เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เกณฑ์สำคัญในการเลือกค่า x_o ก็คือต้องให้พลังงาน W ที่กักไว้ในตัวเหนี่ยวนำ L ภาย

หลังการคอมมิวเตตมีค่าน้อยที่สุด พลังงานนี้ไม่เพียงแต่บอกพิกัดของตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น แต่ยังทำให้กำลังสูญเสียในวงจรสูงขึ้นอีกด้วย กำลังที่กักไว้และไหลวนเวียนอยู่ก็คือ 2Wf วัตต์ จากรูปที่ (3.5) ถ้าเลือกให้ $x_o = 1.15$ พลังงานที่ถูกกักไว้ภายใต้ภาวะการคอมมิวเตตที่รุนแรงที่สุด คือ W_o จะมีค่าต่ำสุด และ

$$\frac{W}{E_d I_{Lo} t_{oo}} = h(x_o) = 3.87 \text{ ต่ำสุด} \tag{3.30}$$

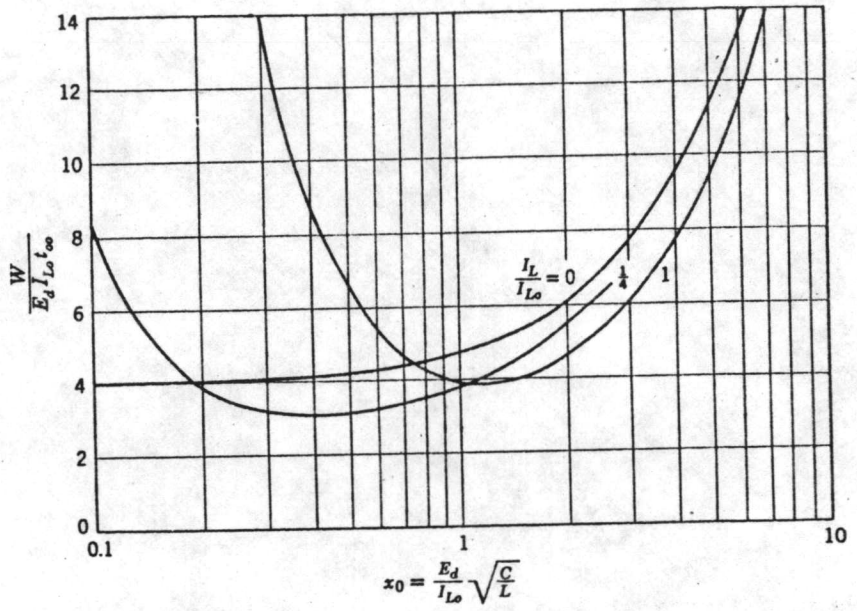
อย่างไรก็ตามค่า x_o ที่เลือกจะไม่ทำให้พลังงานที่กักไว้มีค่าต่ำสุด เมื่อกระแสโหลดขณะที่มีการคอมมิวเตตมีค่าน้อยกว่า I_{Lo} ยกตัวอย่างในกรณีไร้โหลด สมการ (3.21) และ (3.28) จะให้

$$\frac{W}{E_d I_{Lo} t_{oo}} = \frac{2x_o}{g(x_o)} \tag{3.31}$$

ฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันเดียวกันกับที่ให้ไว้ในสมการ (3.28) และรูปที่ 3.6 และมีค่าต่ำสุดเมื่อ x_o มีค่าน้อย ที่โหลดระดับกลางเราสามารถแสดงให้เห็นว่าพลังงาน W มีความสัมพันธ์กับปริมาณคงตัว $E_d I_{Lo} t_{oo}$ ได้โดยสมการ (3.15) และ (3.30) ซึ่งให้ผลเป็น

$$\frac{W}{E_d I_{Lo} t_{oo}} = h(x_o) \frac{W}{W_o} = h(x_o) \left[\frac{I_L f(x)}{I_{Lo} f(x_o)}\right]^2$$

$$= h(x_o) \left[\frac{x_o f(x)}{x f(x_o)}\right]^2 \tag{3.32}$$



รูปที่ 3.7 การแปรของพลังงานที่ถูกกักไว้กับพารามิเตอร์ x_o และโหลด

รูปที่ 3.7 แสดงถึงการแปรค่าของ $W/E_d I_{Lo} t_{oo}$ ตาม x_o ในภาวะโหลดต่างๆ ดังต่อไปนี้

(1) $I_L = I_{Lo}$, $x = x_o$ โหลดสูงสุด สมการ (3.30)

(2) $I_L = I_{Lo}/4$, $x = 4x_o$ คำนวณจาก สมการ (3.32)

(3) $I_L = 0$, $x \to \infty$ ไร้โหลด สมการ (3.31)

จะเห็นได้ว่าเมื่อ x_o มีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 และ 1.15 ค่าพลังงาน W จะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเมื่อมีโหลด และมีค่าใกล้เคียงกับค่าต่ำสุด ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์ส่วนมาก เราถือได้ว่าค่า $x_o = 1$ ที่เลือกใช้นั้นดีที่สุดที่ค่า $x_o = 1$ นี้เราได้ $g(1) = 0.425$ (รูปที่ 3.5) ดังนั้นจากสมการ (3.28) และ (3.29) เราได้ค่าดีที่สุดของ C และ L เป็น

$$C = \frac{t_{oo} I_{Lo}}{0.425 E_d} \tag{3.33}$$

$$L = \frac{t_{oo} E_d}{0.425 I_{Lo}} \tag{3.34}$$

กระแสยอดสูงสุดที่ไหลผ่านไทรีสเตอร์ก็คือค่าสูงสุดของ I_m ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโหลดมีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้า และเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีค่าสูงสุดตามสมการ (3.27) ภาวะนี้จะให้ค่า W สูงสุด

พารามิเตอร์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราการเพิ่มของแรงดันเดินหน้าที่ป้อนซ้ำเข้าสู่ไทรีสเตอร์หลังจากที่ไทรีสเตอร์ถูกทำให้หยุดนำกระแส ความชันสูงสุดของเส้นโค้งที่แทนแรงดันเดินหน้า $I_L = I_{Lo}$ และมีค่าเกือบสม่ำเสมอ แรงดันเดินหน้า $2E_d$ จะถูกป้อนให้แก่ไทรีสเตอร์ในช่วงเวลา

$$t_{co} - t_{oo} = \left[\frac{\tan^{-1} x_o}{g(x_o)} - 1 \right] t_{oo} \tag{3.35}$$

$$= 0.85 t_{oo} \quad \text{เมื่อ} \quad x_o = 1$$

ดังนั้นอัตราเฉลี่ยของการเพิ่มของแรงดันก็คือ $2E_d / 0.85\ t_{oo}$ ซึ่งจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้สำหรับไทรีสเตอร์ที่ใช้

3.3.5 การเลือกค่าเศษส่วนสำหรับจุดแยก

กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านไทรีสเตอร์ในช่วง C ก็คือ $I_m/2$ ถ้าถือว่าแรงดันตกคร่อมไทรีสเตอร์เป็นค่าคงตัว E_a พลังงานที่สูญเสียในไทรีสเตอร์ในช่วง C จะเป็น

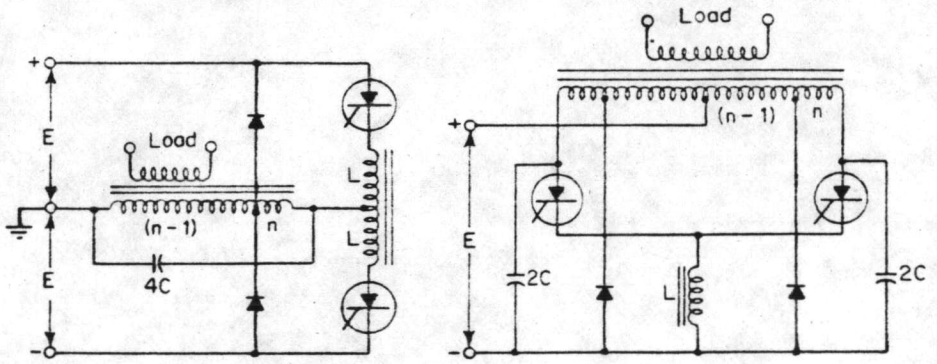
$$\frac{1}{2} I_m E_a t_f = \frac{L I_m^2 E_a (1-n)}{2 E_d n} = W \frac{E_a (1-n)}{E_d n} \tag{3.36}$$

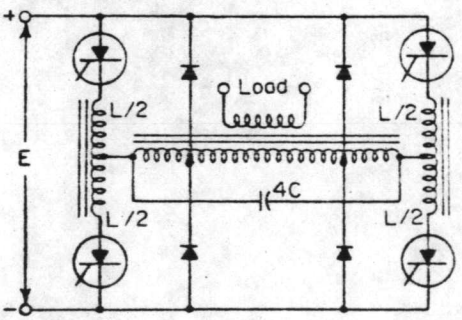
เมื่อ t_f หาได้จากสมการ (3.1) ดังนั้นพลังงานที่กักไว้คือ W จะสูญเสียไปในไทรีสเตอร์เพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น พลังงานส่วนใหญ่จะสูญเสียไปในไดโอดป้อนกลับขดลวดตัวเหนี่ยวนำ และหม้อ

แปลง เพื่อให้ได้พลังงานคืนมาอย่างมีประสิทธิภาพ n จะต้องมีค่าสูงโดยเฉพาะเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ค่ายอดของแรงดัน $2E_d/(1-n)$ ที่ไทรีสเตอร์มีค่าต่ำ และเพื่อให้แรงดันของโหลดเปลี่ยนแปลงตามค่าตัวประกอบกำลังได้น้อยลง n ต้องมีค่าต่ำ การประนีประนอมที่ดีที่สุดให้ n มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.2 โดยเอนเอียงไปทางค่าข้างสูงเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีค่าต่ำ และความถี่ของอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง ในอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก ยกตัวอย่างขนาด 1 KVA หรือเล็กกว่าจะเป็นการดีถ้าไม่มีจุดแยกที่หม้อแปลง

3.3.6 รูปลักษณ์หลายแบบของอินเวอร์เตอร์คลาส C

รูปที่ 3.8 แสดงรูปลักษณ์ 3 อย่างอินเวอร์เตอร์คลาส C





รูปที่ 3.8 รูปลักษณ์วงจรคลาส C