บทที่ 5

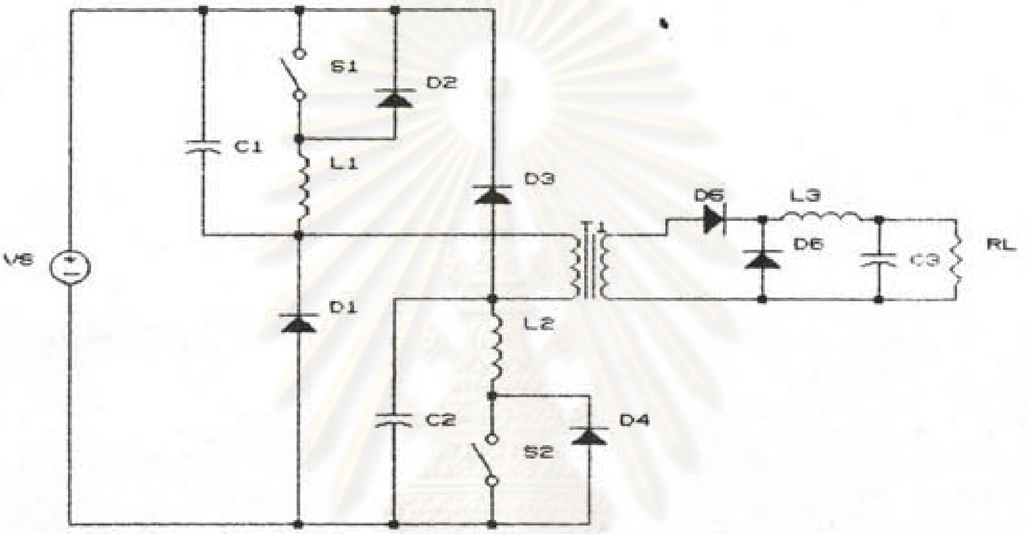
วงจรแปลงผันที่ใช้สวิตช์กระแสศูนย์

จากการออกแบบสร้างและทดสอบวงจรแปลงผันในบทที่ผ่านมานั้นความถี่ในการสวิตช์ถ้ามีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียในสวิตช์ในช่วงเปลี่ยนสถานะจากช่วงหยุดนำกระแสมาเป็นช่วงนำกระแส (Turn on Switching Loss) และในช่วงเปลี่ยนสถานะจากช่วงนำกระแสมาเป็นช่วงหยุดนำกระแส (Turn off Switching Loss)ในการออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟตรง ที่ความถี่สูงมาก(ตั้งแต่ 100 kHz ขึ้นไป) เพื่อให้ได้ความหนาแน่นกำลังสูง จึงต้องพยายามลดการสูญเสียในช่วงเปลี่ยนสถานะทั้งสองดังกล่าวข้างต้นลง ในกรณีที่โหลดคงที่อาจเลือกวงจรแปลงผันไฟตรง แบบเรโซแนนซ์ (DC Resonant Converter) ซึ่งสามารถสวิตช์ที่ความถี่สูงมากได้ (มากกว่า 1 MHz) เมื่อพิจารณาว่าอัตราการแปลงผันที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับโหลด การใช้วงจรแปลงผันไฟตรงแบบเรโซแนนซ์จะต้องปรับวงจรใหม่เมื่อโหลดเปลี่ยน ทำให้ต้องปรับความถี่การสวิตช์ในย่านที่กว้าง ดังนั้นในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะวงจรแปลงผัน แบบกึ่งเรโซแนนซ์ (Quasi - Resonant Converter) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะไม่มีผลกับความถี่การสวิตช์ โดยใช้สวิตช์มอสเฟต ซึ่งปัจจุบันมีพิกัดแรงดัน 500 โวลต์ โดยที่ยังมีความต้านทานขณะนำกระแสต่ำ (น้อยกว่า 1โอห์ม) สำหรับสวิตช์แรงดันศูนย์นั้นจะไม่เลือกใช้เพราะพิกัดแรงดัน 500 โวลต์ ไม่เพียงพอที่จะทนแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรงที่ได้จากการเรียงกระแสจากแรงดันไฟสลับขนาด 220 VAC ได้เพราะสำหรับสวิตช์แรงดันศูนย์แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าอย่างต่ำสองเท่าของแรงดันแหล่งจ่าย [4] ทำให้การออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรงที่ใช้ในการวิจัยนี้เลือกใช้สวิตช์กระแสศูนย์ ถึงแม้ว่าสวิตช์กระแสศูนย์ จะมีค่าสูญเสียในช่วงนำกระแสสูงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับสวิตช์ธรรมดาแบบสี่เหลี่ยมก็ตาม

ในการเลือกวงจรแปลงผันที่จะใช้กับสวิตช์กระแสศูนย์นั้นต้องคำนึงถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทำนองเดียวกับตารางที่ 1.1 โดยพิจารณาผลของสวิตช์กระแสศูนย์ ที่มีผลกับวงจรแปลงผันด้วย

5.1 วงจรแบบบริดจ์อสมมาตร (asymmetrical bridge) เมื่อใช้สวิตช์กระแสศูนย์

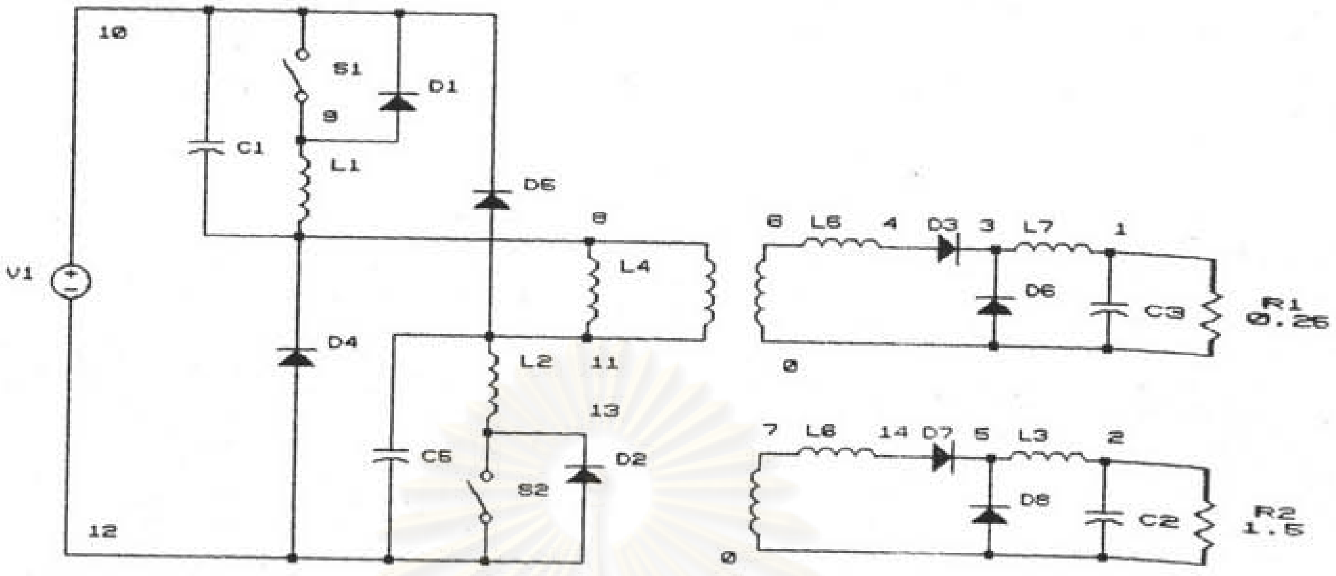
วงจรในรูปที่ 2.1 เป็นวงจรบริดจ์อสมมาตร เมื่อแทนที่สวิตช์เดิมด้วยสวิตช์กระแสศูนย์จะได้วงจรใหม่ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรบริดจ์อสมมาตรเมื่อใช้สวิตช์กระแสศูนย์

วงจรในรูปที่ 5.1 เมื่อทดสอบด้วยโปรแกรม LEC พบว่ามีองค์ประกอบกระแสไฟตรงไหลผ่านหม้อแปลง T_1 ซึ่งเป็นข้อเสียทั้งในแง่การออกแบบหม้อแปลงให้ใหญ่ขึ้นเพื่อป้องกันการอิ่มตัว และในแง่กระแสผ่านสวิตช์ที่สูงขึ้นเพราะกระแสไฟฟ้านี้ก็ไหลผ่านสวิตช์ด้วยเช่นกัน

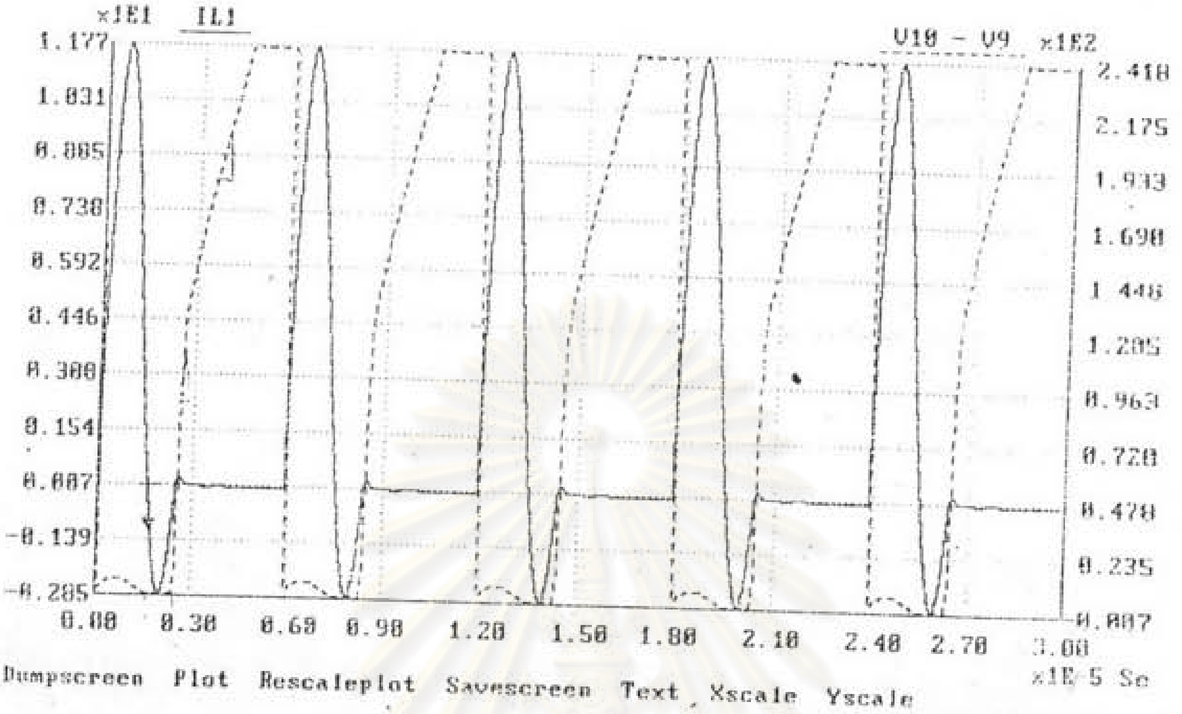
เมื่อทำการซิมูเลตวงจรบริดจ์อสมมาตรในรูปที่ 5.2 โดยใช้โปรแกรม LEC จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4



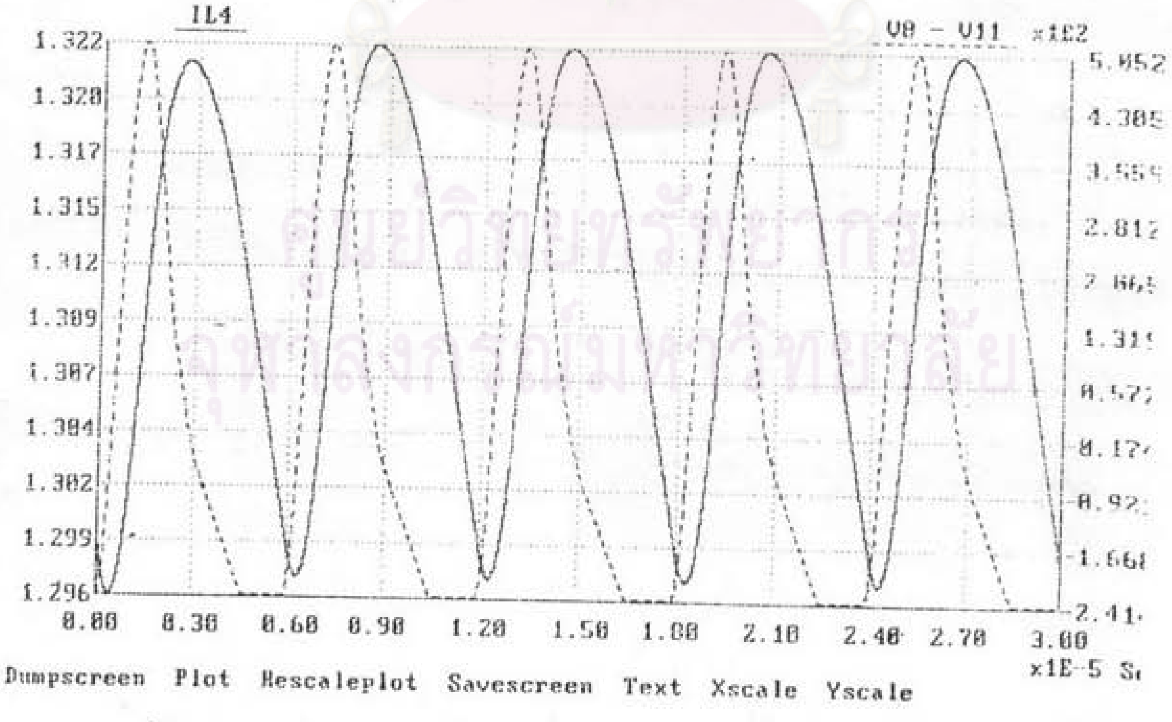
รูปที่ 5.2 วงจรที่ใช้ในการทดสอบด้วยโปรแกรม LEC

ค่าอุปกรณ์ , แหล่งจ่ายแรงดัน , และ เวลาในการสวิตช์ในโปรแกรม LEC

```
LEC>list
      R1     1     0    2.500E-01ohm
      R2     2     0    1.500E+00ohm
      C1    10     8    1.500E-08farad   VC=2.407E+02Volt
      C2     2     0    4.400E-05farad   VC=1.302E+01Volt
      C3     1     0    8.800E-05farad   VC=5.156E+00Volt
      C5    11    12    1.500E-08farad   VC=2.407E+02Volt
      L1     9     8    1.200E-05henry   IL=2.407E-05Amp
      L2    11    13    1.200E-05henry   IL=2.407E-05Amp
      L3     5     2    4.000E-05henry   IL=8.228E+00Amp
      L4     8    11    2.600E-02henry   IL=4.238E-01Amp
      L5     6     4    1.000E-07henry   IL=-1.42E-06Amp
      L6     7    14    1.000E-07henry   IL=-3.24E-06Amp
      L7     3     1    1.000E-05henry   IL=1.963E+01Amp
      V3    19     0    PWL   4breakpoints   Rs=1.000E-03
                 0.000E+00Sec     2.000E+00Volt
                 2.000E-06Sec     2.000E+00Volt
                 2.000E-06Sec     0.000E+00Volt
                 6.000E-06Sec     0.000E+00Volt
      V1    10    12    DC    2.400E+02Volt   Rs=1.000E-02
      D1     9    10   `     1N916   OFF
      D2    12    13         1N916   OFF
      D3     4     3         1N916   OFF
      D4    12     8         1N916   ON
      D5    11    10         1N916   ON
      D6     0     3         1N916   ON
      D7    14     5         1N916   OFF
      D8     0     5         1N916   ON
   DMODEL    1N916      Vcutin = 7.000E-01,   Ron = 1.000E-02,   Roff = 1.000E+07
                          Vbrk = 1.000E+08, Rbrk = 1.000E-02
      T1   3 coils
           coil#1     8    11   8.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
           coil#2     6     0   5.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
           coil#3     7     0   1.10000E+01turns   Rs=1.000E-03
     S1 STNO    10     9    19     0   1.000E+00v   Rs=5.000E-01   NO
     S2 STNO    13    12    19     0   1.000E+00v   Rs=8.500E-01   NO
LEC>proff
```



รูปที่ 5.3 กระแสในสวิตช์และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ในเทอมของเวลา



รูปที่ 5.4 กระแสทำแม่เหล็กของหม้อแปลงและแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง

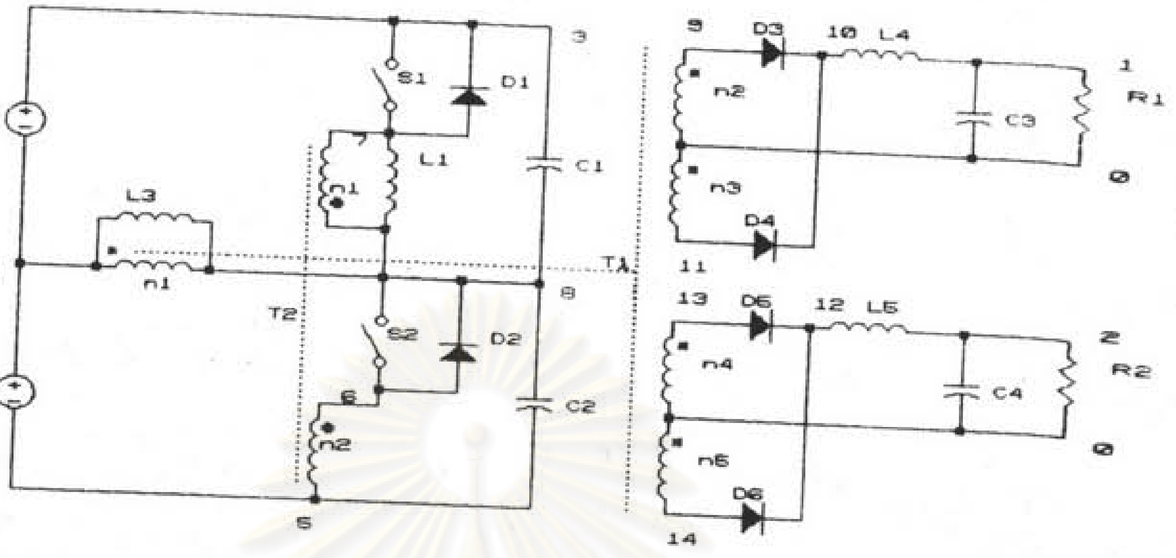
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.3 พบว่ากระแสในสวิตช์หรือ I_{L1} มีค่ากระแสสูงสุดถึง 11.77 A ในกรณีสวิตช์ปกติค่าสูงสุดของ I_{L1} มีค่าเพียง 2.3 A พิจารณารูปที่ 5.4 พบว่ากระแสทำแม่เหล็ก-มีองค์ประกอบไฟตรงประมาณ 1.31 A

เหตุที่ I_{LM} มีองค์ประกอบไฟตรงก็เพราะต้องการกระแสไฟผ่าน C_1 และ C_2 เมื่อสวิตช์ตัดวงจร แรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแรงดันตกคร่อมสวิตช์เท่ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_c มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟตรงด้านเข้า (V_1ในรูปที่ 5.2) ไดโอด D_4,D_5 (ดูรูปที่ 5.2) จึงยังไม่นำกระแส ดังนั้น I_{LM} จะไหลผ่านตัวเก็บประจุทำให้ v_c เพิ่มแบบเชิงเส้น (ดังรูปที่ 5.3) เมื่อแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเพิ่มค่าขึ้นจนเท่ากับค่าแรงดันไฟตรงด้านเข้า D_4,D_5 จะเริ่มนำกระแส ได้แรงดันคร่อมหม้อแปลง $V_6 - V_{11}$ จะมีค่าเท่ากับ $-V_1$ ดังรูปที่ 5.4 แรงดัน $V_6 - V_{11}$ ต้องมีสมดุลโวลต์ x วินาที มิฉะนั้น I_{LM} จะเพิ่มขึ้นเรื่อย เมื่อ I_{LM} มีค่าน้อย $V_6 - V_{11}$ ใช้เวลานานในการแปรสู่ค่า V_1 ทำให้ขาดสมดุลโวลต์ x วินาที (ซีกบวกมากกว่าซีกลบ) I_{LM} จึงเพิ่มขึ้น ซีกลบของ $V_6 - V_{11}$ จึงมีพื้นที่มากขึ้น จนถึงค่าสมดุล ในกรณีนี้ I_{LM} จะมีค่าสมดุลเท่ากับ 1.31 A จะเห็นได้ว่า I_{LM} ขึ้นอยู่กับจุดทำงานและขนาดของอุปกรณ์เช่นค่าของ C ซึ่งเป็นปัญหามากวงจรที่ใช้สวิตช์เรโซแนนซ์จึงไม่ควรใช้

5.2 วงจรแบบกึ่งบริดจ์ (half bridge) เมื่อใช้สวิตช์กระแสศูนย์

จากปัญหาที่พบในวงจรบริดจ์อสมมาตรเมื่อใช้สวิตช์กระแสศูนย์เพราะกระแสทำแม่เหล็ก I_{LM} จะต้องมีองค์ประกอบไฟตรงเพื่อการประจุตัวเก็บประจุเนื่องจากกระแส I_{LM} มีองค์ประกอบไฟตรงค่อนข้างมาก จึงต้องเลือกหาวงจรแปลงผันแบบอื่น หลังจากพิจารณาโครงสร้างต่าง ๆ แล้ว พบว่าวงจรแบบกึ่งบริดจ์น่าจะใช้สวิตช์กระแสศูนย์ โดยไม่มีปัญหาองค์ประกอบไฟตรงในหม้อแปลง



รูปที่ 5.5 วงจรที่ใช้ในการทดสอบด้วยโปรแกรม LEC

ในรูปที่ 5.5 นี้ จะตั้งเป้าความถี่การสวิตช์ไว้ประมาณ 300 kHz คาบเวลา T จะมีค่าประมาณ $1/f = 1/300 \times 10^3 = 3.3\ \mu s$ เลือก $T = 3.5\ \mu s$ ในการซิมมูเลด กำหนดเวลาคำสั่งสวิตช์ให้ทำงานไว้ที่ $1 \mu s$ ซึ่งมีเวลาเท่ากับ 3/4 ของคาบเวลาเรโซแนนซ์ของ L_r, C_r C_1, C_2 ในวงจรต่อสมมาตรกันอยู่ ค่าตัวเก็บประจุในวงจรเรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากับ $C_1 + C_2 = C_r$ เนื่องจากในการคำนวณโดยใช้วงจรสมมูลไฟสลับแหล่งแรงดันไฟตรงเป็นเสมือนวงจรลัดและตัวเก็บประจุทั้งสองปรากฏขนานกัน ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ $L_1 = L_2 = L_r$ ความถี่เชิงมุมเรโซแนนซ์ และความต้านทานลักษณะ Z_n มีค่าดังนี้ [3]

$$W = 1/\sqrt{L_r C_r} \tag{5.1}$$

$$Z_n = \sqrt{L_r / C_r} \tag{5.2}$$

คำนวณทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง กระแสเฉลี่ยผ่านสวิตช์มีค่า

$$I_{av} = P/n \times V_{min} \tag{5.3}$$

กำหนดให้ P คือกำลังจ่ายออก, n คือประสิทธิภาพมีค่า 0.8

$$I_{av} = 200/(0.8 \times 240)$$

$$= 1.04 \quad A$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระแสสูงสุด (peak current) ของวงจรเรโซแนนซ์ $I_{amp.}$ หาได้จากแรงดันในวงรอบการสวิตช์ V_1 หารด้วยความต้านทานคุณสมบัติ Z_n [3]

$$I_{amp.} = V_1/Z_n \qquad (5.4)$$

ให้ f_s คือความถี่การสวิตช์

f_n คือความถี่เรโซแนนซ์

V_o คือแรงดันทางด้านออกที่แปลงมาทางปฐมภูมิ

V_s คือแรงดันทางด้านเข้ามีค่าเท่ากับ V_1, V_2

กระแสเฉลี่ยในสวิตช์จะมีค่า [3]

$$I_{av.} = I_{amp.} \times f_s/f_n = (V_1/Z_n)(f_s / f_n) \qquad (5.5)$$

อัตราการแปลงแรงดัน [3]

$$V_o/V_s = f_s/f_n$$

$$f_s/f_n = (5 \times 6.6)/120$$

$$= 0.275$$

สมการ(5.5)

$$1.04 = (120/Z_n) \times (0.275)$$

$$Z_n = 31.7 \quad \text{ohms}$$

เลือก Z_n ต่ำกว่าค่าดังกล่าวมีค่า 15 ohms

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จาก $3\,T/4 = 1 \times 10^{-6}$ s

$$W = 2\pi f = 2\pi/T$$

$$= 2\pi/(4 \times 10^{-6}/3) \quad \text{rad./s}$$

$$= 4.7 \times 10^{6} \quad \text{rad./s}$$

จาก (5.1) $L_rC_r = 1/(4.7 \times 10^{6})^2$

$$= 4.5 \times 10^{-14} \qquad (5.6)$$

จาก (5.2) $L_r/C_r = (15)^2$

$$= 225$$

$L_r \quad = 225\ C_r$

จาก (5.6) $C_r \quad = [(4.5 \times 10^{-14})/225]^{1/2}$

$= 14 \times 10^{-9} \qquad F$

$L_r \quad = 225 \times 14 \times 10^{-9}$

$= 3.2 \times 10^{-6} \qquad H$

$C_r/2 = 7 \times 10^{-9} \qquad F$

เลือก $C_1 = C_2 \quad = 8.2 \times 10^{-9} \qquad F$

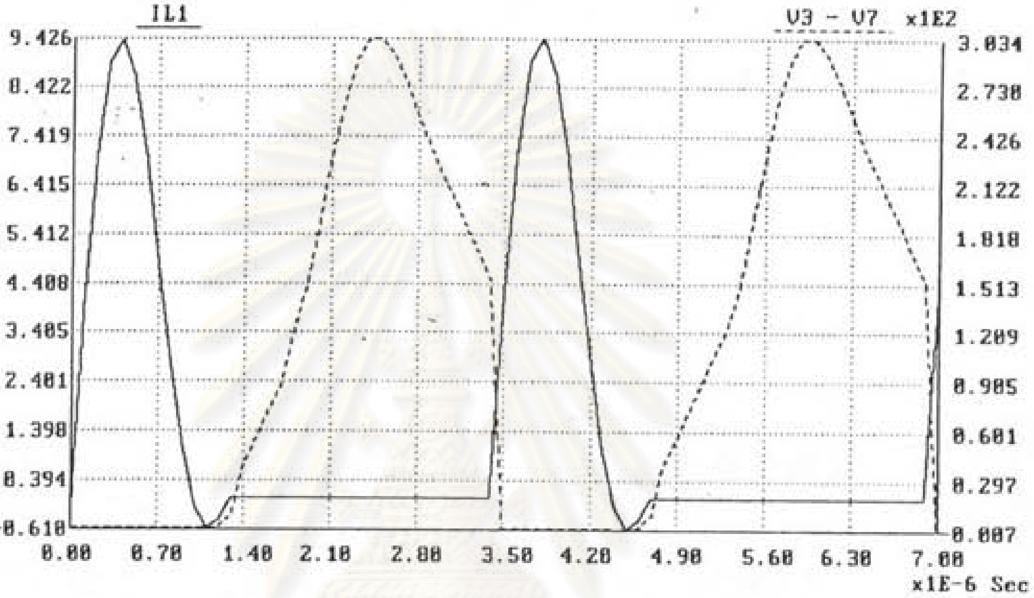
$L_1 = L_2 \quad = 3 \times 10^{-6} \qquad H$

ค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้โปรแกรม LEC มีข้อมูลดังนี้

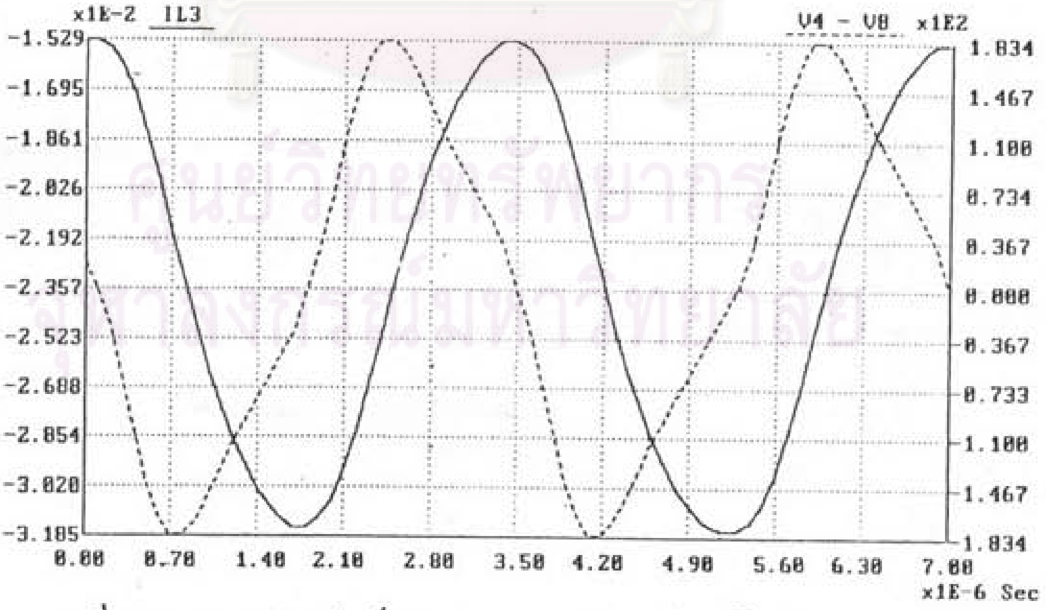
5.2.1 กรณีโหลดมากที่สุดแรงดันขาเข้าต่ำสุด

```
LEC>pron
LEC>list
        R1    1    0   2.500E-01ohm
        R2    2    0   1.500E+00ohm
        C1    3    8   8.200E-09farad   VC=1.384E+02Volt
        C2    8    5   8.200E-09farad   VC=1.016E+02Volt
        C3    1    0   2.200E-03farad   VC=5.377E+00Volt
        C4    2    0   1.100E-03farad   VC=1.497E+01Volt
        L3    4    8   1.100E-02henry   IL=-6.17E-03Amp
        L4   10    1   1.000E-05henry   IL=2.591E+01Amp
        L5   12    2   4.000E-05henry   IL=7.126E+00Amp
        L1    7    8   3.000E-06henry   IL=1.384E-05Amp
        L2    6    5   3.000E-06henry   IL=1.016E-05Amp
        V1    3    4   DC    1.200E+02Volt   Rs=1.000E-03
        V2    4    5   DC    1.200E+02Volt   Rs=1.000E-03
        V3   15    0   PWL   4breakpoints   Rs=1.000E-03
                  0.000E+00Sec      2.000E+00Volt
                  1.000E-06Sec      2.000E+00Volt
                  1.000E-06Sec      0.000E+00Volt
                  3.500E-06Sec      0.000E+00Volt
        V4   16    0   PWL   6breakpoints   Rs=1.000E-03
                  0.000E+00Sec      0.000E+00Volt
                  1.750E-06Sec      0.000E+00Volt
                  1.750E-06Sec      2.000E+00Volt
                  2.750E-06Sec      2.000E+00Volt
                  2.750E-06Sec      0.000E+00Volt
                  3.500E-06Sec      0.000E+00Volt
        D1    7    3        1N916   OFF
        D2    6    8        1N916   OFF
        D3    9   10        1N916   ON
        D4   11   10        1N916   OFF
        D5   13   12        1N916   ON
        D6   14   12        1N916   OFF
     DMODEL     1N916     Vcutin = 7.000E-01,  Ron = 1.000E-02,  Roff = 1.000E+07
                              Vbrk = 1.000E+08, Rbrk = 1.000E-02
        T1   5 coils
             coil#1     4     8   6.60000E+01turns   Rs=1.000E-03
             coil#2     9     0   4.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
             coil#3     0    11   4.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
             coil#4    13     0   1.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
             coil#5     0    14   1.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
        S1 STNO     3     7    15     0   1.000E+00v   Rs=1.000E-03   NO
        S2 STNO     8     6    16     0   1.000E+00v   Rs=1.000E-03   NO
```

เมื่อทำการซิมมูเลต (simulate) ในแกนของเวลา และพิจารณารูปคลื่น กระแสและแรงดันพบว่ากรณีแรกที่เราพิจารณานี้คือ กรณีโหลดมากที่สุด และแรงดันขาเข้าต่ำที่สุดจะได้รูปคลื่นดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 5.6 กระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 ในแกนเวลากรณีที่หนึ่ง



รูปที่ 5.7 กระแสทำแม่เหล็ก I_{L3} และแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง $v_8 - v_4$

ในแกนของเวลา กรณีที่หนึ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

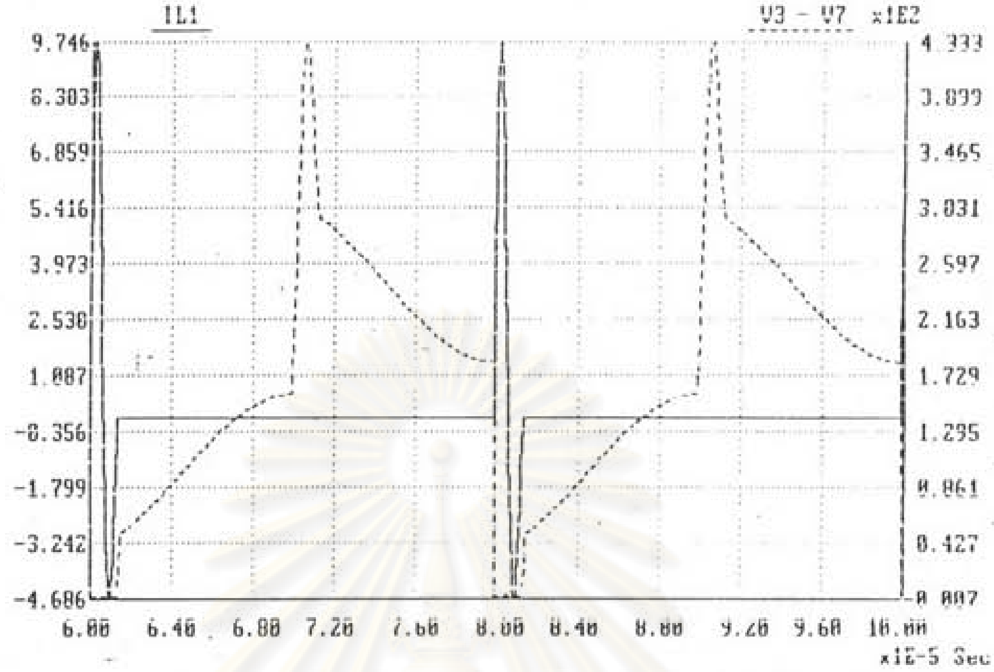
จากการซิมมูเลตโดยกำหนดให้แรงดันขาเข้าต่ำสุด และโหลดมีค่าสูงสุด โดยที่แรงดันจ่ายออกมีค่าเต็มพิกัด จะพบว่า (ดูรูปที่ 5.6) กระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่ายอดประมาณ 9.5 A แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าประมาณ 1.25 เท่าของแหล่งจ่าย ส่วนในรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่ากระแสทำแม่เหล็ก I_{L3} มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ไม่ทำให้หม้อแปลงอิ่มตัว เพื่อลดความผิดพลาดอื่นๆ อันอาจจะเกิดขึ้นก่อนสร้างวงจรเพื่อทดสอบ จึงต้องกำหนดสภาพแรงดันด้านเข้าสูงที่สุดและโหลดน้อยที่สุดด้วยการซิมมูเลตก่อน

5.2.2. โหลดน้อยที่สุดและแรงดันขาเข้าสูงที่สุด

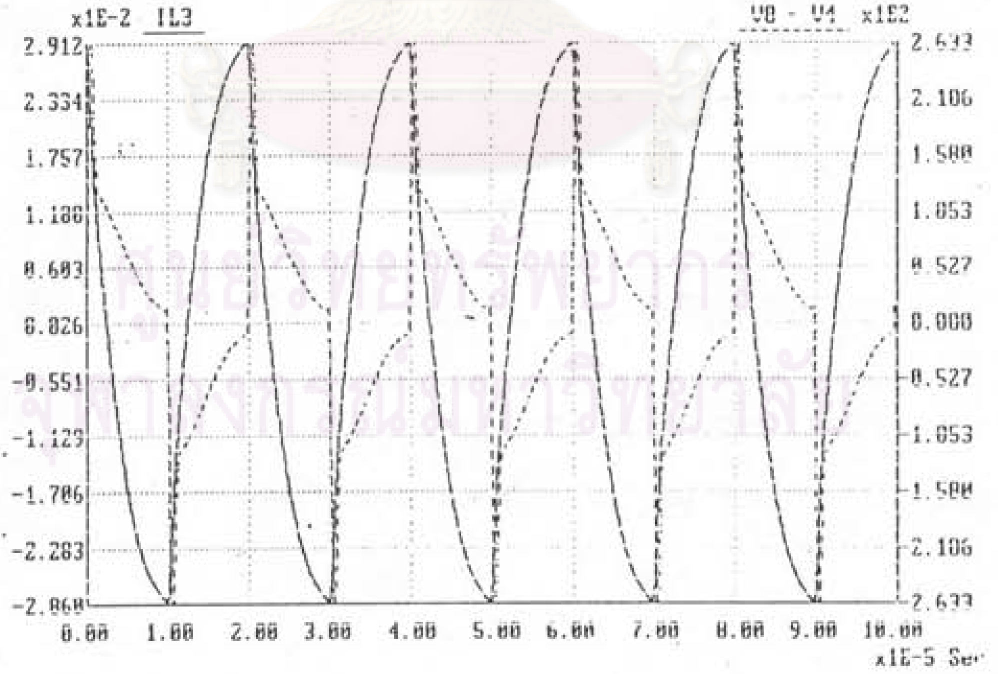
กำหนดให้ v_1,v_2 มีค่า 170 V และ R_1,R_2 มีค่า 2.5 โอห์ม,15 โอห์ม ตามลำดับ

```
R1    1    0    2.500E+00ohm
R2    2    0    1.500E+01ohm
C1    3    8    8.200E-09farad   VC=1.509E+02Volt
C2    8    5    8.200E-09farad   VC=1.891E+02Volt
C3    1    0    2.200E-03farad   VC=5.409E+00Volt
C4    2    0    1.100E-03farad   VC=1.181E+01Volt
L3    4    8    1.300E-02henry   IL=2.871E-02Amp
L4   10    1    1.000E-05henry   IL=-1.08E-06Amp
L5   12    2    4.000E-05henry   IL=-2.36E-06Amp
L1    7    8    3.000E-06henry   IL=5.026E+00Amp
L2    6    5    3.000E-06henry   IL=1.891E-05Amp
V1    3    4    DC    1.700E+02Volt   Rs=1.000E-03
V2    4    5    DC    1.700E+02Volt   Rs=1.000E-03
V3   15    0    PWL   4breakpoints   Rs=1.000E-03
          0.000E+00Sec     2.000E+00Volt
          1.000E-06Sec     2.000E+00Volt
          1.000E-06Sec     0.000E+00Volt
          2.000E-05Sec     0.000E+00Volt
V4   16    0    PWL   6breakpoints   Rs=1.000E-03
          0.000E+00Sec     0.000E+00Volt
          1.000E-05Sec     0.000E+00Volt
          1.000E-05Sec     2.000E+50Volt
          1.100E-05Sec     2.000E+00Volt
          1.100E-05Sec     0.000E+00Volt
          2.000E-05Sec     0.000E+00Volt
D1    7    3        1N916   OFF
D2    6    8        1N916   OFF
D3    9   10        1N916   OFF
D4   11   10        1N916   OFF
D5   13   12        1N916   OFF
D6   14   12        1N916   OFF
DMODEL   1N916    Vcutin = 7.000E-01,  Ron = 1.000E-02,  Roff = 1.000E+07
                  Vbrk = 1.000E+08, Rbrk = 1.000E-02
T1   5 coils
     coil#1     4     8   6.20000E+01turns   Rs=1.000E-03
     coil#2     9     0   5.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
     coil#3     0    11   5.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
     coil#4    13     0   1.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
     coil#5     0    14   1.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
S1 STNO    3    7    15    0   1.000E+00v   Rs=1.000E-03   NC
S2 STNO    8    6    16    0   1.000E+00v   Rs=1.000E-03   NO
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 กระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 ในแกนเวลากรณีที่สอง



รูปที่ 5.9 กระแสทำแม่เหล็ก I_{L3} และแรงดันตกคร่อม หม้อแปลง $v_8 - v_4$

ในแกนของเวลา กรณีที่สอง

จากการทดสอบด้วยโปรแกรม LECโดยกำหนดให้แรงดันขาเข้าสูงที่สุดและโหลดมีค่าต่ำที่สุด โดยที่แรงดันจ่ายออกมีค่าเต็มพิกัดจะพบว่าในรูปที่ 5.8 แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าค่อนข้างสูงคือมีค่าเกินกว่า $V_s + V_c$ เช่นเดียวกับรูปที่ 5.6 ต่างกันแต่เพียงว่ารูปที่ 5.6 แรงดันขาเข้ารวมกันมีค่า 240 V ในขณะที่ รูปที่ 5.8 แรงดันขาเข้ารวมกันมีค่า 340 V ส่วนที่เกินมาประมาณ 93 V จะเพิ่มความเค้นให้แก่สวิตช์ ซึ่งจะต้องหาทางแก้ไขต่อไป สำหรับกระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} มีค่า 9.746 A ซึ่งมีค่ามากกว่าในช่วงจ่ายโหลดเล็กน้อย รวมทั้งในช่วงกระแส I_{L1} แกว่งลงเป็นลบมีค่า 4.686 A ไดโอดขนานกลับทิศทาง จะรับกระแสในส่วนนี้ และในรูปที่ 5.9 กระแสทำแม่เหล็ก I_{L3} มีค่ามากกว่ารูปที่ 5.7 เพราะแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าสูงขึ้น

5.3 <u>พิกัดวงจรแบบกึ่งบริดจ์สวิตช์กระแสศูนย์ที่มีการปรับปรุง</u>

จากปัญหาที่พบในวงจรแบบกึ่งบริดจ์มีปัญหาหลักคือ ความเค้นในสวิตช์เนื่องจากกระแสค่อนข้างสูง และแรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่ามากกว่าสวิตช์ปกติ ซึ่งจะต้องปรับปรุงองค์ประกอบต่าง ๆ ในวงจรเพื่อลดปัญหาข้างต้นลง

5.3.1 การคำนวณหา L_r, C_r ที่เหมาะสม ปัญหานี้ต้องพิจารณาในขณะที่แรงดันด้านเข้ามีค่าต่ำที่สุด แรงดันต่ำที่สุดคิดจากแรงดันด้านเข้ามีค่าตกลง 10 % และแรงดันตกเนื่องจากการกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุมีค่า 10%

ให้แรงดันด้านเข้า V_{min} มีค่า

$$= \sqrt{2} \times 220 \times 0.9 \times 0.9 \qquad (5.7)$$

$$= 252 \quad V$$

กำลังจ่ายออก P มีค่าเพียง 100 W จาก(5.7)

$$I_{av} = 100/(0.8 \times 240)$$

$$= 0.52 \quad A$$

$$f_s/f_n = (5 \times 6.6)/(252/2)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= 0.26$$

จาก (5.5) $Z_n = (252/2) \times (0.26)/0.52$

$$= 63$$

เลือกค่า $Z_n = 50$

จาก (5.6) $L_r C_r = 4.5 \times 10^{-14}$ (5.8)

จาก (5.2) $L_r / C_r = (50)^2$ (5.9)

จาก (5.8),(5.9) $C_r^2 = (4.5 \times 10^{-14} / 50^2)$

$$C_r = (4.5 \times 10^{-14} / 50^2)^{1/2}$$

$$= 4.24 \times 10^{-9} \quad F$$

แทนค่า C_r ใน (5.8) $L_r = (4.5 \times 10^{-14} / 4.24 \times 10^{-9})$

$$= 10.6 \times 10^{-6} \quad H$$

$$C_1 = C_2 = C_r / 2$$

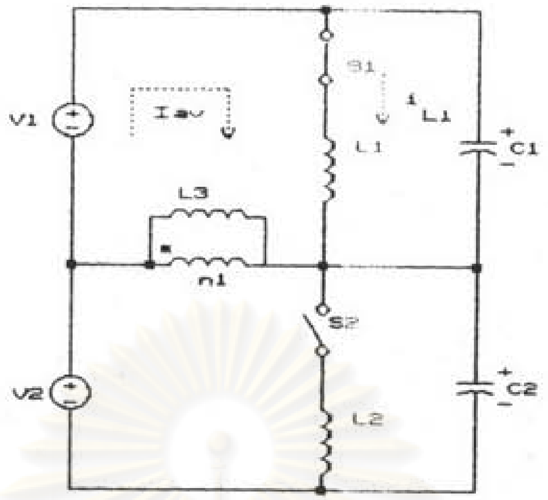
$$\cong 2.2 \quad nF$$

$$L_1 = L_2 = L_r$$

$$\cong 10 \quad \mu H$$

5.3.2 ปัญหาแรงดันในสวิตช์ เมื่อพิจารณาวงจรในรูปที่ 5.5 แรงดันเฉลี่ยที่ C_1, C_2 จะมีค่าเท่ากับแรงดัน V_1, V_2 จากรูปที่ 5.10 กรณีสวิตช์ S_1 นำกระแส สวิตช์ S_2 หยุดนำกระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 สวิตช์ S_1 นำกระแส S_2 หยุดนำกระแส

กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะเริ่มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นจนถึงระดับกระแสเฉลี่ย จากนั้นกระแสในตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} จะเริ่มแกว่งเป็นฟังก์ชันไซน์ เมื่อกระแส I_{L1} มีค่าเป็นศูนย์ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 จะมีค่าศักดาไฟฟ้าเป็นลบ จากรูปที่ 5.9 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 มีค่า

$$V_{C2} = V_1 + V_2 - V_{C1}$$

เมื่อ V_{C1} มีค่าเป็นลบแรงดัน V_{C2} จะมีค่าแรงดันมากกว่าแหล่งจ่ายซึ่งเป็นอันตรายกับสวิตช์ S_2

แนวทางในการแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้ดังนี้

5.3.2.1 ลดกระแสในวงจรเรโซแนนซ์ลง

5.3.2.2 จำกัดแรงดันตกคร่อม C_1, C_2 ในด้านลบด้วยซีเนอร์ไดโอดกับไดโอด

5.3.2.3 เชื่อมวงจรแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 เข้าด้วยกัน

เมื่อพิจารณาแนวทางในการแก้ไขกรณี 5.3.2.1 ทำได้โดยการเพิ่มความต้านทานลักษณะ Z_n ซึ่งวิธีนี้จะไปจำกัดให้วงจรแปลงผันจ่ายกระแสโหลดได้น้อยลงจึงไม่เลือกใช้วิธีนี้ดัง

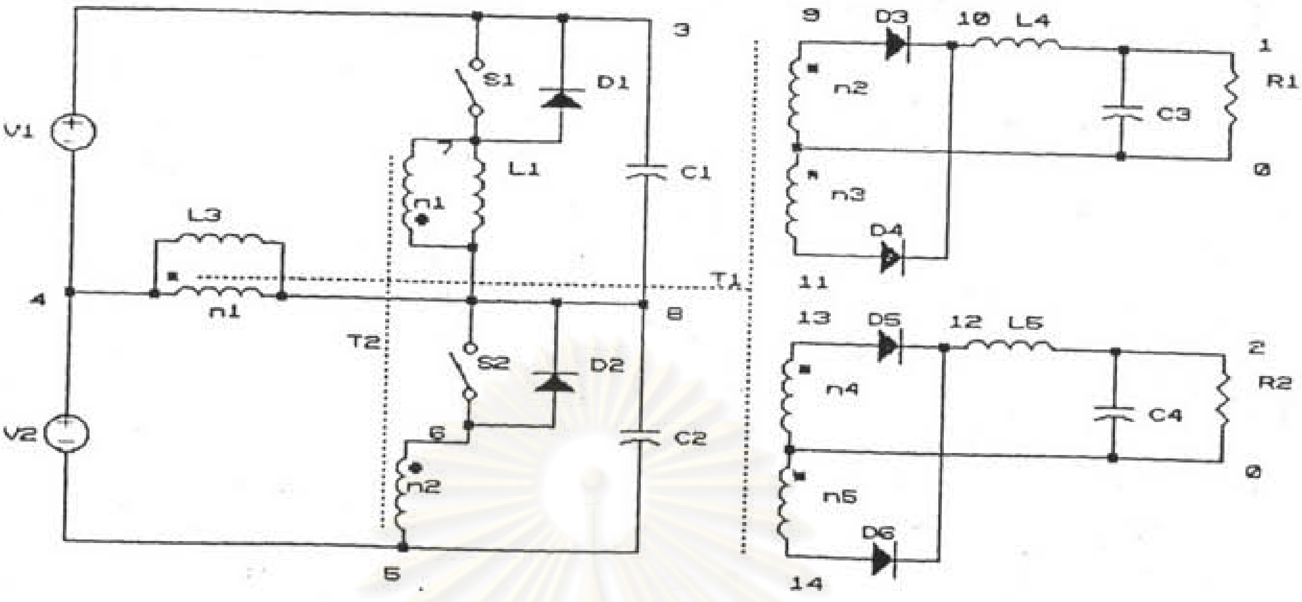
ได้แสดงใน 5.3.1 ที่จำกัดกำลังออกลงเหลือ 100 W สำหรับหัวข้อ 5.3.2.2 นั้นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในทางลบคือ ศักดาที่จุด 8 มีค่ามากกว่าจุด 3 ในกรณี C_1 หรือศักดาจุด 5 มีค่ามากกว่าจุด 8 ในกรณี C_2 ทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์มีค่าสูงขึ้น กรณีนี้แนวทางในการแก้ไขก็คือ จำกัดแรงดันในด้านลบด้วยไดโอดซีเนอร์อนุกรมกับไดโอด โดยให้ขั้วคาโทดมีทิศทางชี้ขึ้นและขั้วคาโทดของซีเนอร์ไดโอดมีทิศทางชี้ลง วิธีนี้จะมีปัญหาหลักสองอย่างคือประสิทธิภาพของวงจรจะไม่ดีในช่วงโหลดด้านเข้ามีค่าต่ำ และขณะเดียวกันแรงดันด้านเข้ามีค่าสูง ปัญหาอีก - อย่างหนึ่งก็คือไม่สามารถหาไดโอดซีเนอร์ที่มีพิกัดกระแสเท่ากับกระแสในตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีค่าค่อน-ข้างสูงได้

จากหัวข้อ 5.3.2.3 แนวทางนี้อาศัยศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมวงจรแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 เข้าด้วยกันโดยให้ศักดาไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำมีทิศทางต้านกับแรงดันในตัวเก็บประจุดังจะอธิบายต่อไป

5.4 <u>วงจรกึ่งบริดจ์ที่ใช้สวิตช์เรโซแนนซ์แบบกระแสศูนย์ที่มีการเชื่อมโยงแม่เหล็ก</u>

วงจรนี้จะเชื่อมโยงตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2 เข้าด้วยกัน ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาก่อนต่อวงจรจริง จะใช้โปรแกรม LEC ทดสอบความถูกต้องอีกครั้งหนึ่งเพื่อประหยัดเวลาในกรณีวงจรอาจมีบางสิ่งที่เป็นข้อจำกัดของวงจรอยู่ โดยใช้รูปที่ 5.11 ในการวิเคราะห์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

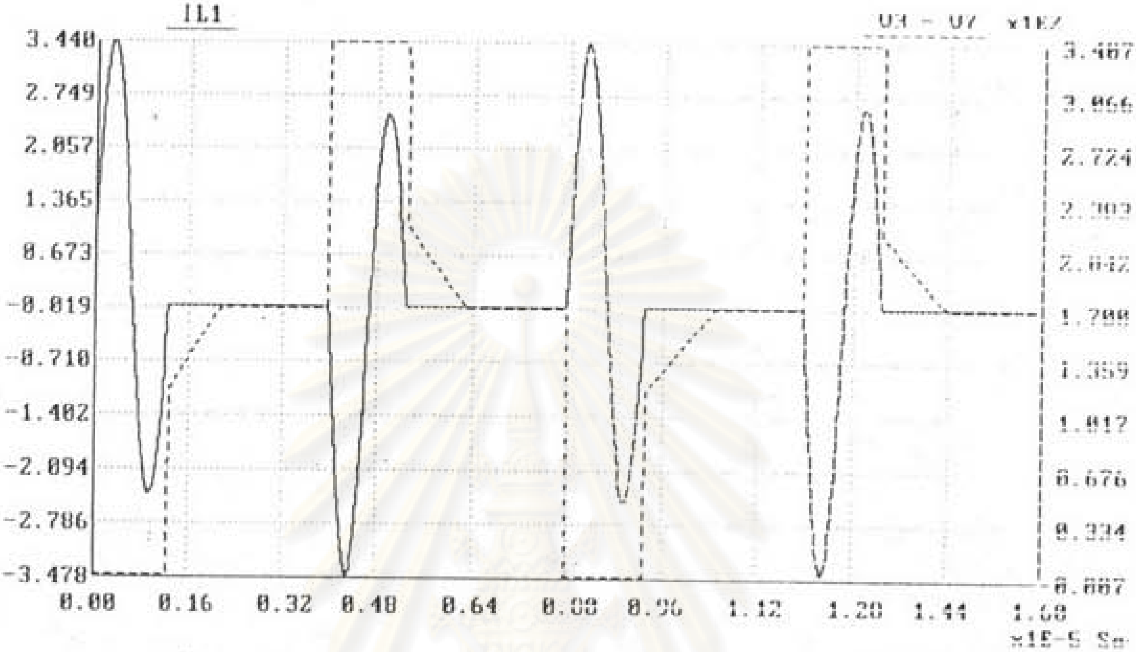


รูปที่ 5.11 วงจรที่ใช้ในการทดสอบด้วยโปรแกรม LEC

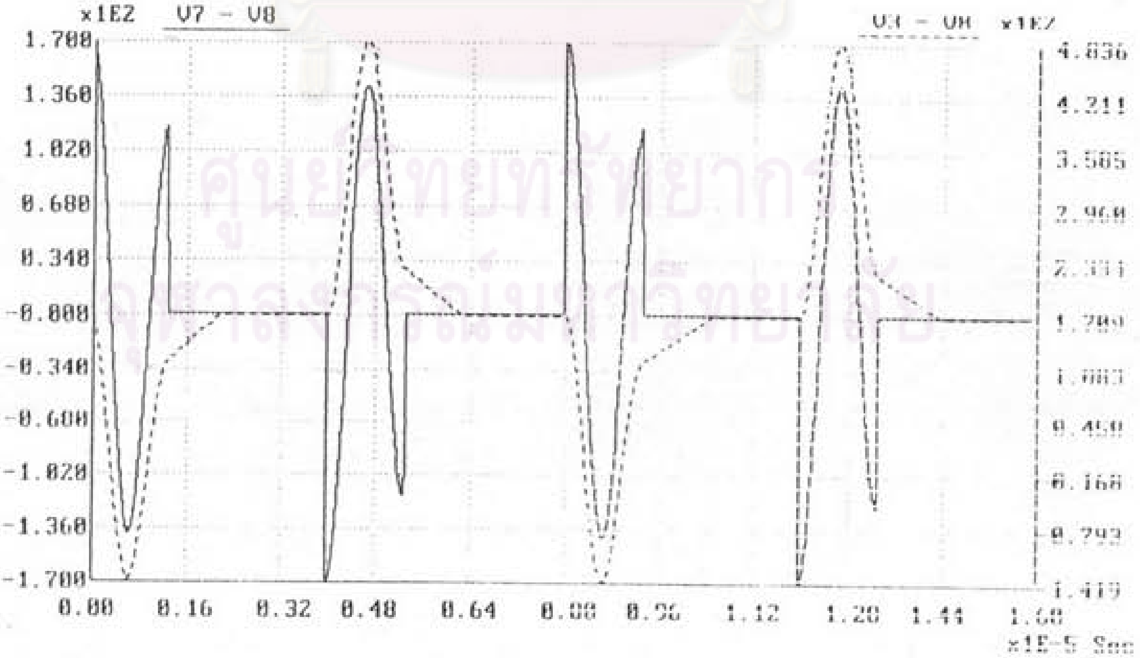
ข้อมูลในโปรแกรม LEC เมื่อโหลดน้อยที่สุดแรงดันขาเข้าสูงที่สุดโดยที่ตัวเหนี่ยวนำในวงจรเรโซแนนซ์สวิตช์ทั้งสองมีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กกัน

```
LEC>pron
LEC>list
      R1     1     Ø    2.500E+00ohm
      R2     2     Ø    1.500E+01ohm
      C1     3     8    2.200E-09farad   VC=1.644E+02Volt
      C2     8     5    2.200E-09farad   VC=1.756E+02Volt
      C3     1     Ø    2.200E-03farad   VC=4.261E+00Volt
      C4     2     Ø    1.100E-03farad   VC=1.150E+01Volt
      L3     4     8    1.100E-02henry   IL=1.505E-02Amp
      L4    10     1    1.000E-05henry   IL=1.131E+00Amp
      L5    12     2    4.600E-04henry   IL=9.949E-01Amp
      L1     7     8    1.000E-05henry   IL=7.449E-01Amp
      V1     3     4    DC    1.700E+02Volt   Rs=1.000E-03
      V2     4     5    DC    1.700E+02Volt   Rs=1.000E-03
      V3    15     Ø    PWL   4breakpoints   Rs=1.000E-03
                 Ø.000E+00Sec     2.000E+00Volt
                 1.000E-06Sec     2.000E+00Volt
                 1.000E-06Sec     Ø.000E+00Volt
                 8.000E-06Sec     Ø.000E+00Volt
      V4    16     Ø    PWL   6breakpoints   Rs=1.000E-03
                 Ø.000E+00Sec     Ø.000E+00Volt
                 4.000E-06Sec     Ø.000E+00Volt
                 4.000E-06Sec     2.000E+00Volt
                 5.000E-06Sec     2.000E+00Volt
                 5.000E-06Sec     Ø.000E+00Volt
                 8.000E-06Sec     Ø.000E+00Volt
      D1     7     3         1N916   OFF
      D2     6     8         1N916   OFF
      D3     9    10         1N916   OFF
      D4    11    10         1N916   ON
      D5    13    12         1N916 . OFF
      D6    14    12         1N916   ON
   DMODEL    1N916     Vcutin = 7.000E-01,  Ron = 1.000E-02,  Roff - 1.000E+07
                         Vbrk = 1.000E+08, Rbrk - 1.000E-02
      T1   5 coils
           coil#1     4     8  6.60000E+01turns   Rs-1.000E-03
           coil#2     9     Ø  4.00000E+00turns   Rs-1.000E-03
           coil#3     Ø    11  4.00000E+00turns   Rs-1.000E-03
           coil#4    13     Ø  1.00000E+01turns   Rs-1.000E-03
           coil#5     Ø    14  1.00000E+01turns   Rs-1.000E-03
      T2   2 coils
           coil#1     7     8  1.50000E+01turns   Rs-1.000E-03
           coil#2     5     6  1.50000E+01turns   Rs-1.000E-03
      S1 STNO      3     7    15      Ø  1.000E+00v   Rs-1.000E-03   NC
      S2 STNO      8     6    16      Ø  1.000E+00v   Rs-1.000E-03   NO
LEC>
```

เมื่อทำการซิมมูเลตแล้ว โดยแรงดันจ่ายออกมีค่าตามพิกัดจะได้รูปคลื่นแรงดัน และกระแสในอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

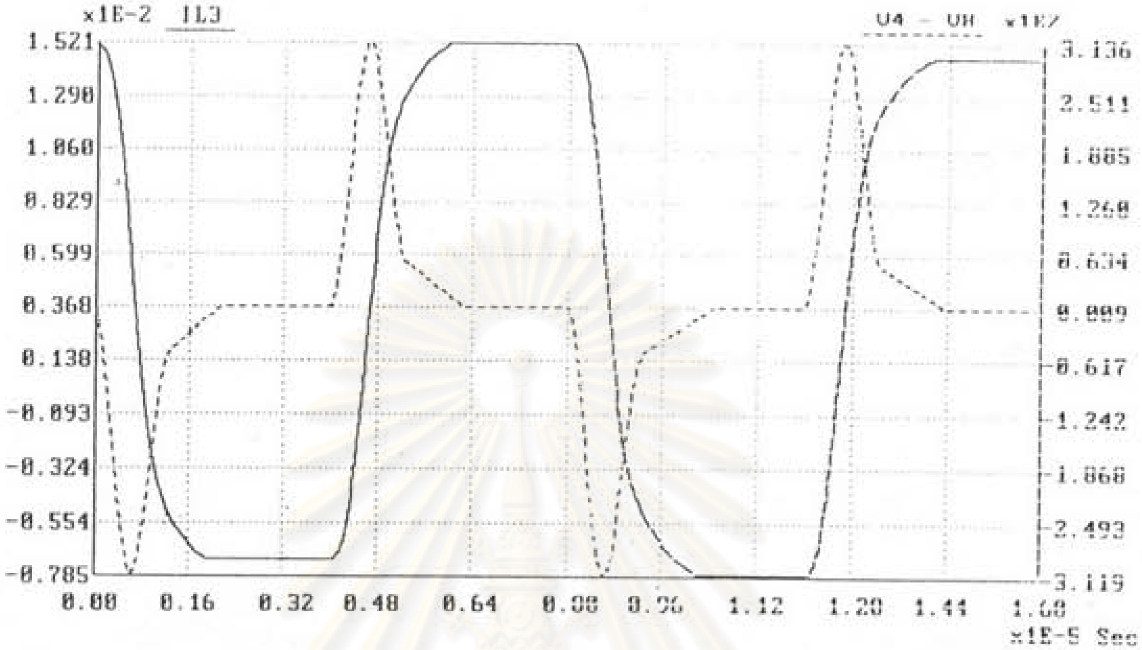


รูปที่ 5.12 กระแสในตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์และแรงดันตกคร่อมสวิตช์

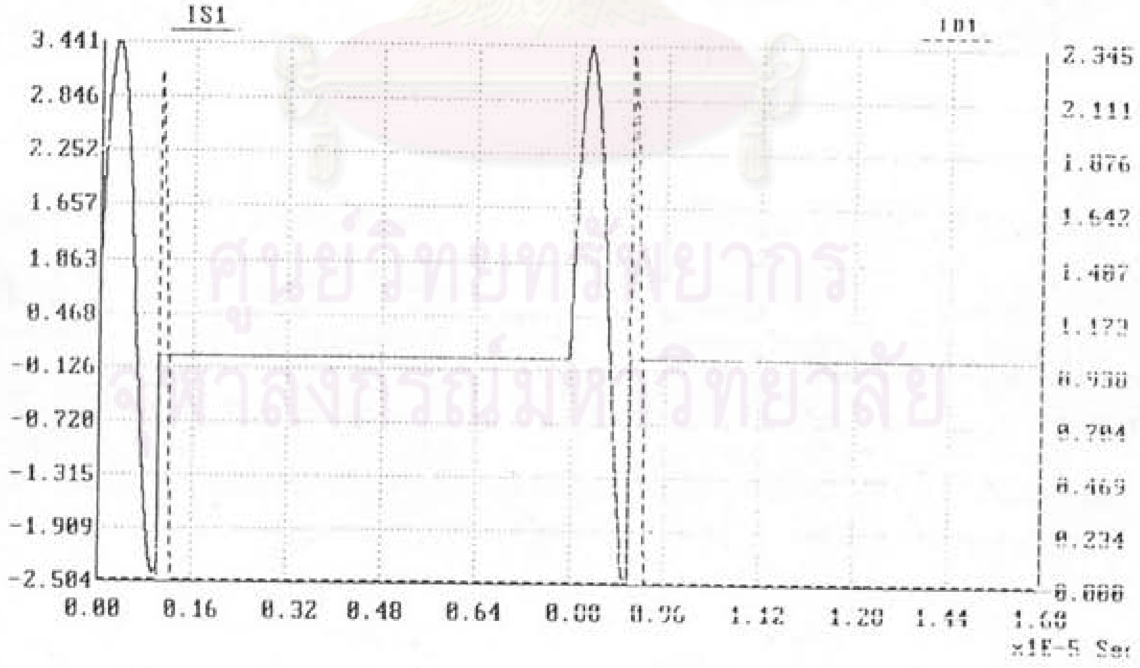


รูปที่ 5.13 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในสวิตช์กระแสศูนย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 กระแสทำแม่เหล็กและแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง



รูปที่ 5.15 กระแสในสวิตช์และในไดโอดขนานกลับทิศทาง (anti parallel)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม LEC เมื่อพิจารณารูปที่ 5.12 พบว่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำในช่วงบวกมีค่าประมาณ 3.5 A กระแสที่เป็นส่วนแกว่งมีค่ายอดประมาณ 3A ส่วนกระแสในช่วงถัดมาคือช่วงที่มีแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_3 เป็นกระแสในสวิตช์กระแสศูนย์ชุด S_2 สำหรับแรงดันตกคร่อมสวิตช์ S_1 จะไม่มีช่วงตัดกับกระแสอันจะทำให้เกิดการสูญเสียในสวิตช์ช่วงเปลี่ยนสถานะ และในช่วงสวิตช์ S_2 นำกระแส แรงดันคร่อมสวิตช์ $S_3 = V_{C3}$ จะถูกตรึงค่าไว้ไม่เกินแรงดันแหล่งจ่าย $(V_1 + V_2)$ ซึ่งเป็นไปตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์คือ $V_{S1} = V_1 + V_2 - V_{L1} + V_{L3}$ พิจารณาในวงรอบ 3 - 4 - 5 - 8 ในรูปที่ 5.11 โดยให้แรงดัน $V_{C6} = V_{C7} = V_{L3}$ เป็นข้อดีของการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำในสวิตช์ทั้งสอง

พิจารณารูปที่ 5.13 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ I_{L1} จะมีเฟสนำหน้ากระแสดังในรูปที่ 5.12 อยู่ 90 องศาไฟฟ้า องค์ประกอบไฟสลับของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ส่วนแรงดันยอดสูงสุดของตัวเก็บประจุคือผลรวมของแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับแรงดันแหล่งจ่าย

พิจารณารูปที่ 5.14 กระแสทำแม่เหล็กในหม้อแปลงยังไม่เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่สภาวะอยู่ตัวจะมีค่าเฉลี่ยของกระแสเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงจะมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์

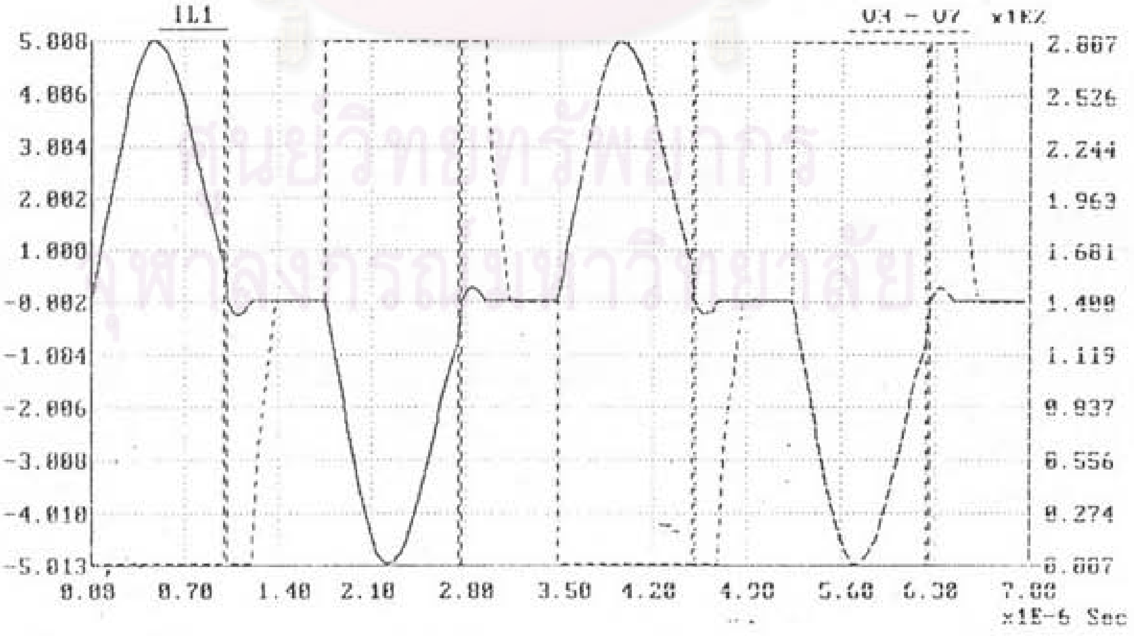
พิจารณารูปที่ 5.15 กระแสในสวิตช์ I_{S1} จะมีขนาดเท่ากับในรูปที่ 5.12 สำหรับในช่วงที่กระแสเริ่มลดลงเป็นศูนย์แล้ว ยังมีกระแสไหลเป็นลบนั้นเพราะสวิตช์ที่ใช้ในโปรแกรมยอมให้กระแสไหลได้สองทิศทางจนกระทั่งสวิตช์ไม่มีค่าสั่งแรงดัน V_3 กระแสก็จะไหลในไดโอด D_1 กรณีในวงจรที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์ กระแสที่เป็นลบนี้จะแยกไปไหลในไดโอด D_3 ทั้งหมด

จากการทดสอบในกรณีโหลดมีค่าน้อยและแรงดันมีค่าสูงสุดปัญหาที่น่าเป็นห่วงเรื่องความเค้นในสวิตช์ เนื่องจากแรงดันมีค่าสูงจะไม่เกิดผลในกรณีนี้สิ่งที่จะพิจารณาต่อไปคือ ในกรณีโหลดมีค่าสูงและแรงดันมีค่าต่ำที่สุด

ข้อมูลในโปรแกรม LEC เมื่อโหลดมีค่าสูงและแรงดันต่ำที่สุด ในวงจรเรโซแนนซ์สวิตช์ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองมีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็กกัน

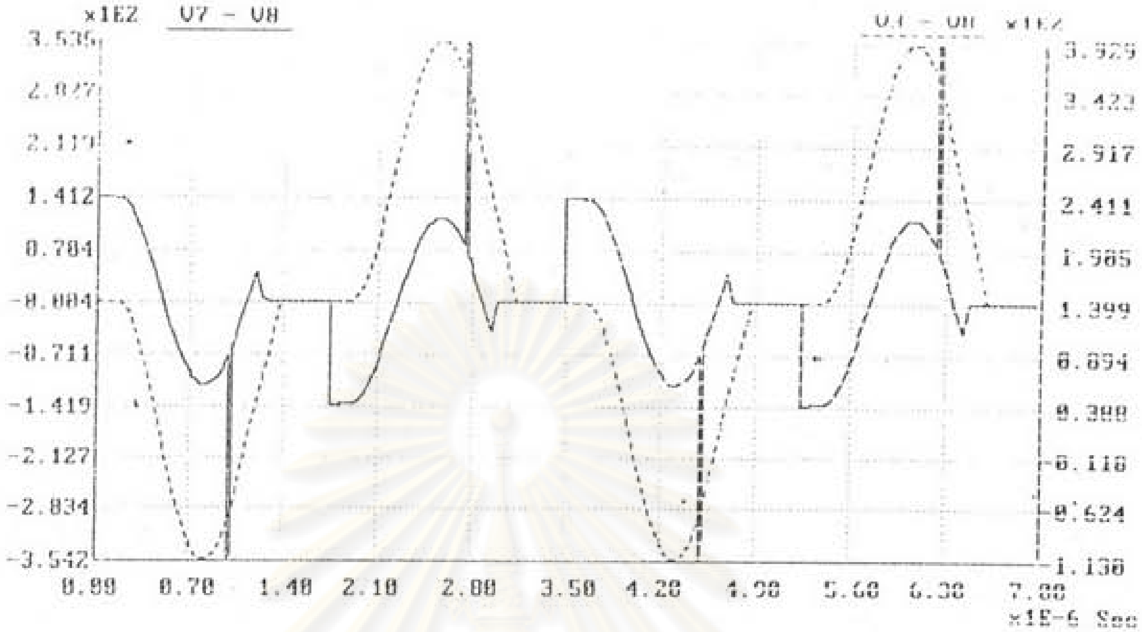
```
LEC>list
    R1     1     0    2.500E-01ohm
    R2     2     0    1.500E+00ohm
    C1     3     0    2.200E-07farad   VC=1.400E+02Volt
    C2     0     5    2.200E-07farad   VC=1.400E+02Volt
    C3     1     0    2.200E-03farad   VC=4.366E+00Volt
    C4     2     0    1.100E-03farad   VC=1.217E+01Volt
    L3     4     0    1.100E-02henry   IL=6.392E-03Amp
    L4    10     1    1.000E-05henry   IL=1.704E+01Amp
    L5    12     2    4.600E-04henry   IL=8.707E+00Amp
    L1     7     0    1.000E-05henry   IL=3.713E-08Amp
    V1     3     4    DC    1.400E+02Volt   Rs=1.000E-03
    V2     4     5    DC    1.400E+02Volt   Rs=1.000E-03
    V3    15     0    PWL   4breakpoints   Rs=1.000E-03
               0.000E+00Sec     2.000E+00Volt
               1.000E-06Sec     2.000E+00Volt
               1.000E-06Sec     0.000E+00Volt
               3.500E-06Sec     0.000E+00Volt
    V4    16     0    PWL   6breakpoints   Rs=1.000E-03
               0.000E+00Sec     0.000E+00Volt
               1.750E-06Sec     0.000E+00Volt
               1.750E-06Sec     2.000E+00Volt
               2.750E-06Sec     2.000E+00Volt
               2.750E-06Sec     0.000E+00Volt
               3.500E-06Sec     0.000E+00Volt
    D1     7     3         1N716   OFF
    D2     6     0         1N716   OFF
    D3     9    10         1N716   ON
    D4    11    10         1N916   ON
    D5    13    12         1N916   ON
    D6    14    12         1N916   ON
DMODEL    1N716     Vcutin = 7.000E-01,  Ron = 1.000E-02;  Roff = 1.000E+07
                    * Vbrk = 1.000E+00,  Rbrk = 1.000E-02
    T1  5 coils
        coil#1     4     0   6.60000E+01turns   Rs=1.000E-03
        coil#2     9     0   4.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
        coil#3     0    11   4.00000E+00turns   Rs=1.000E-03
        coil#4    13     0   1.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
        coil#5     0    14   1.00000E+01turns   Rs=1.000E-03
    T2  2 coils
        coil#1     7     0   1.50000E+01turns   Rs=1.000E-03
        coil#2     5     6   1.50000E+01turns   Rs=1.000E-03
    S1 STNO     3     7    15     0   1.000E+00v   Rs=1.000E-03   NO
    S2 STNO     0     6    16     0   1.000E+00v   Rs=1.000E-03   NO
```

เมื่อทำการซิมมูเลตแล้วโดยแรงดันจ่ายออกมีค่าตามพิกัดจะได้รูปคลื่นแรงดันและกระแสในอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

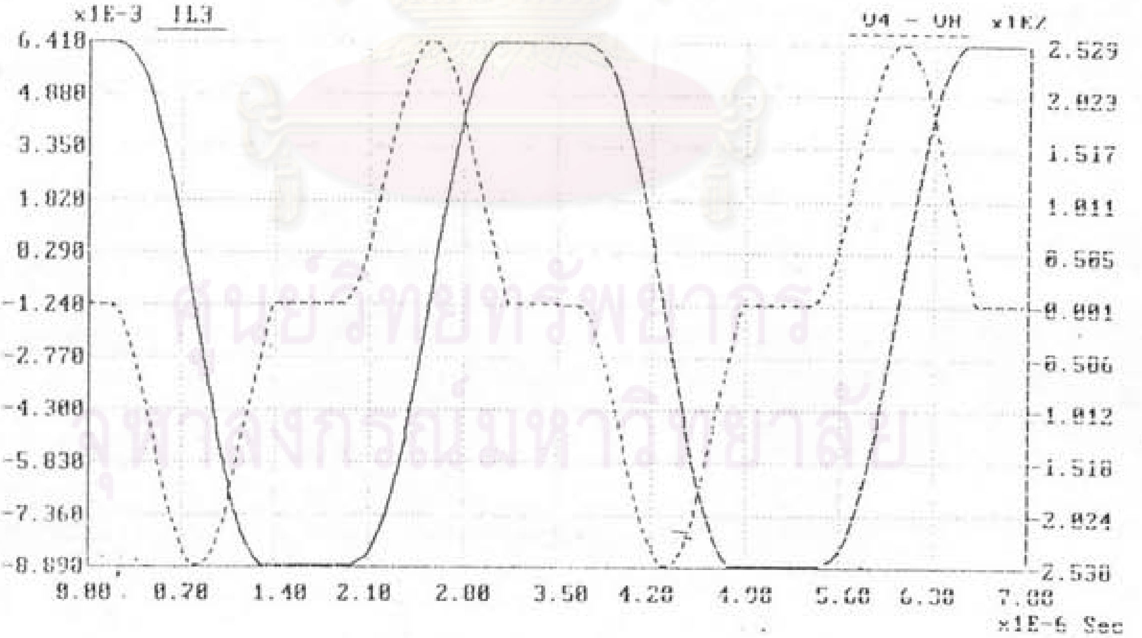


รูปที่ 5.16 กระแสในตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ และแรงดันตกคร่อมสวิตช์

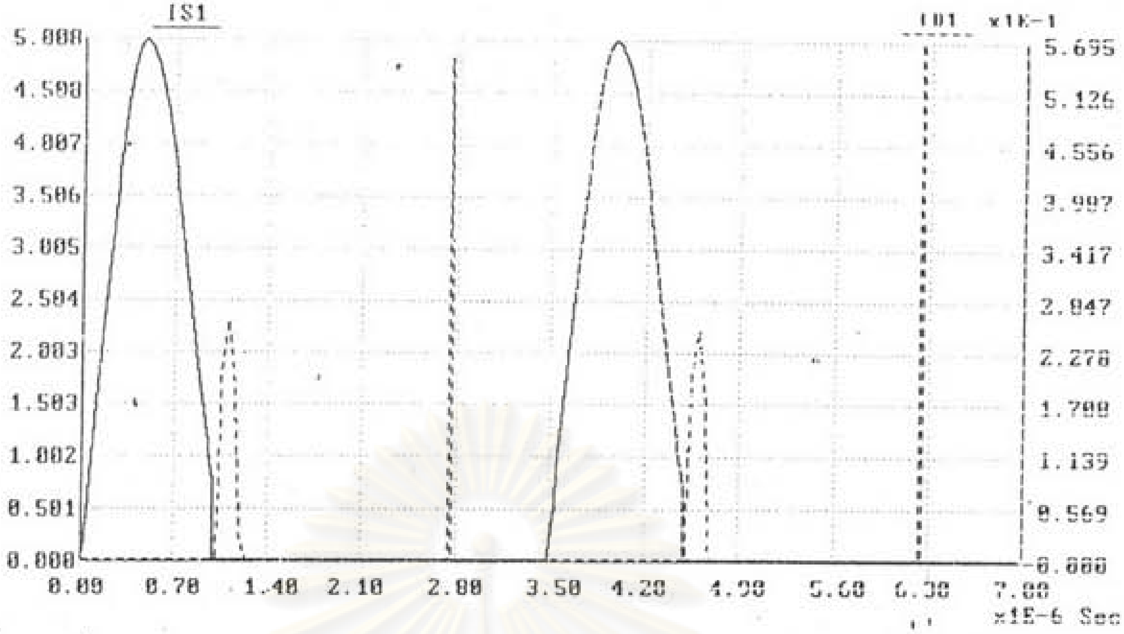
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในสวิตช์กระแสศูนย์



รูปที่ 5.18 กระแสทำแม่เหล็กและแรงดันตกคร่อมหม้อแปลง



รูปที่ 5.19 กระแสในสวิตช์และในไดโอดขนานกลับทิศทาง (anti parallel)

ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม LEC ถ้าพิจารณาในรูปที่ 5.16 กระแส I_{L1} ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสเฉลี่ย และกระแสที่เกิดจากการแกว่งของวงจรเรโซแนนซ์จะถูกยกขึ้นด้วยค่ากระแสเฉลี่ย ในกรณีนี้สวิตช์ถูกสั่งให้หยุดทำงานในช่วงที่ยังมีกระแสไหลในตัวเหนี่ยวนำ กระแสในตัวเหนี่ยวนำนี้จะย้ายไปไหลผ่านไดโอด D_E ประจุให้ C_E ซึ่งทำให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์ถูกตรึงไว้ไม่เกินแรงดันแหล่งจ่าย ในช่วงเวลาถัดมาพบว่าแรงดันตกคร่อมสวิตช์จะมีค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายด้วยกระแส I_{L1}

พิจารณารูปที่ 5.17 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำและแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุพบว่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีรูปคลื่นคล้ายกับกรณีแรงดันขาเข้าสูงที่สุดโหลดต่ำสุด เพียงแต่มีแรงดันยอดแหลม (spike voltage) อันเกิดจากการตัดกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะยังมีกระแสไหล พิกัดแรงดันยอดแหลมจะถูกตรึงไว้ไม่เกินแรงดันแหล่งจ่าย รวมกับแรงดันในตัวเหนี่ยวนำเอง ส่วนแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุก็คือผลรวมของแรงดันในตัวเหนี่ยวนำกับแรงดันแหล่งจ่ายเช่นเดียวกับรูปที่ 5.13

พิจารณารูปที่ 5.18 กระแสทำแม่เหล็กในหม้อแปลง และแรงดันตกคร่อมหม้อแปลงในสภาวะอยู่ตัวจะไม่พบองค์ประกอบไฟตรง

พิจารณารูปที่ 5.19 กระแสในสวิตช์และในไดโอดขนานกลับทิศทาง(anti parallel)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระแสในสวิตช์ I_{S1} จะมีค่าเหมือนกระแสในตัวเหนี่ยวนำยกเว้นในช่วงกระแสในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบ กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะมาไหลในไดโอดขนานกลับทิศทาง กระแสในไดโอดขนานกลับทิศทาง จะมีช่วงที่มีค่ายอดแหลมเกิดขึ้นเนื่องจากการตัดกระแสในตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่ตัวเหนี่ยวนำยังคงมีกระแสไหล

จากผลการทดสอบด้วยโปรแกรม LEC สรุปได้ว่าวงจรกึ่งบริดจ์ที่ใช้สวิตช์กระแสศูนย์เข้าแทนที่สวิตช์ธรรมดาสามารถที่จะใช้งานเป็นวงจรแปลงผันไฟตรงความถี่สูงได้โดยที่ตัวเหนี่ยวนำในสวิตช์กระแสศูนย์สามารถที่จะตรึงแรงดันตกคร่อมสวิตช์ให้มีค่าไม่เกินแหล่งจ่ายได้ และมีความถี่การสวิตช์อยู่ในช่วง 1/3.5μs ถึง 1/8 μs หรือ 286 kHz ถึง 125 kHz

คาบเวลาหนึ่งรอบของการสวิตช์ในช่วงแรงดันด้านเข้าต่ำสุด และโหลดมีค่าเต็มพิกัดนี้จะมีวัฏจักรการทำงานอยู่ที่ 0.8 สาเหตุที่ไม่เลือกให้มีค่ามากกว่านี้เพราะเวลาฟื้นตัวของไดโอดที่ต่อขนานกลับทิศทางมีค่าอย่างต่ำ 200×10^{-9} s รวมทั้งป้องกันสวิตช์สองตัวที่อนุกรมกันเกิดการนำกระแสพร้อมกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย