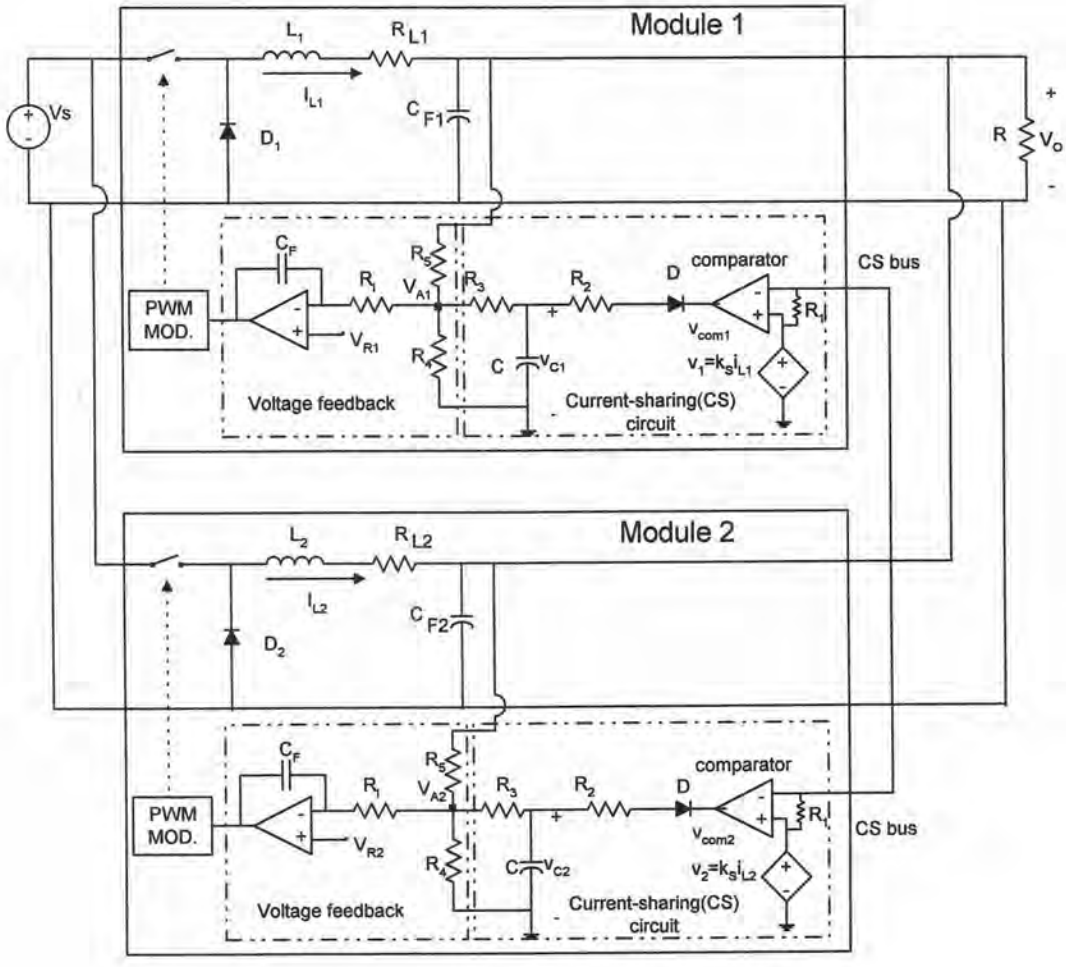
# บทที่ 3

## การขนานแหล่งจ่ายไฟตรง

การขนานแหล่งจ่ายไฟตรงทำได้หลายวิธี (Choi, Cho, Ridley and Lee, 1990; Siri and Lee, 1990; Siri, Lee and Wer, 1991; Jovanovic, Crow and Yi, 1994 ) อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบเดโมเครติก (democratic) ( Jovanovic, Crow and Yi, 1994 ) เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่น มีโครงสร้างที่ง่าย มีความเข้มแข็งในเสถียรภาพ (robustness) และไม่ไวต่อสัญญาณรบกวน

การควบคุมแบบนี้ได้มีการวิเคราะห์แล้ว สำหรับการขนานของวงจรทอนระดับ (Siriwat Laohaket and Gothom Arya,1997) ดังแสดงในรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.1 การขนานแบบเดโมเครติกของวงจรทอนระดับ

3.1 หลักการทำงาน

จากรูปที่ 3.1 แต่ละโมดูล (module) ประกอบด้วย 3 ส่วน : วงจรกำลัง, วงจรป้อนกลับแรงดัน (voltage feedback), และวงจรป้อนกลับกระแส(current-sharing (CS) circuit ) ในรูปวงจรเปรียบเทียบ (comparator) ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันที่ถูกควบคุมโดยกระแสโหลด ($v_1 = k_s i_{L1}$ และ $v_2 = k_s i_{L2}$) กับ แรงดันที่ CS bus ($V_{CS}$) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ $V_1$ และ $V_2$ ( สมการ (3.1)) สัญญาณออกของวงจรเปรียบเทียบ $v_{com1}$ และ $v_{com2}$ จะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะมีเฟสต่างกัน $180^{O}$ เมื่อ $v_{com}$ อยู่ในระดับสูง ไดโอด D จะ 'off' ดังนั้น C จะถูกอัดประจุด้วยค่าคงตัวเวลา = $CR_3$ แต่เมื่อ $v_{com}$ อยู่ในระดับต่ำ C จะคายประจุผ่านไดโอด D ด้วยค่าคงตัวเวลา = $C(R_2//R_3)$ แรงดัน $v_C$ ที่ได้จะไปรวมกับ $v_O$ ที่จุด $V_A$ (รูปที่ 3.1) แล้วผ่านวงจรคุมค่าซึ่งเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ สัญญาณออกของวงจรคุมค่าจะถูกนำไปควบคุมสวิตช์โดยผ่านบล๊อก PWM MOD. ได้กระแสด้านออกของแต่ละโมดูลดังในรูป 3.2 ซึ่งมีองค์ประกอบไฟสลับต่างเฟสกัน $180^{O}$ อันเป็นผลจากการต่างเฟสของ $v_{com1}$ และ $v_{com2}$ ส่วนค่าเฉลี่ยในกรณีนี้จะเท่ากันเนื่องจากแรงดันเฉลี่ยของ $v_{C1}$ และ $v_{C2}$ เท่ากัน

การวิเคราะห์วงจรสมมูลของการอัดและคายประจุในรูปที่ 3.3 โดยใช้หลักการสมดุลแอมแปร์-วินาที และสมมุติว่า $V_C$ มีค่าคงที่ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของตัวเก็บประจุเฉลี่ย $V_C(av)$ และวัฏจักรงาน $D_{CS}$ ของสัญญาณ $V_{com}$ ดังสมการ (3.2)

$$V_{CS} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{k_S(i_{L1} + i_{L2})}{2} \tag{3.1}$$

$$V_{C1}(av) = \frac{V_R}{1 + \frac{R_3}{R_2}(1 - Dcs)} + \frac{V_F(1 - Dcs)}{\frac{R_2}{R_3} + (1 - Dcs)} \tag{3.2}$$

ซึ่ง $D_{CS}$ คือวัฏจักรงานของ $v_{com1}$, $D'_{CS}$=1-$D_{cs}$ และ $V_F$ คือแรงดันตกไปข้างหน้าของไดโอด

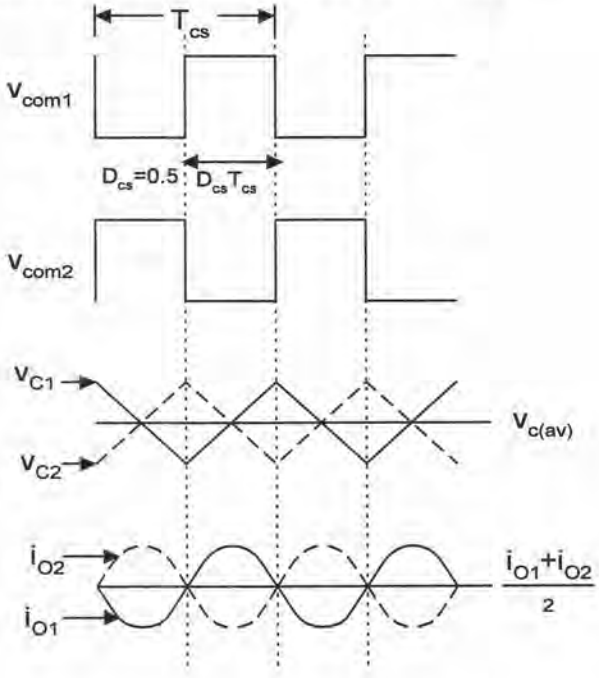
เราอาจประมาณค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ด้านเข้าของวงจรคุมค่า (จุด $V_{A1}$, $V_{A2}$) ว่ามีค่าเท่ากับ $V_R$ และจากวงจรสมมูลเทวินินและทฤษฎีบทการทับซ้อน จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (3.3)

$$v_A = V_R = \frac{\beta V_o R_3}{R_3 + R_{th}} + \frac{v_c(av) R_{th}}{R_3 + R_{th}} \tag{3.3}$$

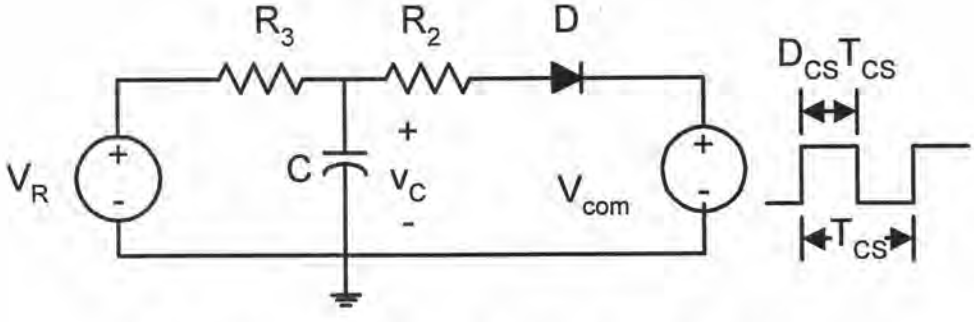
โดยที่ $\beta = R_4/(R_4+R_5)$ และ $R_{th} = R_4R_5/(R_4+R_5)$

จากสมการ (3.3) ถ้า $V_R$, $R_4$ ,$R_5$ , และ $R_3$ ของวงจรแปรผันแต่ละตัวเท่ากัน $v_{C1}$ (av) จะมีค่าเท่ากับ $v_{C2}$ (av) และจากสมการ (3.2) จะได้ว่า $D_{cs1}= D_{cs2}= 0.5$ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2

ถ้า $V_{R1} \neq V_{R2}$ แล้วสมการ (3.3) จะให้ค่า $v_{C1}$ (av) ไม่เท่ากับ $v_{C2}$ (av) และจากสมการ (3.2) จะพบว่า $D_{cs1} \neq D_{cs2} \neq 0.5$ ทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการแบ่งจ่ายกระแส (current-sharing error) ซึ่งในทางปฏิบัติควรหลีกเลี่ยง ดังนั้นจะไม่พิจารณากรณีนี้




รูปที่ 3.2 รูปคลื่นของ 2 โมดูลเมื่อ $V_{R1} = V_{R2}$




รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของการอัดและคายประจุ C ในวงจร CS

3.2 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็ก

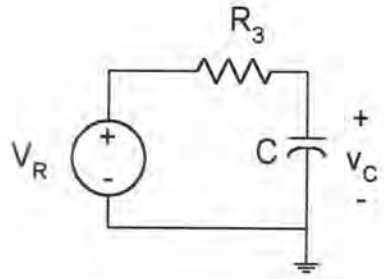
ในการหาวงจรสมมูลของการป้อนกลับกระแส (current-feedback equivalent circuit) เราจะใช้วิธีการเฉลี่ย และทำให้เป็นเชิงเส้น (โคทม อารียา, 2537)

เมื่อ $V_{com}$ อยู่ในระดับสูงหรือมีสถานะเป็น 'H' รูปลักษณ์ของวงจรรูปที่ 3.3 จะเป็นดังรูปที่ 3.4 ก) เราสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

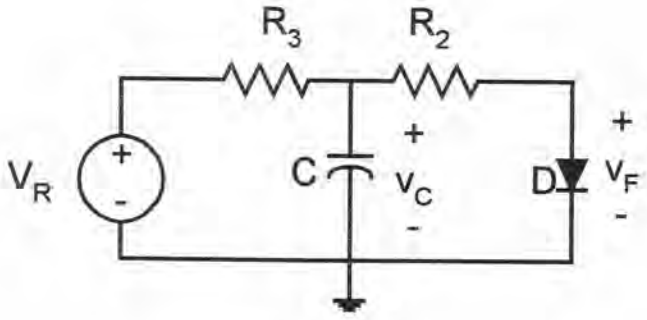
$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{V_R - v_C}{CR_3} \tag{3.4}$$

และอีกสถานะเมื่อ $V_{com}$ อยู่ในระดับต่ำหรือมีสถานะเป็น 'L' รูปลักษณ์ของวงจรจะเป็นดังแสดงรูปที่ 3.4 ข) ซึ่งนำมาเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ดังในสมการ (3.5)

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}\left[\frac{V_R}{R_3} + \frac{V_F}{R_2} - \frac{v_C}{R_3 // R_2}\right] \tag{3.5}$$




ก) $0 < t < D_{CS}T_{CS}$ : $v_{com}$ มีสถานะ 'H'




ข) $D_{CS}T_{CS} < t < T_{CS}$ : $v_{com}$ มีสถานะ 'L'

รูปที่ 3.4 รูปลักษณ์ของวงจรป้อนกลับกระแส

จากสมการ (3.4) และ(3.5) หาสมการเฉลี่ยได้เป็น

$$\frac{dv_C(av)}{dt} = \frac{1}{C}\left[\frac{V_R}{R_3} + \frac{D'_{CS}V_F}{R_2} - \frac{v_C(av)}{R_{eq}}\right] \tag{3.6}$$

โดยที่ $R_{eq} = R_3//(R_2/D'_{CS})$

เมื่อทำสมการ (3.6) ให้เป็นเชิงเส้นสำหรับสัญญาณขนาดเล็ก จะได้

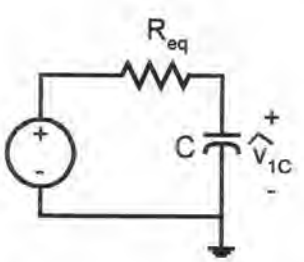
$$\frac{d\hat{v}_C}{dt} = \frac{1}{C}\left[-\frac{\hat{v}_C}{R_{eq}}\right] \tag{3.7}$$

ในทางปฏิบัติ ควรให้ $R_3 >> R_2$ (Jovanovic , Crow, and Yi ,1994) ดังนั้นCในวงจร CS จะถูกอัดประจุด้วยกระแสเกือบคงตัวเท่ากับ $\frac{(V_R - V_C(av))}{R_3}$ และคายประจุแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ด้วยค่าคงตัวเวลาเท่ากับ $C(R_3//R_2)$ อย่างไรก็ตามการกระเพื่อมของแรงดัน $V_C$ สามารถประมาณเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งมีลักษณะสมบัติดังนี้

แรงดันค่ายอดถึงยอด $$V_{cpp} = \frac{V_R - V_C(av)}{CR_3} \times \frac{T_{CS}}{2} \tag{3.8}$$

แอมพลิจูดที่ความถี่หลักมูล $$V_{1cm} = \frac{4V_{cpp}}{\pi^2} \tag{3.9}$$

วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กในรูปที่ 3.5 ได้จากสมการ (3.7) และการใช้หลักการฟังก์ชันบรรยาย (describing function) ที่ว่าระบบควบคุมซึ่งเป็นวงจรผ่านต่ำสามารถกรองสัญญาณ harmonic ออกหมดจนเหลือเพียงองค์ประกอบหลักมูล (Gupta ,1987)




รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กของวงจรป้อนกลับกระแส (CS)

สัญญาณ $\hat{v}_{lC}$ เป็นประกอบหลักมูลของ $\hat{v}_C$ และมีเฟสเซอร์ดังนี้

$$\hat{V}_{lC} = V_{lcm} \angle \tan^{-1}(\omega/\omega_c) \tag{3.10}$$

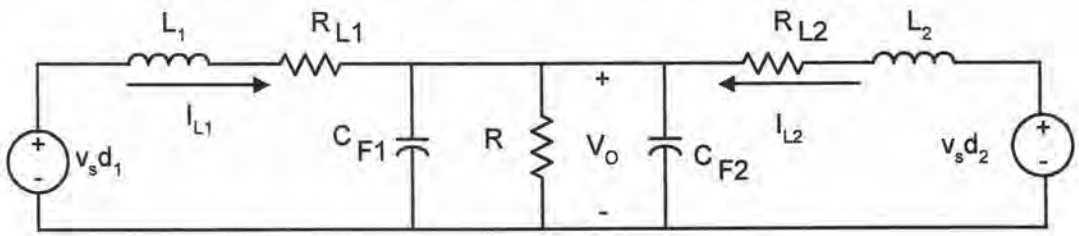
$$\omega_C = \frac{1}{R_{eq}C} \tag{3.11}$$

แบบจำลองเฉลี่ยของวงจรด้านออกของวงจรทอนระดับสองวงจรขนานกัน แสดงในรูปที่ 3.6 กรณีนี้เราละเลยความต้านทานของเส้นลวดซึ่งต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงกับโหลด และสมมุติว่า

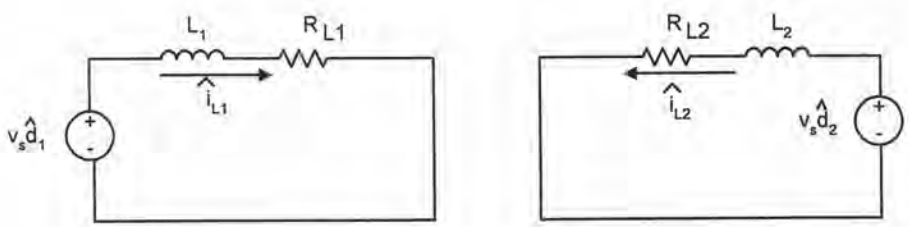
ก) ความไม่สมมาตรของวงจรกำลังเกิดจากความต้านทานในตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว

ข) การคงค่าแรงดันของวงจรคุมค่าดีมากจนกระทั่ง $v_o$ คงที่ หรือ $\hat{v}_o = 0$

ดังนั้นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงจรทอนระดับจะเป็น ดังรูปที่ 3.7




รูปที่ 3.6 วงจรเฉลี่ยของวงจรทอนระดับในรูปที่ 3.1




รูปที่ 3.7 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของรูปที่ 3.6

ฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรทอนระดับคือ

$$\frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = \frac{(V_s / R_L)}{1 + \frac{s}{\omega_L}} \tag{3.12}$$

เมื่อ $\omega_L = R_L / L$

3.3 <u>การคำนวณหาความถี่ $\omega_{CS}$ และการหาแอมพลิจูดของกระแสออสซิเลต $\hat{I}_L$</u>

รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพบล็อกของวงรอบกระแสของ 1 โมดูล เพื่อให้ไม่มีความคลาดเคลื่อนของแรงดันด้านออก และ วงจรคุมค่ามีความง่าย เราเลือกวงจรคุมค่าซึ่งเป็นอินทิเกรเตอร์ (ดูรูปที่ 3.1) และ มีฟังก์ชันโอนย้ายดังนี้

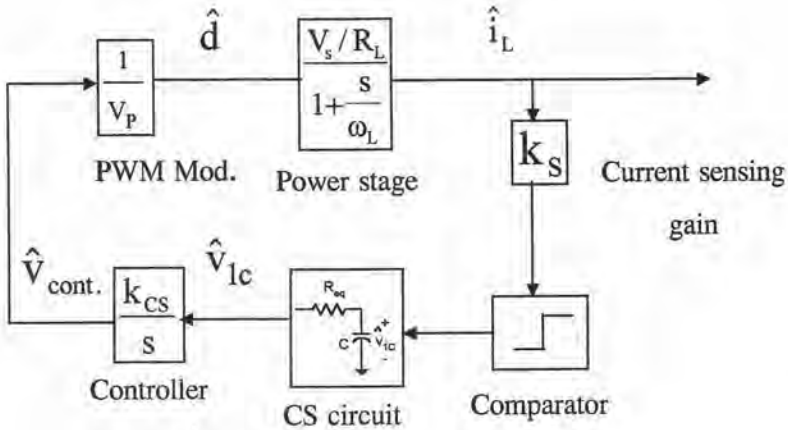
$$\frac{\hat{v}_{cont}}{\hat{v}_{1C}} = \frac{k_{CS}}{s} \tag{3.13}$$

$$k_{CS} = \frac{-R_{th}}{R_{th} + R_S} \times \frac{1}{R_F C_F} \qquad \text{และ} \qquad R_F = R_1 + R_{th} // R_3 \tag{3.14}$$

ความถี่ของการออสซิเลต $\omega_{CS}$ ของกระแสด้านออกของวงจรทอนระดับ (ดูรูปที่ 3.2) ถูกกำหนดโดยเฟสของวงรอบกระแสซึ่งจะเท่ากับ $180^\circ$ ที่ความถี่นี้ นั่นคือ

$$\tan^{-1}\frac{\omega_{CS}}{\omega_c} + \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\frac{\omega_{CS}}{\omega_L} = \pi \tag{3.15}$$

หรือ $$\omega_{CS} = 2\pi f_{CS} = \frac{2\pi}{T_{CS}} = \sqrt{\omega_C \omega_L} \tag{3.16}$$




รูปที่ 3.8 แผนภาพบล็อกของวงรอบกระแส

แอมพลิจูดของกระแสตัวเหนี่ยวนำ $\hat{I}_L$ สามารถคำนวนได้จากวงรอบกระแสของรูปที่ 3.8 ดังนี้

$$\hat{I}_L = V_{lcm} \times \frac{k_{CS}}{\omega_{CS}} \times \frac{1}{V_P} \times \frac{V_S / R_L}{\sqrt{1+\frac{\omega_{cs}^2}{\omega_L^2}}} \qquad (3.17)$$

สมการ (3.17) เป็นกรณีเมื่อ $R_{L1} \approx R_{L2}$ แต่เมื่อ $R_{L1} \neq R_{L2}$ $\hat{v}_o$ จะไม่เท่ากับ 0 หรือรูปคลื่น $v_o$ จะมีความไม่สมมาตร ซึ่งจะชดเชยความต่างเฟสระหว่างวงจรกำลังทั้งสอง เพื่อให้วงรอบกระแสของแต่ละโมดูลมีเฟสเป็น $180^\circ$ ดังแสดงในผลการซีมูเลตรูปที่ 3.10

ความถี่ของการออสซิเลต $\omega_{cs}$ ในกรณีใหม่สามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$\omega_{CS} \approx \sqrt{0.5\omega_C(\omega_{L1}+\omega_{L2})} \qquad (3.18)$$

เมื่อ $R_{L1} \neq R_{L2}$ อัตราขยายวงรอบกระแสมีขนาดแตกต่างกัน แต่ในรูปที่ 3.10 แอมพลิจูด $\hat{I}_{L1}$ และ $\hat{I}_{L2}$ จะเท่ากัน ทั้งนี้เพราะ $v_{A1}$ และ $v_{A2}$ (ดูในรูปที่ 3.1) มีแอมพลิจูดแตกต่างกันดังรูปที่ 3.10 ส่วนแอมพลิจูด $\hat{I}_L$ สามารถประมาณได้โดยแทน $\omega_L$ ลงในสมการ(3.17) ด้วยค่าเฉลี่ยซึ่งเท่ากับ $\omega_L(av) = 0.5\ (\omega_{L1}+\omega_{L2})$

## 3.4 ผลการซีมูเลต

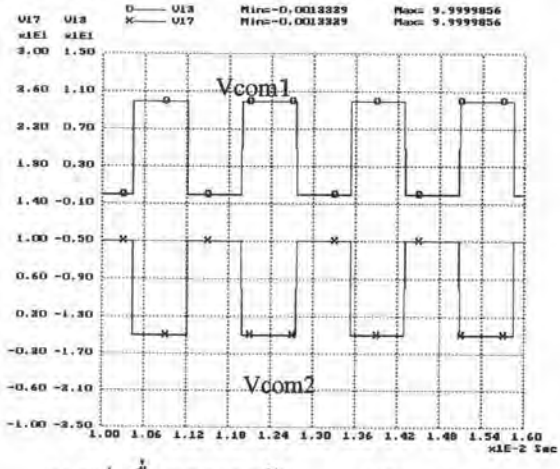
วงจรทอนระดับ 2 โมดูล มีกำลังออกตัวละ 50 W แรงดันเข้า 8 V แรงดันออก 5 V ความถี่สวิตช์ 100 kHz มีค่าพารามิเตอร์ของวงจรคือ $L_1 = L_2 = 5\ \mu H$, $R_{L1} = R_{L2} = 40\ m\Omega$, $C_{F1} = C_{F2} = 100\ \mu F$, $R = 0.25\ \Omega$, $R_1 = 10\ k\Omega$, $C_F = 5\ nF$, $R_4 = 10.9\ k\Omega$, $R_5 = 10\ k\Omega$, $R_1 = 1\ k\Omega$, $R_2 = 10\ k\Omega$, $R_3 = 100\ k\Omega$, $C = 30\ nF$, $V_P = 10\ V$, $V_F = 0.03\ V$ (ในทางปฏิบัติใช้ LM311 (Jovanovic, Crow and Yi,1994)) และ $V_{R1} = V_{R2} = 2.5\ V$ $R_{eq}$ ซึ่งได้จากสมการ(3.6) คือ $16.67\ k\Omega$

จากสมการ (3.8), (3.9), (3.16), และ (3.17) เราคำนวณได้ว่า $f_{CS} = 630\ Hz$, $V_{cpp} = 0.54\ V$, $V_{lcm} = 0.22\ V$ and $\hat{I}_L = 0.61\ A$

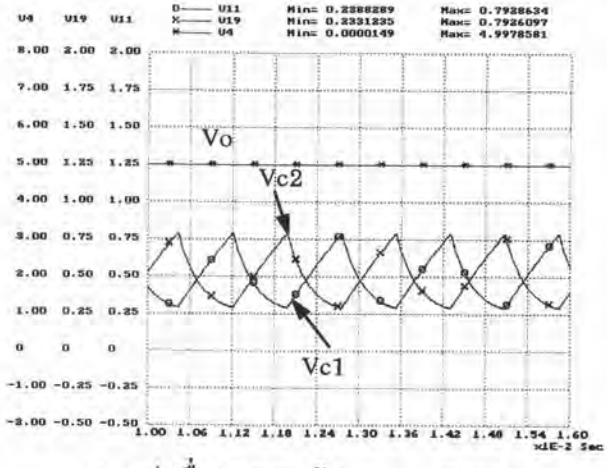
เพื่อให้การซีมูเลตได้ผลรวดเร็วขึ้น จึงได้ใช้วงจรเฉลี่ย(Tsai, 1993)ของวงจร ทอนระดับ (รูปที่ 3.6) แทนวงจรทอนระดับของรูปที่ 3.1 แล้วทำการซีมูเลตด้วยโปรแกรม LEK ผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งมี $f_{CS} = 650\ Hz$ และ $\hat{I}_L = 0.6A$ พบว่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการคำนวณข้างต้น

เมื่อขนาน 3 วงจรแปลงผันซึ่งสมมาตรกัน จะได้แอมพลิจูด $\hat{I}_L$ และความถี่ $f_{CS}$ ค่าเดิม แต่เฟสของ $i_{L1}$, $i_{L2}$ และ $i_{L3}$ จะต่างกัน $120^\circ$ แทนที่จะเป็น $180^\circ$ (ดูรูปที่ 3.11) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เบื้องต้น

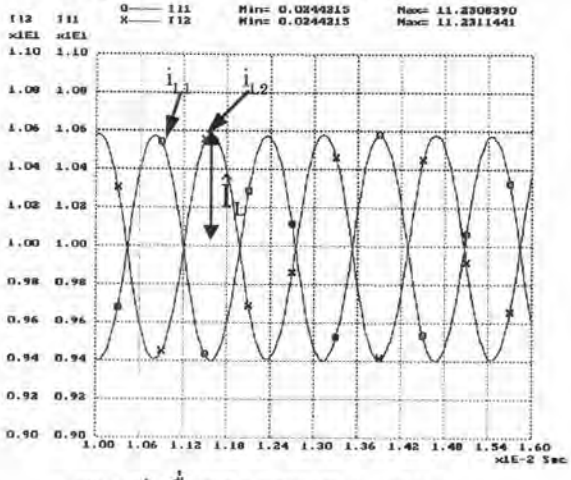
ในกรณีที่ $R_{L1} \neq R_{L2}$ ($R_{L1}$= 40 mΩ, $R_{L2}$ = 10 mΩ) จะได้รูปคลื่นของการซีมูเลต ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจากรูปจะได้ $f_{CS}$= 500 Hz และ $\hat{I}_L$ = 1.4 A โดยค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (3.18) และ (3.17) คือ $f_{CS}$= 500 Hz และ $\hat{I}_L$ = 1.56 A




ก) รูปคลื่นของแรงดัน $v_{com1}$ และ $v_{com2}$

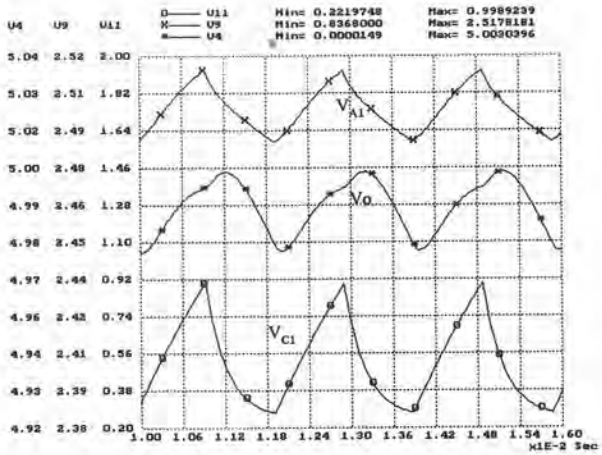



ข) รูปคลื่นของแรงดัน $v_{c1}$, $v_{c2}$ และ $v_o$

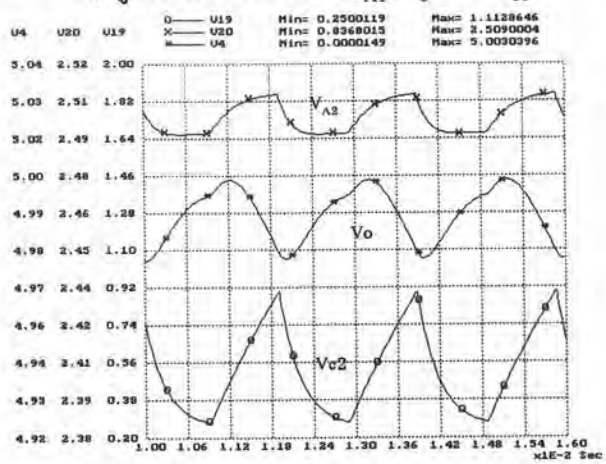



ค) รูปคลื่นของ กระแส $i_{L1}$ และ $i_{L2}$

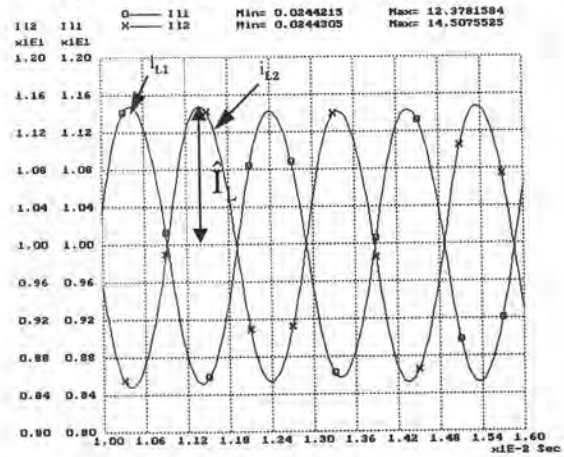
รูปที่ 3.9 รูปคลื่นของการขนานวงจรทอนระดับ 2 โมดูล ซึ่งมี $R_{L1} = R_{L2} = 40\ m\Omega$




ก) รูปคลื่นของแรงดัน $v_{A1}$, $v_o$ และ $v_{c1}$



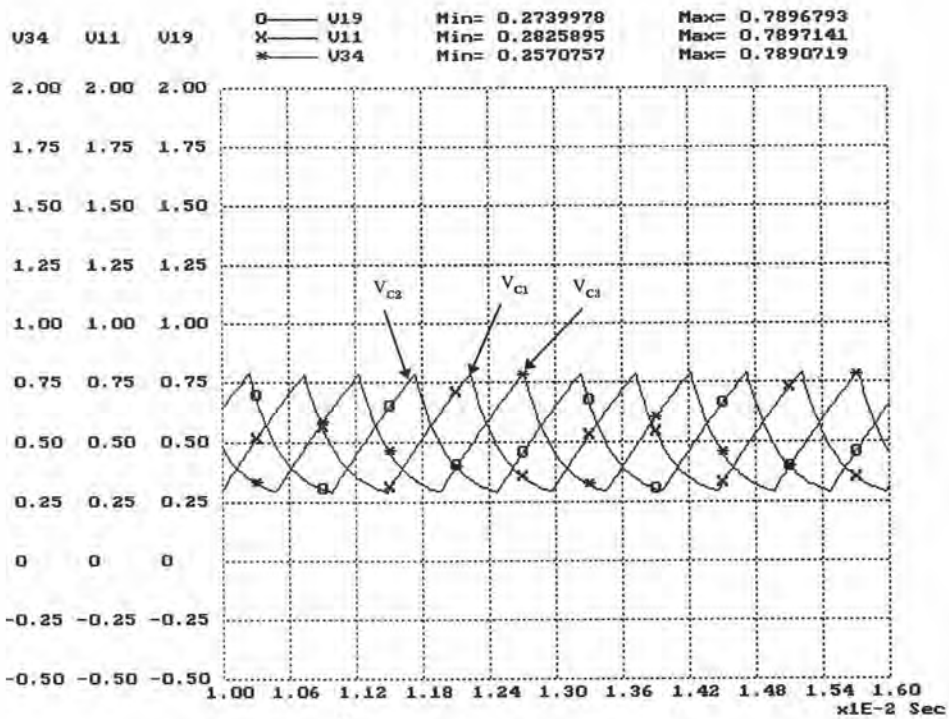

ข) รูปคลื่นของแรงดัน $v_{A2}$, $v_o$ และ $v_{c2}$



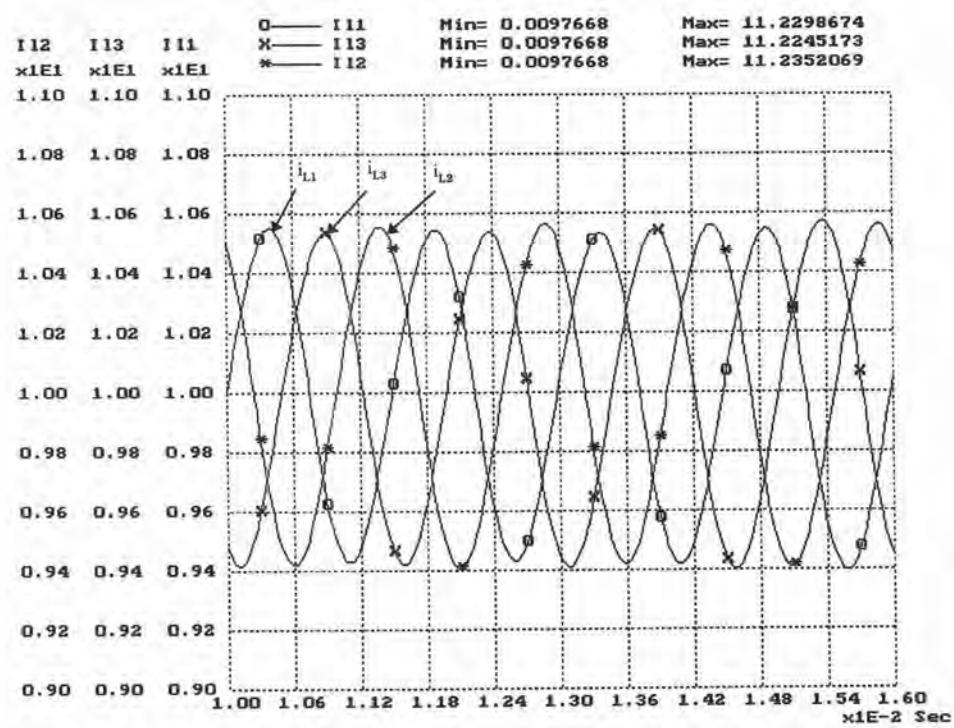

ค) รูปคลื่นของ กระแส $i_{L1}$ และ $i_{L2}$

รูปที่ 3.10 รูปคลื่นของการขนานวงจรทอนระดับ 2 วงจร

ซึ่งมี $R_{L1} = 40\ m\Omega$ และ $R_{L2} = 10\ m\Omega$




ก) รูปคลื่นของแรงดัน $v_{c1}$, $v_{c2}$ และ $v_{c3}$




ข) รูปคลื่นของ กระแส $i_{L1}$, $i_{L2}$ และ $i_{L3}$

รูปที่ 3.11 รูปคลื่นของการขนานวงจรทอนระดับ 3วงจร

ซึ่งมี $R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = 40\ m\Omega$