P-CP24

การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ

Analysis of a designed solid state tesla transformer by computer simulation For studying the effective design

สุพจน์ วรธิพรหมมา* และ บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110 E-mail: suphot_power2@yahoo.com

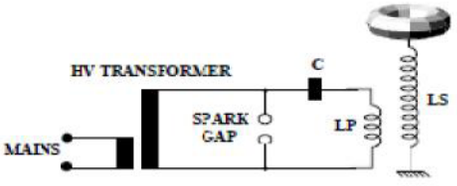
บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอ การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเทสล่าแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์(Solid state tesla transformer) โดยเปรียบเทียบวงจรสวิตช์ 3 รูปแบบ คือ วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตช์โดยตรง วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อเลือกรูปแบบของวงจร ขนาดพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแส ของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่เหมาะสม ในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า ขนาดพิกัด 150 kV 200 kHz โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ผลการจำลองระบบ พบว่าวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตช์โดยตรง ต้องใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 1,800V 1,420 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 160 kHz วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±75 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 145 kV 132 kHz และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±175 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 145 kHz สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่าวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: หม้อแปลงเทสล่า, โซลิตสเตส, อินเวอร์เตอร์หม้อแปลงเทสล่า

1. บทนำ

หม้อแปลงเทสล่า เป็นหม้อแปลงแกนอากาศ ใช้สร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง จะอาศัยการเกิดปรากฏการเรโซแนนซ์ ในวงจร LC โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวด ของหม้อแปลงเทสล่า และ C คือค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)



รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสล่า

จากรูปที่ 1 เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงจ่ายแรงดันไฟฟ้า สปาร์คแกปเกิดการสปาร์ค จะมีการถ่ายทอดพลังงานที่สะสมระหว่างคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำและขดลวดด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเทสล่าในลักษณะออสซิเลชั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์และเหนี่ยวนำให้เกิดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันด้านแรงดันสูงในลักษณะรูปคลื่นขบวนหน่วงด้วยความถี่เรโซแนนซ์ โดยค่าแอมพลิจูดของการออสซิเลชั่นจะมีค่าสูงสุดถ้าคลื่นทั้งสองฝั่งมีเฟสตรงกัน

1. การออกแบบหม้อแปลงเทสล่า

1.1 เงื่อนไขในการออกแบบ การออกแบบ เบื้องต้นต้องคำนึงถึงตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูงเนื่องจากตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูงมีผลต่อแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์ของการออกแบบหม้อแปลงเทสล่าก็เพื่อใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันวาบไฟตามผิว140 kVและความถี่มาตรฐานที่กำหนดไม่น้อยกว่า 150 kHzจึงทำการกำหนดพิกัดในการออกแบบอยู่ที่ พิกัดแรงดันสูง 150 kV พิกัดความถี่ 200 kHz และใช้แรงดันป้อนเข้าที่ 4,000 V ตามพิกัดอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่หาได้ เบอร์ MBN800H45E2-H มีพิกัดแรงดัน 4,500V พิกัดกระแส 800A

1.2 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 6.5 นิ้ว และสูง 30 นิ้ว เมื่อนำความสูงของท่อหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG จะได้**จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1,250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ**

$$L = \frac{N^2 R^2}{9R + 10H} \qquad (1)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด (μH) N = จำนวนรอบของขดลวด R = รัศมีของขดลวด (นิ้ว)
H = ความสูงของขดลวด (นิ้ว) ได้ค่า L = 50.125mH

เมื่อนำลวดจำนวน 1,250 รอบ ที่ออกแบบไปทำการพันขดลวดพบว่าขดลวดมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 32 นิ้ว และเมื่อทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดใหม่จะได้ค่าเท่ากับ 47.255 mH

1.3 การออกแบบตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง ตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูงประกอบด้วย ตัวเก็บประจุของลูกถ้วยฉนวน ประมาณ 60 pF หาค่าความจุแฝงในขดลวด (Stray Capacitor) ด้วยสมการ

$$C_{st} = 0.29H + 0.41R + 1.94\sqrt{\frac{R^3}{H}} \qquad (2)$$

ได้ค่า C = 12.62 pF และหาค่าความจุของตัวเก็บประจุทอรอยด์จากสมการ

$$C_{tor} = 1.4(1.2781 - \frac{D_I}{D_o})\sqrt{\pi D_I (D_o - D_I)} \quad (3)$$

เมื่อ D_I = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอรอยด์(นิ้ว)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอรอยด์(นิ้ว)

ในที่นี้จะออกแบบให้ทอรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับท่อที่ใช้พันขดลวดทุติยภูมิคือ 6.5นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะได้ค่า C = 21.55 pF เมื่อนำค่า ของตัวเก็บประจุทั้ง 3 มารวมกันจะได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าด้านแรงสูง เท่ากับ 94.17 pF แล้วคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์เบื้องต้น จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4)$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝงจะได้ความถี่เรโซแนนซ์ 206.094 kHz

คิดประจุแฝงรวมกับค่าประจุทอรอยด์ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 125.248 kHz

คิดประจุทั้งสามรวมกัน ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 75.446 kHz

1.4 การออกแบบตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำ คำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำจากสมการ

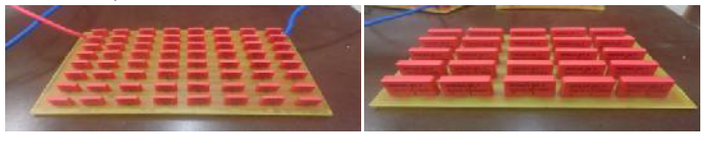
$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi f Z} \quad (5)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 125.248 kHz จะได้ค่าความจุประมาณ 0.033 μF

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 75.446 kHz จะได้ค่าความจุประมาณ 0.1 μF

สำหรับคาปาซิเตอร์ 0.033 μF เป็นค่าคาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำขณะไม่ต่อลูกถ้วยด้านแรงดันสูง จะใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033 μF 680V อนุกรมกัน 8 ตัวแล้วขนานกัน 8 ชุด เพื่อให้ทนแรงดันได้ 5,040 V

และคาปาซิเตอร์ 0.01 μF เป็นค่าคาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำขณะต่อลูกถ้วยด้านแรงดันสูง จะใช้ค่าปาซิเตอร์ขนาด 0.1 μF 1,000V อนุกรมกัน 5 ตัวแล้วขนานกัน 5 ชุด เพื่อให้ทนแรงดันได้ 5,000 V



รูปที่ 2 คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033 μF 5,040V และ 0.1 μF 1,000V ชนิดโพลีโพรไพลีน

1.5 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำ

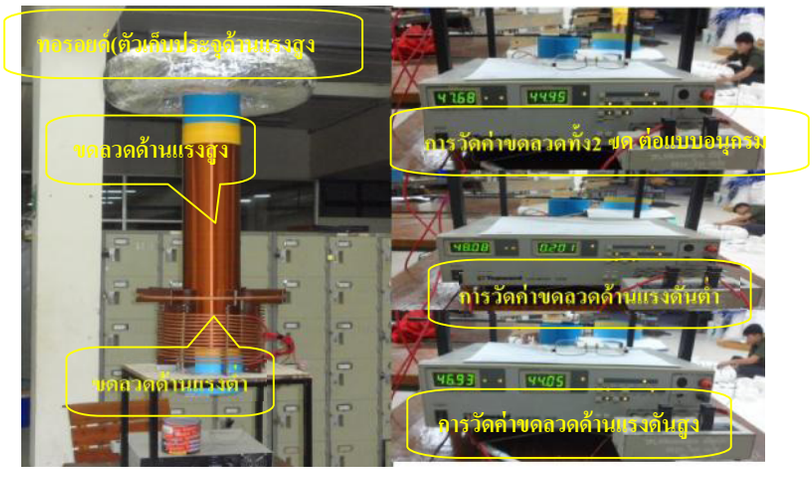
จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 2.3 พบว่าหากต้องการนำหม้อแปลงเทสล่าไปใช้ในการทดสอบลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนท์ จะอยู่ที่ 75.446 kHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงเทสล่าได้จากสมการ

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_1} \quad (6)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.5 μH และในการจัดทำขดลวดแรงดันต่ำ จะพันในลักษณะทรงกระบอกเช่นเดียวกับขดลวดแรงดันสูง โดยขดลวด มีรัศมี R = 5.85 นิ้ว สูง H = 6 นิ้ว พันทั้งหมด 12 รอบ และแต่ละรอบห่างกัน 0.5 นิ้ว ใช้ท่อทองแดงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เมื่อคำนวณตามสมการที่ 1จะได้เท่ากับ 43.74 μH ซึ่งใกล้เคียงกับสมการที่ 6

2. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

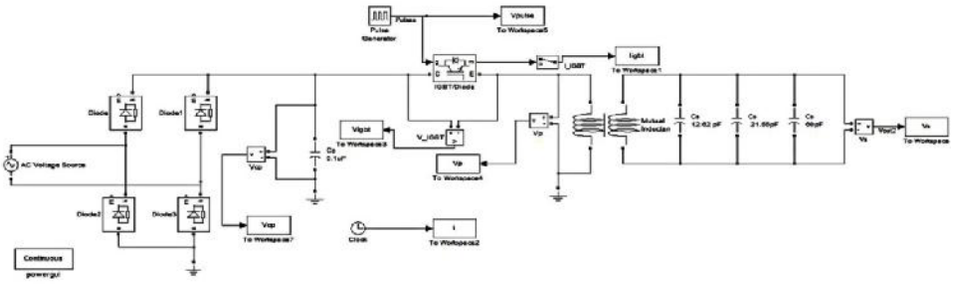
2.1ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้การจำลองระบบมีความถูกต้องผู้วิจัยได้ทำการสร้างขดลวดหม้อแปลงเทสล่าแล้ววัดหาค่าเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าความเชื่อมโยงทางแม่เหล็กได้ $L_1 = 48.08\mu H$ $L_2 = 46.93mH$ และ M=0.3509 mH



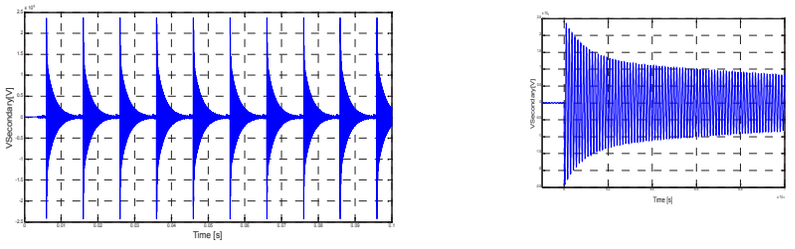
รูปที่ 3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงเทสล่า

2.1 การจำลองระบบแบบใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ต่อโดยตรง

การจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการจำลองระบบสองรูปแบบคือแบบที่ต่อลูกถ้วยฉนวนและแบบไม่ต่อลูกถ้วยฉนวน แล้วทำการจูนโดยการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ให้ตัดต่อวงจรที่ยอดคลื่นไฟฟ้าที่ป้อนเข้า 220V 50Hz โดยทุก 10 ms จะตัดต่อ 1 ครั้งพบว่าที่ Duty cycle 10 % จะเกิดออสซิเลชั่นสูงสุด



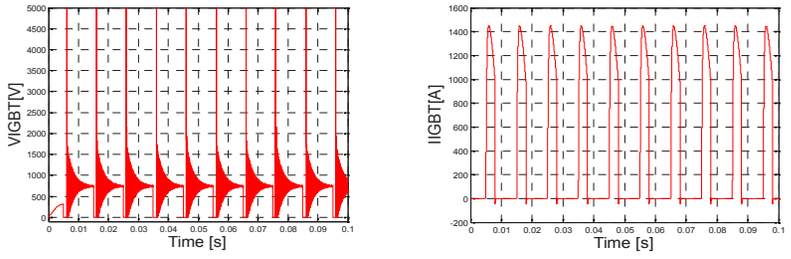
รูปที่ 4 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ แบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 5 แรงดันจากการจำลองระบบแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ แรงดัน 240 kV 160 kHz

ตารางที่ 3.1 แรงดันด้านแรงดันสูง, แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT

Duty cycle (%)	ไม่มีลูกถ้วย			มีลูกถ้วย		
	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
50	18	311	1,450	18	311	1,420
40	50	750	1,450	90	700	1,420
30	100	1,500	1,450	**150**	**1,800**	**1,420**
20	**250**	**3,000**	**1,450**	210	1,900	1,420
10	300	3,000	1,450	240	1,900	1,420

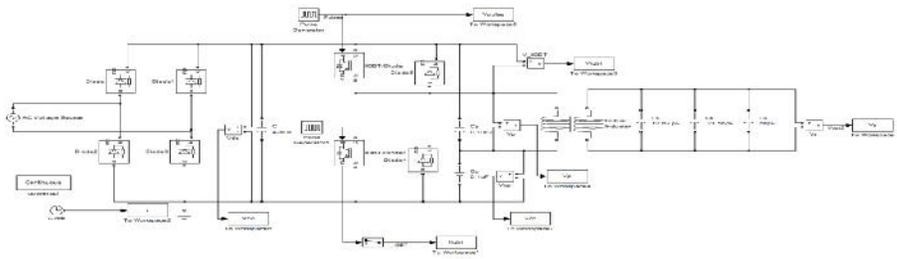


รูปที่ 6 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ที่ D=10%

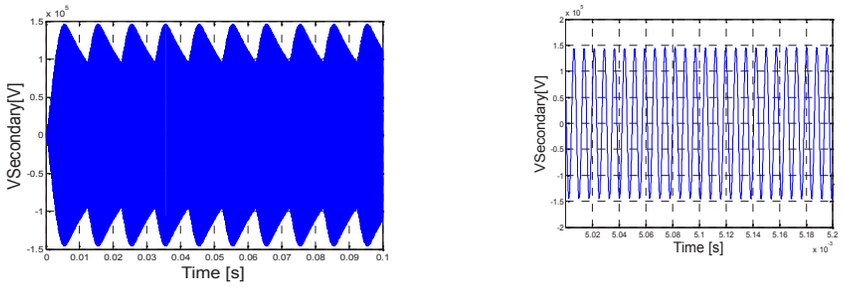
จากตารางที่ 3.1 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 5 และ6 จะสังเกตุได้ว่า กรณีมีลูกถ้วย แรงดันเอาท์พุทสูงสุดจะอยู่ที่ 240 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ที่ 10% มีค่าแรงดันตกคร่อม IGBTอยู่ที่ 1,900V และมีกระแสไหลผ่าน IGBT 1,420 Aเมื่อเพิ่ม Duty Cycle แรงดันและกระแสก็ยังมีค่าสูงอยู่

2.2 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

การจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ที่ย่านความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้แล้วจึงทำการปรับจูนให้ได้ความถี่ที่ถูกต้อง



รูปที่ 10 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์



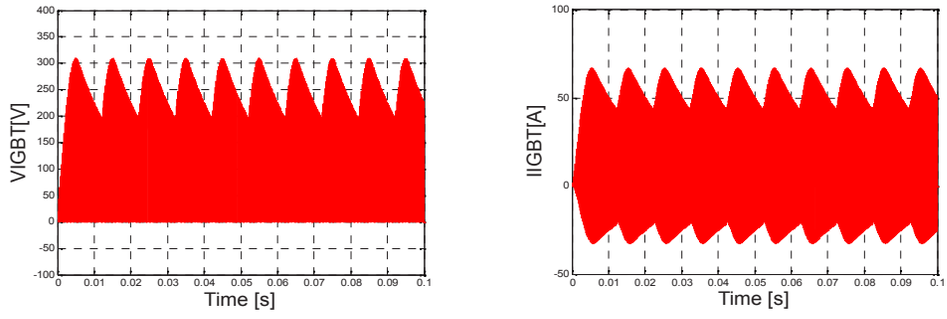
รูปที่ 11 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132kHz Duty Cycle 20 % ไม่มีลูกถ้วย

ตารางที่ 3.2 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBTที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฮาฟบริดจ์แบบไม่มีลูกถ้วย

Duty cycle =40%				f=132kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	Duty cycle	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
125	24	311	15	40	360	311	+150,-100
130	65	311	32	30	350	311	+140,-100
132	**360**	**311**	**+150,-100**	**20**	**145**	**311**	**+75,-25**
133	270	311	+125,-80	10	25	311	25

ตารางที่ 3.3 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่าน IGBT ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฮาฟบริดจ์แบบมีลูกถ้วย

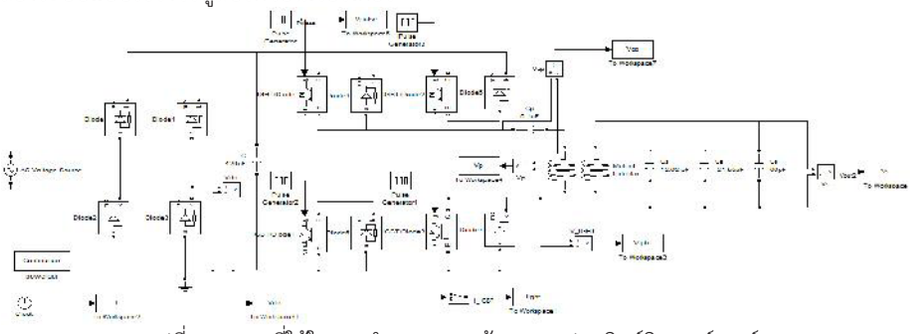
Duty cycle =40%				f=80kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	Duty cycle	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
73	16	311	21	40	170	311	±125
75	21	311	20	**30**	**160**	**311**	**+125,-80**
80	**170**	**311**	**±125**	20	70	311	+70,-40
85	15	311	+37,-5	10	14	311	40



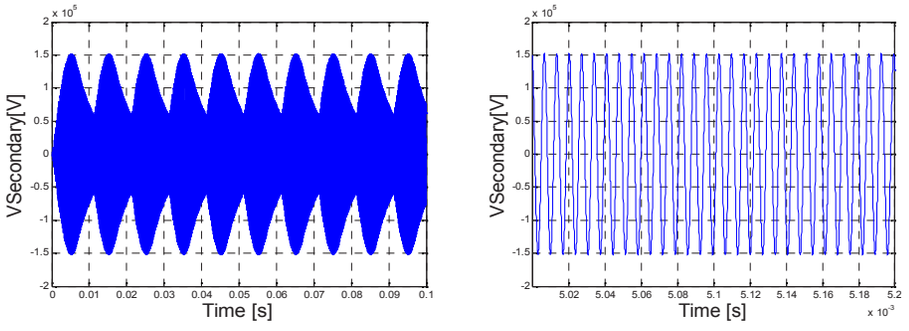
รูปที่ 12 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์วงจรฮาฟบริดจ์ ที่ความถี่ 132kHz D 20%

จากตารางที่ 3.2 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 11 และ12 จะสังเกตได้ว่ากรณีไม่มีลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นที่ 132 kKz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 145 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์(IGBT)อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ +75 A ถึง-25 A

2.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 13 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



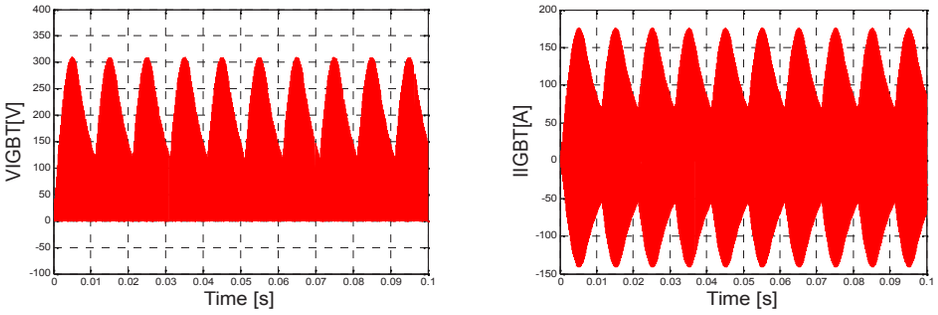
รูปที่ 14 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 145kHz Duty Cycle 20%ไม่มีลูกถ้วย

ตารางที่ 3.4 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฟูลบริดจ์แบบไม่มีลูกถ้วย

Duty cycle =40%				f=145kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	D	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
135	70	311	+50,-20	40	360	311	±400
140	125	311	+110,-75	30	350	311	±400
145	**360**	**311**	**±400**	**20**	**150**	**311**	**+175,-145**
150	70	311	±100	10	10	311	30

ตารางที่ 3.5 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBTที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆของวงจรฟูลบริดจ์แบบมีลูกถ้วย

Duty cycle =40%				f=85kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	Duty cycle	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
75	50	311	20	40	800	311	+1,100,-750
80	70	311	+70,-25	30	600	311	+750,-600
85	**800**	**311**	**+1,100, -750**	**20**	**175**	**311**	**+250,-200**
90	40	311	+110,-75	10	7.5	311	30

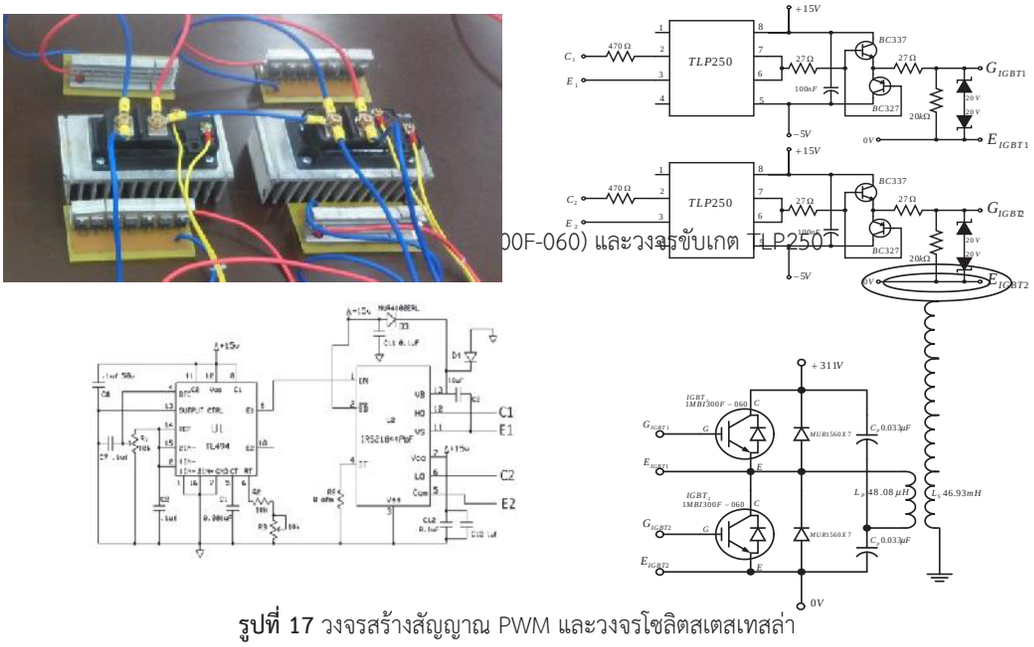


รูปที่ 15 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์วงจรฟูลบริดจ์ ที่ความถี่ 145 kHz D 20%

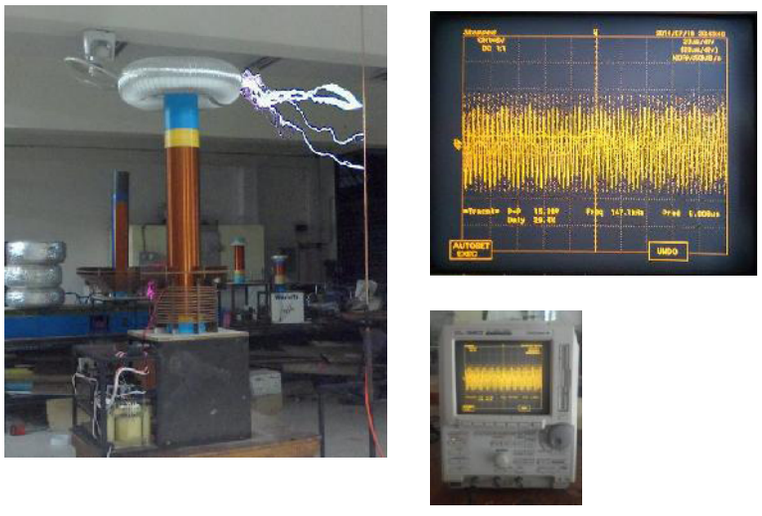
จากตารางที่ 3.4 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 14 และ15 จะสังเกตได้ว่ากรณีไม่มีลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นที่ 145 kKz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 150 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์(IGBT)อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ +175 A ถึง-145 A

3. สร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า

จากการจำลองระบบที่ได้ ผู้เขียนบทความได้นำข้อมูลไปใช้ในการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์สวิตช์ที่เหมาะสม และสร้างหม้อแปลง โซลิตสเตสเทสล่า ขนาดพิกัด 145 kV 132 kHz โดยใช้ IGBT เบอร์ 1MBI300F-060 พิกัดแรงดัน 600 V กระแส ±300 A ต่อแบบวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และเมื่อสร้างแล้วได้ขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz



รูปที่ 17 วงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรโซลิตสเตสเทสล่า



รูปที่ 18 หม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่าขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz ที่สร้างขึ้น และคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูง ที่วัดด้วยวิธี Voltage divider

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการดำเนินงานวิจัย ผู้เขียนบทความ ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขดลวดของหม้อแปลงเทสล่าที่ได้จัดทำขึ้น นำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ ของหม้อแปลงเทสล่าแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ทั้ง 3 รูปแบบ จากข้อจำกัด ของพิกัดอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ผลการจำลองระบบพบว่า สามารถหาค่าความเหมาะสมและรูปแบบของวงจรในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า จากพิกัดที่กำหนดในการออกแบบได้ จากการปรับค่าความถี่และ ค่า Duty Cycle ในการควบคุม โดยผู้เขียนบทความได้ดำเนินการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า จากรูปแบบวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากมีค่าพิกัดอุปกรณ์ต่ำสุด ซึ่งผลการสร้างได้ค่าแรงดันและความถี่ใกล้เคียงกับการจำลองระบบ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Denicolai M, “Tesla Transformer for Experimentation and Research.” Helsinki University of Technology May 2001
[2] Tilbury M, “The ULTIMATE Tesla Coil Design AND CONSTRUCTION GUIDE ” The Mc Graw Hill Companies, 2008