

บทที่ 4 ผลการจำลองและการทดลองของหม้อแปลงเตสลา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและผลการทดลอง โดยส่วนแรกจะแสดงถึงผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OrCAD และในส่วนที่สองของบทนี้จะแสดงถึงผลการทดลองของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

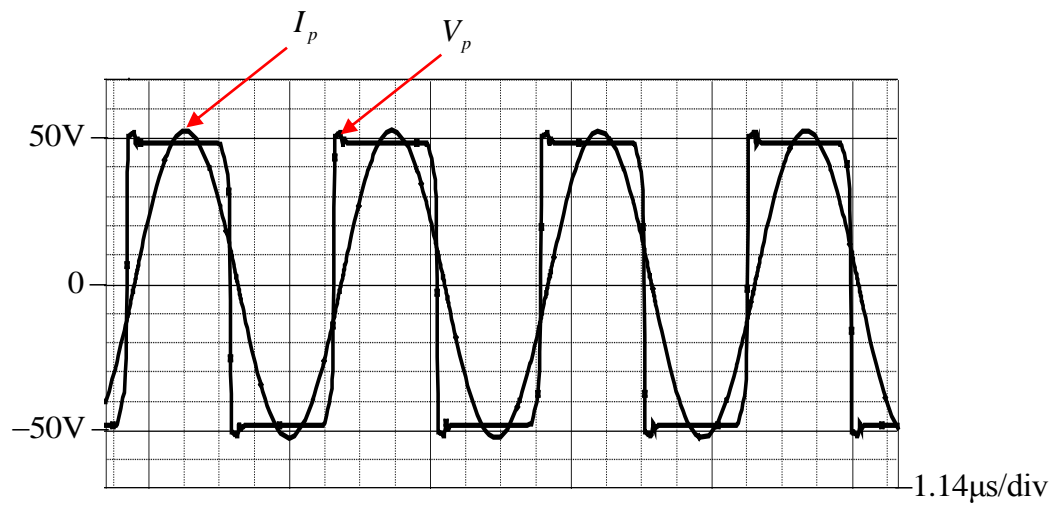
4.1 พารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานของหม้อแปลงเตสลา

ในการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างว่าเป็นไปตามหลักการที่ได้ตั้งสมมุติฐานไว้หรือไม่จะต้องกำหนดตัวแปรเบื้องต้นการทำงานดังนี้

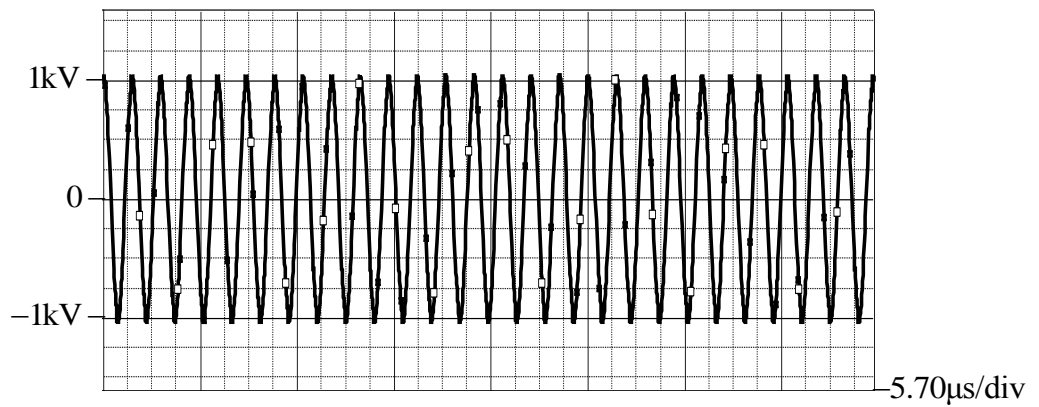
แรงดันด้านเข้า	$V_{dc} = 0 - 310 \text{ V}$
แรงดันด้านออก	$V_o = \text{ไม่ต่ำกว่า } 100 \text{ kV}$
ความถี่ในการสวิตช์	$f_{sw} = 146 \text{ kHz}$
ตัวเหนี่ยวนำด้านแรงต่ำ	$L_1 = 27.56 \text{ } \mu\text{H}$
ตัวเหนี่ยวนำด้านแรงสูง	$L_2 = 26.77 \text{ mH}$
ตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำ	$C_1 = 43.15 \text{ nF}$
ตัวเก็บประจุด้านแรงสูง	$C_2 = 45 \text{ pF}$
ไอจีบีที	$Q_1 - Q_4 = \text{GA200SA60U}$

4.2 ผลการจำลองการทำงานของหม้อแปลงเตสลา

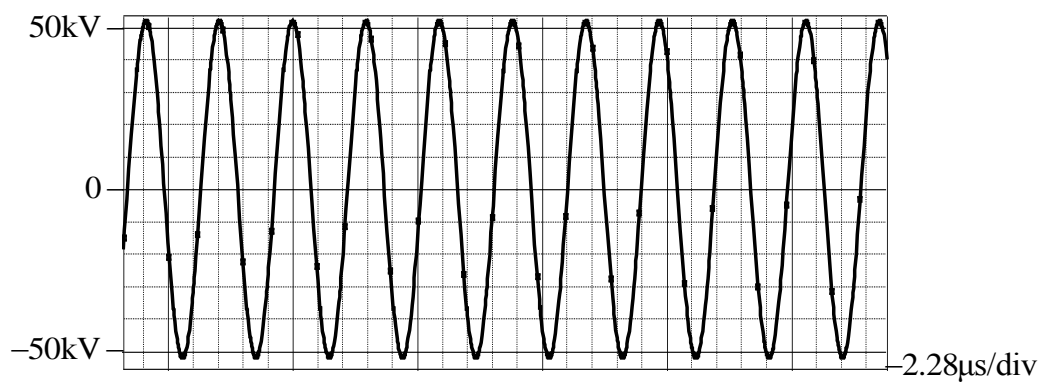
จากทฤษฎีที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 นำมาทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OrCAD โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงข้างต้นและทำการจำลองที่แรงดันอินพุต 4 ระดับแรงดันเพื่อสังเกตผลของกระแส I_p แรงดัน V_p แรงดันทางด้านปฐมภูมิและแรงดันทางด้านทุติยภูมิในระดับแรงดันที่เปลี่ยนไป 4 ระดับ คือ $50V_{dc}$, $70V_{dc}$, $90V_{dc}$, $130V_{dc}$, $170V_{dc}$ ซึ่งผลจะแสดงดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.15



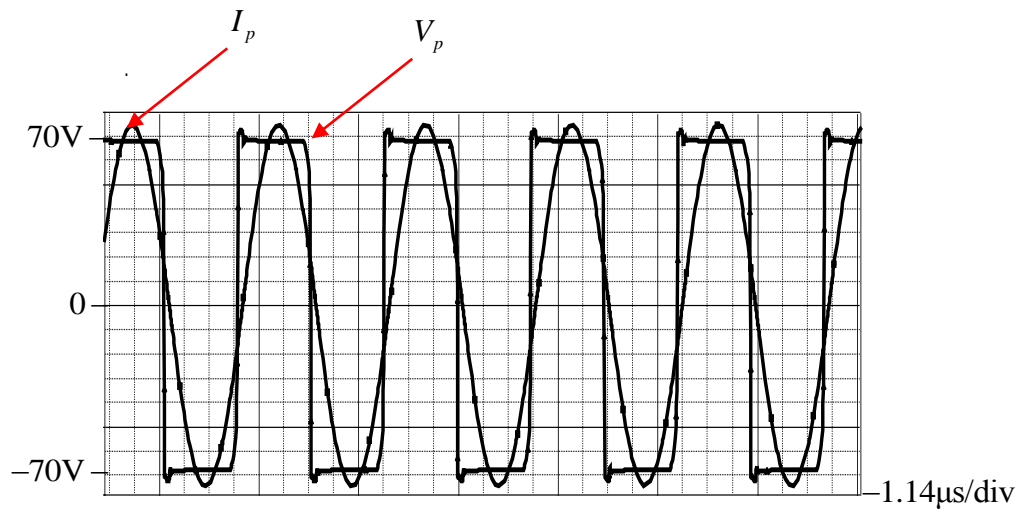
รูปที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดัน V_p และกระแส I_p เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 50V_{dc}



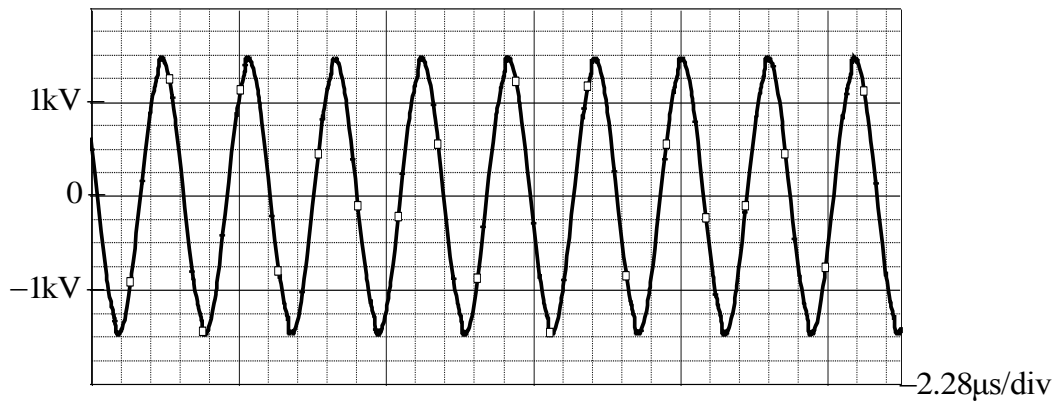
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันด้านปฏุมภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 50V_{dc}



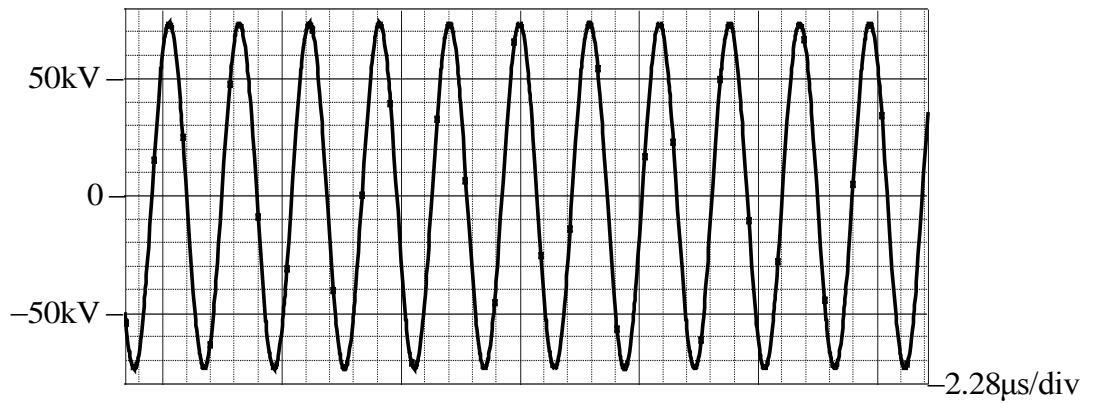
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันด้านทุติยภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 50V_{dc}



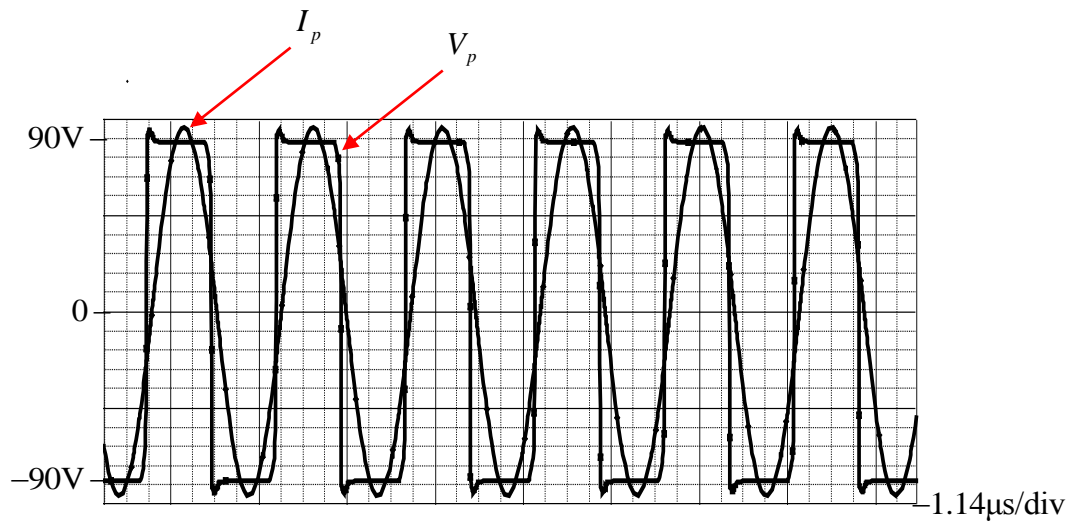
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดัน V_p และกระแส I_p เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 70V_{dc}



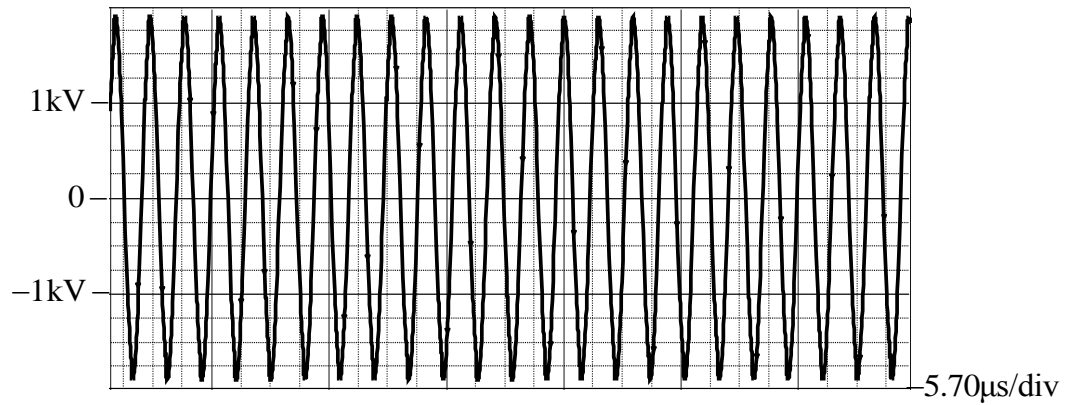
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 70V_{dc}



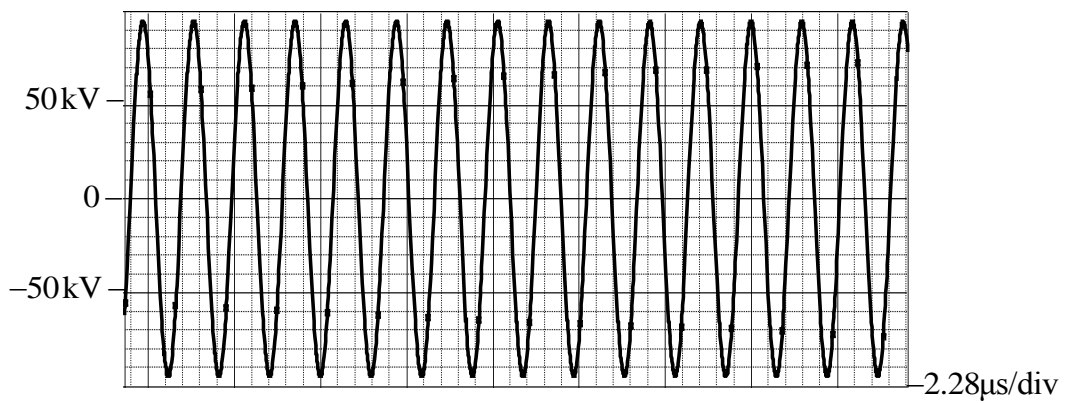
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันด้านทุติยภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 70V_{dc}



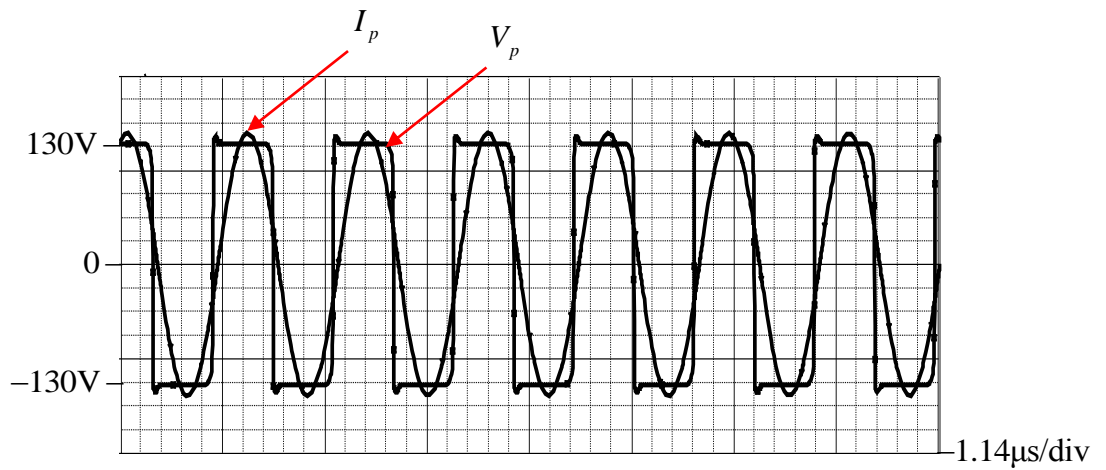
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดัน V_p และกระแส I_p เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $90V_{dc}$



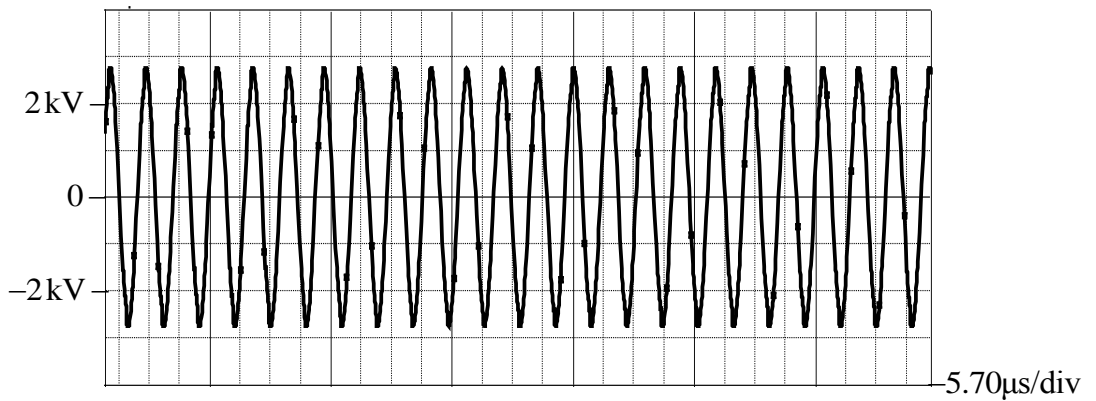
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $90V_{dc}$



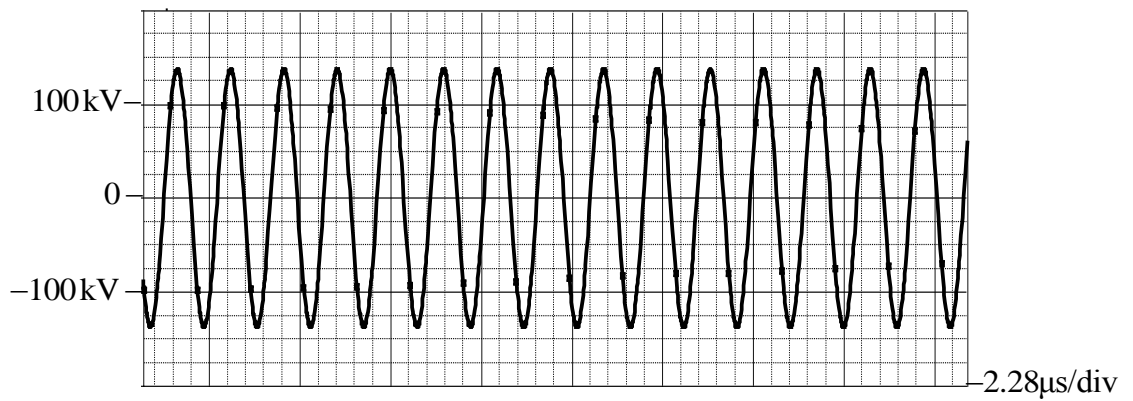
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันด้านทุติยภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $90V_{dc}$



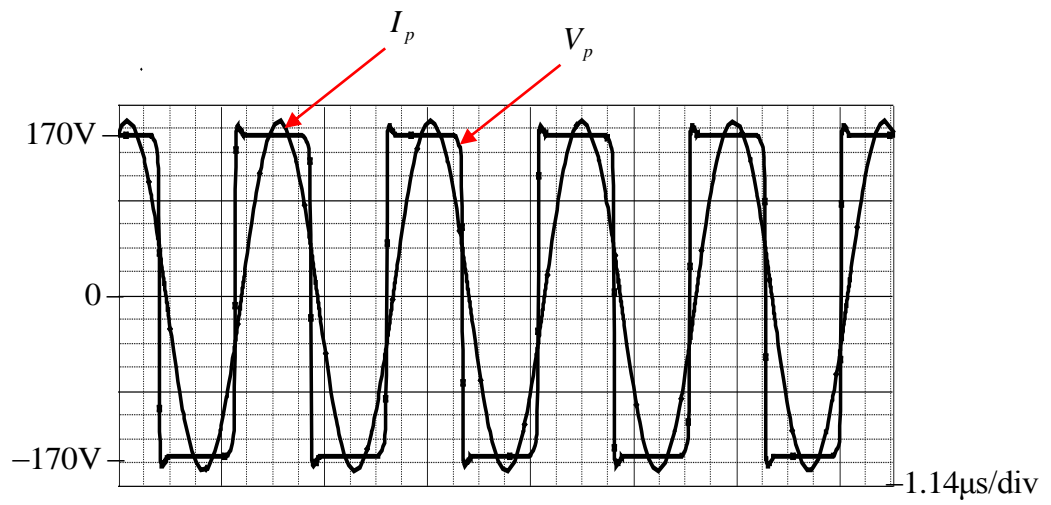
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดัน V_p และกระแส I_p เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 130V_{dc}



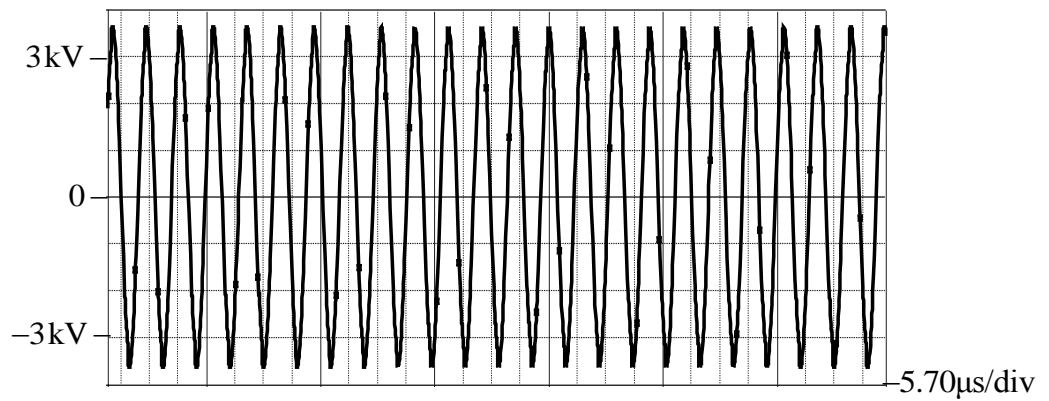
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 130V_{dc}



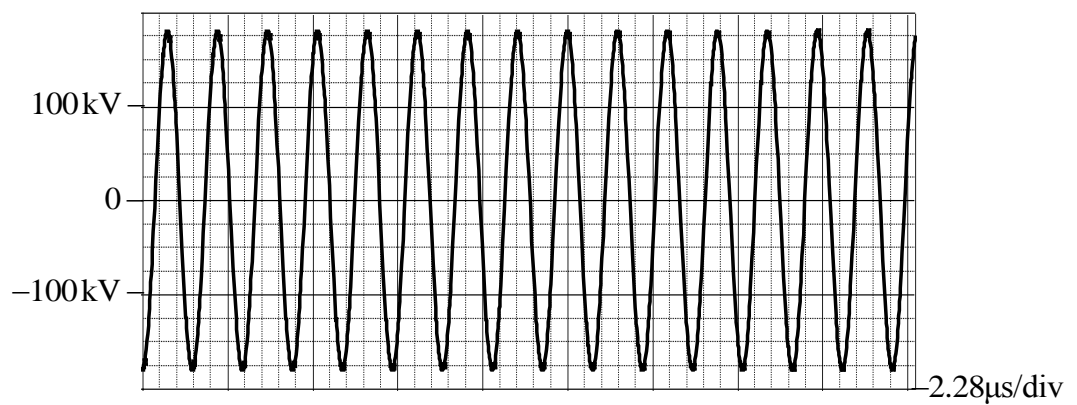
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันด้านทุติยภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต 130V_{dc}



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดัน V_p และกระแส I_p เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $170V_{dc}$



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันด้านปฐมภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $170V_{dc}$



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นแรงดันด้านทุติยภูมิเมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $170V_{dc}$

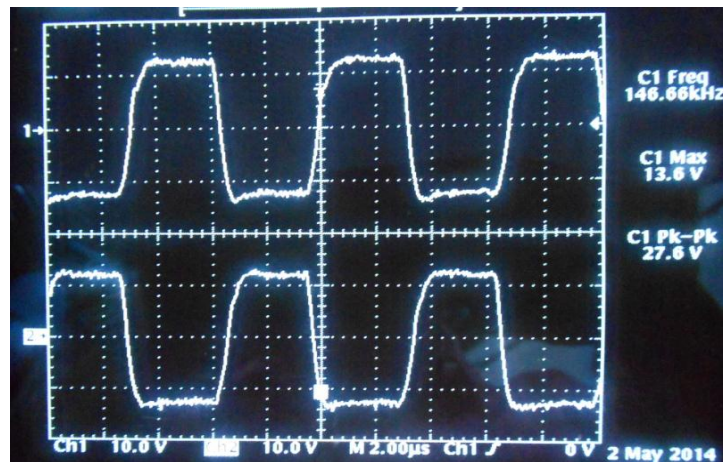
จากผลการจำลองการทำงานสามารถกล่าวได้ว่า วงจรที่นำเสนอนี้สามารถสร้างแรงดันสูงและความถี่สูงได้ โดยขนาดของแรงดันทางด้านทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต V_{dc} โดยมีค่ายอดสูงสุดของแรงดันประมาณ 182 kV_p ที่แรงดันอินพุต $170V_{dc}$

4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------|
| 1. ออสซิลโลสโคป | ยี่ห้อ Yokogawa | รุ่น DL1620 |
| 2. โพรบวัดกระแส | ยี่ห้อ Tektronix | รุ่น TM502A |
| 3. ดิฟเฟอเรนเชียลโพรบ | ยี่ห้อ Pintek | รุ่น DP-25 |
| 4. ออสซิลโลสโคป | ยี่ห้อ Tektronix | รุ่น TDS620B |
| 5. แกะทรงกลม 12.5 เซนติเมตร | | |
| 6. มิเตอร์ ดิจิตอล | ยี่ห้อ Fluke | รุ่น 115 |

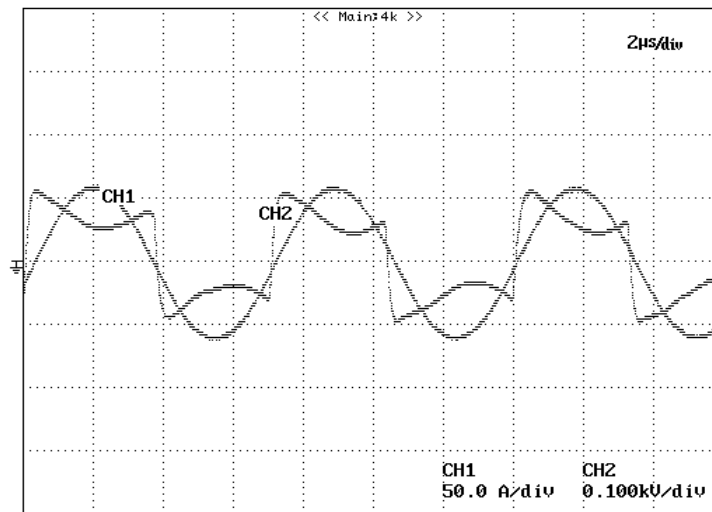
4.4 ผลการทดลองด้านปฐมภูมิ

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.21 ดังต่อไปนี้



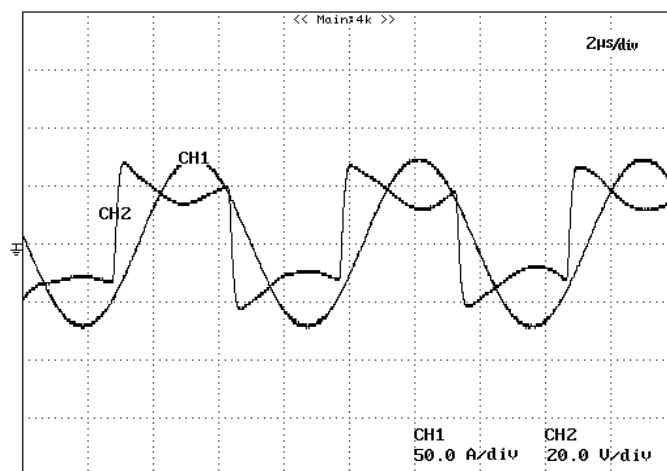
รูปที่ 4.16 รูปคลื่นสัญญาณขั้วนำสวิตช์

รูปที่ 4.17 เป็นการทดลองป้อนแรงดันอินพุตที่ $36V_{dc}$ ผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นแรงดันกระแสตรง ซึ่งจะได้แรงดันที่ $50V_{dc}$ จะได้ค่ากระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.17 ซึ่งได้กระแสสูงสุด $52A$



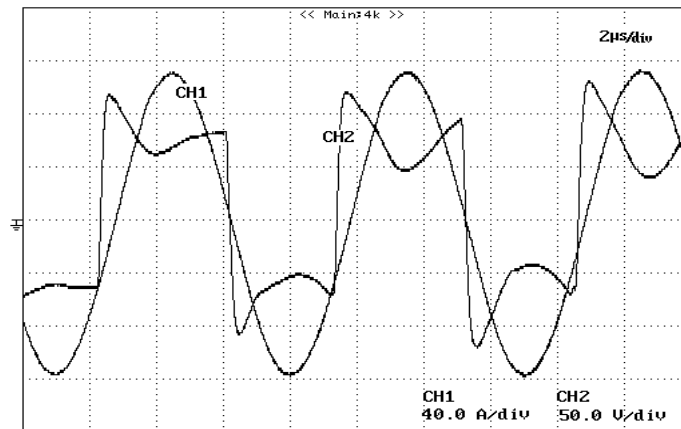
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดัน V_p (CH2) และกระแส I_p (CH1) เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $50V_{dc}$

รูปที่ 4.18 เป็นการทดลองป้อนแรงดันอินพุตที่ $50V_{ac}$ ผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นแรงดันกระแสตรง ซึ่งจะได้แรงดันที่ $70V_{dc}$ จะได้อ่ากระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งได้กระแสสูงสุด 74A



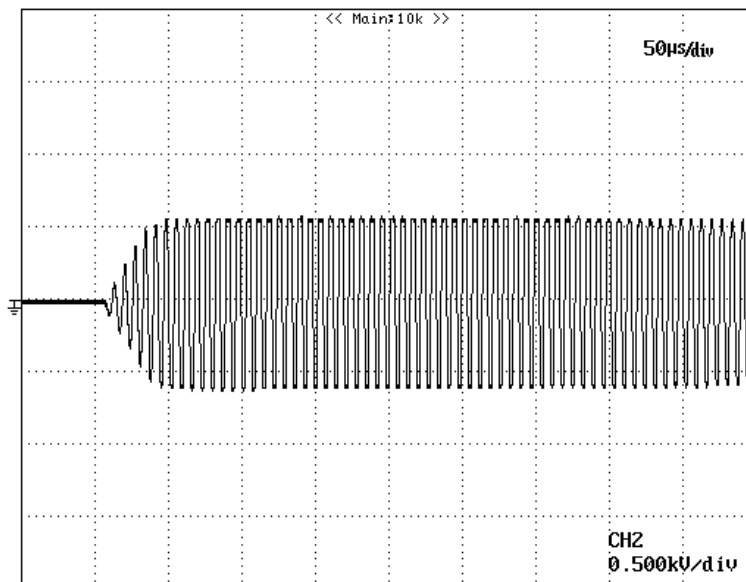
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดัน V_p (CH2) และกระแส I_p (CH1) เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $70V_{dc}$

รูปที่ 4.19 เป็นการทดลองป้อนแรงดันอินพุตที่ $64V_{ac}$ ผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นแรงดันกระแสตรง ซึ่งจะได้แรงดันที่ $90V_{dc}$ จะได้อ่ากระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งได้กระแสสูงสุด 114A



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นแรงดัน V_p (CH2) และกระแส I_p (CH1) เมื่อจ่ายแรงดันอินพุต $90V_{dc}$

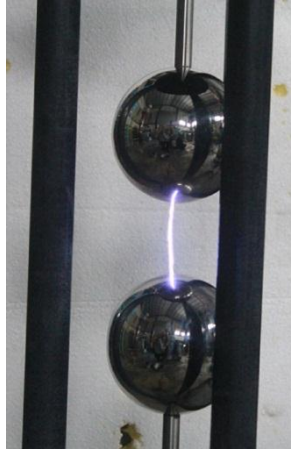
รูปที่ 4.20 เป็นการทดลองป้อนแรงดันอินพุตที่ $36V_{dc}$ ผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นแรงดันกระแสตรง ซึ่งจะได้แรงดันที่ $50V_{dc}$ จะได้ค่าแรงดันดังรูปที่ 4.20 ซึ่งได้แรงดันสูงสุด $1.04V_{max}$ (ตั้ง ออสซิลโลสโคปไว้ที่อัตราส่วนลดทอนแรงดัน 100:1 ตั้ง Differential Probe ไว้ที่อัตราส่วนลดทอนแรงดัน 200:1)



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอินพุต $50V_{dc}$

4.5 ผลการทดลองแรงดันด้านทุติยภูมิ

การวัดแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาจะใช้แถบทรงกลมขนาด 12.5 เซนติเมตรในการวัด เพื่อหาพิกัดแรงดันซึ่งแรงดันที่ได้จากการวัดจะแสดง ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.21 การวัดแรงดันด้วยแถบทรงกลม

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงด้วยแถบทรงกลม

จำนวนรอบของ ขดลวดแรงต่ำ	ระยะแถบ (cm)	แรงดันอินพุต (V)	แรงดันที่สถานะ มาตรฐาน (kV)	แรงดันที่สถานะห้อง (kV)
8	1.5	50	45.5	43.1
	2.2	70	64.5	61.0
	2.8	90	80.0	75.7
	4.0	130	108.0	102.2
	5.5	170	138.0	130.6

จากรูปที่ 4.21 แสดงการวัดแรงดันสูงสุดด้านขาออกโดยใช้แถบทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 12.5 เซนติเมตร ที่ระยะแถบของทรงกลมสูงสุด 5.5 เซนติเมตร โดยอ้างอิงตามมาตรฐานสากล (IEC 60052) สามารถหาค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กของแถบทรงกลมนั้นได้ตามสมการที่ (4.1)

$$U_b = U_{bn} \times K_d \times K_h \quad (4.1)$$

เมื่อ

U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สถานะมาตรฐาน

K_d คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ

K_h คือ ตัวประกอบแปลงผันความชื้น

โดยที่ K_d คำนวณได้จากสมการที่ (4.2)

$$K_d = \frac{b}{b_n} \frac{273+t_n}{273+t} \quad (4.2)$$

โดยที่ b คือ ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์ เป็น kPa หรือ bar

t คือ อุณหภูมิของห้องในขณะวัด $^{\circ}C$

K_h คำนวณได้จากสมการที่ (4.3)

$$K_h = 1 + [0.002(h / K_d - 8.5)] \quad (4.3)$$

โดยที่ h คือ ความชื้นสัมบูรณ์เป็น g/m^3 สามารถอ่านได้จากกราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในเทอมของอุณหภูมิตอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียกของ Psychrometer

จากสมการที่ (4.4) สามารถหา K_d ได้จาก

$$K_d = \frac{750}{760} \frac{273+25}{273+30} = 0.96 \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.5) สามารถหา K_h ได้จาก

$$K_h = 1 + [0.002(30 / 0.96 - 8.5)] = 0.99 \quad (4.5)$$

ดังนั้น แรงดันเบรกดาวน์ที่สปาร์กแกปมีค่า

$$\begin{aligned} U_b &= 138 \times 0.96 \times 0.99 \\ &= 130.6 \text{ kV}_p \end{aligned} \quad (4.6)$$

จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า วงจรที่นำเสนอนี้ สามารถสร้างแรงดันสูงสุดที่ 130.59 kV_p และความถี่สูงสุดที่ 142 kHz โดยใช้ความถี่ในการสวิตซ์ที่ 146 kHz สามารถนำไปทดสอบลูกถ้วยได้ โดยจ่ายแรงดันอินพุตที่ 170V_{dc} และผลจากการทดลองดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันอินพุตที่

$90V_{dc}$ กระแสทางด้านปฐมภูมิจะมีค่าเท่ากับ 114A ที่พิกัดที่เครื่องมือวัดได้ ซึ่งจากข้อจำกัดของ เครื่องมือวัด สามารถวัดกระแสสูงสุดได้ที่ 100A ดังนั้น จึงวัดกระแสสูงสุดที่แรงดัน $90V_{dc}$

สำหรับรูปคลื่นแรงดัน V_p จากผลการจำลองการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วพบว่า มีรูปคลื่นที่แตกต่างกัน อาทิเช่น รูปที่ 4.10 กับ รูปที่ 4.17 เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ค่าความจุไฟฟ้า (C_2) ที่ใช้ตอนจำลองการทำงานมีค่าคงที่ แต่ในขณะที่ทำงานจริงนั้นเกิดวาทไฟตามผิวที่ลูกถ้วยทำให้ ค่าความจุไฟฟ้าค่าจริงไม่ได้เป็นค่าคงที่ นี่คือเหตุผลที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันจากผลการจำลองกับผลการ ทดลองมีค่าไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม วงจรต้นแบบที่นำเสนอนี้สามารถทดสอบลูกถ้วยโดยเกิด ปรากฏการณ์วาทไฟตามผิวได้