

การศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเทสลา  
ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz

STUDY AND ANALYSIS OF A DESIGN AND CONSTRUCTED  
SOLID STATE TESLA TRANSFORMER RATED 100 kV 150 kHz

สุพจน์ วรธิพรหมมา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเทสล่า  
ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz

สุพจน์ วรธิพรหมมา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา  
ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz  
Study and Analysis of a Design and Constructed Solid State Tesla  
Transformer Rated 100 kV 150 kHz

ชื่อ-นามสกุล              นายสุพจน์ วรธิพรหมมา

สาขาวิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา          ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา                2557

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, D.Eng.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)  
วันที่      เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz
ชื่อ-นามสกุล	นายสุพจน์ วรธิพรหมมา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา (Solid State Tesla Transformer) ซึ่งเป็นหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทน สปาร์กแกป โดยมีข้อดีคือ สามารถทำให้หม้อแปลงเตสลา มีขนาดเล็กลง ไม่เกิดเสียงดังและสามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้ แต่ปัญหาในการสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา ให้มีขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ จำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีพิกัดกระแสและแรงดันสูงตามไปด้วย ซึ่งอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวมีราคาแพง ทำให้หม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา มีต้นทุนในการสร้างสูง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการสร้างเพื่อแก้ปัญหา

การดำเนินการวิจัยได้ทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 100 kV, 150 kHz ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบจะถูกนำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ใน 4 รูปแบบ คือ การใช้สวิตช์แบบสปาร์กแกป การใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบต่อตรง การใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ต่อแบบวงจรถอานาฟริคชันอินเวอร์เตอร์ และการใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ต่อแบบวงจรถอานาฟริคชันอินเวอร์เตอร์ เพื่อหารูปแบบวงจรถอานาฟริคชันที่เหมาะสมในการสร้าง หม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลาที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการทำงาน กับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์กแกป

ผลการดำเนินการวิจัยพบว่า การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รูปแบบการสวิตช์แบบวงจรถอานาฟริคชันอินเวอร์เตอร์ เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการสร้าง เนื่องจากมีค่าพิกัดกระแสและแรงดันของอุปกรณ์สวิตช์ต่ำที่สุด คือ 311 V, 75 A ได้หม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลาขนาดพิกัดแรงดัน 152 kV, 147 kHz และเมื่อทดสอบการทำงานของหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลาที่สร้างขึ้นพบว่าการใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ โซลิดสเตตริเลย์ เป็นสวิตช์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ สปาร์กแกป สามารถทำให้หม้อแปลงเตสลา มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา มีการทำงานถูกต้องตามการออกแบบ

**คำสำคัญ:** หม้อแปลงเตสลา โซลิดสเตตเตสลา สปาร์กแกปเตสลา

<b>Thesis Title</b>	Study and Analysis of a Design and Construction of Solid State Tesla Transformer Rated 100kV 150 kHz
<b>Name-Surname</b>	Mr. Suphot Woratipromma
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Boonyang Plangklang, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2014

### ABSTRACT

This thesis aims to study and analyze a design and construction of an electronic switching tesla transformer which is called Solid State Tesla Transformer. The advantages of solid state tesla transformer are smaller, noiseless, adjustable frequency. However, there are disadvantages of solid state tesla transformer such as requirement of high rated current and voltage of electronic switch devices. Moreover electronic switch devices are expensive thus solid state tesla transformer has higher cost in construction. Therefore analysis of design and construction is necessary to find a suitable model in order to solve such mentioned problems.

The research implements a design and construction of a solid state tesla transformer, which capacity of 100 kV, 150 kHz. The data from the design was simulated using MATLAB/Simulink into 4 forms program such as: spark gap switching, direct connected electronic switching, half bridge inverter electronic switching, and full bridge inverter electronic switching in order to find a suitable model for the construction. The constructed solid state tesla transformer was tested and compared the performance with a typical tesla transformer spark gap.

From the experimental result, it shows that the simulation of half bridge inverter electronic switch is the most appropriate model for construction because electronic device has lower voltage and current as 311 V , 75 A. The constructed solid state tesla transformer has capacity of 150 kV, 145 kHz output rating. From functional testing of the constructed solid state tesla transformer, it found that the performance is similar to the typical spark gap tesla transformer. This can prove that the designed solid state tesla transformer is working properly as it designation.

**Keywords:** tesla transformer, solid state tesla transformer, spark gap tesla transformer

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับการให้คำแนะนำช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิ และอาจารย์ ดร.ฉัตรชัย สุขพิทักษ์สกุล ประธานหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมไฟฟ้า ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอ กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษาและวิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อดูณ ประิสุทฺุโธ ที่ได้ให้เวลาและสนับสนุนทุนพัฒนานุเคราะห์ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ผู้วิจัยได้นำหนังสือและบทความของท่าน มาอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ครูปาริชาติ ทีจันท์ก ครูแผนกวิชาสามัญสัมพันธ์ วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อดูณ ประิสุทฺุโธ ที่ช่วยเหลือในการพิมพ์ต้นฉบับ วิทยานิพนธ์ ในส่วนของบทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณ นายปัญญา หลงศรีภูมิ นายภูมินทร์ เต็มพุดชา นายประสิทธิ์ สินขุนทด นายไวยวุฒิ ทวีโยค นายเกียรติศักดิ์ หีบขุนทด และนักศึกษาแผนกวิชาช่าง ไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อดูณ ประิสุทฺุโธ ซึ่งไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด ที่ได้ช่วยในการจัดทำชิ้นงานในส่วนของฮาร์ดแวร์จนเสร็จสมบูรณ์

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบ เพื่อบูชาพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ที่ได้เมตตาถ่ายทอดความรู้ ให้กับผู้วิจัยโดยไม่ปิดบังอำพราง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัย หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจ หากงานวิจัยมีความผิดพลาด ขาดตกบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุพจน์ วรธิพรหมมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญภาพ.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำร่วมของขดลวด.....	4
2.1.1 ความเหนี่ยวนำร่วม.....	4
2.2 ลักษณะการเกิดการคัปปลิงระหว่างขดลวดทั้งสอง.....	10
2.3 ทฤษฎีการทำงานของขดลวด.....	13
2.3.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบคัปปลิงผ่านอากาศ.....	13
2.3.2 เงื่อนไขที่ทำให้เกิดอัตราส่วนขยายแรงดันมีค่าสูงสุด.....	17
2.3.3 เงื่อนไขต่างๆที่ทำให้การส่งถ่ายพลังงานได้อย่างสมบูรณ์.....	22
2.3.4 ค่าความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าของขดลวดโซลินอยด์แบบปิด.....	27
2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า.....	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	34
2.4.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	35
2.5 รายละเอียดเกี่ยวกับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	39
2.5.1 กราฟอ้างอิง.....	39
2.5.2 แกบป้องกัน.....	39
2.5.3 สปาร์กแกป.....	39
2.5.4 ทอรอยด์.....	40
2.6 การทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	42
2.7 คุณสมบัติของตัวนำ.....	43
2.7.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน.....	43
2.7.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำไฟฟ้า.....	44
2.7.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน.....	45
2.7.4 สกินเอฟเฟกต์.....	45
2.7.5 ปปรากฏการณ์โคโรนา.....	46
2.7.6 สถานะการเกิดสปาร์คโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา.....	47
2.7.7 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อการเบรกดาวน.....	48
2.7.8 ศักย์ค่าไฟฟ้าเบรกดาวนที่ความถี่สูง.....	49
2.8 แกบทรงกลม.....	50
2.8.1 ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศโดยไม่ต่อลงดิน.....	48
2.8.2 ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศโดยลูกหนึ่งต่อลงดิน..	48
2.8.3 ข้อควรระวังในการวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง.....	49
2.9 ฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กทริก.....	52
2.9.1 วัสดุฉนวนดีเลิศ.....	52
2.9.2 ชนิดของวัสดุฉนวน.....	53
2.9.3 การเบรกดาวนของสารไดอิเล็กทริก.....	53



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.4 การนำและการดูดกลืน.....	54
2.9.5 ตัวประกอบของกำลัง.....	54
2.10 คุณสมบัติของฉนวน.....	56
2.10.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์.....	56
2.10.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	56
2.11 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน.....	57
2.12 สภาพการคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	58
2.13 การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงในปัจจุบัน.....	58
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	64
3.1 การออกแบบหม้อแปลงทดสอบ.....	64
3.1.1 เงื่อนไขในการออกแบบ.....	64
3.1.2 การกำหนดค่าตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง.....	65
3.1.3 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง.....	65
3.1.4 การหาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝง.....	68
3.1.5 การหาค่าความจุของตัวเก็บประจุทอรอยด์.....	68
3.1.6 การหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ค่าประจุค่าต่างๆด้านแรงดันสูง.....	69
3.1.7 การหาค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ.....	69
3.1.8 การออกแบบขดลวดด้านแรงต่ำ.....	70
3.1.9 การหาค่าความเชื่อมโยงทางแม่เหล็กของขดลวด.....	71
3.2 การสร้างส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงทดสอบ.....	71
3.3 การวัดความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลงทดสอบ.....	83
3.4 สรุปข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากกาออกแบบ.....	84

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	85
4.1 การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	85
4.1.1 การจำลองระบบด้วยการใช้สวิตช์แบบสปาร์กแกป.....	85
4.1.2 การจำลองระบบด้วยการใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบต่อโดยตรง.....	87
4.1.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรถูกอินเวอร์เตอร์.....	90
4.1.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรถูกอินเวอร์เตอร์.....	93
4.2 การเลือกรูปแบบในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา.....	96
4.3 การสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา.....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 คำนำ.....	107
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	107
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	109
บรรณานุกรม.....	110
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก การใช้งาน โปรแกรม MALAB/Simulink ในการจำลองระบบ.....	114
ภาคผนวก ข เอกสารข้อมูลอุปกรณ์สวิตช์(IGBT).....	130
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	143
ประวัติผู้เขียน.....	228

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราขยายสูงสุดเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการจูนและสัมประสิทธิ์การคับปลิง.....	22
ตารางที่ 2.2 ค่าบางค่าของkที่ทำให้การถ่ายโอนพลังงานเป็นไปอย่างสมบูรณ์.....	24
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างทรงกลมซ้อนกับทรงกระบอกซ้อน.....	38
ตารางที่ 2.4 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนานของหม้อแปลงน็อน.....	40
ตารางที่ 2.5 แรงดันวาทไฟตามผิวแห่งของรูปถ้วยแบบต่างๆ.....	60
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ.....	65
ตารางที่ 3.2 ตารางสำหรับเลือกความสูงท่อ.....	66
ตารางที่ 4.1 แรงดันด้านรงคั้นสูงแรงคั้นตกร้อมigbtและกระแสไหลผ่านigbt แบบต่อสวิตซ์โดยตรง.....	89
ตารางที่ 4.2 แรงคั้นด้านรงคั้นสูงแรงคั้นตกร้อมigbtและกระแสไหลผ่านigbt ของวงจรสภาพบริค้แบบไม่ต่อลูกถ้วย.....	91
ตารางที่ 4.3 แรงคั้นด้านรงคั้นสูงแรงคั้นตกร้อมigbtและกระแสไหลผ่านigbt ของวงจรสภาพบริค้แบบต่อลูกถ้วย.....	91
ตารางที่ 4.4 แรงคั้นด้านรงคั้นสูงแรงคั้นตกร้อมigbtและกระแสไหลผ่านigbt ของวงจรฟูลบริค้แบบไม่ต่อลูกถ้วย.....	94
ตารางที่ 4.5 แรงคั้นด้านรงคั้นสูงแรงคั้นตกร้อมigbtและกระแสไหลผ่านigbt ของวงจรฟูลบริค้แบบต่อลูกถ้วย.....	94
ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบผลการจำลองระบบเพื่อเลือกรูปแบบในการสร้างหม้อแปลงโซลิติตเตตเตลล่า.....	96

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ฟลักสนามแม่เหล็ก.....	4
ภาพที่ 2.2 กระแสไหลเข้าที่ขั้วคอร์ทนั้นๆ.....	8
ภาพที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การคับปลิ่ง.....	10
ภาพที่ 2.4 วงจรหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	11
ภาพที่ 2.5 ตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์.....	11
ภาพที่ 2.6 คลื่นสัญญาณการเกิดออสซิลเลชัน.....	12
ภาพที่ 2.7 วงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิซึ่งคับปลิ่งโดยการเหนี่ยวนำในขดลวดทดสอบ.....	13
ภาพที่ 2.8 อัตราการขยายG/GLกับอัตราส่วนการจูนTสำหรับค่าmที่แตกต่าง.....	18
ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยาย K1กับอัตราส่วนการจูนTค่าmที่ต่างๆ	20
ภาพที่ 2.10 การถ่ายโอนพลังงานรวมหลังจาก 10 Cycle ของกระแสด้านปฐมภูมิ ที่มี $k = 0.161$ ซึ่งสอดคล้องกับ Notch อันดับที่ 2.....	25
ภาพที่ 2.11 พลังงานที่ถูกถ่ายโอนและเวลาในการถ่ายโอนที่สัมประสิทธิ์การคับปลิ่งค่าต่างๆ	26
ภาพที่ 2.12 การจำลองค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดด้านทุติยภูมิ.....	28
ภาพที่ 2.13 อิลเล็กโทรด์ที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน.....	33
ภาพที่ 2.14 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กทริกตามลักษณะ ทางไฟฟ้า.....	35
ภาพที่ 2.15 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า.....	36
ภาพที่ 2.16 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิลเล็กโทรด์ลักษณะต่างๆ.....	37
ภาพที่ 2.17 รูปแบบของทอรอยด์ที่ใช้กับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	41
ภาพที่ 2.18 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง.....	42
ภาพที่ 2.19 การไหลของกระแสในสายเนื่องจากสกินเอฟเฟกต์.....	46
ภาพที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์เกรเดียนสูงสุดกับ $r/R$ .....	48
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ และความถี่.....	49
ภาพที่ 2.22 เวกเตอร์ไคอะแกรมของ Pure Capacitor .....	55
ภาพที่ 2.23 เวกเตอร์ไคอะแกรมของ Impure Capacitor .....	56
ภาพที่ 2.24 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงทดสอบ.....	58

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.25 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงทดสอบ.....	59
ภาพที่ 2.26 ตัวอย่างสัญญาณ ออสซิลเลชันของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบ.....	59
ภาพที่ 2.27 การเกิดแรงดันวาบไฟบนผิวของลูกถ้วย.....	60
ภาพที่ 2.28 วงจรหม้อแปลงทดสอบแบบใช้สปาร์กแกป.....	61
ภาพที่ 2.29 สปาร์กแกปที่ใช้สร้างความถี่ออสซิลเลชันให้กับหม้อแปลงทดสอบ.....	62
ภาพที่ 3.1 IGBT เบอร์ MBN800H45E2-H .....	64
ภาพที่ 3.2 การเตรียมท่อ PVC ในการพันขดลวดแรงดันสูง.....	72
ภาพที่ 3.3 การพันขดลวดด้านแรงดันสูง.....	73
ภาพที่ 3.4 ขดลวดหม้อแปลงทดสอบด้านแรงดันสูง.....	74
ภาพที่ 3.5 การทำฐานวางขดลวดหม้อแปลงทดสอบ.....	74
ภาพที่ 3.6 การทำฐานวางขดลวดด้านแรงดันต่ำ.....	75
ภาพที่ 3.7 การพันขดลวดด้านแรงดันต่ำ.....	76
ภาพที่ 3.8 การประกอบและติดตั้งขดลวดหม้อแปลงทดสอบ.....	77
ภาพที่ 3.9 ขดลวดหม้อแปลงทดสอบ.....	78
ภาพที่ 3.10 การเตรียมไม้อัดเพื่อทำตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง(ทอรอยด์).....	79
ภาพที่ 3.11 การทำตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง (ทอรอยด์).....	80
ภาพที่ 3.12 การติดตั้ง ทอรอยด์ บนขดลวดทดสอบ.....	81
ภาพที่ 3.13 คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033 $\mu\text{F}$ และ 0.1 $\mu\text{F}$ .....	82
ภาพที่ 3.14 ขดลวดของหม้อแปลงทดสอบที่สร้าง แล้วทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	83

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.1 วงจรการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสปาร์คแกป.....	85
ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบ โดยแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 10 ช่วง.....	86
ภาพที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบ โดยแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 1 ช่วง .....	86
ภาพที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ แบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์โดยตรง.....	87
ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยตรงแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 10 ช่วง.....	88
ภาพที่ 4.6 คลื่นแรงดันจากการจำลองระบบแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ แรงดัน 240 kV 160 kHz.....	88
ภาพที่ 4.7 แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) เมื่อปรับ Duty cycle 10%.....	89
ภาพที่ 4.8 กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) เมื่อปรับ Duty cycle 10%.....	89
ภาพที่ 4.9 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	90
ภาพที่ 4.10 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132 kHz Duty Cycle 20 % แบบไม่ต่อลูกถ้วย	90
ภาพที่ 4.11 ขยายรูปแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132 kHz Duty Cycle 20 % แบบไม่ต่อลูกถ้วย.....	91
ภาพที่ 4.12 แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์(IGBT) วงจรฮาฟบริดจ์ ที่ความถี่ 132kHz Duty cycle 20%.....	92
ภาพที่ 4.13 กระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) วงจรฮาฟบริดจ์ ที่ความถี่ 132kHz Duty cycle 20%.....	92
ภาพที่ 4.14 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	93
ภาพที่ 4.15 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 145 kHz Duty Cycle 20%ไม่ต่อลูกถ้วย	93

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.16 ขยายรูปแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 145 kHz Duty Cycle 20% ไม่ต่อลูกถ้วย.....	94
ภาพที่ 4.17 แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์(IGBT)วงจรพูลบริดจ์ ที่ความถี่ 145 kHz D 20%	95
ภาพที่ 4.18 กระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์(IGBT) วงจรพูลบริดจ์ ที่ความถี่ 145 kHz D 20%	95
ภาพที่ 4.19 อุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT 1MBI300F-060).....	97
ภาพที่ 4.20 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรรวม เบอร์ TL494 .....	97
ภาพที่ 4.21 วงจรขับเคลื่อนด้วยวงจรรวม TLP250.....	98
ภาพที่ 4.22 วงจรหม้อแปลง โหลดสแตตเทสล่า.....	98
ภาพที่ 4.23 การจัดทำวงจรควบคุมหม้อแปลง โหลดสแตตเทสล่า.....	99
ภาพที่ 4.24 วงจรสร้างสัญญาณPWM และวงจรขับเคลื่อนหม้อแปลง โหลดสแตตเทสล่า.....	100
ภาพที่ 4.25 สัญญาณPWM จากวงจรรวม TL494 ที่ความถี่ 85.47 kHz Duty cycle 11%.....	101
ภาพที่ 4.26 สัญญาณPWM จากวงจรรวม TL494 ที่ความถี่ 147 kHz Duty cycle 20%.....	101
ภาพที่ 4.27 สัญญาณควบคุม จากวงจรรวม TLP250 ที่ความถี่ 147 kHz Duty cycle 20%.....	102
ภาพที่ 4.28 หม้อแปลง โหลดสแตตเทสล่าขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz ที่สร้างขึ้น.....	103
ภาพที่ 4.29 คลื่นสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าด้านแรงดันสูง ที่วัดด้วยวิธี Voltage divider.....	103
ภาพที่ 4.30 คลื่นสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าด้านแรงดันสูงที่แสดงการเกิดออสซิลชัน.....	104
ภาพที่ 4.31 ภาพขยายคลื่นสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าด้านแรงดันสูงที่แสดงการเกิดออสซิลชัน.....	105
ภาพที่ 4.32 หม้อแปลง โหลดสแตตเทสล่า.....	106

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานที่มีความสำคัญในการพัฒนาประเทศทั้งทางด้านอุตสาหกรรม และเทคโนโลยี การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านิยมใช้ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง เนื่องจากทำให้เกิดกาสูญเสียในระบบส่ง ต่ำกว่าการส่งไฟฟ้าแบบแรงดันต่ำ อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแรงดันสูงต้องมีความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่สูง การทดสอบความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงทดสอบที่สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าให้มีแรงดันและความถี่ที่สูงในย่านการทดสอบ เช่น การทดสอบลูกถ้วยฉนวน คือ ความถี่ต้องสูงกว่า 100 kHz และแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 80 kV ถึง 140 kV

หม้อแปลงทดสอบ เป็นหม้อแปลงที่อาศัยหลักการ การถ่ายเทพลังงานระหว่าง ตัวเก็บประจุ กับ ขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแกนอากาศ ในสภาวะเรโซแนนซ์ โดยพลังงานนี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิและขดลวดทุติยภูมินี้จะถ่ายทอดพลังงานให้กับตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิด้วย ในลักษณะคลื่นขบวนหนึ่ง การเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ของหม้อแปลงทดสอบ จะใช้หลักการสร้างความถี่ออสซิลเลทจากสปาร์กแกปซึ่งเกิดจากการหมุนของมอเตอร์

การสร้างความถี่ออสซิลเลท ของหม้อแปลงทดสอบ ด้วยการใส่สปาร์กแกป มีปัญหาในเรื่องการเกิดประกายไฟและมีเสียงดัง รวมทั้งเป็นปัจจัยที่ทำให้หม้อแปลงทดสอบมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมาก ทำให้เคลื่อนย้ายไม่สะดวก

หากนำหลักการสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ ในวงจรอินเวอร์เตอร์มาใช้สร้างความถี่ออสซิลเลท แทนสปาร์กแกป ก็จะสามารถ แก้ปัญหา การเกิดประกายไฟและการเกิดเสียงดัง รวมถึงยังสามารถลดขนาดของหม้อแปลงทดสอบให้มีขนาดเล็กลงเพื่อประโยชน์ในการเคลื่อนย้าย



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา
- 1.2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลาโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.2.3 เพื่อสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการทำงานของหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา กับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานการศึกษาโดยพิจารณาจาก การออกแบบหม้อแปลงเตสลาแบบใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์กแก๊ป จะมีประสิทธิภาพ เท่ากัน แต่หม้อแปลงเตสลาแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จะมีขนาดที่เล็กกว่าและเคลื่อนย้ายได้สะดวก

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา เพื่อหาประสิทธิภาพด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.2 สร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 100 kV 150 kHz
- 1.4.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบการทำงานของหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา กับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบและการสร้างหม้อแปลงเตสลา
- 1.5.2 ศึกษาการออกแบบและการควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์
- 1.5.3 ศึกษาการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลาในรูปแบบต่างๆ
- 1.5.4 กำหนดพิกัดและคุณสมบัติต่างๆของหม้อแปลงเตสลาที่ต้องการสร้าง
- 1.5.5 ออกแบบและสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา
- 1.5.6 ทำการทดสอบหม้อแปลงโซลิตเตสลาที่สร้างขึ้น
- 1.5.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงเตสลาที่สร้างขึ้นกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงานเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและศึกษาต่อไป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถเข้าใจหลักการออกแบบหม้อแปลงเตสลา
- 1.6.2 สามารถนำหลักการการสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหม้อแปลงเตสลาได้
- 1.6.3 สร้างหม้อแปลงเตสลาที่มีประสิทธิภาพสามารถใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวน ใช้ทดลองด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงดันสูงได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์คแกป โดยมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะทำการออกแบบสร้างหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง จะต้องทราบถึงความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดและหลักการออกแบบพื้นฐานเกี่ยวกับส่วนประกอบต่างๆ ของหม้อแปลงแรงดันความถี่สูง เช่น ทฤษฎีความเหนี่ยวนำร่วม ลักษณะการเกิดการคับปลิงระหว่างขดลวดทั้งสอง และความเครียดสนามไฟฟ้า คุณสมบัติตัวนำ คุณสมบัติของวัสดุฉนวน เพื่อใช้ในการพิจารณาศึกษาผลกระทบชุดขดลวดเหนี่ยวนำและการออกแบบสร้างซึ่งจะกล่าวในบทที่ 2 นี้

#### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวด

##### 2.1.1 ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

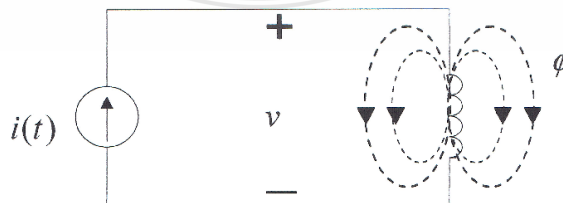
โดยทั่วไปแล้ว วงจรทางไฟฟ้าสามารถเชื่อมโยงกันได้ 2 แบบ คือ

- การเชื่อมโยงทางตัวนำ (Conductively Coupled) เช่น ลูปวงจรหนึ่งๆ ในวงจรมีผลต่ออีลูปอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียง จากกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ร่วมระหว่างลูป

- การเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็ก (Magnetically Coupled) เช่น ลูปหนึ่งในวงจรส่งผลกระทบต่ออีลูปหนึ่ง โดยผ่านทางสนามแม่เหล็ก หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อทางสนามแม่เหล็ก ในการถ่ายเทพลังงานจากวงจรหนึ่งไปยังวงจรหนึ่ง

ความเหนี่ยวนำร่วม หมายถึง ขดลวดเหนี่ยวนำสองขดวางอยู่ใกล้กัน สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดที่หนึ่งจะเชื่อมไปยังอีกขด โดยจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขดที่สอง

ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก หมายถึง การที่ขดลวดพัน  $N$  รอบ และมีกระแสไหล  $i(t)$  ผ่านทำให้เกิดฟลักซ์สนามแม่เหล็ก  $\Phi$  ขึ้นรอบๆ ขดลวดดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก[4]

กฎของฟาราเดย์

“แรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำในขดลวดจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวดและอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ต่อเวลา”

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน สำหรับขดลวดเหนี่ยวนำ

$$v = N \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow v = N \frac{d\phi}{di} \frac{di}{dt} \equiv L \frac{di}{dt} \Rightarrow L = N \frac{d\phi}{di} \quad (2.2)$$

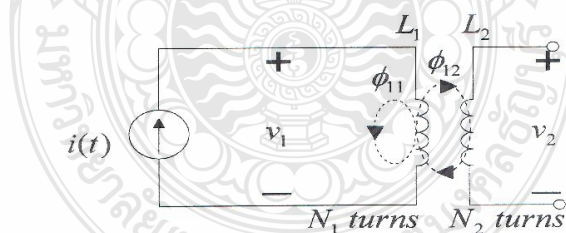
$L$  ถูกเรียกว่า self-inductance

- ผลของแรงดันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อเวลาในขดลวดเดียวกัน

การพิจารณาขดเหนี่ยวนำสองขด

- ขดที่หนึ่ง  $N_1$  รอบ และความเหนี่ยวนำ  $L_1$
- ขดที่สอง  $N_2$  รอบ และความเหนี่ยวนำ  $L_2$

สมมติว่า ไม่มีกระแสในขดที่สอง



ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดในขดลวดที่ 1

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12} \quad (2.3)$$

แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 1 จากฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi_1$

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \Rightarrow v_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{di_1} \frac{di_1}{dt} \equiv L_1 \frac{di_1}{dt} \Rightarrow L_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{di_1} \quad (2.4)$$

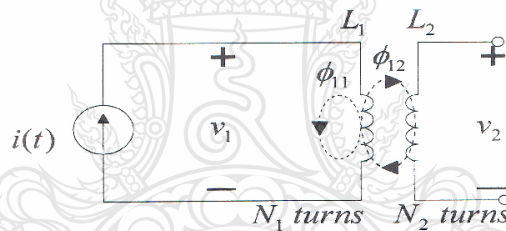
แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 2 จากฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi_{12}$

$$v_2 = N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} \Rightarrow v_2 = N_2 \frac{d\phi_{12}}{di_1} \frac{di_1}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt} \Rightarrow v_2 = M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (2.5)$$

$$M_{21} = N_2 \frac{d\phi_{12}}{di_1}$$

$M_{12}$  ความเหนี่ยวนำร่วม ของขดลวดที่ 2 เทียบกับขดลวดที่ 1

สมมติว่า ไม่มีกระแสไหลในขดที่ 1



ฟลักซ์แม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 2

$$\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21} \quad (2.6)$$

แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 2 จากฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi_2$

$$v_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{dt} \Rightarrow v_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{di_2} \frac{di_2}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \Rightarrow L_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{di_2} \quad (2.7)$$

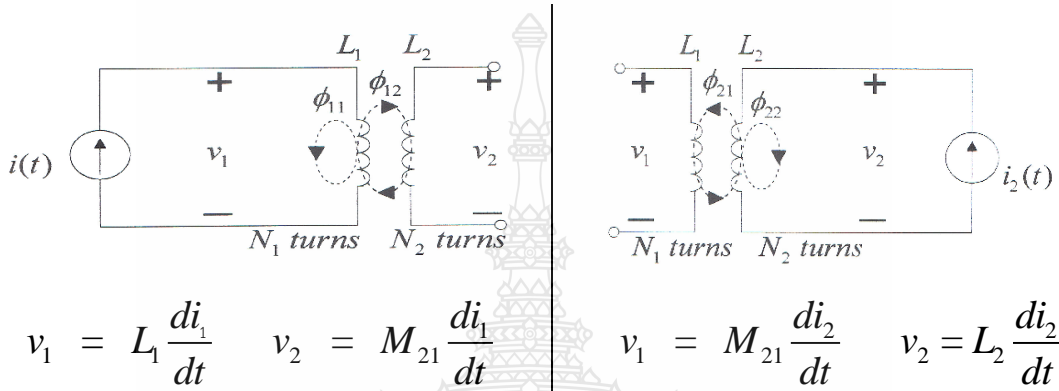
แรงดันที่เกิดขึ้นในขดลวดที่ 1 จากฟลักซ์แม่เหล็ก  $\phi_{12}$

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_{21}}{dt} \Rightarrow v_1 = N_2 \frac{d\phi_{21}}{di_2} \frac{di_2}{dt} = M_{12} \frac{di_2}{dt} \Rightarrow v_1 = M_{12} \frac{di_2}{dt}$$

(2.5)

$$M_{12} = N_1 \frac{d\phi_{22}}{di_2}$$

$M_{12}$  : ความเหนี่ยวนำร่วม ของขดลวดที่ 1 เทียบกับขดลวดที่ 2



$M_{21} = M_{12} = M_{12}$  เป็นความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำทั้งสองหน่วย เฮนรี่

(H)

- ความเหนี่ยวนำร่วม จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อขดลวดสองขดวางใกล้กันและวงจรถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลงทางเวลาเท่านั้น

สัญลักษณ์ดอก

$M$  ความเหนี่ยวนำร่วม มีค่าเป็นบวกเสมอ

- แต่  $M \frac{d_i}{d_i}$  มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ เช่นเดียวกับ  $L \frac{d_i}{d_i}$  แต่

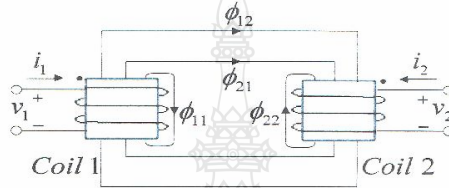
ขั้วไฟฟ้า (polarity) ของ  $L \frac{d_i}{d_i}$  กำหนดได้จากทิศทางอ้างอิงของทิศกระแสไฟฟ้า และขั้วอ้างอิงของแรงดันไฟฟ้า

- การหาขั้วของแรงดัน  $M \frac{d_i}{d_i}$  เป็นเรื่องที่ไม่ง่าย เนื่องจากมี 4 ขั้วต่อของขดลวดทั้งสอง ขดมาเกี่ยวข้อง

ทางเลือกหนึ่งในการแสดงขั้วไฟฟ้า  $M \frac{d_i}{d_t}$  สามารถทำได้โดยการทดสอบทิศทางฟลักซ์ของขดลวดทั้งสอง และการประยุกต์ใช้ Lenz's law พร้อมด้วยกฎมือขวา

การใช้สัญลักษณ์จุด

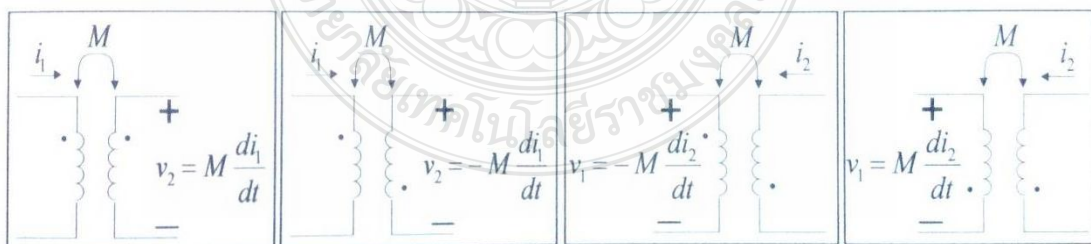
จุดจะถูกกำหนดลงบนวงจรที่ ขั้วปลายของขดลวดหนึ่งขดมา เพื่อแสดงทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก ที่เกิดจากการที่กระแสไหลเข้าขดลวดที่ขั้วคอดนั้นๆ ดังภาพที่ 2.2



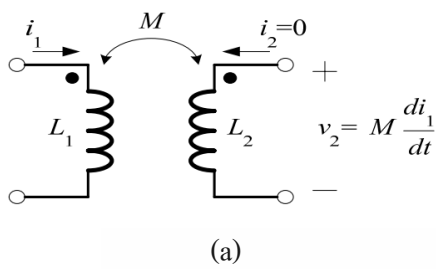
ภาพที่ 2.2 กระแสไหลเข้าที่ขั้วคอดนั้นๆ[4]

เงื่อนไขการใช้สัญลักษณ์จุด

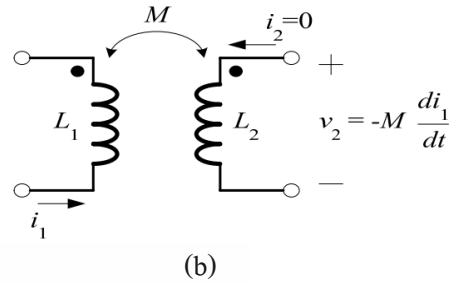
- ถ้ากระแสไหลเข้าขั้วคอดของขดลวดหนึ่ง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของแรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่สอง จะมีศักย์เป็นบวกที่ขั้วคอดของขดลวดที่สอง
- ในทำนองเดียวกันถ้ากระแสไหลออกจากขั้วคอดของขดลวดหนึ่ง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของแรงดันที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดที่สอง จะมีศักย์เป็นลบที่ขั้วคอดของขดลวดที่สอง



กรณีขดลวดเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน



$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

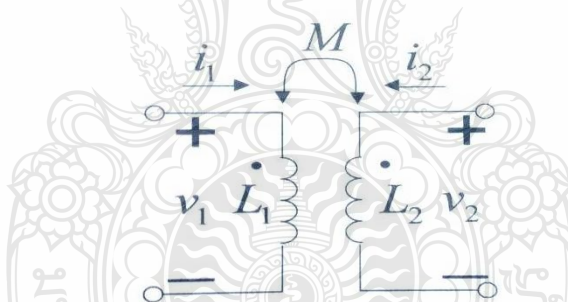


$$L = L_1 + L_2 - 2M$$

จากวงจร พลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ  $w = \frac{1}{2} L_i^2$

พลังงานในวงจรที่เชื่อมโยงกัน

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \pm M i_1 i_2 \quad (2.9)$$



พลังงานที่เกิดขึ้นจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0

$$\frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 - M i_1 i_2 \geq 0 \quad (2.10)$$

จะได้ความสัมพันธ์

$$\sqrt{L_1 L_2} - M \geq 0 \Leftrightarrow M \leq \sqrt{L_1 L_2} \quad (2.11)$$

อัตราส่วนของ M ต่อ L เรียกว่า สัมประสิทธิ์การคัปปลิง (coefficient of coupling, k)

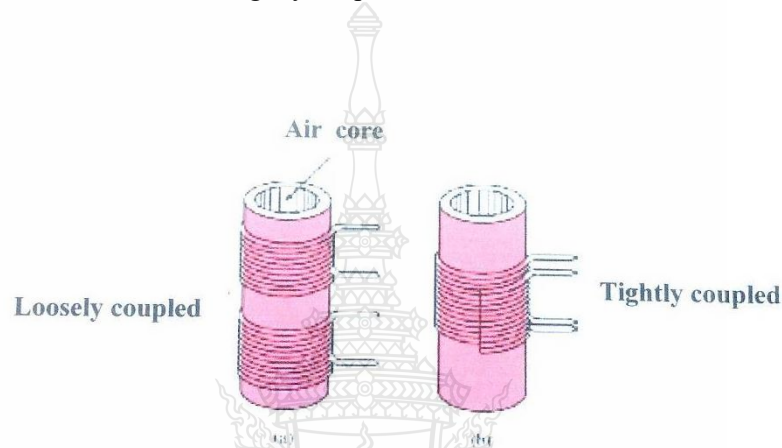


$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad ; \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (2.12)$$

### สัมประสิทธิ์การคับปลิ่ง ดังภาพที่ 2.3

สำหรับ  $k < 0.5$  จะเรียกว่า loosely coupled

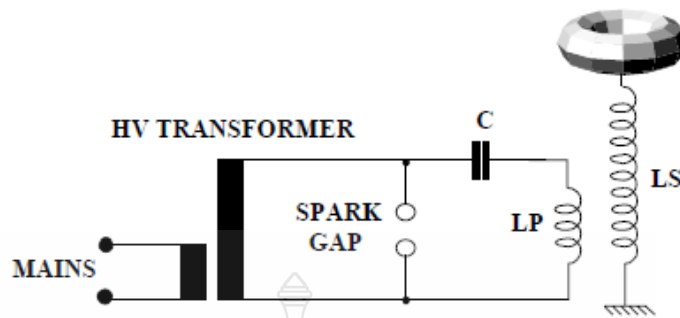
สำหรับ  $k > 0.5$  จะเรียกว่า tightly coupled



ภาพที่ 2.3 สัมประสิทธิ์การคับปลิ่ง[4]

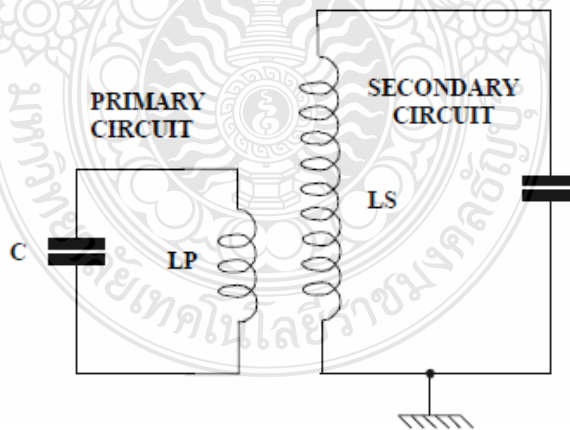
### 2.2 ลักษณะการเกิดการคับปลิ่งระหว่างขดลวดทั้งสอง

หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงจัดได้ว่าเป็นประเภทของหม้อแปลงที่เป็นชนิดพิเศษ โดยที่แกนของตัวหม้อแปลงจะใช้เป็นแกนอากาศ ขดปฐมภูมิ (Primary) และขดทุติยภูมิ (Secondary) จะติดตั้งอยู่ในแกนร่วมกัน แรงดันของหม้อแปลงจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของรอบในขดปฐมภูมิ และขดทุติยภูมิ แต่จะเพิ่มขึ้นโดยการใช้เรโซแนนซ์ (Resonance) ระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ โดยที่ขดลวดทุติยภูมิจะกระทำเป็นตัวรับพลังงานจากขดปฐมภูมิ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) จะเป็นผลทำให้เกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ความถี่เรโซแนนซ์จะอยู่ระหว่าง 50 Hz ถึง 500 kHz ที่แรงดันด้านออกจะมีค่าเริ่มตั้งแต่ 100 kV ขึ้นไป ถ้าหากมีพลังงานที่ป้อนให้เพียงพอ แรงดันด้านออกจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงช่วงเมกะโวลต์ (Mega Volt) และถ้าเกิดมีแรงดันขึ้นไปถึงช่วงระดับที่แน่นอนจะทำให้มีการเริ่มเกิดการสปาร์ก (Spark) และจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นคำฟ้าผ่า (Lightning) ดังภาพที่ 2.4



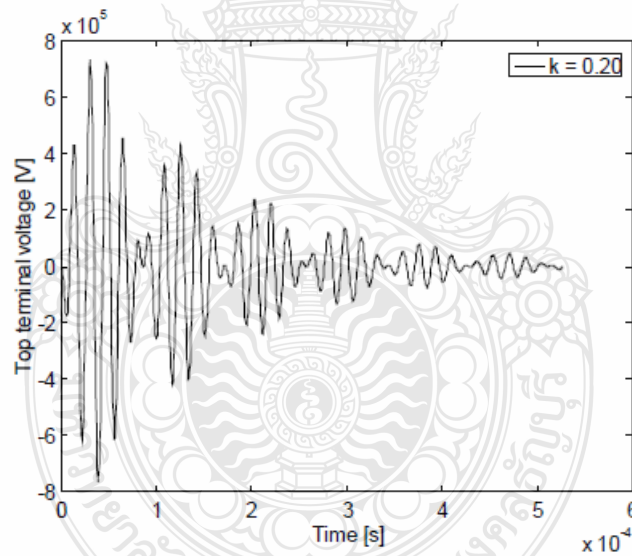
ภาพที่ 2.4 วงจรหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง[6]

การทำงานของขดลวดหม้อแปลงทดสอบอธิบายได้โดยใช้กฎทางคณิตศาสตร์ไฟฟ้าของวงจกระโซแนนซ์ 2 วงจรที่มีการคับปลิง โดยขดลวดเหนี่ยวนำผ่านแกนอากาศ วงจรแรกประกอบด้วยตัวเก็บประจุ C และขดลวดทางด้านปฐมภูมิ LP ต่อกันแบบอนุกรมผ่าน Spark gap ในขณะที่วงจรที่สองประกอบด้วยขดลวดทุติยภูมิ LS ต่อแบบอนุกรมกับตัวนำทรงกลมหรือทรงโดนัทซึ่งทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์ ดังรูปที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์[6]

ในขณะที่ Spark gap นำกระแสไฟฟ้า พลังงานที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ C จะถูกจ่ายให้กับ LP ทำให้วงจรทางด้านปฐมภูมิออสซิลเลตใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งความถี่ขึ้นอยู่กับค่า C และ LP พลังงานส่วนนี้จะถูกส่งผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังขดลวดด้านทุติยภูมิ LS ซึ่งจะทำให้เกิดออสซิลเลตใกล้เคียงความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรด้านทุติยภูมิด้วยเช่นกัน ในลำดับถัดมา ขนาดสูงสุดของแรงดันจะมีค่าสูงสุดเมื่อแรงดันของวงจรเรโซแนนซ์ 2 วงจรนี้มีเฟสตรงกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ Beat เช่นเดียวกับคลื่นน้ำหรือคลื่นเสียง ดูตัวอย่างตามรูปที่ 2.6 พลังงานนี้ถูกส่งกลับไปกลับมาจากวงจรด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งด้วยความถี่ Beat จนกระทั่งพลังงานเหล่านี้ทั้งหมดสูญเสียไปในรูปของความร้อนเนื่องจากความต้านทานของขดลวด และสูญเสียไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ช่วงเวลานี้กระแสไฟฟ้าทางด้านวงจรปฐมภูมิจะมีค่าต่ำสุดและทำให้ Spark gap หยุดนำกระแส



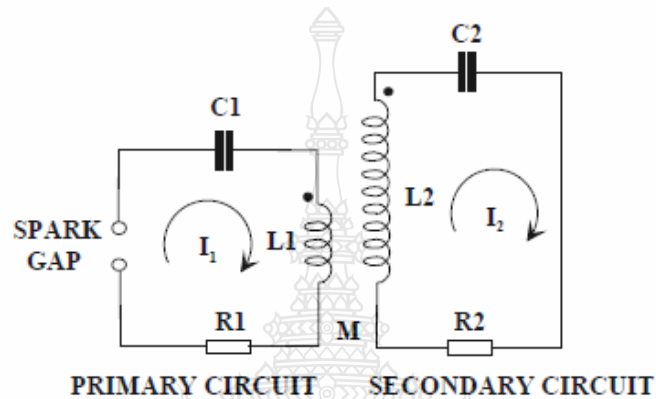
ภาพที่ 2.6 คลื่นสัญญาณของการเกิดออสซิลเลชัน[6]

อัตราส่วนระหว่างแรงดันทางด้าน LP และแรงดันที่เกิดขึ้นด้าน  $L_s$  ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่เป็นสัดส่วนตรงกับรากที่ 2 ของอัตราส่วนค่าความเหนี่ยวนำ  $L_s$  และ  $L_p$  สัมประสิทธิ์การคับปลิงระหว่างขดลวดทั้งสองค่อนข้างแตกต่างจากค่า

ปกติ ซึ่งมีค่า 0.9-1.0 สำหรับหม้อแปลงแกนเหล็กที่ใช้กันโดยทั่วไปด้วยเหมือนกัน โดยทั่วไปค่าจะอยู่ระหว่าง 0.1-0.6

## 2.3 ทฤษฎีการทำงานของขดลวด

### 2.3.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบคัปปลิงผ่านอากาศ



ภาพที่ 2.7 วงจรต้านปฐมภูมิและทุติยภูมิซึ่งคัปปลิงโดยการเหนี่ยวนำในขดลวดทดสอบ[6]

ตามกฎของเคอร์ชอฟข้อที่ 1 ผลรวมของแรงดันรอบวงจรปิดมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$R_1 i_1 = \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

$$R_2 i_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

ถ้า  $q_i$  คือประจุไฟฟ้าชั่วขณะเวลาใด ๆ บนตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  ของแต่ละวงจร

$$i_i = \frac{dq_i}{dt} \quad i = 1, 2 \quad (2.15)$$

แทนค่าในสมการ (2.13) และ (2.14)

$$R_1 \frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{C_1} q_1 + L_1 \frac{d^2 q_1}{d^2 t} + M \frac{d^2 q_2}{d^2 t} = 0 \quad (2.16)$$

$$R_2 \frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{C_2} q_2 + L_2 \frac{d^2 q_2}{d^2 t} + M \frac{d^2 q_1}{d^2 t} = 0 \quad (2.17)$$

จัดสมการใหม่และกำหนดให้  $D$  เท่ากับตัวดำเนินการดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลา  $t$

$$\left[ D^2 + \frac{R_1}{L_1} D + \frac{1}{L_1 C_1} \right] q_1 + \frac{M}{L_1} D q_2 = 0 \quad (2.18)$$

$$\left[ D^2 + \frac{R_2}{L_2} D + \frac{1}{L_2 C_2} \right] q_2 + \frac{M}{L_2} D q_1 = 0 \quad (2.19)$$

จากสมการต่างๆ ข้างต้นจะทำให้ได้สมการเสริม (หรือสมการคุณลักษณะ)

$$\begin{aligned} (1 - k^2) D^4 + \left( \frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2} \right) D^3 + \left( \omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2} \right) D^2 + \\ \left( \frac{R_1}{L_1} \omega_2^2 + \frac{R_2}{L_2} \omega_1^2 \right) D + \omega_1^2 \omega_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.21)$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad i = 1, 2 \quad (2.22)$$

คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิ่ง ( $0 < k < 1$ ) ขณะที่  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์เชิงมุมของวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิขณะที่ไม่มีการคับปลิ่งตามลำดับ (หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการเรโซแนนซ์แบบวงจรเปิด) สมการ (2.20) เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลเดี่ยวเชิงเส้นลำดับที่ 4 ซึ่งจะมีค่ารากเชิงซ้อนจำนวน 4 ค่า  $D_i, i = 1 \dots 4$

$$Y_i = e^{D_i t} \quad i = 1 \dots 4 \quad (2.23)$$

แทนองค์ประกอบพื้นฐานองค์ประกอบหนึ่งของมิติของผลเฉลยสำหรับระบบที่แทนด้วยสมการ (2.18) และสมการ (2.19) ดังนั้นผลเฉลยทั่วไปของระบบนี้คือ

$$q_1 = \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad (2.24)$$

$$q_2 = \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad (2.25)$$

ค่าคงที่  $A_i$  และ  $B_i$  สามารถหาได้โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นที่  $t = 0$

$$\begin{aligned} q_1 &= 0 \\ q_2 &= q_0 \\ Dq_1 &= Dq_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $q_0$  คือ ค่าประจุเริ่มต้นบนตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ แรงดันที่ตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แทนได้เป็น

$$v_1 = \frac{1}{C_1} q_1 = \frac{1}{C_1} \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad (2.27)$$

$$v_2 = \frac{1}{C_2} q_2 = \frac{1}{C_2} \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad (2.28)$$

ผลเฉลยในรูปแบบปิดสำหรับ  $v_1$  และ  $v_2$  สามารถหาได้สำหรับกรณีอุดมคติคือไม่มีการหน่วงเลยเท่านั้น ( $R_1=R_2=0$ ) ค่าราก  $D_i$  ของสมการ (2.20) มีเพียงส่วนจินตภาพเท่านั้นและค่าแรงดันด้านทุติยภูมิสามารถแทนด้วย

$$v_2(t) = \frac{2kV_1}{\sqrt{(1-t)^2 + 2k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}\right) \quad (2.29)$$

เมื่อ

$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(2-k^2)}} \\ \omega_2 &= \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) + \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(2-k^2)}} \end{aligned} \quad (2.31)$$

$T$  คืออัตราส่วนการจูน ซึ่งแทนด้วยรากที่สองของอัตราส่วนของความถี่เรโซแนนซ์ในสภาวะไม่มีการคับปลิง ในขณะที่  $V_1$  คือค่าแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อม  $C_1$ ,  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  คือความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเมื่อมีการคับปลิง เงื่อนไขต่างๆ ด้านกายภาพต่อค่าของ  $k$  และ  $T$  จะประกันว่า  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  สามารถหาค่าได้เสมอ และสมมติให้  $\omega_2 > \omega_1$  ด้วยสมการ (2.29) มีความสำคัญและแสดงว่าแรงดันด้านทุติยภูมิคือการอสซิลเลตด้านความถี่สูง  $(\omega_2 + \omega_1)/2$  นั่นก็คือมีการมอดคูเลตทางด้านแอมพลิจูดโดยความถี่อสซิลเลตด้านความถี่ต่ำ  $(\omega_2 - \omega_1)/2$

### 2.3.2 เงื่อนไขที่ทำให้อัตราส่วนขยายแรงดันมีค่าสูงสุด

จากสมการ (2.29) ในบทที่ผ่านมาจะเห็นว่าแรงดัน  $V_2(t)$  ที่ตัวเก็บประจุด้านทุติยภูมิ  $C_2$  จะมีค่ามากกว่าแรงดันด้านต้นกำเนิดบน  $C_1$  ที่เวลา  $t=0$  นี้คือหลักพื้นฐานที่ใช้กับขดลวดทดสอบเพื่อสร้างแรงดันค่าสูงด้านทุติยภูมิ

วิธีการที่เห็นได้ชัดวิธีหนึ่งเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบขดลวดทดสอบ คือการกำหนดให้ขดลวดสามารถสร้างแรงดันด้านทุติยภูมิที่มีค่าสูงสุดได้อัตราการขยายแรงดันสูงสุด (จากสมการ (2.29)) คือ

$$G = \frac{v_{2(t)} v_{2(t)}}{V_1 V_1} \Big|_{\max} = \frac{2k}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2 T}} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$G_L = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (2.33)$$

อัตราขยาย  $G$  จากสมการ (2.32) สามารถเป็นไปได้อีกหากค่าไซน์ทั้งสองเทอมในสมการ (2.29) มีค่าเท่ากับ  $\pm 1$  พร้อมกัน นั่นก็คือ ถ้าหาก

$$\frac{w_2 + w_1}{2} t = \frac{\pi}{2} + m\pi \quad \text{และ} \quad \frac{w_2 + w_1}{2} t = \frac{\pi}{2} + n\pi \quad (2.34)$$

เมื่อ  $m$  และ  $n$  เป็นจำนวนเต็มบวกหรือลบ  $n$  สามารถกำหนดให้เท่ากับ 0 โดยไม่ทำให้สูญเสียลักษณะทั่วไปของสมการ ดังนั้นสิ่งที่ต้องการเปลี่ยนไปเป็น

$$\frac{w_2}{w_1} t = \frac{1+m}{m} \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการ (2.31) ในสมการ (2.35)



$$k = \sqrt{\frac{\alpha^2 (1+T)^2 - (1-T)^2}{4T}} \quad (2.36)$$

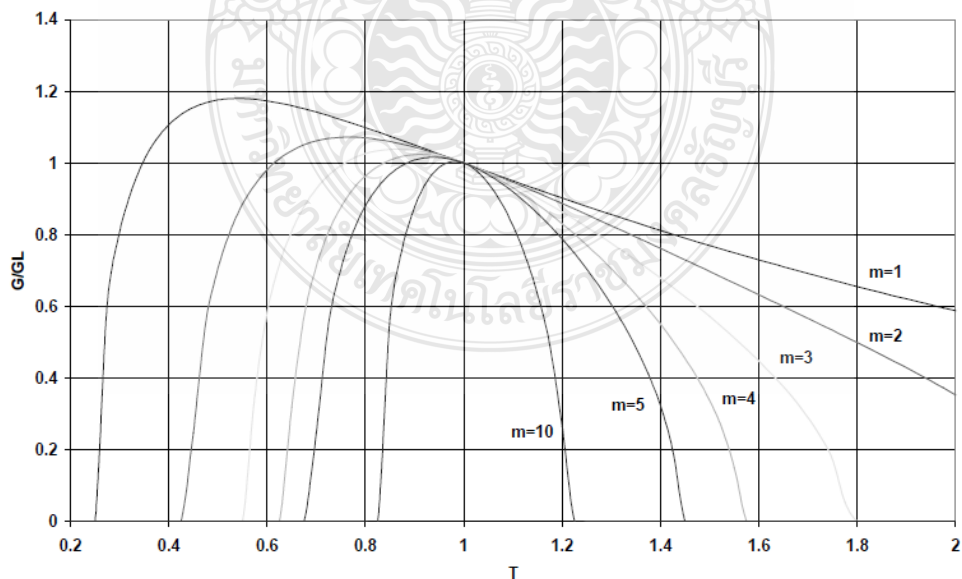
เมื่อ

$$\alpha = \frac{1+2m}{1+2m+2m^2} \quad (2.37)$$

ถ้าจัดค่า  $k$  จากสมการ (2.32) จะได้

$$G = \frac{v_{2(0)}}{V_1} \Big|_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha^2 (1+T)^2 - (1-T)^2}{\alpha^2 T (1+T)^2}} G_L \quad (2.38)$$

ผลลัพธ์ข้างต้นที่ได้รับการตรวจสอบมาก่อนหน้านี้มุ่งหวังที่จะให้ได้ค่าอัตราส่วน  $G/G_L$  มีค่าสูงสุด และแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนมากกว่า 1 สามารถเป็นไปได้ถ้าค่าอัตราส่วนการจูนมีค่าต่างจาก 1 ภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนนี้มีค่าสูงสุดเมื่อ  $T < 1$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการเลือกค่า  $m$  ตัวอย่างเช่น ถ้า  $m=1$  แล้วจะทำให้ค่า  $G/G_L$  เท่ากับ 1.18 เมื่อ  $T=0.541$  และ  $k=0.546$



ภาพที่ 2.8 อัตราขยาย  $G/G_L$  กับอัตราส่วนการจูน  $T$  สำหรับค่า  $m$  ที่แตกต่างกัน[6]

การวิเคราะห์นี้มีความถูกต้องและเป็นผลให้ได้ค่าแรงดันยอดสูงสุด  $v_2(t)$  โดยสมมติว่าค่าของ  $G_L$  (นั่นคือ  $L_1$  และ  $L_2$ ) และค่าของ  $V_1$  มีค่าคงที่ตลอด เนื่องจากอัตราส่วนการจูน  $T$  สมการ (2.30) สามารถปรับค่าได้โดยการควบคุมค่าของ  $C_1, C_2, L_1$  หรือ  $L_2$  ในทางปฏิบัติให้ความสนใจในการหาค่าแต่ละค่าเหล่านี้แยกกันเป็นกรณี ๆ ไปภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้อัตราส่วนขยายแรงดันด้านทุติยภูมิโดยรวมมีค่าสูงสุด จากสมการ (2.29) และสมการ (2.38)

$$V_2 = v_2(t)|_{\max} = V_1 G = V_1 \sqrt{\frac{\alpha^2(1+T)^2 - (1-T)^2}{\alpha^2 T(1+T)^2}} G_L = V_1 G_T \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (2.39)$$

เมื่อ

$$G_T = \frac{G}{G_L} = \sqrt{\frac{\alpha^2(1+T)^2 - (1-T)^2}{\alpha^2 T(1+T)^2}} \quad (2.40)$$

ต้องจำไว้ว่าการเลือกค่าใดของ  $m$  นำไปคำนวณหาค่า  $\infty$  จากสมการ (2.37) เลือกค่า  $T$  และนำไปคำนวณหาค่า  $k$  โดยใช้สมการ (2.36) ต้องให้แน่ใจว่าอยู่ภายใต้เงื่อนไขสมการ (2.35) และผลคูณของค่าไซน์มีค่าสูงสุด  $\pm 1$

การหาค่าที่เหมาะสมของ  $L_1$  หรือ  $L_2$  จากสมการ (2.33) และสมการ (2.30)

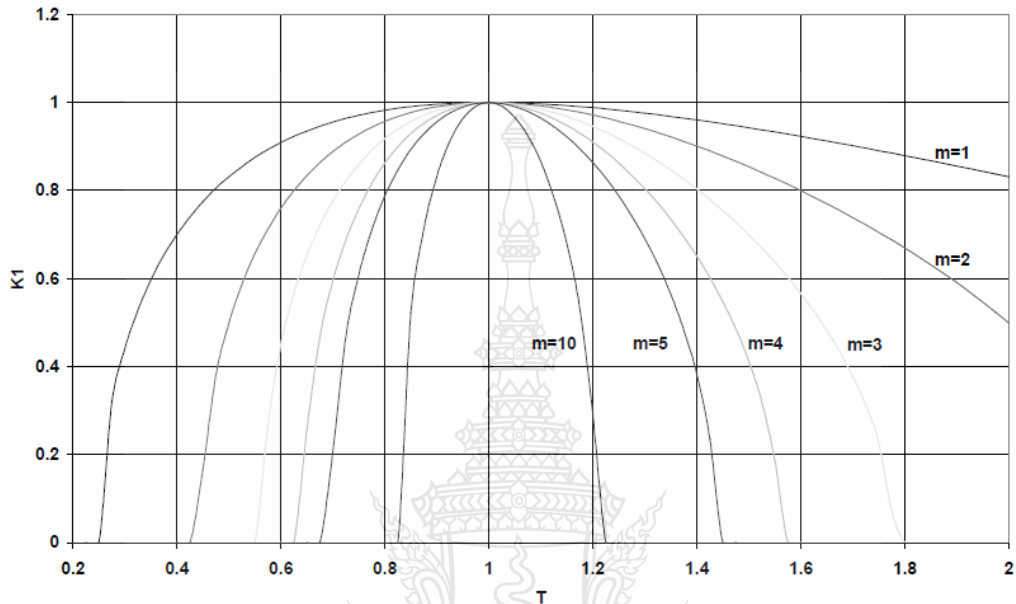
$$T = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} = G_L^2 \frac{C_2}{C_1} \quad (2.41)$$

การหาค่าที่เหมาะสมของ  $L_1$  หรือ  $L_2$  จากสมการข้างบน โดยกำหนดให้  $C_1$  และ  $C_2$  มีค่าคงที่

$$G_L = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} T \propto \sqrt{T} \quad (2.42)$$

เนื่องจาก  $V_1$  มีค่าคงที่เช่นกัน จากสมการ (2.39) และสมการ (2.42)

$$v_2 \propto G_T \sqrt{T} \quad (2.43)$$



ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยาย  $K_1$  กับอัตราส่วนการจูน  $T$  ที่  $m$  ค่าต่างๆ [6]

หมายความว่าเมื่อปรับค่า  $T$  โดยการเปลี่ยนค่า  $L_1$  หรือ  $L_2$  เป็นการปรับปรุงค่าจากกราฟต้นฉบับจากรูปที่ 2.9 โดยตัวประกอบ  $\sqrt{T}$  ดังนั้นค่าตัวแปร  $K_1$  หาได้จาก

$$v_2 \propto K_1 = G_T \sqrt{T} \quad (2.44)$$

จากภาพที่ 2.9 จะเห็นได้ชัดว่า  $V_2$  มีค่าสูงสุดเมื่อ  $T = 1$  โดยไม่ขึ้นกับค่า  $m$  (อย่างไรก็ตาม  $m$  จะต้องเป็นจำนวนเต็มตามที่แสดงให้เห็นแล้วก่อนหน้านี้) ในทางปฏิบัติบนขดลวดทดสอบของจริง ไม่สามารถตัดแปลงขดลวดด้านทุติยภูมิได้โดยง่าย แต่แทปด้านปฐมภูมิสามารถปรับเลื่อนได้โดยไม่มีปัญหาอะไร ด้วยข้อควรพิจารณาต่างๆ ข้างต้น เมื่อปรับจูนโดยการเลื่อนแทปของขดลวดปฐมภูมิจะได้สมรรถนะที่ดีที่สุดเมื่ออัตราส่วนการจูน  $T = 1$

การหาค่าที่เหมาะสมของ  $C_1$

เมื่อประเมินผลประโยชน์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่เกี่ยวข้องกับการปรับเปลี่ยนค่า  $C_1$  เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องให้พลังงาน  $E_0$  ค่าเดียวกันกับพลังงานที่ใช้ในการสะสมของประจุเริ่มต้น  $q_0$  บน  $C_1$  และเป็นข้อกำหนดว่า  $V_1$  คือค่าแรงดันเริ่มต้นตกคร่อม  $C_1$

$$E_0 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 \quad (2.45)$$

จากสมการ (2.39) และสมการ (2.45) เมื่อกำจัดค่า  $V_1$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2E_0}{C_1}} G_T \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (2.46)$$

แทนสมการ (2.30) ในสมการก่อนหน้า และเมื่อกำจัด  $C_1$

$$V_2 = \sqrt{2E_0} \sqrt{\frac{L_1 T}{L_2 C_2}} G_T \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $L_1, L_2, C_2$  และ  $E_0$  มีค่าคงที่ จะเห็นว่า  $V_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $K_2$  สามารถแทนได้ด้วย

$$v_2 \propto K_1 = \sqrt{T} G_T \quad (2.48)$$

จะเห็นว่าจะได้ผลลัพธ์เดียวกับหัวข้อก่อนหน้า สำหรับ  $K_1$  (รูปที่ 2.9) สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน ดังนั้นเมื่อจูนโดยการปรับค่าตัวเก็บประจุด้านปฐมภูมิ จะได้ค่าที่มีสมรรถนะดีที่สุดเมื่ออัตราส่วนการจูน  $T = 1$

การหาค่าที่เหมาะสมของ  $C_2$

สมการ (2.39) ได้รับอิทธิพลจากค่า  $C_2$  ที่อยู่ในพจน์ของ  $G_T$  เท่านั้น ดังนั้นผลลัพธ์ต่างๆ ที่แสดงในรูป 2.9 สามารถปรับใช้ได้โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงใดๆ ถ้าหากการหาค่าที่เหมาะสมของขดลวดเทสล่ากระทำโดยการปรับค่าความจุไฟฟ้าของขั้วบนสุดของขดลวดด้านทุติยภูมิจากทั้งหมดที่

กล่าวมา การปรับปรุงที่ดีที่สุด (ในพจน์ของแรงดันด้านทุติยภูมิ) จากเงื่อนไข โดยทั่วไป  $T = 1$  สามารถทำให้  $T = 0.541$  ได้โดยลดค่า  $C_2$  (ดูตารางที่ 2.1) ในขณะที่สามารถปรับปรุงอัตราขยายเพิ่มขึ้นได้เพียง 18% ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงต้องมีค่า  $K = 0.546$  ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาทางด้านวิศวกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Dielectric breakdown ระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ และสร้างผลในทางปฏิบัติที่เป็นปัญหามาก

ตารางที่ 2.1 อัตราขยายสูงสุดเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนการจูนและสัมประสิทธิ์การคับปลิง

$m$	1	2	3	4	5	10
$T$	0.541	0.766	0.863	0.912	0.939	0.982
$k$	0.546	0.364	0.271	0.215	0.178	0.095
$G_T$	1.180	1.073	1.039	1.024	1.016	1.005

### 2.3.3 เงื่อนไขต่างๆ ที่จะทำให้ส่งถ่ายพลังงานได้อย่างสมบูรณ์

วิธีการหนึ่งซึ่งแตกต่างไป คือการนิยาม โหมดการทำงานตามหน้าที่ที่เหมาะสมของขดลวด เทสค่า ว่าเป็นสถานะที่ประจุไฟฟ้าเริ่มต้นทั้งหมดบน  $C_1$  ถูกถ่ายโอนไปยัง  $C_2$  ทั้งหมดภายในช่วงเวลา ที่สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การถ่ายโอนพลังงานอย่างสมบูรณ์ที่อยู่บน  $C_1$  ไปยัง  $C_2$  หมายถึงแรงดัน  $V_2$  ซึ่งถูกสร้างขึ้นจะมีค่าสูงสุด จัดใหม่เป็นไปตามสมการ (2.34) และจัดสมการนี้ใหม่จะได้

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{a + 2b + 1}{a} \quad (2.49)$$

สามารถแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขเพิ่มเติมซึ่งจำเป็นเพื่อให้ประจุทั้งหมดที่อยู่บน  $C_1$  เคลื่อนที่ไปยัง  $C_2$  คือ

$$w_1 = w_2 \quad (2.50)$$

นั่นก็คือ อัตราส่วนการจูนต้องมีค่า  $T = 1$  แทนค่าสมการ (2.50) ในสมการคุณลักษณะ (2.20) จะทำให้หาค่ารากของสมการได้โดยง่ายดังต่อไปนี้

$$w_1 = \frac{\omega_1}{\sqrt{1+k}}$$

$$w_1 = \frac{\omega_1}{\sqrt{1-k}} \quad (2.51)$$

โดยใช้เงื่อนไขตามสมการ (2.49) และสมการ (2.51) ค่าต่างๆ ของ  $k$  ที่จะทำให้การถ่ายโอนพลังงานเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์สามารถหาได้จาก

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{a+2b+1}{a} = \frac{\sqrt{1+k}}{\sqrt{1-k}} \quad (2.52)$$

นั่นคือ

$$k = \frac{c^2 - a^2}{c^2 + a^2} \quad (2.53)$$

เมื่อ

$$c = a + 2b + 1 \quad b = 1, 2, 3, \dots \quad (2.54)$$

กล่าวโดยสรุปว่า อัตราส่วนการจูน  $T = 1$  และค่า  $k$  ซึ่งหาได้จากสมการ (2.53) เพียงพอที่จะประกันว่าจะทำให้ได้ทั้งแรงดันสูงสุดทางด้านทุติยภูมิและมีการถ่ายโอนพลังงานได้อย่างสมบูรณ์ทางด้านปฐมภูมิ การเลือกค่าของ  $a$  และ  $c$  (และจะสามารถนำมาหาค่า  $k$  ได้) จะมีผลกระทบเฉพาะตำแหน่งของช่วงระยะเวลาที่การถ่ายโอนพลังงานเป็นไปได้

ตารางที่ 2.2 ค่าบางค่าของ  $k$  ที่ทำให้การถ่ายโอนพลังงานเป็นไปอย่างสมบูรณ์เมื่อ  $T = 1$

a	c	k	Notch	Cycles
1	2	0.600	1	1.0
2	3	0.385	1	1.5
3	4	0.280	1	2.0
4	5	0.220	1	2.5
5	6	0.180	1	3.0
6	7	0.153	1	3.5
7	8	0.133	1	4.0
8	9	0.117	1	4.5
9	10	0.105	1	5.0
10	11	0.095	1	5.5
11	12	0.087	1	6.0
12	13	0.080	1	6.5
13	14	0.074	1	7.0
14	15	0.069	1	7.5

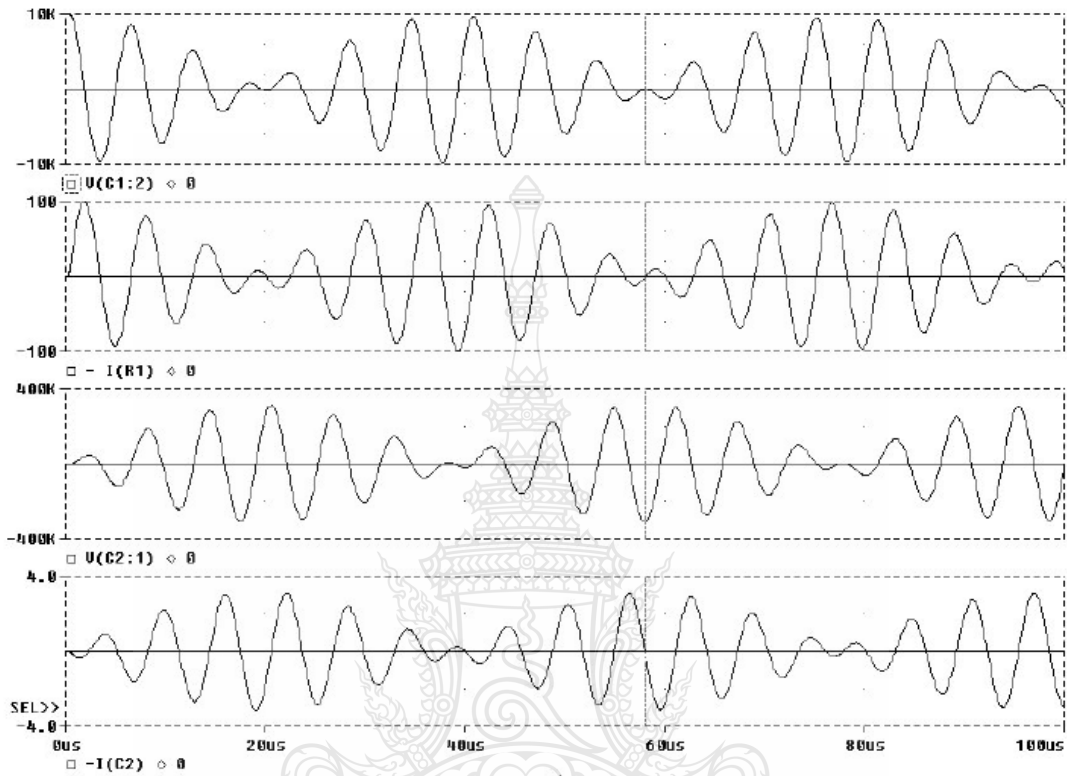
a	c	k	Notch	Cycles
1	4	0.882	2	2.0
2	5	0.724	2	2.5
4	7	0.508	2	3.5
5	8	0.438	2	4.0
7	10	0.342	2	5.0
8	11	0.308	2	5.5
10	13	0.257	2	6.5
11	14	0.237	2	7.0
13	16	0.205	2	8.0
14	17	0.192	2	8.5
16	19	0.170	2	9.5
17	20	0.161	2	10.0
19	22	0.146	2	11.0
20	23	0.139	2	11.5

ในตารางที่ 2.2 แสดงรายการของค่า  $k$  บางค่าที่ได้จากสมการ (2.53) ค่า Notch ที่แสดงไว้เป็นค่าหนึ่งของตัวอย่างการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่จำนวน Cycle อ้างถึงจำนวน Cycle ของการอสซิลเลตด้านปฐมภูมิ (กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ) หลังจากพลังงานถูกถ่ายโอนอย่างสมบูรณ์ จะเห็นว่าจำนวน Cycle หาได้ง่ายๆ จาก  $c/2$  ในขณะที่จำนวน Notch หาได้จากค่า  $b$  (สมการ (2.54)) ณ ช่วงเวลาที่ประจุไฟฟ้าเริ่มต้นทั้งหมดถูกถ่ายโอนจากด้านปฐมภูมิไปยังด้านทุติยภูมิ จะได้ว่า (ดูรูปที่ 2.10)

$$V_{C_1} = 0 \quad V_{C_2} = 2 \quad I_1 = 0 \quad I_2 = 0 \quad (2.55)$$

ภายใต้เงื่อนไข  $T = 1$  จากสมการ (2.29) จะได้ว่า

$$v_2(t)|_{T=1} = V_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2} t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2} t\right) \quad (2.56)$$



ภาพที่ 2.10 การถ่ายโอนพลังงานรวมหลังจาก 10 Cycle ของกระแสด้านปฐมภูมิ ที่มี  $k = 0.161$  ซึ่งสอดคล้องกับ Notch อันดับที่ 2 [6]

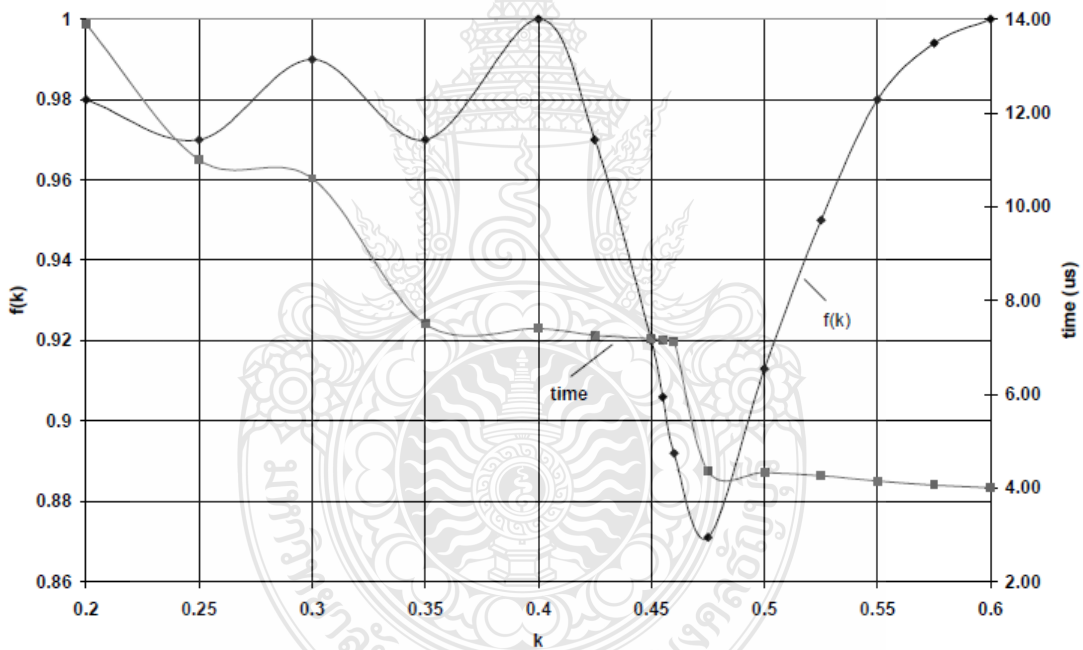
สมมติว่าเป็นวงจรไร้ความสูญเสีย และ  $T = 1$  การปรับค่า  $k$  จะไม่มีอิทธิพลกับการได้ค่าสูงสุดของ  $V_2$  การวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ตั้งใจจำกัดที่  $0.2 < k < 0.6$  เนื่องจากเป็นช่วงปกติที่ใช้กับขดลวดเตสลา เนื่องจากพลังงานที่เก็บอยู่ใน  $C_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของแรงดันคร่อม  $C_2$  แทนได้ด้วยฟังก์ชัน  $f(k, t)$

$$f(k, t) = \left[ \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2} t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2} t\right) \right]^2 \quad (2.57)$$



ซึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์ของพลังงานรวมจากการวัดโดยตรงใน  $C_2$  รูปที่ 2.10 แสดงค่าสูงสุดซึ่งถูกสันนิษฐานขึ้นตามสมการ  $f(k, t)$  ภายใน Notch ลำดับแรกของมันที่ค่า  $k$  แตกต่างกัน ช่วงเวลาเมื่อมีค่าถึงค่านี้ก็จะถูกรายงานค่าให้ทราบด้วยเช่นกัน มันเป็นการง่ายที่จะเห็นว่า กรณีสัมประสิทธิ์การคับปลิ่งมีค่าต่ำกว่า 0.43 พลังงานที่เหลืออยู่ใน  $C_1$  จะมีค่าน้อยกว่า 4% ถ้าใช้พลังงานเท่ากันในกรณี  $0.53 < k < 0.6$  จะมีสมรรถนะที่เลวร้ายที่สุดกรณี  $0.43 < k < 0.53$  ซึ่งจะมีพลังงานเหลือสูงสุดบน  $C_1$  13%

ในขดลวดทดสอบของจริง วงจรเรโซแนนซ์เป็นแบบวงจรที่มีการสูญเสียและเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดด้านทุติยภูมิในเวลาอันสั้นที่สุดเพื่อลดการสูญเสียให้มีค่าต่ำที่สุดในทางกลับกันสัมประสิทธิ์การคับปลิ่งไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยไม่ก่อให้เกิด Dielectric breakdown ทางด้านขดลวดทุติยภูมิหรือระหว่างด้านทุติยภูมิกับปฐมภูมิ



ภาพที่ 2.11 พลังงานที่ถูกถ่ายโอนและเวลาในการถ่ายโอนที่สัมประสิทธิ์การคับปลิ่งค่าต่างๆ[6]

เพื่อให้ได้สมรรถนะการทำงานมีค่าเหมาะสม สามารถใช้กลยุทธ์ดังต่อไปนี้ได้

- จูนขดลวดด้านปฐมภูมิให้ได้  $T = 1$
- เพิ่มค่า  $k$  ให้มีค่ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
- หลีกเลี่ยงค่า  $k$  ในช่วงระหว่าง 0.43-0.53

- ไม่ต้องสนใจในการหาค่า  $k$  ที่เหมาะสมในเทอมของการถ่ายโอนพลังงานรวม

### 2.3.4 ค่าเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าของขดลวดโซลินอยด์ซึ่งมีการพันแบบปิด

การจำลองขดลวดเทสล่า คือ ความสามารถในการทำนายความถี่เรโซแนนซ์ (ค่าความถี่จริง) ของขดลวดด้านทฤษฎีที่ด้านบนสุดต่ออยู่กับโหลดกระบวนการนี้ได้กระทำมาแล้ว และอยู่บนพื้นฐานการใช้ค่าเหนี่ยวนำกระแสตรงสมมูล และค่าความจุไฟฟ้าของตัวขดลวดเองและประยุกต์ใช้สมการ  $C_s = KD$  ประกอบกับผลลัพธ์การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวมันเองจากการทดลองซึ่งนำเสนอในรูปแบบตาราง ผลลัพธ์เหล่านี้ใช้กับขดลวดโซลินอยด์ที่นำกระแสไฟฟ้าที่ประมาณว่ามีความสม่ำเสมอที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุดของมัน ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่าไม่ใช่กรณีที่เกิดขึ้นกับขดลวดเทสล่าขดลวดหลายขดลวดที่ไม่มีโหลดที่มี  $h/d$  ค่ามากถูกกระตุ้นใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ของมันจะมีโครงสร้างการจ่ายของกระแสแบบ Co-sinusoidal ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ฐานของขดลวด ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำปรากฏของขดลวดจะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ขดลวดทำงานที่ความถี่ต่ำกว่านี้กรณี  $h/d$  มีค่าน้อยลง ตำแหน่งกระแสค่าสูงสุดจะเลื่อนขึ้นไปทางกึ่งกลางของขดลวดและแอมพลิจูดของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 40% จากกระแสที่ฐานขดลวดกรณี  $h/d$  มีค่ามาก มีผลต่อการใช้ขดลวดมากกว่าค่าความถี่ต่ำ ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมสมมูลที่ความถี่เรโซแนนซ์โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.7L_{dc}$  ( $h/d$  มีค่ามากและกระแสสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งระดับสูง) Breit ได้ตีพิมพ์บทความทางทฤษฎีเกี่ยวกับขดลวดโซลินอยด์ที่อยู่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุดของมันเองในกรณีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดมีค่าน้อยมากๆ ประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรก วิธีการเดียวกันนี้สามารถนำมาขยายผลใช้กับกรณีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดค่าใดๆ ก็ได้ การกระจายตัวของคาร์รีแอกแตนซ์ในทางกายภาพสามารถหามาได้โดยวิธี Elliptic integrals บนวงแหวนประจุและวงแหวน Current filament และสมการดิฟเฟอเรนเชียลสามารถสร้างขึ้นโดยหลักพื้นฐานของการอนุรักษ์ประจุและกฎต่างๆ เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก

### ค่าความจุไฟฟ้าในทางกายภาพ

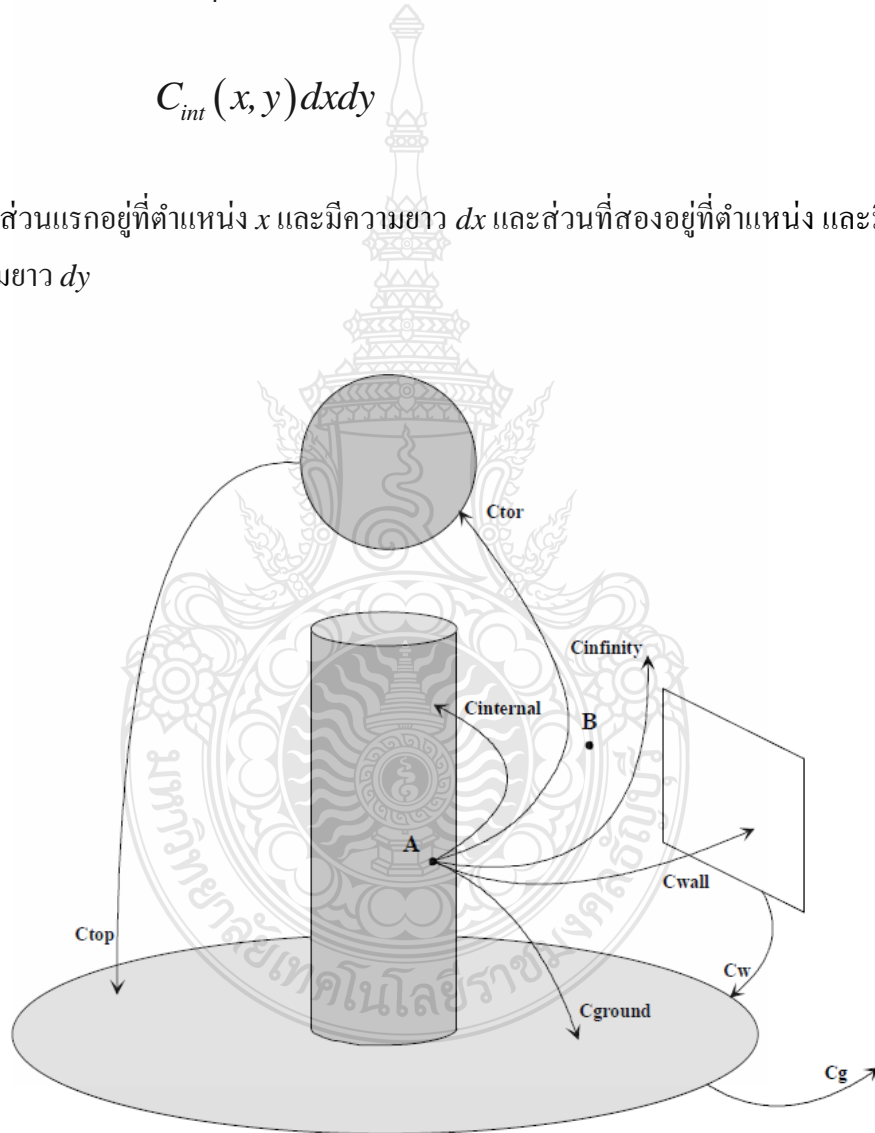
ภาพที่ 2.12 แสดงเส้นทางหลักๆ ของฟลักซ์สนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากจุดๆ หนึ่ง A บนพื้นผิวของขดลวดที่วางอยู่บนระนาบดิน แต่ละเส้น A-B สามารถแทนได้ด้วยค่าความจุไฟฟ้าสมมูลที่มีค่าขนาดความจุหาได้จากอัตราส่วนระหว่างประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำคร่อม A-B และฟลักซ์ที่เชื่อมต่อระหว่าง 2 จุด สำหรับแต่ละส่วนเล็กๆ ของขดลวดสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าภายนอกของขดลวด  $C_{ext}$  ได้จากการต่อขนานกันของ  $C_{ground}$ ,  $C_{wall}$  และ  $C_{infinity}$  ซึ่งแทนด้วย

$$C_{ext}(x)dx \quad (2.58)$$

เมื่อส่วนแรกอยู่ที่ตำแหน่ง  $x$  และมีความยาว  $dx$  ค่าความจุไฟฟ้าภายนอก คือ ความสูงที่ฐานของขดลวดเนื่องจากตัวมันเองอยู่ใกล้ชิดกับระนาบดินและส่วนบนสุดของขดลวด เนื่องจากเป็นขดลวดแบบปลายเปิด ค่าความจุไฟฟ้าภายในระหว่างขดลวด 2 ส่วน  $C_{int}$  สามารถนิยามได้จาก

$$C_{int}(x,y)dxdy \quad (2.59)$$

เมื่อส่วนแรกอยู่ที่ตำแหน่ง  $x$  และมีความยาว  $dx$  และส่วนที่สองอยู่ที่ตำแหน่ง  $y$  และมีความยาว  $dy$



ภาพที่ 2.12 การจำลองค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดด้านทุติยภูมิ[6]

โหนดด้านบนสุด (ทอรอยด์) มีค่าความจุไฟฟ้าของมันเองเทียบกับระนาบดินซึ่งสามารถรวบรวมเป็นค่าเดียวค่าหนึ่ง  $C_{tor}$  ได้ แต่มันก็มีค่าความจุไฟฟ้าพิเศษเกิดขึ้นระหว่างตัวมันเองกับส่วนเล็กๆ ของขดลวดที่ตำแหน่ง  $x$  และมีความยาว  $dx$  ด้วยเหมือนกัน

$$C_{tor}(x)dx \quad (2.60)$$

ค่าความเหนี่ยวนำทางกายภาพ

ทุกๆ ส่วนของขดลวดที่ตำแหน่ง  $x$  และมีความยาว  $dx$  อยู่ภายใต้ EMF ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากองค์ประกอบของจุดอื่นๆ ทั้งหมดของขดลวดด้วย จึงทำให้มันทำตัวเหมือนแหล่งกำเนิดกระแสองค์ประกอบของกระแส  $I(y)$  ที่ไหลผ่านจุดๆ หนึ่งที่ตำแหน่ง  $y$  และมีความยาว  $dy$  คือ

$$M(x, y)dx dy \frac{dI(y, t)}{dt} \quad (2.61)$$

เมื่อ  $M(x, y)$  คือสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำร่วมระหว่าง  $x$  และ  $y$  ขดลวดปฐมภูมิถูกควบคุมให้ทำงานอย่างดีภายใต้ความถี่เรโซแนนซ์ของมันเอง และดังนั้นจะทำให้ EMF ทางด้านทุติยภูมิสามารถลดรูปเป็นตัวเหนี่ยวนำแบบ Lumped

$$M_p(x)dx \frac{dI_p(t)}{dt} \quad (2.62)$$

เมื่อ  $I_p$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ

สมการสำหรับการคับปลิง

การอนุรักษ์ของประจุ จะเกิดขึ้นสำหรับแต่ละส่วนของขดลวด ถ้าหากกระแสสุทธิที่ไหลเข้าสู่ส่วนนั้นของขดลวดมีค่าเท่ากับอัตราเพิ่มของประจุ  $Q$  นั่นก็คือ

$$\frac{dq}{dt} = I_s(x, t) + I_c(x, t) = I(x, t) - I(x + dx, t) \quad (2.63)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 I_s(x,t) &= C_{ext}(x) \frac{d}{dt} v(x,t) dx \\
 I_c(x,t) &= \frac{d}{dt} dx \int_0^h C_{int}(x,y) [V(x,t) - V(y,t)] dy
 \end{aligned} \tag{2.64}$$

$I_s$  และ  $I_c$  คือ กระแสที่เคลื่อนย้ายเข้าสู่ความจุไฟฟ้าภายนอกในตามลำดับ ในขณะที่  $h$  คือความสูงของขดลวด และในขณะที่ EMF สุทธิ ซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นมาในส่วนหนึ่งของขดลวดหาได้จากกรอินทิเกรตสมการ (2.61) บนแหล่งกำเนิดกระแสทั้งหมดที่ตำแหน่ง  $y$  ไปตามแนวขดลวด

$$dV(x,t) = - \frac{d}{dt} dx \int_0^h M(x,y) I(y,t) dy \tag{2.65}$$

สมการ (2.63) และ (2.65) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} = -j\omega C_{ext}(x) \bar{V}(x) - j\omega \int_0^h C_{int}(x,y) [\bar{V}(x) - \bar{V}(y)] dy \tag{2.66}$$

$$\frac{d\bar{V}(x)}{dx} = -j\omega \int_0^h M(x,y) \bar{I}(y) dy \tag{2.67}$$

เมื่อ  $V$  และ  $I$  แทนแอมพลิจูดของฟังก์ชันไซน์ที่มีความถี่เชิงมุม  $\omega$  สมการเหล่านี้แทนชุดของสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้อย่างสมบูรณ์ และไม่ขึ้นต่อกันในแต่ละความถี่ ผลเฉลยของสมการเหล่านี้สำหรับที่  $\omega$  ที่กำหนดให้จะเป็นโมดูลของแอมพลิจูดกระแสและแรงดันขององค์ประกอบความถี่นั้นๆ เงื่อนไขการทำงานโดยทั่วไปของ

$$\bar{V}(0) = 0 \quad (\text{Inductive feed})$$

$$\bar{V}(0) = V_{in} \quad (\text{Best feed}) \quad (2.68)$$

$$\bar{I}(h) = j\omega C_{top} \bar{V}(h) + j\omega \int_0^h C_{tor}(x) [\bar{V}(h) - \bar{V}(x)] dx \quad (2.69)$$

สมมติฐานสถานการณ์การป้อนจากรฐาน (Base feed) ถูกใช้งาน ความถี่เรโซแนนซ์ด้านทุติยภูมิสามารถหาได้โดยการพลอตอัตราส่วนของ

$$\frac{\bar{V}(0)}{\bar{I}(0)} \quad (2.70)$$

ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่เห็นระหว่างฐานของขดลวดและพื้นดิน

#### ค่าความจุไฟฟ้าขนานสมมูล

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ความจุไฟฟ้าภายนอกสามารถแทนได้จากสมการ (2.64) เป็น

$$\bar{I}_s(x) = j\omega C_{ext}(x) \bar{V}(x) dx \quad (2.71)$$

เมื่อกระแส  $I_s$  แทนแวกเตอร์ของฟังก์ชันไซน์ กระแสสุทธิที่ไหลจากขดลวดไปยังระนาบดินกำหนดได้จากการอินทิเกรตของกระแส  $I_s(x)$  Contributions ทั้งหมด โดยกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าเหล่านี้ต้องมีค่าเท่ากับกระแสฐานที่ไหลใน  $I_{base}$  ดังนั้น

$$\bar{I}_{base} = \int_0^h \bar{I}_s(x) = j\omega \int_0^h C_{ext}(x) \bar{V}(x) dx \quad (2.72)$$

$$\bar{I}_{base} = j\omega C_{es} \bar{V}_{top} \quad (2.73)$$

จากสมการ (2.72) และ (2.73)  $\bar{I}_{base}$  สามารถกำจัดได้ และจะได้

$$C_{es} = \frac{1}{\bar{V}_{top}} \int_0^h C_{ext}(x) \bar{V}(x) dx \quad (2.74)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ลำดับแรก โดยปกติ  $C_{es}$  จะมีค่าน้อยกว่า 70% ของค่าความจุไฟฟ้ากระแสตรง

ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมสมมูล

แรงดัน ณ ตำแหน่งบนสุด  $C_{es}$  สามารถคำนวณได้จากอินทิเกรตของแรงดันคิฟเฟอร์เรนเชียลตลอดขดลวดทั้งขด นั่นก็คือ

$$\bar{V}_{top} = \int_0^h \frac{d\bar{V}(x)}{dx} dx \quad (2.75)$$

ใช้สมการ (2.67) เพื่อกำจัด  $\bar{V}(x)$

$${}^9 \bar{I}_{base} = \bar{I}(0)$$

$${}^{10} \bar{I}_{top} = \bar{V}(h)$$

$$\bar{V}_{top} = -j\omega \int_0^h \int_0^h M(x,y) \bar{I}(y) dy dx \quad (2.76)$$

เป็นไปได้ที่จะนิยามให้ความเหนี่ยวนำสมมูลแบบ Lumped เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดัน ณ ตำแหน่งบนสุด  $V_{top}$  ขณะขดลวดกำลังนำกระแสฐานค่าเดียวกับ  $I_{base}$  นั่นก็คือ

$$\bar{V}_{top} = -j\omega L_{es} \bar{I}_{base} \quad (2.77)$$

เมื่อ  $L_{es}$  คือความเหนี่ยวนำอนุกรมสมมูลของขดลวดที่ความถี่  $\omega$  กำจัด  $V_{top}$  โดยใช้สมการ (2.76) จะได้

$$L_{es} = \frac{1}{\bar{I}_{base}} \int_0^h \int_0^h M(x,y) \bar{I}(y) dy dx \quad (2.78)$$

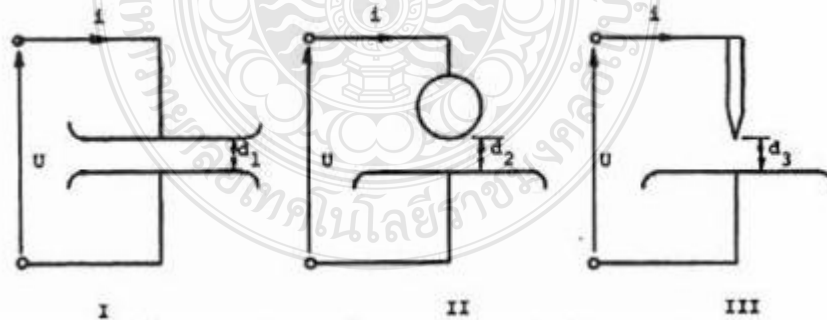
สำหรับขดลวดที่มีค่า  $h/d$  ปานกลางถึงสูง โดยทั่วไปจะมีค่า  $L_{es}$  อยู่ระหว่าง 70% และ 100% ของค่ากระแสตรงของขดลวด ในขณะที่กรณีมีค่า  $h/d$  ต่ำ จะทำให้ค่า  $L_{es}$  มีค่าอยู่ที่ราวๆ 20% การเพิ่มโหนด ณ ตำแหน่งบนสุดมีแนวโน้มทำให้ลักษณะของกระแสมีรูปแบบมากขึ้นและค่า  $L_{es}$  จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสตรงของมันมากๆ

## 2.4 ความเครียดสนามไฟฟ้า

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึง ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดเบรกดาวน์ หรือทำให้การฉนวนเสื่อมสภาพ ซึ่งจะมีหน่วยเป็น V/mm, k V/m หรือ k V/cm คือมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเล็กโทรด ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้า

โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (Uniform field) คือเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (Plate to plate) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า ( $E_b$ ) ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ ซึ่งพอจะเขียนเป็นเกณฑ์ทั่วไปได้ว่า

$$E_b = f(\text{ลักษณะแห่งเรขาคณิตอิเล็กโทรด, ลักษณะคุณสมบัติของไดอิเล็กทริกและเวลา})$$



ภาพที่ 2.13 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ กัน [17]

- I : สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- II : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly non-uniform field)
- III : สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly non-uniform field)



ถ้าป้อนแรงดันคิตอลทีอเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.13 จะพบว่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกควาน์ไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกควาน์สามารถวัดได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ามิใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักกำหนดหรือระบุด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่งระหว่างอเล็กโทรดในขณะที่เบรกควาน์เริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ หลายประการ

#### 2.4.1 สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (I)

สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึง สนามไฟฟ้าเท่ากันทุกจุด ดังเช่นในช่องระหว่างอเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E = \frac{U}{d} \quad (2.79)$$

- เมื่อ  $U$  คือ แรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอเล็กโทรด  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างอเล็กโทรด  
 $E$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ระหว่างอเล็กโทรด  
 $E_{max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

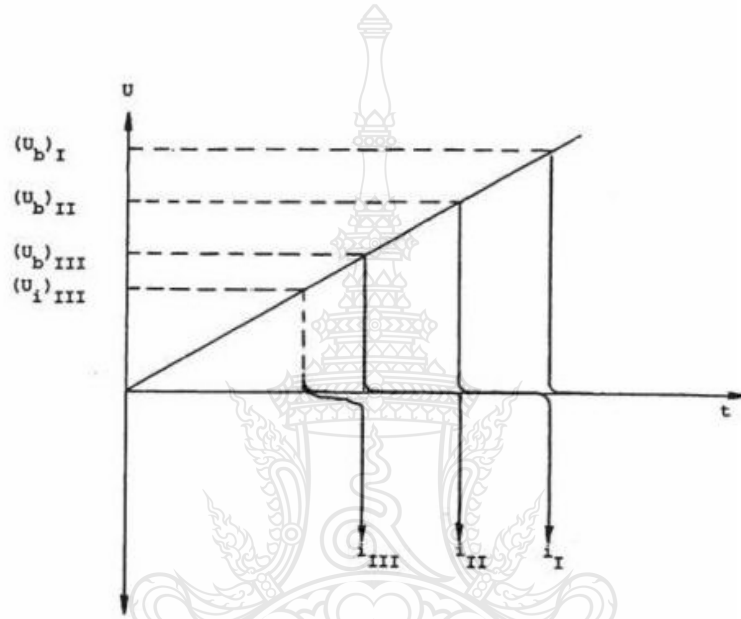
นั่นหมายความว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับอเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกควาน์หรือสปาร์กทันที ที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอเล็กโทรด (ซึ่งเท่ากันทุกจุด) ถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่ากระแสเบรกควาน์นี้จะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวจ่าย และวงจรภายนอกเท่านั้น ซึ่งก่อนจะเกิดเบรกควาน์นั้นค่ากระแสจะวัดไม่ได้ดังในรูปที่ 2.13 (แบบ I) และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดเบรกควาน์นี้ก็คือค่าความคงทนทางไฟฟ้า (Dielectric strength) หรือความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (2.80)$$

- เมื่อ  $U_b$  คือ แรงดันที่ทำให้เกิดเบรกควาน์ด้วยสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ

$E_b$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน ซึ่งเรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้า

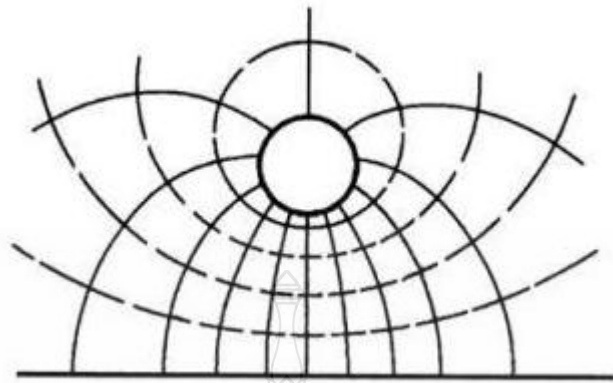
อย่างไรก็ตาม  $E_b$  นี้ ของไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งก็มีค่าไม่คงตัวเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ แม้แต่ความหนา หรือระยะห่าง  $d$  ที่ไม่เท่ากับ  $E_b$  ก็ไม่เท่ากัน ฉะนั้นในมาตรฐานที่กำหนดค่าความคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน มักจะกำหนดความหนาของไดอิเล็กทริกไว้ด้วยเสมอ



ภาพที่ 2.14 การเปรียบเทียบแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนในไดอิเล็กทริกตามลักษณะทางไฟฟ้า[17]

#### 2.4.2 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ (II, III)

สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะแ่งเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.13 II ถ้าเขียนเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า จะได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 สนามไฟฟ้าและเส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า[17]

\_\_\_\_\_ เส้นสนามไฟฟ้า  
 ..... เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า

ในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{U}{d\eta^*} \quad (2.81)$$

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \quad 0 < \eta \leq 1$$

โดยที่  $E_{av}$  คือ ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $U/d$

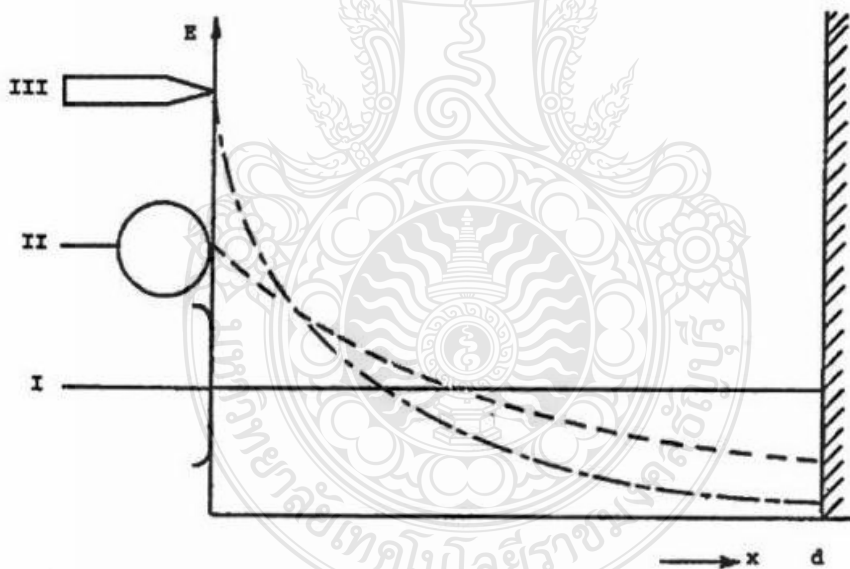
จึงอาจกล่าวได้ว่า ก็คือกรณีนี้แสดงให้เห็นทราบว่าอิเล็กโทรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเล็กน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (แบบ II) ได้คือ [2]

$$E_b = \frac{U_b}{d\eta^*}$$

$$\text{และค่าแรงดันเบรกดาวน์ } U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^* \quad (2.82)$$

แสดงว่าอิเล็กโตรดที่มีค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา คือไม่มีดีสชาร์จนำหน้า (Pre discharge) เกิดก่อนเบรกดาวน์ ดังอิเล็กโตรดในภาพที่ 2.13 II กล่าวคือก่อนเกิดเบรกดาวน์จะไม่ปรากฏว่ามีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโตรด และลักษณะสนามไฟฟ้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าความคงทน คือ  $E_{max}=E_b$

ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง (Highly no uniform field) ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้กับผิวอิเล็กโตรด ที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูปที่ 2.13 III เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังเส้นกราฟความเครียดสนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบดังภาพที่ 2.16 อิเล็กโตรดแบบ III นี้ ถึงแม้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าถึงค่าวิกฤตแล้วก็ตาม เบรกดาวน์จะยังไม่เกิด แต่จะเกิดโคโรนา [2]



ภาพที่ 2.16 สนามไฟฟ้ากระจายเปรียบเทียบของอิเล็กโตรดลักษณะต่างๆ[17]

บริเวณที่ผิวอิเล็กโตรดเป็นบริเวณที่มีความเครียดไฟฟ้าสูงสุด ส่วนบริเวณอื่นๆ ที่ห่างออกไป จะมีความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงและโคโรนาไม่เกิด ฉะนั้นในแถบระหว่างอิเล็กโตรดจะเกิดดีสชาร์จที่ไม่สมบูรณ์ เรียกว่าดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge = PD) ปรากฏการณ์อาจเกิดขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ จึงทำให้มีกระแสไหลในวงจรที่ป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรด กระแสนี้จะเกิดขึ้นและวัดได้ก่อนเกิดเบรกดาวน์ เรียกว่ากระแสโคโรนา หรือกระแสพรีดีสชาร์จ ดังในภาพที่ 2.13

### III

การเกิดโคโรนาจะทำให้สนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตเปลี่ยนไป เพราะมีประจุค้าง (Space charge) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดจะคำนวณจากสมการ (2.81) นี้อาจใช้คำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าที่แรงดันโคโรเริ่มเกิดได้ เพราะสนามไฟฟ้าแห่งเรขาคณิตยังไม่เปลี่ยนแปลง

$$E_i = \frac{U_i}{d\eta^*} \quad (2.83)$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่โคโรนาเริ่มเกิด

$U_i$  คือ แรงดันป้อนที่โคโรนาเริ่มเกิด (Corona inception voltage)

สมการ (2.82) ใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีประจุค้างระหว่างอิเล็กโทรด (Free of space charge) คือ ใช้สำหรับคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแรงดันเริ่มต้น (Inception voltage, starting voltage, threshold voltage) ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแถบ

สำหรับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ที่เกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมและทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วมกับทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

คุณลักษณะ	ทรงกลมซ้อนศูนย์กลางร่วม	ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม
$E_{max}$	$\frac{U}{r_1 \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)}$	$\frac{U}{r_1 \ln \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)}$
$\eta^*$	$\frac{r_1}{r_2}$	$\frac{r_1 \ln \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right)}{(r_1 - r_2)}$

## 2.5 รายละเอียดส่วนประกอบของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง

### 2.5.1 กราวด์อ้างอิง (RF Ground)

กราวด์อ้างอิงถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ทำให้การทำงานของหม้อแปลงมีประสิทธิภาพสูงสุด กราวด์ที่นำมาใช้งานจำเป็นจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedence) ที่มีค่าต่ำมากๆ จึงจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานกับหม้อแปลง และห้ามที่จะนำหม้อแปลงไปต่อรวมกับกราวด์ของบ้าน เพราะจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานอยู่ และยังรวมไปถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ ที่ต่อกราวด์รวมกันอาจมีผลกระทบได้ และเมื่อทำการต่อกราวด์ที่มีคุณภาพดีให้กับหม้อแปลงก็จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของหม้อแปลง

### 2.5.2 แยกป้องกัน (Safety Gap)

การทำงานของหม้อแปลงที่แรงดันของด้านทุติยภูมิ บ้างครั้งมีแรงดันสูงมากกลับไปยังแหล่งจ่าย (Supply) ได้ ความผิดพลาดของแรงดันสูงๆ ที่เกิดขึ้นบ่อยๆ เรียกว่าคิกแบล็ค (Kickback) แยกป้องกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น และทำการออกแบบขึ้นมาป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแหล่งจ่าย (Power Supply) ได้เนื่องจากการคิกแบล็คปกติติดตั้งกับหม้อแปลงน็อนด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง แยกป้องกันมีความแตกต่างกับแยกหลัก (Main Gap) เพราะแยกป้องกันจะเกิดความร้อนขึ้นบางครั้งบางคราวเท่านั้น การปรับแต่งแยกป้องกัน โดยปกติจะปรับแต่งให้เพียงพอกับการป้องกันแหล่งจ่าย การปรับตั้งระยะขอบแยกป้องกัน สำหรับหม้อแปลงน็อนมีขนาดตั้งแต่ 9, 12 หรือ 15 kV ปกติจะใช้ระยะขอบ คือ 3/8 นิ้วก็เพียงพอ ถ้าปรับตั้งแล้วไม่เกิดการสปาร์ก (Spark) เลยหรือเกิดขึ้นน้อยครั้ง ก็ให้ทำการปรับเข้ามาอีกเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเกิดการสปาร์กอย่างสม่ำเสมอ ก็ให้ทำการขยายออกอีกเพียงเล็กน้อย

### 2.5.3 สปาร์กแกป (Spark Gap)

สปาร์กแกปจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ความเร็วสูง ตัวสปาร์กต้องครอบคลุมระดับแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ไม่ต่างไปจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) การออกแบบต้องสามารถเป็นสวิตช์ (Switch) ที่ระดับกำลังไฟฟ้าสูงๆ อย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่าสปาร์กแกป เมื่อแรงดันคร่อมสปาร์กแกปมีค่าสูงเพียงพอจะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างตัวนำของแกปจะเริ่มเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) หากว่าการเกิดไอออไนซ์ที่เพิ่มขึ้นเพียงพอจะทำให้เกิดเป็นสื่อที่แกปกระโดดไปยังอีกแกปหนึ่ง เมื่อแรงดันที่คร่อมสปาร์กแกปตกลงจะทำให้การไอออไนซ์ลดลงด้วยและแกปก็จะกลับสภาพเดิม คือเปิดวงจร (Open Circuit) การดับของอาร์ค (Arc) จะเป็นไป

ตามเวลาที่กำหนดให้ดับ แกปจะต้องมีความแข็งแรงที่จะทำการหยุดเป็นตัวนำที่รวดเร็วได้โดยจำนวนของแกปที่ต่ออนุกรมอยู่ ความร้อนและไอออน (Ion) จะเกิดขึ้นและแผ่ขยายออกไปเต็มพื้นที่ถ้ามีอากาศเป่าที่แกปก็จะทำให้การดับอาร์คทำได้ดีขึ้น โดยอากาศจะเป็นตัวช่วยทำให้การเคลื่อนที่ของไอออนร้อน (Hot Ion) ที่เป็นสื่อในแกปเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น การต่อแกปแบบอนุกรมจะเรียกว่า สเตตริกแกป (Static Gap) และยังมีอีกชนิดคือ โรตารีแกป (Rotary Gap) จะมีส่วนประกอบคือหนึ่งคู่ตัวนำที่อยู่กับที่ และหลายคู่ตัวนำที่เคลื่อนที่ด้วยการหมุน โดยมีข้อแม้ว่าระหว่างแกปหนึ่งคู่ของตัวนำที่หมุนจะต้องตรงกันหรือเป็นแนวเดียวกันกับตัวนำที่หยุดนิ่ง จะทำการดับอาร์คโดยการทำงานของตัวนำที่เคลื่อนที่ สำหรับแกปของสเตตริกแกปที่นำมาต่ออนุกรมกันที่ใช้หม้อแปลงน็ออนเป็นแหล่งจ่ายจะมีจำนวนและขนาดตัวนำขึ้นอยู่กับระดับกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงน็ออนสามารถดูได้จาก ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนาดของหม้อแปลงน็ออน

แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง	จำนวนของตัวนำ	จำนวนของสปาร์กแกป
9kV	7	6
12 kV	9	8
15 kV	11	10

ตัวนำที่ใช้ทำแกปทำจากน็อตสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ระยะห่างระหว่างแกปตัวนำจะอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.03 นิ้ว แกปใช้ได้กับขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1.5 kW ขึ้นไป

#### 2.5.4 ทอรอยด์ (Toroid)

ทอรอยด์ของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูงมีหน้าที่ต่างๆ ดังนี้

ก) ทอรอยด์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง เป็นส่วนช่วยให้เกิดการเรโซแนนซ์ ถ้าทอรอยด์มีขนาดใหญ่ก็จะได้อำนาจของตัวเก็บประจุที่มากด้วย เมื่อขดลวดทำงานก็จะทำให้เกิดหมอกอากาศของการไอออไนซ์ขึ้นรอบๆ จุดต่อของทอรอยด์ แต่ถ้าทำการต่อทอรอยด์ที่จุดต่อจะทำให้การไอออไนซ์มีความราบเรียบและสมบูรณ์มากขึ้น

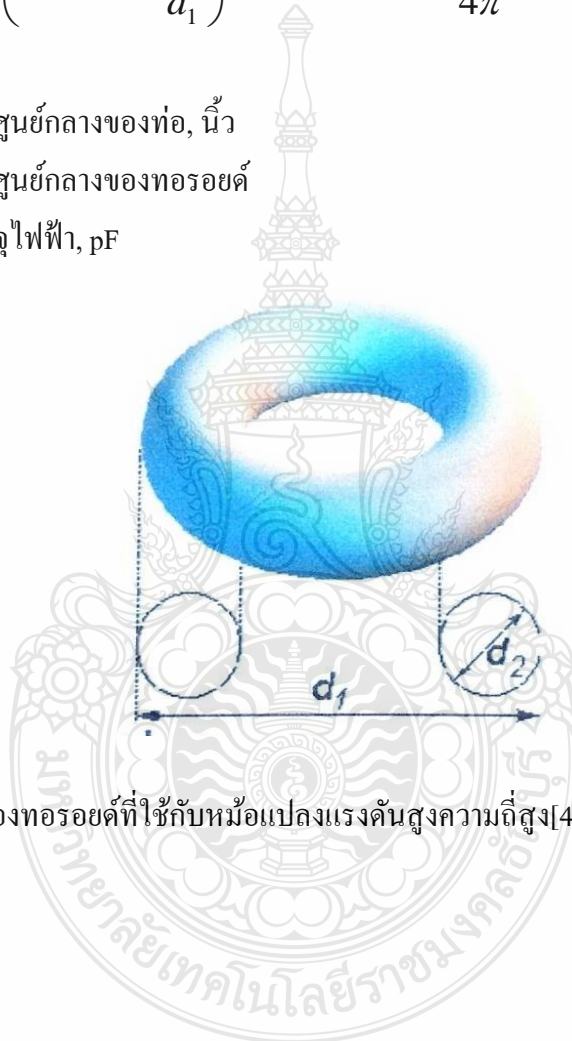
ข) ทอรอยด์จะทำให้มีเสถียรภาพขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงคือพยายามทำให้แรงดันลาดเอียง (Voltage Gradient) ลดลงอย่างมาก ในส่วนของระดับแรงดันที่เกิดบนจุดต่อทอรอยด์จะกลายเป็นแรงดันที่มีค่าสูงมาก

ค) ทอรรอยด์ทำหน้าที่ช่วยในการสร้างสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆ ส่วนบนสุดที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

จากที่กล่าวมาสามารถหาค่าของตัวเก็บประจุได้จากสมการ 2.84 ดังภาพที่ 2.17

$$C = 1 + \left( 0.2781 - \frac{d_2}{d_1} \right) \times 2.8 \times \frac{2\pi \times (d_1 - d_2) \times \frac{d_2}{d_1}}{4\pi} \quad (2.84)$$

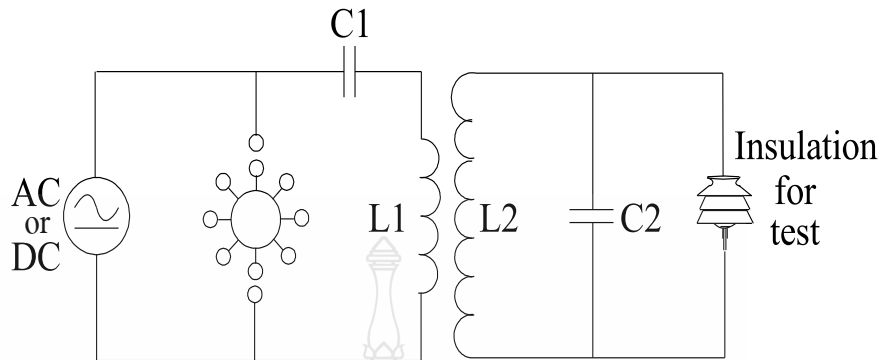
เมื่อ  $d_1$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, นิ้ว  
 $d_2$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของทอรรอยด์  
 $C$  = ค่าความจุไฟฟ้า, pF



ภาพที่ 2.17 รูปแบบของทอรรอยด์ที่ใช้กับหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง[4]



## 2.6 การทำงานของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง[18]

จากรูปที่ 2.18 เป็นวงจรสมมูลของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง และส่วนประกอบอื่นๆ โดยที่  $C_1$  เป็นตัวเก็บประจุทางด้านปฐมภูมิ ส่วน  $C_2$  เป็นตัวเก็บประจุที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิของขดลวดทดสอบ ซึ่งเป็นประจุแฝง (Stray Capacitor) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ประมาณ 15 kV ให้กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  เมื่ออัดประจุให้กับ  $C_1$  จนได้แรงดันซึ่งทำให้เกิดการเบรกควานระหว่างช่องว่างของอากาศที่ตัวสปาร์กแกป (Quenching Gap, QG) ซึ่งจะทำให้เกิดการปิดเปิด (Switching On-Off) และยังทำหน้าที่ตัดอาร์คหรือสปาร์กด้วย เมื่อเกิดการ Spark Over ที่สปาร์กแกปจะทำให้วงจรของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงครบวงจร พลังงานที่เก็บไว้ใน  $C_1$  ในรูปสนามไฟฟ้าก็จะถ่ายเทพลังมายังขดลวดแรงต่ำ  $L_1$  และ  $L_1$  ก็จะเก็บพลังงานไว้ในรูปสนามแม่เหล็ก เมื่อเต็มที่แล้ว  $L_1$  ก็จะถ่ายเทพลังงาน (Transfer Energy) กลับไปให้  $C_1$  ใหม่ จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานกลับไปกลับมา ระหว่าง  $L_1$  กับ  $C_1$  ทำให้เกิด Oscillate ต่อเนื่องแบบ Damped Oscillation ที่มีความถี่สูง สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 1/50 วินาที ใน 1 Cycle ของแรงดัน ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่  $C_1$  ใน 1 Cycle จะทำให้เกิดการประจุและคายประจุของครึ่งไซเคิลบวกและครึ่งไซเคิลลบ ดังนั้นจะทำให้เกิดการแกว่งแบบหน่วง (Damped Oscillation) ที่นิยมใช้จะสูงประมาณ 100-250 kHz ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า Inductance และ Capacitance ของการ Oscillation ค่าโดยประมาณของความถี่ที่ทำให้เกิดการ Oscillate หาได้จาก

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.85)$$

เมื่อ  $L_1$  เป็นค่า Inductance ของวงจรด้านปฐมภูมิ เกิดการ Oscillation ในวงจรทางด้านปฐมภูมิ ของ Tesla Transformer จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ และกระแสเหนี่ยวนำในขดลวดด้านทุติยภูมิ ของ Tesla Transformer ซึ่งมีความถี่เช่นเดียวกันกับทางด้านปฐมภูมิจะส่งถ่ายพลังงานไปยังวงจรทางด้านทุติยภูมิ ( $L_2C_2$ ) ในลักษณะแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเริ่มลดลงและในขณะที่แรงดันด้านปฐมภูมิเริ่มเพิ่มขึ้น ถ้าเพื่อค่า Inductance ทางด้านปฐมภูมิ ( $L_2$ ) และ Stray Capacitance ( $C_2$ ) มีค่าเท่ากับ วงจรทางด้านปฐมภูมิ คือ  $L_1C_1 = L_2C_2$  จะเกิดการ Damped Oscillation แบบต่อเนื่อง และพลังงานที่เกิดขึ้นหาได้จาก

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.86)$$

โดยที่  $W$  = พลังงานที่เกิดขึ้น  
 $C$  = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ  
 $V$  = แรงดันที่ป้อนให้แก่ตัวเก็บประจุ

## 2.7 คุณสมบัติของตัวนำ (Properties of Conductor)

คุณสมบัติลักษณะต่างๆ ของวัสดุที่จะเลือกนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลง จะมีข้อกำหนดหลายอย่างที่สำคัญเข้ามาเกี่ยวข้องกับพื้นฐาน หรือเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา และตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุนั้นๆ เช่น คุณสมบัติของวัสดุตัวนำ ผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นของวัสดุตัวนำ และวัสดุฉนวนกับสภาพแวดล้อม ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุฉนวนนี้เป็นตัวประกอบสำคัญที่สุดในการออกแบบแลตัดสินใจเลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ อย่างเหมาะสม จะเป็นผลทำให้การออกแบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.7.1 อุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Temperature Effect)

โดยส่วนมากวัสดุที่เป็นโลหะค่าสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานมักจะมีค่าสูงขึ้น ตามค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงในสมการ

$$R_t = R_{20} + \alpha_{20}(T - 20) \quad (2.87)$$

เมื่อ  $R_{20}$  = ค่าความต้านทานที่ 20 องศาเซลเซียส  
 $T$  = อุณหภูมิ  
 $\alpha$  = ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะ

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบขดลวดก็คือ การเลือกขนาดที่ถูกต้องของขดลวด ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิของขดลวดที่จะสูงขึ้นภายใต้สภาวะที่มีกระแสไหลอยู่ เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นด้วย

### 2.7.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในตัวนำทางไฟฟ้า (Variation of Electrical Conductor)

ไม่มีวัสดุตัวนำไฟฟ้าใดที่จะเป็นตัวนำสมบูรณ์ที่อุณหภูมิใดๆ ไป อย่างน้อยย่อมจะมีความต้านทานอยู่บ้าง ค่าความต้านทานวัสดุตัวนำชนิดเอกพันธ์ (Homogenous Material) ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาว ขนาดพื้นที่หน้าตัดและอุณหภูมิ ค่าของตัวนำไฟฟ้า (Ohmic Resistance) สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.88)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความต้านทานจำเพาะ หรือสัมประสิทธิ์ความต้านทานของสาร  
 $l$  = ความยาวของตัวนำ  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

สมการนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไหลที่สม่ำเสมอรอบผิวของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวนำ

### 2.7.3 ผลของความถี่ต่อความต้านทาน (Frequency Effect)

ค่าความต้านทานของวัสดุตัวนำจะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความถี่กระแสที่ไหลในตัวนำ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ คือลวดเส้นหนึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม ค่าอินดักแตนซ์(Inductance) ที่เกิดขึ้นในตัวนำเส้นลวดตรงกลาง จะมีค่ามากกว่าบริเวณผิวเนื่องจากจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ในส่วนกลางมีมากกว่า จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนกลางของลวดตัวนำมีค่าสูงกว่า และทำให้กระแสส่วนมากไหลในบริเวณผิวของขดลวดตัวนำ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่า ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำมีขนาดเล็กลงจากความจริงของตัวนำ และจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อสกินเอฟเฟกต์

### 2.7.4 สกินเอฟเฟกต์(Skin Effect)

ในขณะที่แรงดันกระแสตรง และแรงดันกระแสสลับความถี่ต่ำ กระแสไฟฟ้าจะไหลในสายได้เต็มพื้นที่หน้าตัดของสาย แต่ไม่เป็นไปตามนั้นสำหรับความถี่สูง เมื่อมีความถี่สูงก็จะเกิดสกินเอฟเฟกต์จะเป็นปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นในสาย เมื่อมีกระแสไหลก็จะเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางถึงส่วนนอกสุดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสาย เมื่อมีความถี่สูงสนามไฟฟ้าจะทำการชาร์จอย่างรวดเร็วทำให้เกิดสนามแม่เหล็กชาร์จด้วย และเกิดเป็นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ หรือเมื่อสนามแม่เหล็กชาร์จอย่างรวดเร็วด้วยตัวมันเอง จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในสายเป็นผลทำให้เกิดกระแสที่สูงมากที่ด้านนอกของเส้นผ่าศูนย์กลาง แต่กระแสในจุดกึ่งกลางของสายจะลดน้อยลงมาก ซึ่งส่วนใหญ่ที่ความถี่สูงกระแสในสายจะไหลเพียงรอบๆ ผิวของสายเท่านั้น ซึ่งด้านในสายเกือบทั้งหมดจะไม่มีกระแสไหล เป็นผลมาจากความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทำสาย

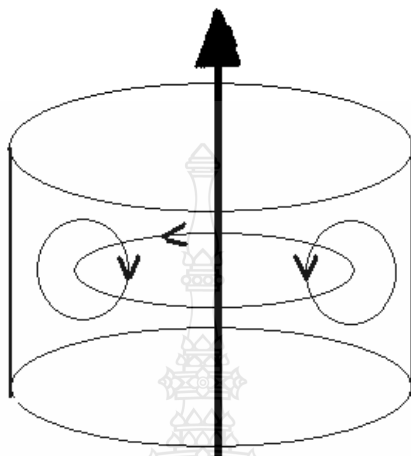
ตามภาพที่ 2.19 เป็นการอธิบายผลที่เกิดจากสกินเอฟเฟกต์ ที่ลูกศรสีแดงแสดงถึงกระแสหลักที่ไหลผ่านสาย กระแสจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคู่ได้จากวงรีสีน้ำเงิน สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสด้วยตัวของมันเอง โดยการชาร์จ ส่วนของกระแสสามารถคู่ได้จากวงกลมสีม่วงโดยที่ทิศทางของกระแสจะตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งที่จุดศูนย์กลางกระแสจะลดลง และที่ผิวของสายจะมีกระแสเพิ่มขึ้น ความลึกของกระแสซึมซาบที่ผิวของสายสามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.89)$$

เมื่อ  $\delta$  = ความลึกของกระแสซึมซาบที่ผิวของสาย  
 $f$  = ความถี่ของกระแส, Hz

$\mu$  = ค่าความซึมซาบของวัสดุที่นำมาทำสาย

$\sigma$  = สภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ, mho/cm



ภาพที่ 2.19 การไหลของกระแสในสายเนื่องจากสกินเอฟเฟกต์[18]

ในการแก้ปัญหาที่เกิดจากสกินเอฟเฟกต์ คือ การใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดเล็กมารวมกันเป็นขนาดใหญ่ หรือจากการออกแบบจะใช้เป็นลวดตัวนำแบบกลวง

#### 2.7.5 ปรากฏการณ์โคโรนา (Corona effect)

ปรากฏการณ์โคโรนาจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันที่เกิดบนชิ้นงาน ใกล้เคียงกับแรงดันเบรกดาวน์และปรากฏการณ์โคโรนาจะขึ้นอยู่กับชิ้นงานนั้นๆ ด้วย โดยทั่วไปที่ชิ้นงานที่มีรัศมีเล็กมากๆ จะเป็นเรื่องง่ายสำหรับเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) ปรากฏการณ์โคโรนาสามารถมองเห็นเป็นแสงสว่างสีฟ้าขึ้นที่รอบๆ ชิ้นงาน โดยที่ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่อยากให้เกิดขึ้น เพราะจะทำให้เป็นการสูญเสียของพลังงาน ปรากฏการณ์โคโรนาลดลงได้โดยการนำส่วนที่มีรูปแบบที่สม่ำเสมอไปแทนที่จุดที่มีความแหลม หรือเมื่อสนามไฟฟ้าลดน้อยลง และแรงดันเพิ่มมากขึ้นก็จะพบการเริ่มเกิดของโคโรนาดีสชาร์จได้ ผลของการเกิดโคโรนาจะเป็นต้นเหตุให้ผิวของฉนวนเสื่อมคุณภาพ และทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน

2.7.6 สถานะการเกิดสปาร์คโอเวอร์กับการเกิดโคโรนา (Sparkover and Corona Chenonens)

สำหรับลวดตัวนำในทรงกระบอกเกรเดียนสูงสุด ซึ่งเบรกดาวนจะเกิดขึ้นที่จุดใดก่อนนั้น ก็คือที่ผิวของลวดตัวนำมีค่า

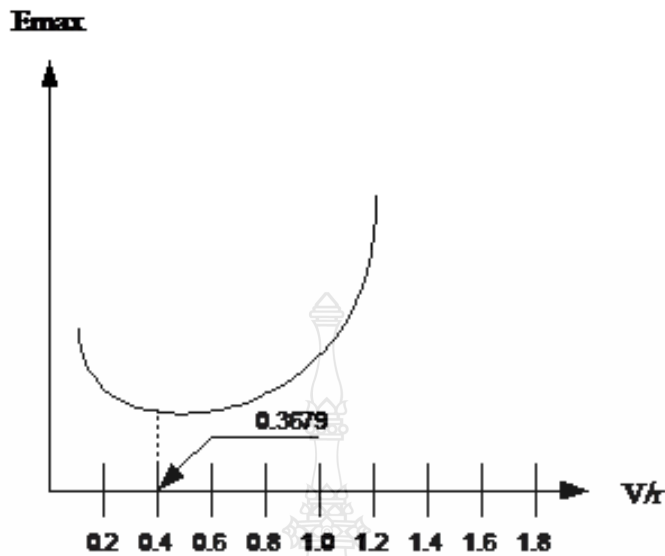
$$E = \frac{V}{r \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad kV / cm \quad (2.90)$$

E คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างลวดตัวนำและทรงกระบอกที่ทำให้เกรเดียนที่ผิวของลวดตัวนำมีค่าเกินเบรกดาวนของอากาศพอดี ทำให้อากาศบริเวณผิวลวดตัวนำเปลี่ยนสภาพจากที่คุณสมบัติเป็นฉนวน มาเป็นตัวนำทำให้เกิดโคโรนา (อากาศมีค่าเบรกดาวนที่ 30 kV/cm ที่ความดัน 760mm.Hg และที่อุณหภูมิ 20 °C) นอกจากนี้ผลทำให้เสมือนลวดตัวนำมีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้าหากการที่ลวดตัวนำเสมือนมีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ ทำให้เกรเดียนที่ถัดออกไปจากบริเวณที่เกิดโคโรนามีค่าลดลง การเบรกดาวนจะไม่เกิดลุกลามต่อไป ในกรณีนี้เรียกว่า โคโรนาที่ผิวของลวดตัวนำ แต่ถ้าการเบรกดาวนของอากาศที่ผิวลวดของตัวนำ ทำให้อากาศเป็นตัวนำและลวดตัวนำเสมือนมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกรเดียนที่ถัดออกไปจากบริเวณที่อากาศเป็นตัวนำมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การเบรกดาวนของอากาศลุกลามต่อไปและในที่สุดก็เกิดการสปาร์คโอเวอร์ ดังนั้นสถานะการเกิดโคโรนา หรือสปาร์คโอเวอร์จึงพิจารณาเกรเดียนว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่ออากาศเบรกดาวน ดังนั้นจะได้ความความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.91

$$\frac{R}{r} = e = 2.718 \quad (2.91)$$

ดังนั้น 1/E มีค่ามากที่สุดเมื่อ R/r = e กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเกรเดียนสูงสุด และ r/R ดังในรูปที่ 2.17

ที่ r/R มีค่าน้อยกว่า 1/e หรือ 0.3679 เมื่ออากาศที่ผิวลวดตัวนำ การเบรกดาวนทำให้เสมือนลวดตัวนำใหญ่ขึ้นนั้น คือ r เพิ่มขึ้นแต่ค่า E<sub>max</sub> กลับมีค่าลดลง ดังนั้น r/R < 1/e จะเกิดโคโรนาก่อน นอกจากว่าจะต้องเพิ่มศักย์ค่าไฟฟ้าให้สูงขึ้นเรื่อยๆ จึงเกิดการสปาร์คโอเวอร์ แต่ที่ r/R > 0.3679E<sub>max</sub>



ภาพที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์เกรเดียนสูงสุดกับ  $r/R$ [18]

มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นในกรณีนี้ไม่มีการฟอร์มตัวของโคโรนาเกิดขึ้น เมื่อเกรเดียนของลวดตัวนำสูงขึ้น พอที่จะทำให้อากาศที่ผิวตัวนำเบรกดาว์ก็จะเกิดการสปาร์คโอเวอร์ทันที

### 2.7.7 ผลของความหนาแน่นและความชื้นของอากาศต่อศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์ (Effect of Relative Air Density and Humidity)

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการสปาร์คโอเวอร์ข้ามระยะแกปนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของอากาศในบริเวณนั้น การเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์เมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น อาจอธิบายได้ว่าเกิดจากความสามารถในการรวมตัวของอิเล็กตรอนและ โมเลกุลหรืออะตอมในอากาศมีค่าสูงขึ้นผลของความหนาแน่นของอากาศสูงจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์มีค่าสูงตาม ค่าศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในเมื่อความดันของอากาศสูงขึ้น และค่าอุณหภูมิลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้าเบรกดาว์จะแปรตรงตามค่าความหนาแน่นของอากาศ จะเป็นฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิ ค่าความชื้นของอากาศ ( $\sigma$ ) ที่  $20^{\circ}\text{C}$  ความดัน 760 mm.Hgหาได้จาก

$$\sigma = 0.386 \left( \frac{p}{273+T} \right) \quad (2.92)$$

เมื่อ  $p$  = ค่าความดันอากาศ, mm.Hg

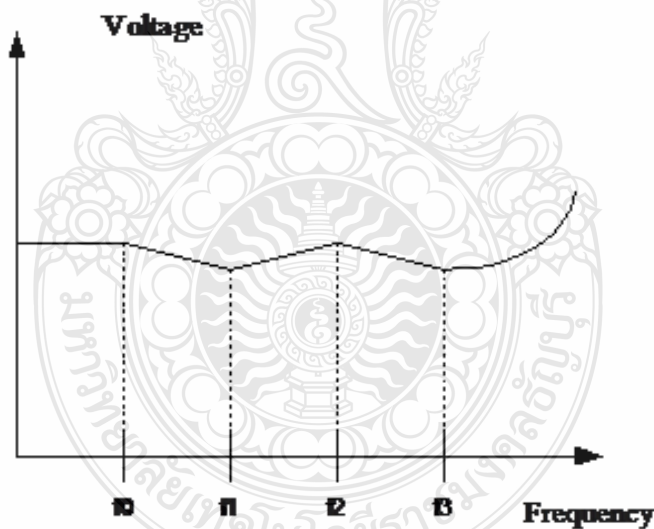
T = อุณหภูมิ, °C

ค่าศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ภายในบรรยากาศ ที่แตกต่างกับบรรยากาศมาตรฐาน คือที่ 20°C ความดัน 760 mm.Hg จำเป็นต้องหาค่าความชื้นของอากาศเพื่อนำไปคูณกับค่าศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์มาตรฐานเพื่อให้ได้ค่าจริงในทางปฏิบัติภายใต้สภาวะบรรยากาศขณะนั้น ซึ่งมาตรฐานของ I.E.C. ค่า  $\sigma$  จะอยู่ระหว่าง 0.95-1.05 ดังนั้น

$$V = \sigma V_n \quad (2.93)$$

### 2.7.8 ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่สูง (Breakdown Voltage at High Frequency)

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และความถี่สามารถแยกออกได้เป็นห้าช่วงดังแสดงในภาพที่ 2.21 และศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ในแต่ละช่วงนั้นมีขบวนการทางด้านฟิสิกส์ต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวน์ และความถี่[18]

ที่ความถี่ต่ำกว่า  $f_0$  ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ทั้งนี้เป็นเพราะไอออนบวกหรือประจุอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างไอออไนเซชันในช่วงครึ่งไซเคิลแรก มีเวลามากพอที่จะเคลื่อนที่เข้า อิเล็กโทรดและครึ่งไซเคิลต่อไปจึงไม่ประจุอากาศ เหลือจากจากครึ่งไซเคิลแรก และขบวนการก็



เริ่มใหม่เหมือนเดิม เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจนมากกว่า  $f_0$  ส่วนหนึ่งของไอออนบวกในครึ่งไซเคิลแรก ยังเหลืออยู่ ทำให้เกิดประจุอากาศสะสมไปเรื่อยๆ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ต่ำลง สำหรับความถี่วิกฤตนั้นขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซ และระยะระหว่างอิเล็กโทรดเช่น ในช่องว่างอากาศในสนามสม่ำเสมอที่ความดันบรรยากาศความถี่วิกฤตมีค่า 1MHz ระยะช่องว่าง 0.09 cm ความถี่วิกฤตมีค่า 110 kHz ที่ระยะช่องว่าง 0.45 cm และความถี่วิกฤตมีค่า 20 kHz ที่ระยะช่องว่าง 2.5cm จะเห็นได้ว่าความถี่เปลี่ยนแปลงแบบผกผันกับระยะช่องว่างโดยประมาณ ถ้าความดันก๊าซเพิ่มมากขึ้นความถี่วิกฤต ต้องมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่จนถึง  $f_1$  แล้วหลังจากนั้นศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์มีค่าเกือบคงที่เมื่อความถี่เพิ่มต่อไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะประจุอากาศที่เกิดขึ้นในช่องว่างไม่เพิ่มขึ้นอีกต่อไปแล้ว เนื่องจากเกิดสถานะสมดุลระหว่างอัตราการเกิดไอออน และการกระจายของประจุอากาศไปยังอิเล็กโทรดเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึง  $f_2$  ต่อจากนั้นศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ลดลงที่ความถี่ในช่วงระยะเวลานี้ ในครึ่งไซเคิลสั้นเกินไปสำหรับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรด ดังนั้นอิเล็กตรอนบางส่วนไม่สามารถข้ามอิเล็กโทรดภายในช่วงครึ่งไซเคิล และหลงเหลืออยู่ภายในช่องว่างทำให้การไอออไนเซชันในช่วงครึ่งไซเคิลหลังดีขึ้น ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์จึงลดลงที่ความถี่สูงกว่า  $f_3$  ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์เริ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่กำลัง (Power Frequency) ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาในครึ่งไซเคิลนั้นสั้นมาก จนอิเล็กตรอนไม่สามารถทำให้เกิดการไอออไนเซชันชุดแรกสมบูรณ์ได้ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

## 2.8 แกปทรงกลม (Sphere Gap)

แกปทรงกลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วยลูกทรงกลมโลหะ 2 ลูก วางห่างกันในอากาศ ถ้าค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างลูกทรงกลมที่มีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดสปาร์คโอเวอร์ ค่าความต่างศักย์ที่ทำให้เกิดการสปาร์คโอเวอร์ จะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ และขนาดของลูกทรงกลมตลอดจนระยะห่างของช่องว่างและตัวประกอบอื่นๆ อีก สมการสำหรับการหาค่าเกรเดียนของทรงกลมขนาดใหญ่สองลูกรัศมีเท่ากัน และวางห่างกันด้วยระยะหนึ่งนั้นแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ลูกทรงกลมหนึ่งลงดิน เพราะลูกทรงกลมที่ต่อลงดินนั้นค่าเกรเดียนของลูกทรงกลมขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบเช่น ก้านที่ต่อลูกทรงกลมมีขนาดและความยาวเท่ากัน เป็นต้น

### 2.8.1 ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศโดยไม่ต่อลงดิน

เกรเดียนที่ผิวของลูกทรงกลมในแนวที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมมีค่า

$$E = \frac{fV}{x} \quad (2.94)$$

เมื่อ  $V =$  ศักย์ไฟฟ้าระหว่างลูกทรงกลม kV  
 $f =$  ฟังก์ชันของ  $x/R$  โดยที่  $R$  เป็นรัศมีของทรงกลม  
 $x =$  ระยะระหว่างผิวของลูกทรงกลมในแนวที่เชื่อมทรงกลม

สมการของ  $f$  สามารถคำนวณและเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$f = \frac{\frac{x}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{x}{R} + 1\right)^2 + 8}}{4} \quad (2.95)$$

2.8.2 ลูกทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันวางห่างกันในอากาศที่ลูกทรงกลมหนึ่งต่อลงดิน  
 เกรเดียนที่ผิวของลูกทรงกลมในแนวเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมจะเป็นไปตาม  
 สมการต่อไปนี้

$$E = \frac{f_0 V}{x} \quad (2.96)$$

สำหรับ  $f_0$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $x/R$  นั้น ค่าที่ได้จากสูตร และจากการทดลองไม่ตรงกัน ทั้งนี้  
 เนื่องจากองค์ประกอบบางอย่าง เช่น ก้านที่ต่อกับลูกทรงกลม สารถ่ต่อ เป็นต้น ที่ทำให้เกรเดียน  
 เปลี่ยนไป ค่าของ  $f_0$  ที่วัดได้จาก  $f$  ไปอย่างไร ลูกทรงกลมที่วางห่างกันด้วยระยะทางระหว่างผิวไม่เกิน  
 สองเท่าของรัศมีของลูกทรงกลม จะไม่เกิดโคโรนาเลยแต่จะเกิดการสปาร์คโอเวอร์ เมื่อศักย์ไฟฟ้า  
 สูง ถ้าหากทางระหว่างลูกทรงกลมมีค่ามากกว่าสองเท่าของรัศมีลูกทรงกลม เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้า  
 ระหว่างลูกทรงกลมจะเกิดโคโรนา ก่อนที่จะเกิดสปาร์คโอเวอร์ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
 แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คโอเวอร์กับระยะห่างของแถบ

### 2.8.3 ข้อควรระวังในการวัดแรงดันไฟฟ้าสูง (Reaction in Measurement of High Voltage)

- ก) โลหะทรงกลมจะต้องสะอาด ผิวเรียบเคลือบขี้ผึ้งไว้บ้างๆ เพื่อขจัดฝุ่นหรือไล่ความชื้น
- ข) ช่องว่างระหว่างลูกทรงกลม จะต้องมีความกว้างไม่เกินรัศมีของทรงกลม เพื่อป้องกันการเกิดโคโรนา ก่อนเกิดการสปาร์กโอเวอร์
- ค) ลูกทรงกลมลูกหนึ่งจะต้องทำการต่อลงกราวด์ และลูกทรงกลมทั้งสองจะต้องมีฉนวนป้องกัน

## 2.9 ฉนวนหรือวัสดุไดอิเล็กตริก (Insulating or Dielectric Materials)

โครงสร้างทางกายภาพ และคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นฉนวนที่ใช้กับความถี่จะแตกต่างกันไปจากวัสดุฉนวนที่ใช้กับความถี่ต่ำ สิ่งที่สำคัญที่ต้องคำนึงคือค่ากำลังสูญเสียในสารไดอิเล็กตริกจะมีค่ามากในกรณีของความถี่สูง กำลังสูญเสียอันนี้จะทำให้เกิดความร้อน เป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ (Breakdown) มีค่าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าเบรกดาวน์ที่ความถี่ต่ำของวัสดุฉนวน ฉะนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและกายภาพของวัสดุฉนวนหรือสารไดอิเล็กตริกที่นำมาใช้

### 2.9.1 วัสดุฉนวนดีเลิศ (Idle Insulating Material)

วัสดุฉนวนมีองค์ประกอบที่มาจากสารอินทรีย์ (Organic) สารอนินทรีย์ (Inorganic) และแร่ (Mineral) วัสดุฉนวนมีทั้งได้มาจากธรรมชาติและสังเคราะห์ วัสดุฉนวนดีเลิศ ควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ก) ค่าความเข้มของไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength) สูงที่อุณหภูมิสูง
- ข) เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
- ค) มีความคงทนที่อุณหภูมิสูง
- ง) มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น ง่ายต่อการใช้และการนำไปใช้งานความต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการสั่น (Vibration)

ราคาของวัสดุฉนวนจะแปรผันตามจำนวนหรือปริมาณ โดยตรง ฉะนั้นในการเลือกใช้วัสดุจึงต้องคำนึงถึงราคาทางสถานะเศรษฐกิจ พร้อมทั้งคุณสมบัติความเข้มแข็งทางไฟฟ้าและทางกลสูง บนผิวของฉนวนส่วนมากค่าความนำไฟฟ้าเกิดจากการเสื่อมคุณสมบัติ ของฉนวนที่มีการนำความร้อนที่ดี และจำเป็นต้องมีศักย์ไฟฟ้าสูง

## 2.9.2 ชนิดของวัสดุฉนวน

วัสดุฉนวนมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด

- ก) ก๊าซ (Gases)
- ข) ของเหลว(Liquids)
- ค) ของแข็ง(Solid)

## 2.9.3 การเบรกดาวน์ของสารไดอิเล็กตริก (Dielectric breakdown)

สารไดอิเล็กตริกก็คือฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรด เพื่อกั้นหรือให้ทนแรงดันได้สูงขึ้นกว่าก๊าซธรรมชาติรวมทั้งอากาศด้วย เช่นคั่นระหว่างแผ่นโลหะของคาปาซิเตอร์ คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของสายเคเบิล คั่นระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กหม้อแปลง เป็นต้น

สารไดอิเล็กตริกจะเกิดการเบรกดาวน์ (คุณสมบัติของฉนวนเปลี่ยนแปลงไปเป็นคุณสมบัติตัวนำ) ก็ต่อเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมสาร ไดอิเล็กตริก หรือค่าเกรเดียนต์มีค่าเกินค่าวิกฤติของสารที่จะทนได้ ค่าเกรเดียนต์จะมีค่าแตกต่างกันไปสำหรับสารแต่ละชนิด

### ก) การเบรกดาวน์ในของแข็ง (Breakdown in Solids)

ฉนวนโดยทั่วไปมีความต้านทานสูงมาก ความต้านทานของฉนวนจะมีได้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงไดอิเล็กตริก(Dielectric Strength) ซึ่งพิจารณาได้จากเกรเดียนต์ หรือความหนาแน่นฟลักซ์(Flux Density) ถ้าสนามไฟฟ้าที่ใช้ฉนวนที่ค่าสูงกว่าความแข็งแรง ไดอิเล็กตริกของฉนวนก็เกิดเบรกดาวน์ของฉนวนขึ้นขึ้น โดยทั่วไป เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าคร่อมฉนวนจะเกิดการสูญเสียไดอิเล็กตริก(Dielectric Loss)หรือบางที่เรียกว่า ไดอิเล็กตริกฮิสเตอร์รีซิส(Dielectric Hysteresis)อากาศมีความต้านทานสูงมาก แต่มีความแข็งแรงไดอิเล็กตริกไม่สูงมาก จะเห็นว่าความต้านทานของฉนวนและความแข็งแรงของไดอิเล็กตริก ไม่สัมพันธ์กันซึ่งต้องทำความเข้าใจให้ดีเสียก่อน การเบรกดาวน์ของฉนวนของแข็ง มีขบวนการของกลไกการเบรกดาวน์หลายแบบกลไก เบรกดาวน์ของฉนวนแข็งเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าสูงมากๆ ฉนวนจะเกิดการเบรกดาวน์ในเวลาอันสั้น เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปลดลงเวลาที่ใช้ในการเบรกดาวน์ก็เพิ่มมากขึ้น และกลไกการเบรกดาวน์ก็เปลี่ยนไป

#### ข) การเบรกดาวน์ในฉนวนของของเหลว (Breakdown in Liquid Dielectric)

เมื่อป้อนศักย์ค่าไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในฉนวนของเหลว จะเกิดกระแสไหล และเมื่อเพิ่มศักย์ค่าไฟฟ้าสูงขึ้นจะเกิดการสปาร์ระหว่างอิเล็กโทรด เมื่อเกิดการสปาร์ระหว่างอิเล็กโทรดในของเหลวทำให้เกิดแสงเรืองระหว่างอิเล็กโทรดเกิดฟองก๊าซและส่วนประกอบของสารอื่นๆ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี เกิดรูเล็กหน้าอิเล็กโทรด และความดันในของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ทฤษฎีสำหรับกลไกการเบรกดาวน์ในของเหลวแยกออกเป็น 2 แบบ คือ แบบอาศัยการอธิบายการเบรกดาวน์ แบบเดียวกับในก๊าซ คือเกิดไอออนในเซชันของอะตอมภายในสนามไฟฟ้า โดยที่อิเล็กตรอนถูกสมมุติว่าถูกทำให้หลุดออกจากหน้าอิเล็กโทรดด้วยขบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field Emission) หรือเนื่องจากขบวนการปล่อยออกเนื่องจากความร้อนของทฤษฎีทั้งสอง อาศัยหลักการของสารไม่บริสุทธิ์ (Impurities) เจือปนหรือมีฟองอากาศเจือปนอยู่ในของเหลว และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ ซึ่งทฤษฎีนี้ไม่ได้ใช้อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ในของเหลว นอกจากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วทั้งสองแบบของของเหลวที่ใช้เป็นฉนวนในทางปฏิบัติอย่างกว้างขวาง ได้แก่ น้ำมัน ซึ่งถ้าหากเป็นน้ำมันบริสุทธิ์ ความแข็งแรงของการเบรกดาวน์ (Breakdown Strength) สูงกว่า 1 ล้าน volts/cm. คุณสมบัติของน้ำมันบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นฉนวน คือความแข็งแรงเบรกดาวน์ไม่ขึ้นกับสารที่เอามาทำอิเล็กโทรด ความแข็งแรงของเบรกดาวน์ลดลงเมื่อเพิ่มระยะช่องว่างมากขึ้นและไม่ขึ้นกับความดันของน้ำมัน แต่ถ้าเป็นน้ำมันที่ประกอบด้วยก๊าซในโตรเจน หรือออกซิเจน ความแข็งแรงเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

#### 2.9.4 การนำและการดูดกลืน (Conduction and Absorption)

ฉนวนของของแข็ง รวมทั้งของของเหลวบางชนิด เมื่อใช้ศักย์ค่าไฟฟ้าตกคร่อมอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดผลของการนำและการดูดกลืนของอิเล็กตรอนในฉนวน นั่นคือมีกระแสไหลผ่านนั่นเอง การนำ (Conduction) กระแสเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวของไอออน ที่เรียกว่า ไอออนในเซชัน และการดูดกลืน (Absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อศักย์ค่าไฟฟ้าทำให้ประจุถูกชาร์จ (Charge) เข้าไปในฉนวนไดอิเล็กตริก

#### 2.9.5 ตัวประกอบของกำลัง (Power Factor ; $\cos\theta$ )

เมื่อป้อนศักย์ค่าไฟฟ้าสลับให้กับตัวเก็บประจุ (Capacitor) ศักย์ค่าไฟฟ้าที่ตกคร่อมฉนวนจะเกิดความสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการดูดกลืน (Absorption) หรือบางทีเรียกว่า ไดอิเล็กตริกอีสเตอร์รี่ซีส ผลจากการสูญเสียอันนี้ทำให้เฟสของกระแสจะไม่นำศักย์ค่าไฟฟ้า

ไปเป็น  $90^\circ$ จริงๆซึ่งอาจจะมีค่าน้อยกว่า  $90^\circ$  และเป็นค่าของมุมที่เกิดจากการสูญเสียในไดอิเล็กตริก เรียกว่า มุมของการสูญเสียค่ากระแสของตัวประจุที่มีคุณสมบัติที่ดีสามารถหาได้จาก

$$I = WCV \quad (2.97)$$

และค่ากำลังสูญเสีย

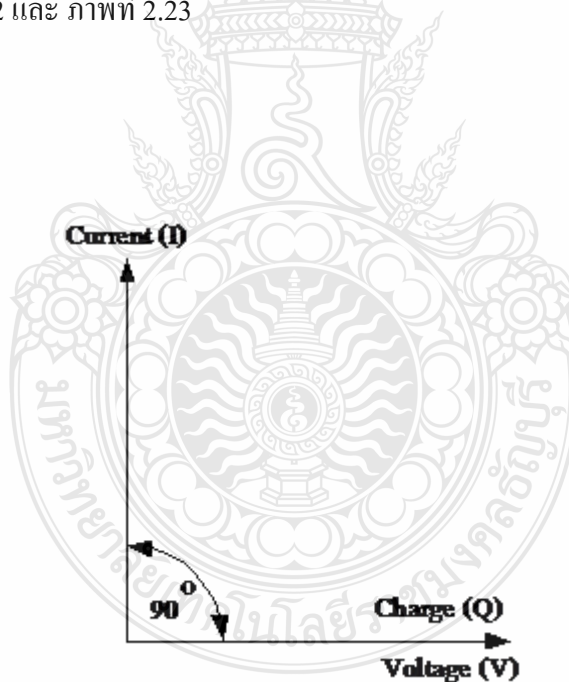
$$P = VI \cos \theta \quad (2.98)$$

$$P = VI \sin \sigma \quad (2.99)$$

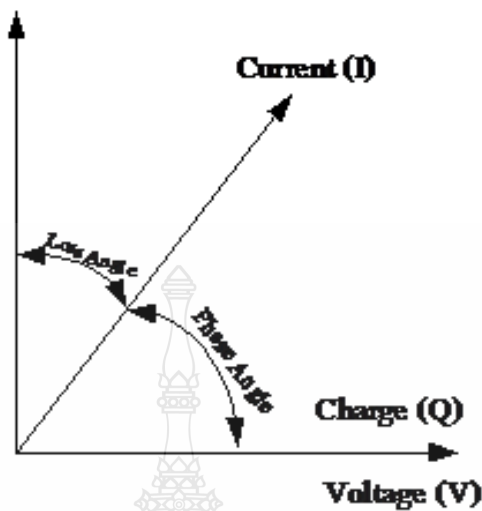
$$P = WCV^2 \sin \sigma \quad (2.100)$$

$$P = VCV^2 \tan \sigma \quad (2.101)$$

ดังแสดงในภาพที่ 2.22 และ ภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.22 เวกเตอร์ไดอะแกรมของ Pure Capacitor[18]



ภาพที่ 2.23 เวกเตอร์ไคอะแกรมของ Impure Capacitor[18]

## 2.10 คุณสมบัติของฉนวน (Properties of Insulating Materials)

### 2.10.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)

ก) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเหลวพวกน้ำมันวานิช น้ำมันประสาน และอื่นๆ ค่าความถ่วงจำเพาะจึงเป็นสิ่งสำคัญมากเพื่อบอกถึงคุณสมบัติของของเหลวแต่ละชนิด ส่วนของแข็งสิ่งที่ต้องคำนึงคือ ค่าความหนาแน่น

ข) การดูดกลืนความชื้น (Moisture Absorption) เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมคุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นเหตุให้จุดเบรกดาวน์ต่ำได้ในวัสดุฉนวนต่างๆ ที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยเฉพาะของเหลวที่เป็นน้ำมัน

ค) ผลของความร้อน (Thermal Effect) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกวัสดุฉนวนที่จะนำมาใช้ หลักการที่จะต้องคำนึงถึงคือ จุดหลอมเหลว (Melting Point) อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการอ่อนตัวของพลาสติก เช่น โพลีไวนิลคลอไรด์(PVC) ที่ใช้ทำเป็นแกนของขดลวดแรงสูง ซึ่งอายุการใช้งานของวัสดุฉนวนย่อมขึ้นอยู่กับผลของความร้อนด้วย

### 2.10.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

ส่วนสำคัญของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก คือการที่สารไดอิเล็กตริกมีค่ากระแสรั่วไหล (Leakage Current) น้อยที่สุด ซึ่งครั้งนี้ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

ก) ความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ค่ากระแสที่สามารถไหลผ่านในวัสดุฉนวนย่อมขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของฉนวน และผลของความชื้นจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะเปลี่ยนแปลง หรืออาจเป็นทางเดินของตัวนำของวัสดุฉนวน ที่เรียกว่า Film on Surface

ข) ความเค้นของสารไดอิเล็กทริก (Dielectric Strange) เป็นคุณสมบัติของวัสดุฉนวนที่สามารถทนความเค้นของสนามไฟฟ้าได้ โดยไม่เกิดความเสียหายต่อค่าความเค้นของสารไดอิเล็กทริก

ค) การเกิดประกายไฟวาบ (Flashover) บริเวณผิวฉนวนวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น ลูกถ้วยฉนวนเรียบขัดมัน และเมื่อมีค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมลูกถ้วย ค่าความเค้นของสารไดอิเล็กทริก (Dielectric Strange) ของลูกถ้วยสูงกว่าค่าความเค้นของสารไดอิเล็กทริก (Dielectric Strange) ของอากาศเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมลูกถ้วยจะทำให้อากาศรอบลูกถ้วยเกิดการเบรกดาวน์ เป็นประกายไฟวาบรอบ ๆ ลูกถ้วย ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การเกิดประกายไฟวาบ (Flashover)

ง) ค่าเปอร์มิททิวิตี (Permittivity) ปริมาณประจุของตัวเก็บประจุที่ประกอบแผ่นของตัวนำสองแผ่นหรือมากกว่าขึ้นไป จะหาได้จากค่าเปอร์มิททิวิตี (Permittivity) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามไฟฟ้าเป็นตัวอยู่ระหว่างตัวนำ คือคุณสมบัติไดอิเล็กทริกที่เรียกว่าค่า ค่าเปอร์มิททิวิตี (Permittivity)

จ) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (Power Factor and Dielectric Losses) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์จะแปรตามค่าความถี่และอุณหภูมิ ปกติแล้วค่าของ  $\tan \delta$  จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะต้องคำนึงถึงผลของความชื้นด้วย สารไดอิเล็กทริกที่ค่าเปอร์มิททิวิตี (Permittivity) ค่าสูญเสียของไดอิเล็กทริกที่เกิดจากผลต่าง ๆ นั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

## 2.11 สนามไฟฟ้าและเทคนิคการฉนวน

การฉนวนเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างและใช้ประโยชน์ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแรงดันสูงที่ใดมีไฟฟ้าที่นั่นก็ต้องการฉนวน เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตที่เข้ามาใกล้หรือสัมผัส หรือป้องกันมิให้เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไฟฟ้ากับสายไฟฟ้า หรือระหว่างสายไฟฟ้ากับดิน การฉนวนแก่ส่วนที่มีไฟฟ้าก็ย่อมทำได้ง่ายถ้ามีที่ว่างๆ มากพอ หรือแรงดันนั้นต่ำ เช่น ต่ำกว่า 100 โวลต์ แต่ในกรณีแรงดันสูงและมีที่ว่างจำกัด การออกแบบฉนวนให้ดี และประหยัดจำเป็นต้องใช้ความรู้เทคนิคการฉนวน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดัน ความเครียดสนามไฟฟ้าและลักษณะสมบัติของฉนวน

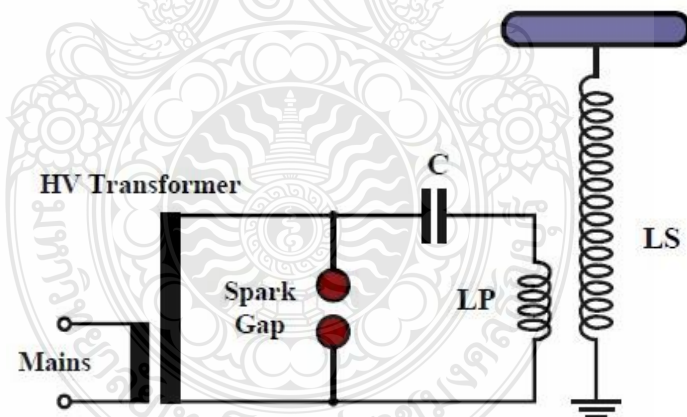


## 2.12 สภาพความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า

พิกัดขีดขึ้นความคงทนฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า กำหนดด้วยสภาพการฉนวนเริ่มจะเปลี่ยนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้าอย่างดี ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดการสปาร์ก หรือวาวไฟ หรือเบรกดาวน์ผ่านฉนวน โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าคงอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันนั้นสูงพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านฉนวนสูงพอจนเกิดการอาร์ค นั่นก็หมายความว่า การเสียดสภาพการฉนวนของก้านนั้นไม่เป็นแบบถาวร คือเสียดสภาพการฉนวนชั่วคราวขณะที่มีแรงดันป้อนอยู่ ตรงกันข้ามกับฉนวนที่เป็นของแข็ง หลังจากเกิดการเบรกดาวน์แล้ว สภาพการฉนวนจะเสียไปอย่างถาวร ส่วนการฉนวนที่เป็นของเหลว การเสียดสภาพการฉนวนกลับคืนสู่สภาพการฉนวนดั้งเดิมหลังจากเบรกดาวน์หรือสปาร์กได้ผ่านไปแล้ว ทำนองเดียวกันกับการฉนวนที่เป็นก๊าซ

## 2.13 การสร้างไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูงด้วยหม้อแปลงเทสลาในปัจจุบัน

การสร้างไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูงจะอาศัยหลักการประยุกต์ใช้งานขดลวดเทสลา (Tesla Coil) ซึ่งคิดค้นโดยนิโกลา เทสลา วิศวกรไฟฟ้าชาวโครเอเชีย ในปี ค.ศ. 1856 ขดลวดเทสลา มีไดอะแกรมแสดงหลักการพื้นฐานดังภาพที่ 2.24

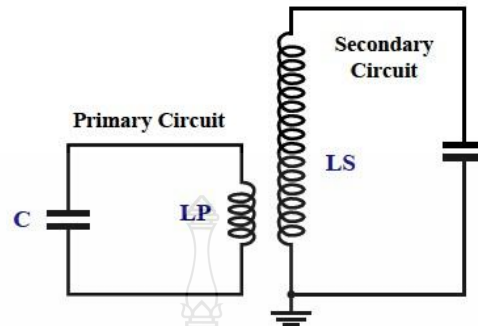


ภาพที่ 2.24 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสลา [8]

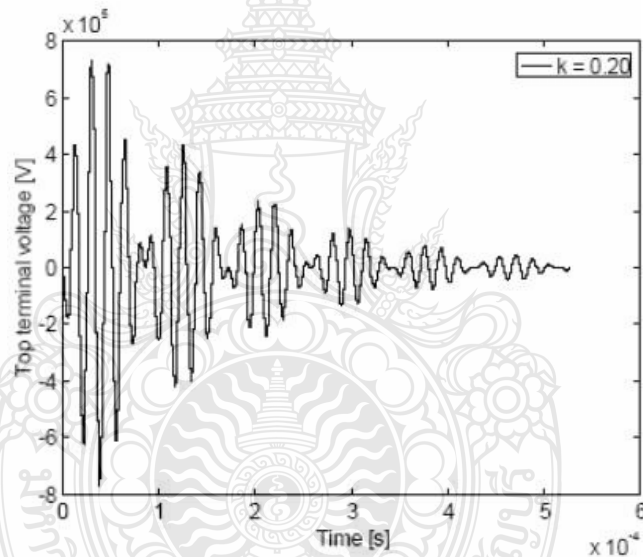
เมื่อสปาร์กเกิดขึ้นเกิดการสปาร์ก จะมีการถ่ายทอดพลังงานที่สะสมระหว่างคาปาซิเตอร์กับขดลวดด้านแรงดันต่ำ (LP) ในลักษณะออสซิลเลชันด้วยความถี่เรโซแนนซ์ และเหนี่ยวนำให้เกิดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันด้านความถี่สูง (LS) ในลักษณะเป็นคลื่นขบวนหนึ่งด้วยความถี่เรโซแนนซ์

เช่นเดียวกัน ค่าแอมพลิจูดของการออสซิลเลตจะมีค่าสูงสุดถ้าถ้าคลื่นทั้งสองฝั่งมีเฟสตรงกันดังภาพที่

2.25



ภาพที่ 2.25 วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงเทสล่า[8]



ภาพที่ 2.26 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณ ออสซิลเลชันของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสล่า[8]

จากหนังสือปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ของไชยพร หล่อทองคำ [8] ขดลวดเทสล่าถูกนำมาประยุกต์ในงานอุตสาหกรรม การศึกษาวิจัยในหลายด้าน เช่นการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฉนวนทางไฟฟ้า การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า การสร้างพัลส์แรงดันสูงเพื่อใช้ในทางฟิสิกส์การแพทย์ การวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่า การวิจัยการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย การทำเทคนิคพิเศษทางการถ่ายภาพยนตร์

การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า จำเป็นจะต้องใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ในการทดสอบตามชนิดของลูกถ้วยฉนวน โดยกำหนดความถี่ไม่น้อยกว่า 100 kHz ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แรงดันวาทตามผิวแห้งของลูกถ้วยแบบต่างๆ

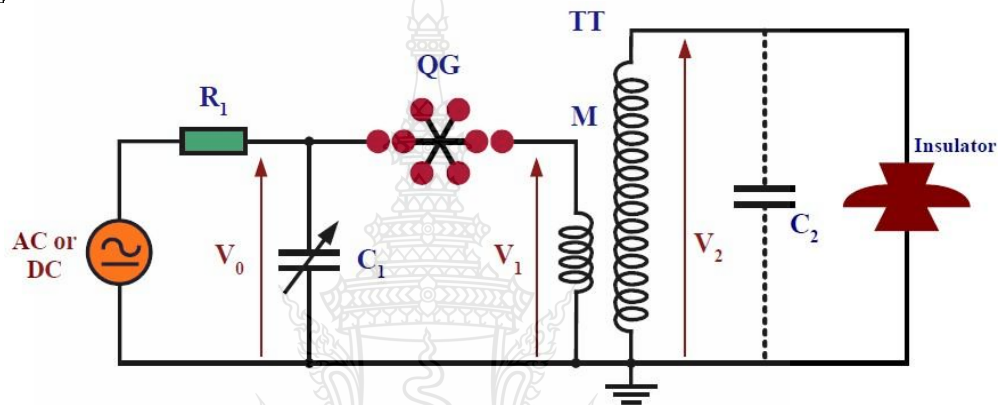
ชนิดรูปถ้วยฉนวน	ค่าแรงดันวาทไฟตามผิวแห้ง AC, 50 Hz (kV)
1. ลูกถ้วยก้านตรง แบบพ็อก AIF -5693	140
2. ลูกถ้วยก้านตรง แบบ 56-2	110
แบบ 56-3	125
3. ลูกถ้วยก้านตรง แบบ ALP11/275 (สีขาว)	80
แบบ ALP11/365 (สีขาว)	100
แบบ ALP22/520 (สีขาว)	110
4. ลูกถ้วยแขวน แบบ 52-1	60
แบบ 52-2	65
แบบ 52-3	80
แบบ 52-4	80

โดยเมื่อทดสอบสามารถมองเห็นการเกิดวาทไฟบนผิวลูกถ้วยได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.27 การเกิดแรงดันวาทไฟบนผิวของลูกถ้วย[8]

ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน โดยใช้หม้อแปลงทดสอบในห้องทดลอง มีการทดสอบลูกถ้วยฉนวนได้ทุกแบบเนื่องจากหม้อแปลงทดสอบที่ใช้มีพิกัดแรงดันที่สูงถึง 200 KV และพิกัดความถี่ใช้งาน 100-200 KHz แต่ต้องใช้การลงทุนที่สูง เนื่องจากต้องสั่งซื้อหม้อแปลงทดสอบจากต่างประเทศ รวมทั้งหม้อแปลงทดสอบที่ใช้มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากไม่เหมาะกับการเคลื่อนย้าย ใช้หลักการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ ในการออสซิลเลต ด้วยสปาร์กแก๊ป ที่ใช้การหมุนของมอเตอร์ทำให้เกิดประกายไฟและเสียงดัง [8]



ภาพที่ 2.28 วงจรหม้อแปลงทดสอบแบบใช้สปาร์กแก๊ป[8]

ปี 2552 ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว และทง ลานทานทอง [9] ได้ออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบขนาดพิกัด 120 kV 120 kHz โดยเป็นการออกแบบและสร้างหม้อแปลงทดสอบที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ แต่ไม่สามารถทดสอบลูกถ้วยฉนวนได้ทุกแบบเนื่องจากมีพิกัดแรงดันเอาท์พุทยังไม่สูงพอและใช้หลักการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ ในการออสซิลเลต ด้วยสปาร์กแก๊ป ที่ใช้การหมุนของมอเตอร์ทำให้เกิดประกายไฟและเสียงดัง



ภาพที่ 2.29 สปาร์กแก๊ปที่ใช้สร้างคามถี่ออสซิลเลชั่นให้กับหม้อแปลงทดสอบ[18]

จากบทความวิชาการ การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30) สมเกียรติ ทองแก้ว และคณะ[10] ได้เสนอแนวคิดในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบโดยคำนึงความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดด้านแรงดันต่ำและแรงดันสูงที่ทำให้เกิดแฟลชโอเวอร์บริเวณขดลวดทั้งสอง ตลอดจนได้ทำการวิเคราะห์ระยะและรูปแบบในการจัดวางขดลวดด้านแรงดันต่ำโดยจำลองเป็นค่าสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม FEMLAB ทำการวิเคราะห์หม้อแปลงทดสอบที่มีพิกัดแรงดันสูงถึง 350 kV 120 kHz สามารถทดสอบลูกถ้วยฉนวนได้ทุกขนาด แต่ยังมีข้อบกพร่องคือ การจำลองด้วยโปรแกรมและบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการออกแบบลดลง และใช้หลักการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ ในการออสซิลเลต ด้วยสปาร์กแก๊ป ที่ใช้การหมุนของมอเตอร์ทำให้เกิดประกายไฟและเสียงดัง

จากบทความวิชาการ การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EECON 32) อุดม พรหมศรี จันทร์ และคณะ [11] ได้เสนอแนวคิดในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบโดยใช้เทคนิคฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์โดยใช้หลักการสร้างความถี่สูงจากวงจรอินเวอร์เตอร์แทนการใช้สปาร์กแก๊ป ทำให้ลดการเกิดประกายไฟและเสียงดัง ใช้ขนาดแรงดันอินพุตที่ต่ำคือ 220 V เป็นรวมทั้งมีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก สามารถสร้างความถี่ในช่วง 30-200 kHz แต่มีขนาดพิกัดแรงดันเอาต์พุตเพียง 35 kV ยังไม่สามารถนำไปทดสอบลูกถ้วยฉนวนได้

หากนำหลักการของอินเวอร์เตอร์ที่ อุดม พรหมศรีจันทร์ และคณะ[11] ได้นำเสนอมีข้อดีคือทำให้หม้อแปลงเตสลา มีขนาดเล็กกลงไม่เกิดเสียงดังและประกายไฟ สามารถปรับความถี่ในช่วงกว้าง มาใช้ร่วมกับ การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในขดลวดแรงดันต่ำและแรงดันสูง ของ สมเกียรติทองแก้ว และคณะ [10] รวมทั้งแก้ไขข้อผิดพลาดระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรมกับการออกแบบในสภาวะอากาศจริง ก็จะสามารถออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลาที่มีประสิทธิภาพ มีขนาดพิกัดแรงดันด้านเอาต์พุตสูง สามารถใช้ทดสอบลูกถ้วยฉนวนได้ทุกแบบ มีราคาถูกลง เคลื่อนย้ายได้สะดวก และสามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ต่อไป



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การออกแบบหม้อแปลงเตสลา

จากทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงเตสลา จะนำไปใช้ในการออกแบบ ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญได้แก่ ขดลวดหม้อแปลงเตสลา ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ และตัวเก็บประจุด้านแรงสูง

##### 3.1.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

ในการออกแบบเบื้องต้นต้องคำนึงถึงขนาดตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากค่าประจุทางด้านแรงดันสูงจะมีผลต่อค่าแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์เบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ก็เพื่อใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันวาทตามผิวที่ 140 kV และความถี่มาตรฐานที่กำหนดไม่น้อยกว่า 150 kHz จึงทำการกำหนดพิกัดของการออกแบบดังนี้

แรงดันพิกัดทางด้านแรงดันสูง 100 kVrms

ความถี่พิกัด 200 kHz

แรงดันป้อนเข้า 4000 V

การออกแบบจะใช้พิกัดแรงดันเข้าที่ 4000 V เนื่องจากเป็นพิกัดแรงดันที่อุปกรณ์สวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่หาได้ เบอร์ MBN800H45E2-H มีพิกัดแรงดันที่ 4500 V พิกัดกระแสที่ 800 A คิดค่าความปลอดภัยจึงลดพิกัดแรงดันให้เหลือ 4000 V



ภาพที่ 3.1 IGBT เบอร์ MBN800H45E2-H

### 3.1.2 การกำหนดค่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง ซึ่งประกอบด้วย

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสตา ประมาณ 10 pF

ค่าความจุไฟฟ้าของทอรอยด์ มีค่าประมาณ 25 pF

ค่าความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน มีค่าสูงสุดประมาณ 60 pF

รวมค่าประจุไฟฟ้าทั้งสามอย่างประมาณ 95 pF

### 3.1.3 การออกแบบขดลวดแรงดันสูงหรือขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสตา

การออกแบบขดลวดแรงดันสูงนี้จะใช้ท่อ PVC ในการพันขดลวด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี มีความแข็งแรงไม่ดูดความชื้น ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย การเลือกขนาดของท่อสามารถเลือกได้ตามตารางความสัมพันธ์ ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ตามตารางที่ 3.1 และเลือกความสูงตามตารางที่ 3.2

#### ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

กำลังไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)
< 500W	3-4
500W-1500W	4-6
1500W-3KW	6-10
>3KW	10 ขึ้นไป
กำลังไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)



ตารางที่ 3.2 ตารางสำหรับเลือกความสูงท่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	อัตราส่วน	ความสูง(นิ้ว)
3	6:1	18
4	5:1	20
6	4:1	24
8 นิ้วขึ้นไป	3-5:1	24 นิ้วขึ้นไป
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	อัตราส่วน	20

จากการกำหนดค่า ความจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูงที่ 95 pF จะสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบในเบื้องต้นได้จากสมการ

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 C_2} \quad (3.1)$$

ซึ่งจะได้ค่าเท่ากับ 7.04 mH โดยค่าที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงทดสอบ ด้วยการหาค่ากระแสแฉัดวงจรของขดลวดที่แรงดันออกแบบคือ 150 kV ด้วยสมการ

$$I_{sc} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{2\pi f_2 L_2} \quad (3.2)$$

$$I_{sc} = \frac{150kV}{2\pi \times 200kHz \times 7.04mH} = 11.303A$$

เนื่องจากกระแสลัดวงจรมีลักษณะเป็นพัลส์ที่เกิดประมาณครึ่งคาบความถี่ 200 kHz (2.5  $\mu$ s) และพัลส์จะเกิดทุกช่วงที่แรงดันป้อนเข้าที่ถ่ายยอดคลื่น ที่ความถี่ 100 Hz (10 ms) จึงสามารถคำนวณกระแสประสิทธิผลได้ด้วยสมการ

$$I_{eff} = I_{sc} \sqrt{\frac{2.5\mu s}{10ms}} \quad (3.3)$$

$$I_{eff} = 16.955 \times \sqrt{\frac{2.5\mu s}{10ms}} = 0.268A$$

และเมื่อคิดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทองแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.5A/mm^2$  รวมถึงคิดผลของ สกินเอฟเฟค แล้ว จะใช้ลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.024 นิ้ว ในการพันขดลวด

การออกแบบขดลวดด้านทุติยภูมิ จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 6.5 นิ้ว และสูง 30 นิ้ว เมื่อนำความสูงของท่อหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหาความเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L = \frac{N^2 R^2}{9R + 10H} \quad (3.4)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด ( $\mu$ H)

N = จำนวนรอบของขดลวด

R = รัศมีของขดลวด (นิ้ว)

H = ความสูงของขดลวด (นิ้ว)

$$L = \frac{1250^2 \times 3.25^2}{(9 \times 3.25) + (10 \times 30)} = 50125.76 = 50.125mH$$

เมื่อนำจำนวนรอบ 1250 รอบที่ออกแบบไปทำการพันขดลวดพบว่าขดลวดมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 32 นิ้ว และเมื่อทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดใหม่จะได้ค่าเท่ากับ 47.255 mH

### 3.1.4 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในขดลวด (Stray Capacitor) ด้วยสมการ

$$C_{st} = 0.29H + 0.41R + 1.94\sqrt{\frac{R^3}{H}} \quad (3.5)$$

$$C_{st} = (0.29 \times 32) + (0.41 \times 3.25) + 1.94\sqrt{\frac{3.25^3}{32}} = 12.62 \text{ pF}$$

### 3.1.5 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุทอรอยด์รูปโดนัทจากสมการ

$$C_{tor} = 1.4\left(1.2781 - \frac{D_i}{D_o}\right)\sqrt{\pi D_i (D_o - D_i)} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอรอยด์ (นิ้ว)

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอรอยด์ (นิ้ว)

ในที่นี้จะออกแบบให้ทอรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับท่อที่ใช้พันขดลวดทุติยภูมิคือ 6.5 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะได้

$$C_{tor} = 1.4\left(1.2781 - \frac{6.5}{19.5}\right)\sqrt{\pi \times 6.5(19.5 - 6.5)} = 21.55 \text{ pF}$$

เมื่อนำค่า ของตัวเก็บประจุทั้ง 3 คือ ตัวเก็บประจุแฝง ตัวเก็บประจุของทอรอยด์ และตัวเก็บประจุของลูกถ้วยมารวมกันจะได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าด้านแรงสูงหรือทุติยภูมิเท่ากับ 94.17 pF

### 3.1.6 หาค่าความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อคิดค่าความจุไฟฟ้าต่างๆของด้านทุติยภูมิ

จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (3.7)$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 12.62pF}} = 206.094KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง รวมกับประจุไฟฟ้าของทอรอยด์

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 34.17pF}} = 125.248KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง รวมกับค่าประจุไฟฟ้าของทอรอยด์ และค่าประจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 94.17pF}} = 75.446KHz$$

จากการคำนวณจะพบว่าหากนำไปทดสอบลูกถ้วยความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง เหลือเพียง 75.446 KH

### 3.1.7 การหาความจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำหรือด้านปฐมภูมิ

ในการออกแบบเบื้องต้นจะใช้หม้อแปลงที่ใช้สำหรับจุดโหลดน็อนเป็นแหล่งจ่าย โดยจะนำหม้อแปลงจุดโหลดน็อนขนาดพิกัด Primary 230V 2A Secondary 15000 V 30 mA 4 ตัว มาต่อขนานกันเพื่อให้จ่ายกระแสได้เพิ่มขึ้นเป็น 120 mA และเมื่อนำมาหารกับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิที่

ได้กำหนดในการออกแบบหม้อแปลงทดสอบที่ 4000 V จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็น 33.334 K $\Omega$  และคำนวณหาค่า ความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบได้จากสมการ

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi f Z} \quad (3.8)$$

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi \times 50 \times 33.334 K\Omega} = 95.493 nF \approx 0.1 \mu F$$

ในการจัดสร้างตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงทดสอบ จะใช้ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.1  $\mu F$  1000 V อนุกรมกัน 5 ตัว และขนานกัน 5 แถว เพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุขนาด 0.1  $\mu F$  5000 V

### 3.1.8 การออกแบบขดลวดด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ

จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 3.1.6 พบว่าหากต้องการนำหม้อแปลงทดสอบไปใช้ในการทดสอบลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์ จะอยู่ที่ 75.446 KHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงทดสอบได้จากสมการ

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_1} \quad (3.9)$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 \times 75.446 KHz \times 0.1 \mu F} = 44.5 \mu H$$

ในการจัดทำขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ จะพันในลักษณะทรงกระบอก เช่นเดียวกับขดลวดแรงดันสูง โดยขดลวด มีรัศมี R = 5.85 นิ้ว สูง H = 6 นิ้ว พันทั้งหมด 12 รอบ และแต่ละรอบห่างกัน 0.5 นิ้ว ใช้ท่อทองแดงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เมื่อคำนวณตามสมการที่ 3.4 จะได้

$$L = \frac{12^2 \times 5.85^2}{(9 \times 5.85) + (10 \times 6)} = 43.74 \mu H$$

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณด้วยสมการที่ 9

จากการออกแบบหม้อแปลงทดสอบจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรได้ดังนี้

ความเหนี่ยวนำขดลวดแรงดันต่ำ  $L_1 = 43.74 \mu H$

ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ  $C_1 = 0.1 \mu F$

ความเหนี่ยวนำขดลวดแรงดันสูง  $L_2 = 47.255 mH$

ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง  $C_2 = 94.17 pF$

### 3. 1.9 การหาค่าความเชื่อมโยงทางแม่เหล็กของขดลวด

จากค่าที่ได้ในการออกแบบ เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการนำค่า พารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการจำลองระบบ ผู้เขียนบทความจึงได้ทำการจัดสร้างขดลวดของหม้อแปลงทดสอบ ทั้งขดลวดด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ รวมถึงหาค่า การเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (Magnetically Coupled Circuits) ของขดลวดโดยการต่อขดลวดทั้งสองแบบอนุกรม [3] แล้วคำนวณด้วยสมการ

$$M = \frac{L - L_1 - L_2}{2} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $M$  = ค่าการเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (H)

$L$  = ค่าความเหนี่ยวนำรวมของขดลวดทั้งสองแบบอนุกรมแบบขั้วเสริม (H)

$L_1$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงต่ำ (H)

$L_2$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูง (H)

### 3.2 การสร้างส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงทดสอบ

จากข้อมูลการออกแบบผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงทดสอบ ได้แก่ ขดลวดด้านแรงดันสูง , ขดลวดด้านแรงดันต่ำ, ตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง (ทอรอยด์) และตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ



ภาพที่ 3.2 การเตรียมท่อ PVC ในการพันขดลวดแรงดันสูง



ภาพที่ 3.3 การพันขดลวดต้านแรงดันสูง





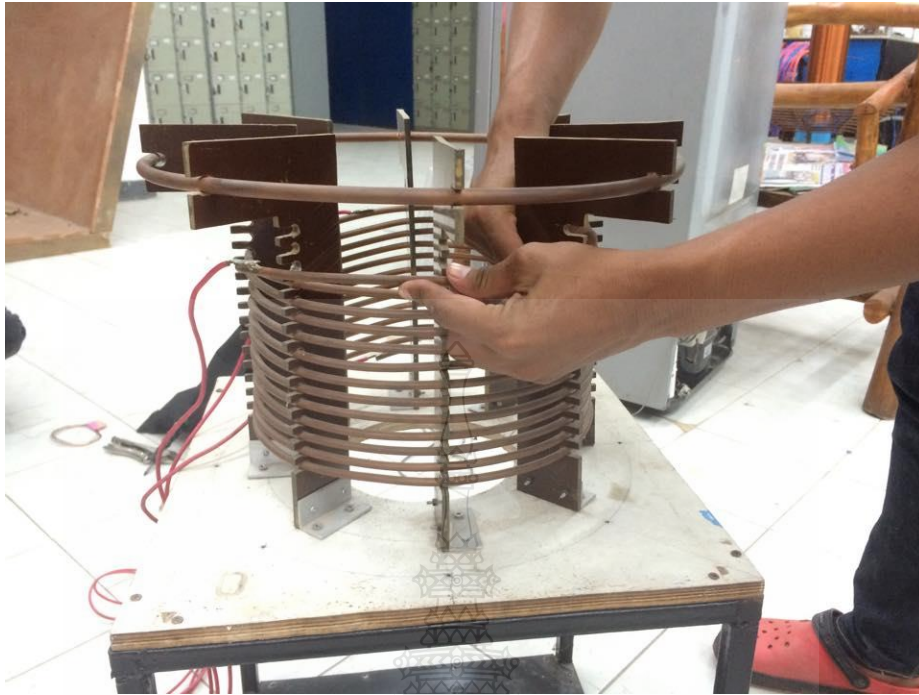
ภาพที่ 3.4 ขดลวดหม้อแปลงทดสอบด้านแรงดันสูง



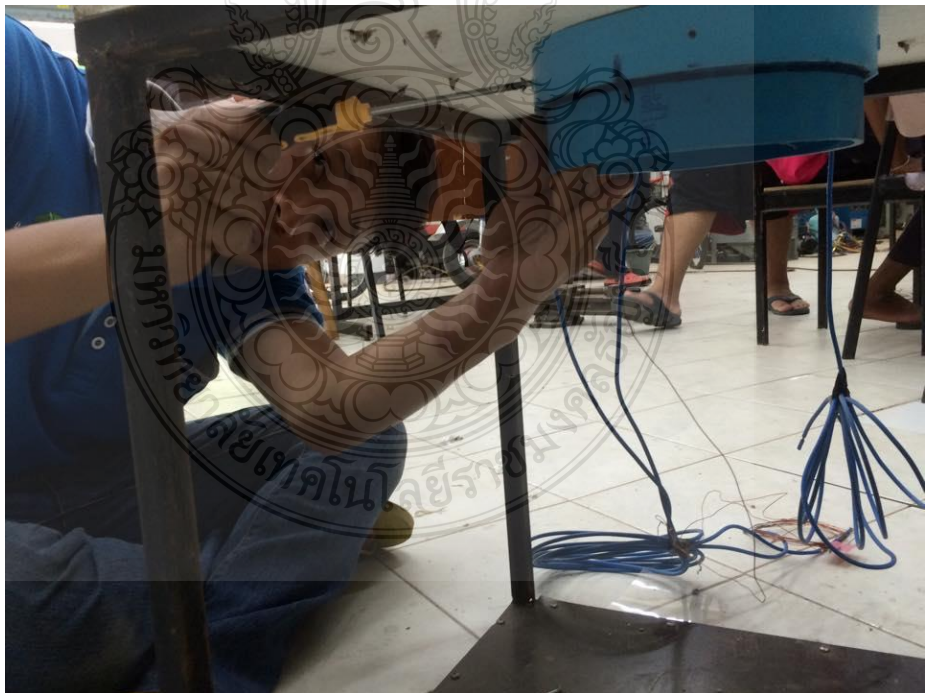
ภาพที่ 3.5 การทำฐานวางขดลวดหม้อแปลงทดสอบ



ภาพที่ 3.6 การทำฐานวางขวดด้านแรงดันต่ำ



ภาพที่ 3.7 การพันขดลวดด้านแรงดันต่ำ



ภาพที่ 3.8 การประกอบและติดตั้งขดลวดหม้อแปลงเตสลา



ภาพที่ 3.9 ขดลวดหม้อแปลงทดสอบ



ภาพที่ 3.10 การเตรียมไม้อัดเพื่อทำตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง(ทอโรยด์)

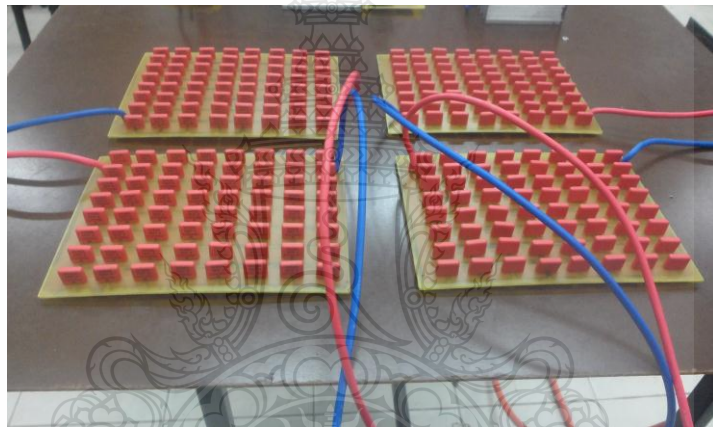


ภาพที่ 3.11 การทำตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง (ทอรอยด์)



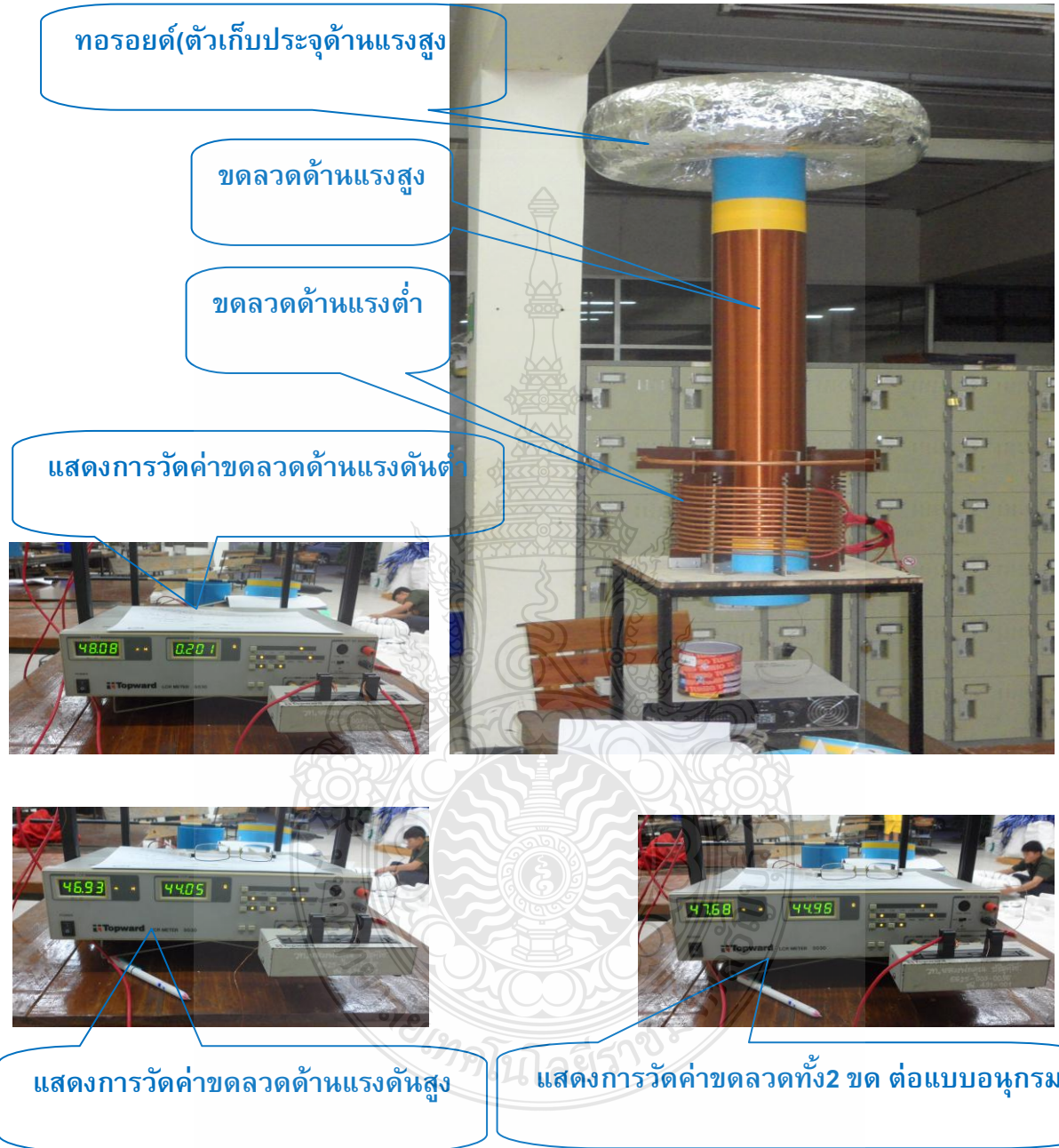
ภาพที่ 3.12 การติดตั้ง ทอรอยด์ บนขดลวดเตสลา





ภาพที่ 3.13 คาปาซิเตอร์ขนาด  $0.033 \mu\text{F}$  5,040V ชนิดโพลีโพรไพลีน และคาปาซิเตอร์ขนาด  $0.1 \mu\text{F}$  1,000V ชนิดโพลีโพรไพลี

### 3.3 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลงเทสลาที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3.14 ขดลวดของหม้อแปลงเทสลาที่สร้างขึ้น แล้วทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของขดลวด

โดย  $L = 47.68mH$   $L_1 = 48.08\mu H$  และ  $L_2 = 46.93mH$

จากสมการที่ 3.10

$$M = \frac{47.68mH - 48.08\mu H - 46.93mH}{2} = 0.3509mH$$

### 3.4 สรุปข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบและการวัดขดลวดที่สร้างขึ้น

ขดลวดด้านแรงดันต่ำ  $L_1 = 48.08\mu H$

ขดลวดด้านแรงดันสูง  $L_2 = 46.93mH$

ค่าการเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก  $M = 0.3509 mH$

คาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำกรณีไม่ต่อลูกถ้วยด้านแรงสูง  $C_p = 0.033\mu F$

คาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำกรณีต่อลูกถ้วยด้านแรงสูง  $C_p = 0.1\mu F$

คาปาซิเตอร์ด้านแรงดันสูงกรณีไม่ต่อลูกถ้วยด้านแรงสูง  $C_s = 34.17pF$

คาปาซิเตอร์ด้านแรงดันสูงกรณีต่อลูกถ้วยด้านแรงสูง  $C_s = 94.17pF$



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

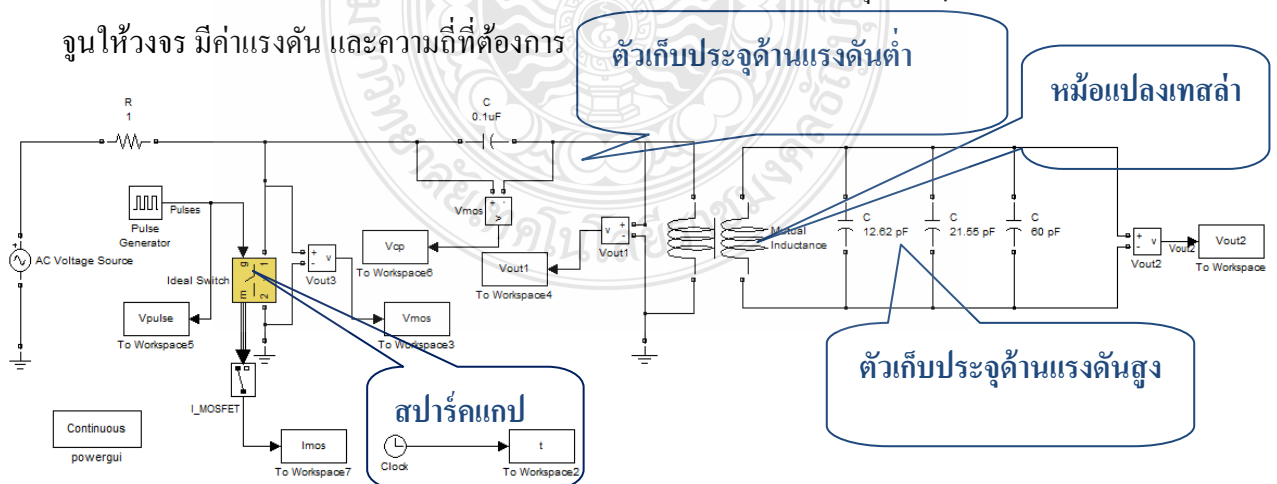
จากการศึกษาข้อมูลการสร้างหม้อแปลงเตสลา ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและจัดทำส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงเตสลา โดยมีเป้าหมายที่จะสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบใช้สวิชต์อิเล็กทรอนิกส์ (หม้อแปลง โซลิตสเตตเตสลา) แทนสปาร์กแกป เพื่อให้การวิจัยการออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา มีความถูกต้องและเป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่าหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์กแกป ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลการออกแบบและการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงเตสลา มาจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการสร้างต่อไป

#### 4.1 การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink

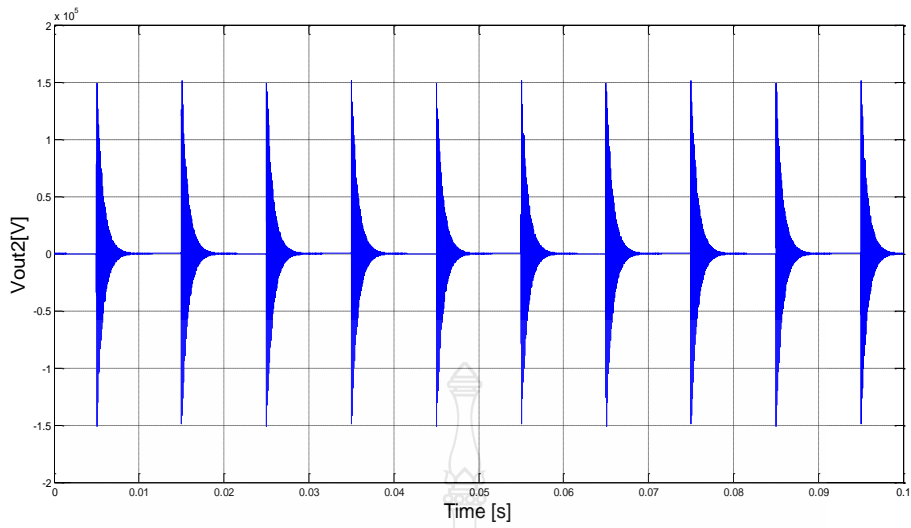
การจำลองระบบผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบและการวัดพารามิเตอร์ของขดลวดมาใช้เป็นข้อมูล การจำลองระบบจะจำลองใน 4 รูปแบบ เพื่อหาความเหมาะสมในการออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา แบ่งเป็น

##### 4.1.1 การจำลองระบบแบบใช้การสวิชต์ด้วยสปาร์กแกป

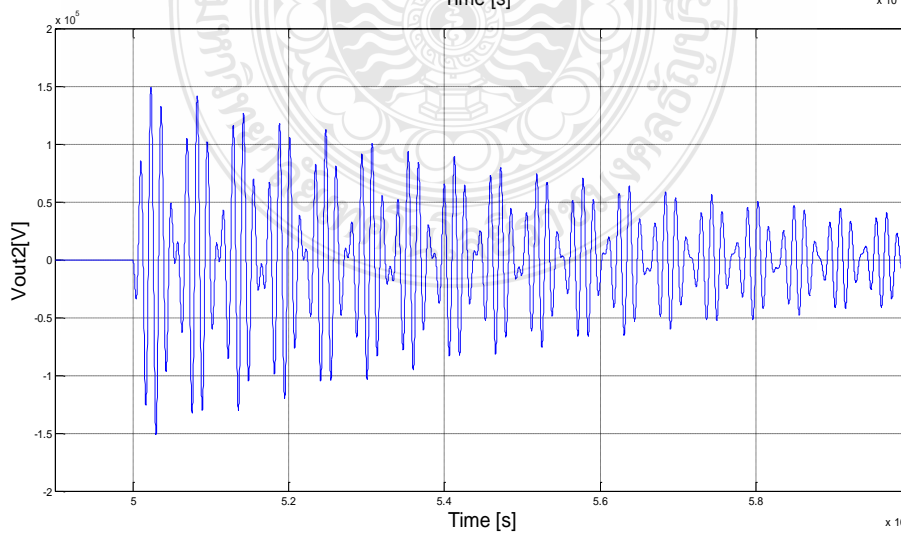
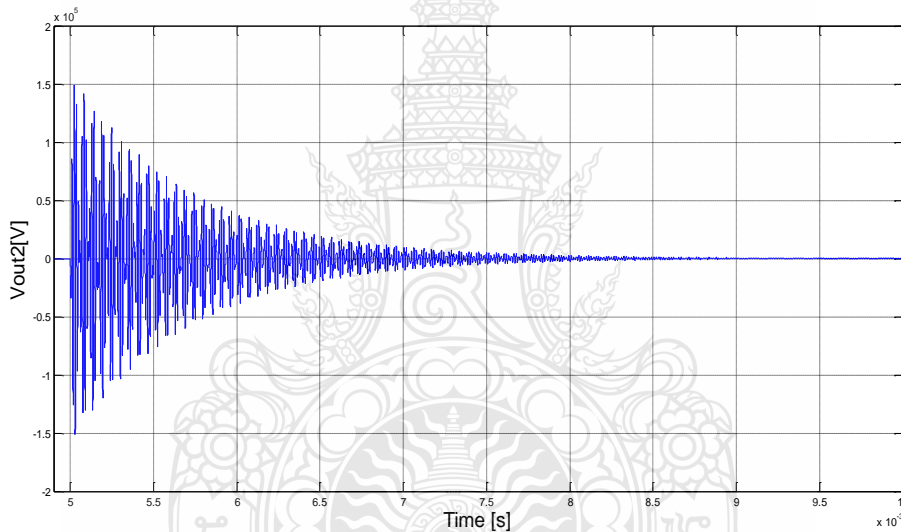
การจำลองได้ทำการควบคุมการทำงานของสปาร์กแกป ที่คาบเวลา 10 ms โดยมี Duty Cycle ที่ 50 % ใช้แรงดันป้อนเข้า 4000 V 50Hz แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆของวงจร รวมถึงปรับจูนให้วงจร มีค่าแรงดัน และความถี่ที่ต้องการ



ภาพที่ 4.1 วงจรการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสปาร์กแกป



ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 10 ช่วง

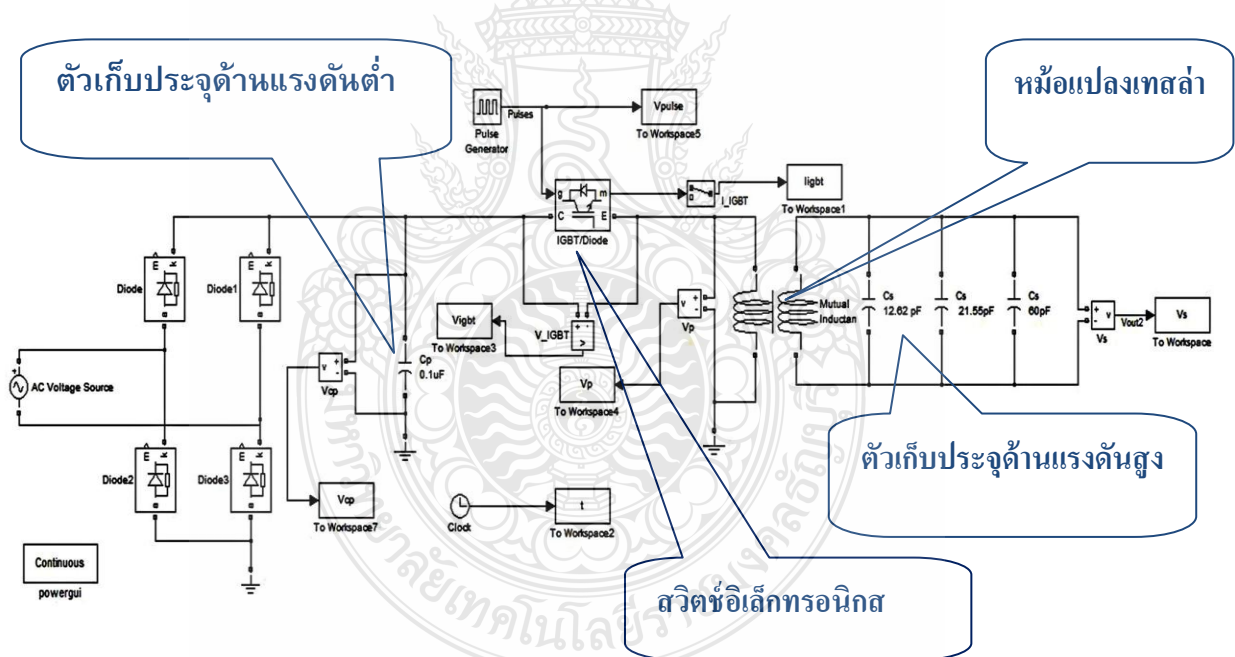


ภาพที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 1 ช่วง

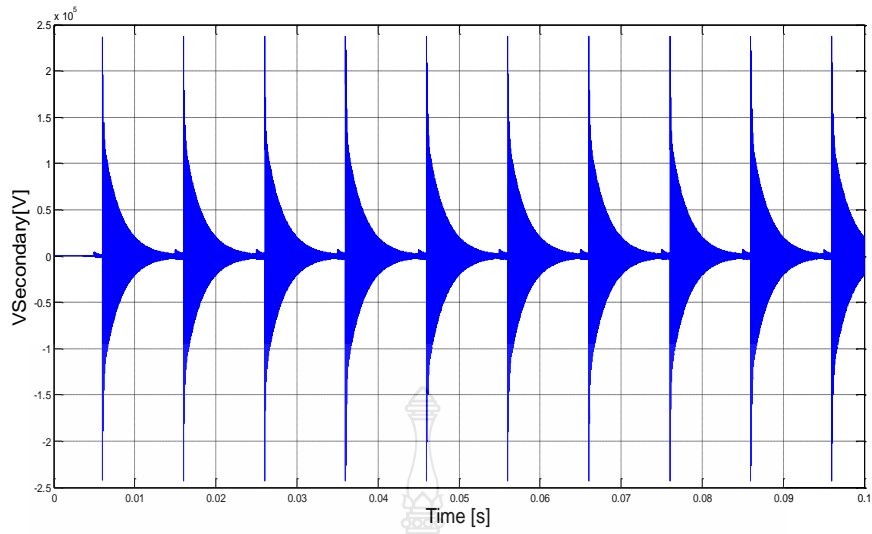
จากภาพที่ 4.2 และ 4.3 จะแสดงกราฟแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงเทสลาที่ได้ทำการจำลองระบบด้วยวงจรในภาพที่ 4.1 โดยได้แสดงการเกิดออสมิเลชันจำนวน 10 ช่วง ในภาพที่ 4.2 และแสดงการเกิดออสมิเลชัน 1 ช่วงในภาพที่ 4.3 เพื่อหาค่าความถี่ของสัญญาณ ซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ 150 kHz และมีแรงดันสูงสุดที่ 150 kV

#### 4.1.2 การจำลองระบบแบบใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบต่อโดยตรง

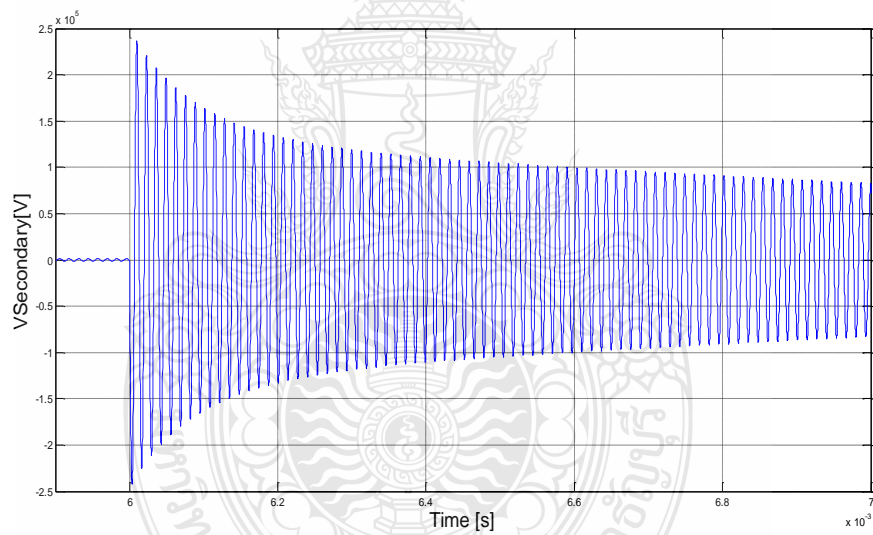
ในการจำลองระบบแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์อีก 3 แบบ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการจำลองระบบของแต่ละวงจรออกเป็น 2 แบบ คือแบบที่ด้านแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา ต่อกับลูกถ้วยทดสอบและแบบไม่ต่อลูกถ้วยทดสอบ โดยเมื่อไม่ต่อลูกถ้วยทดสอบค่าประจุด้านแรงดันต่ำจะอยู่ที่ 0.033  $\mu$ F และเมื่อต่อลูกถ้วยทดสอบ ค่าประจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำจะอยู่ที่ 0.1  $\mu$ F จากนั้นจะทำการจุด โดยการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) ให้ทำการตัดต่อวงจรที่ขั้วคลื่นของไฟฟ้ากระแสสลับที่ ป้อนเข้าคือ 220 V 50Hz โดยทุก 10 ms จะตัดต่อ 1 ครั้ง พบว่าเมื่อปรับ Duty Cycle ที่ 10 % จะเกิดการออสมิเลชันสูงสุด



ภาพที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ แบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์โดยตรง



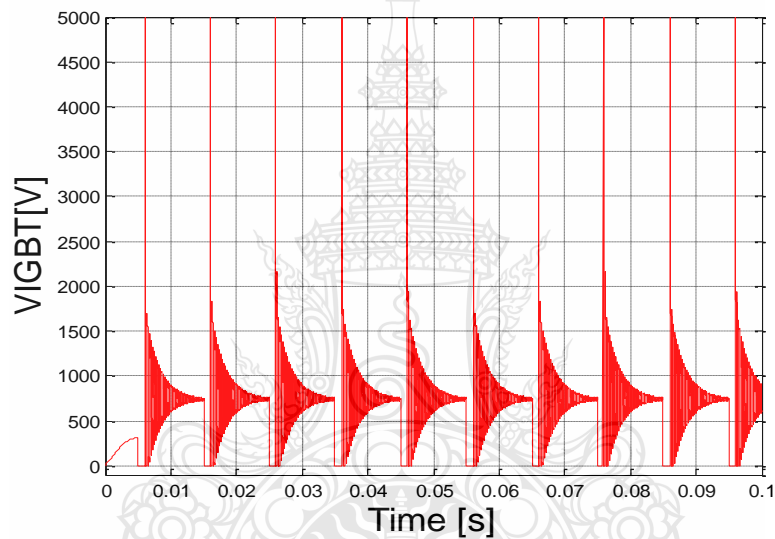
ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์โดยตรง แสดงการเกิดออสซิลเลชั่น 10 ช่วง



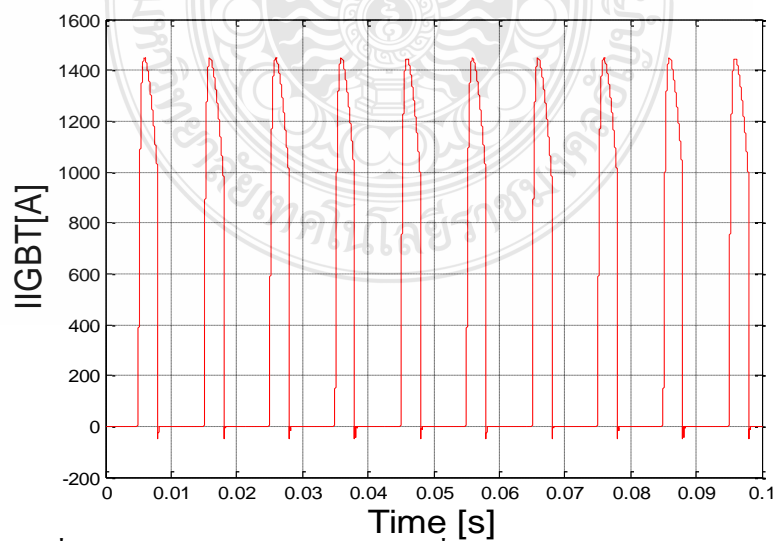
ภาพที่ 4.6 คลื่นแรงดันจากการจำลองระบบแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ แรงดัน 240 kV 160 kHz

ตารางที่ 4.1 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	<b>150</b>	<b>1,800</b>	<b>1,420</b>
<b>20</b>	<b>250</b>	<b>3,000</b>	<b>1,450</b>	210	1,900	1,420
10	300	3,000	1,450	240	1,900	1,420



ภาพที่ 4.7 แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) เมื่อปรับ Duty cycle 10%



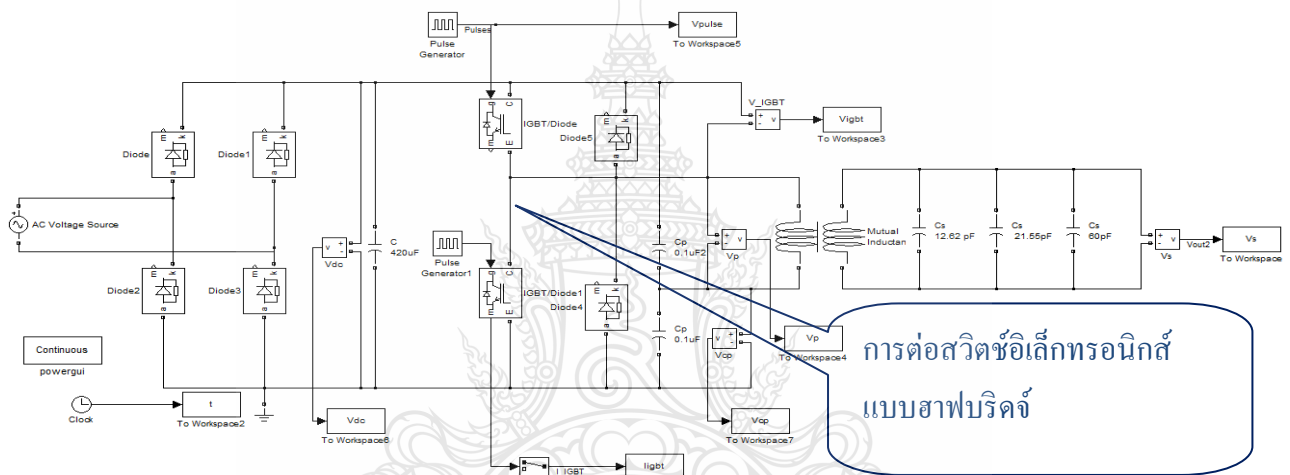
ภาพที่ 4.8 กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) เมื่อปรับ Duty cycle 10%



จากตารางที่ 4.1 และรูปคลื่นสัญญาณในภาพที่ 4.6 ,4.7 และ 4.8 จะสังเกตเห็นได้ว่า กรณีต่อลูกถ้วยทดสอบ แรงดันเอาต์พุตสูงสุดจะอยู่ที่ 240 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ที่ 10% มีค่าแรงดันตกคร่อม IGBT อยู่ที่ 1,900V และมีกระแสไหลผ่าน IGBT 1,420 Aเมื่อเพิ่ม Duty Cycle แรงดันและกระแสก็ยังมีค่าสูง

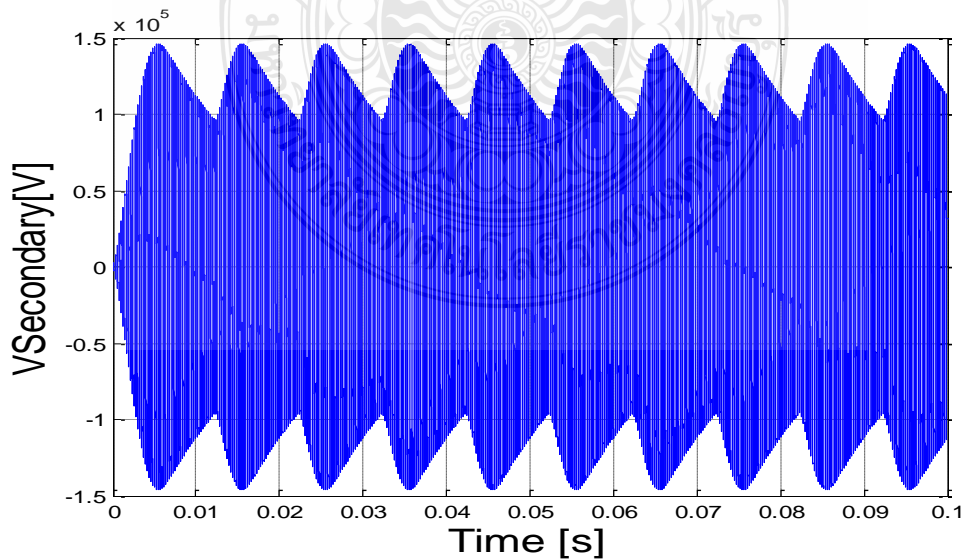
#### 4.1.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฮาร์ดแวร์อินเวอร์เตอร์

การจำลองระบบแบบใช้วงจรฮาร์ดแวร์อินเวอร์เตอร์ผู้วิจัยได้ทำการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ให้ทำงานที่ย่านความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้แล้วจึงทำการปรับจูนให้ได้ความถี่ที่ถูกต้อง

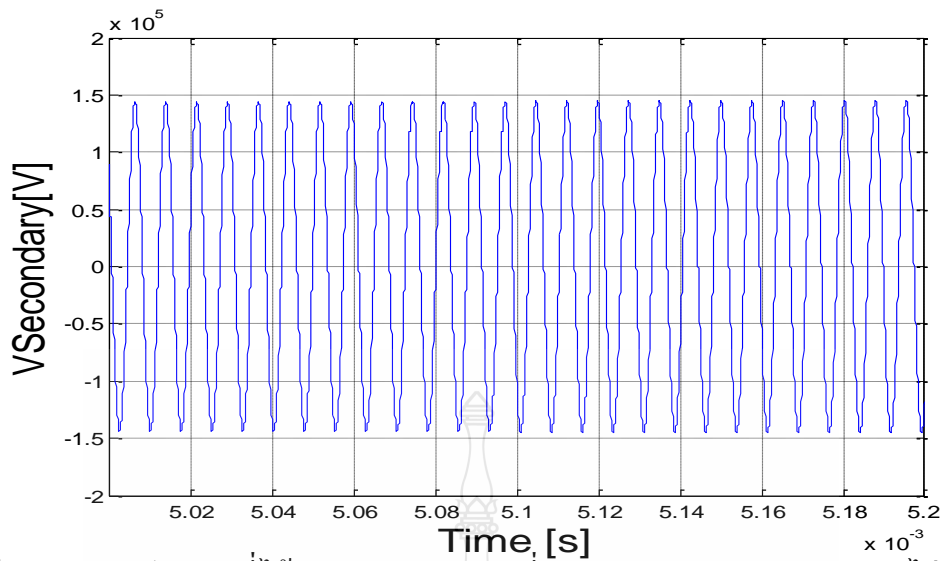


การต่อสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบฮาร์ดแวร์

ภาพที่ 4.9 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรฮาร์ดแวร์อินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 4.10 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132 kHz Duty Cycle 20 % แบบไม่ต่อลูกถ้วย



ภาพที่ 4.11 ขยายรูปแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132 kHz Duty Cycle 20 % แบบไม่ต่อลูกถ้วย

ตารางที่ 4.2 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT

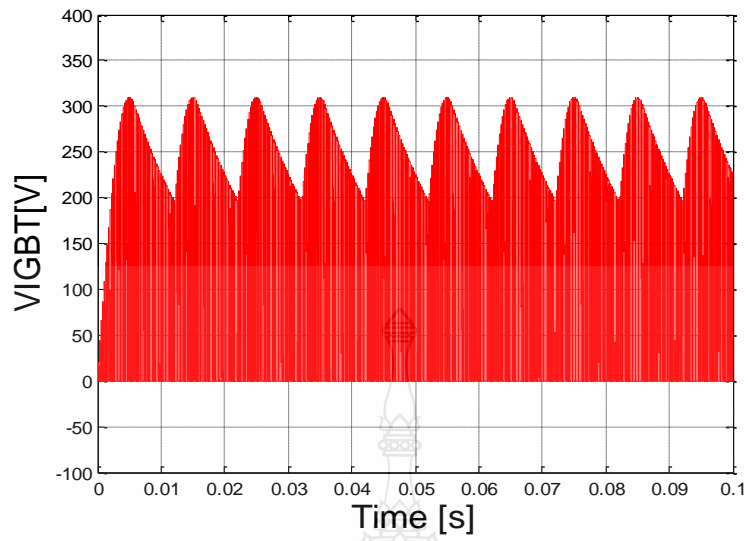
ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฮาฟบริดจ์แบบไม่ต่อลูกถ้วย

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
<b>132</b>	<b>360</b>	<b>311</b>	<b>+150,-100</b>	<b>20</b>	<b>145</b>	<b>311</b>	<b>+75,-25</b>
133	270	311	+125,-80	10	25	311	25

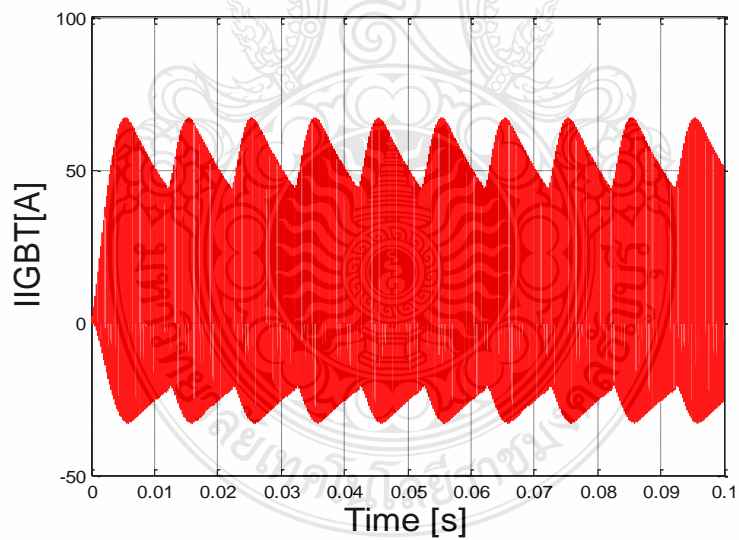
ตารางที่ 4.3 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT

ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฮาฟบริดจ์แบบต่อลูกถ้วย

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	<b>30</b>	<b>160</b>	<b>311</b>	<b>+125,-80</b>
<b>80</b>	<b>170</b>	<b>311</b>	<b>±125</b>	20	70	311	+70,-40
85	15	311	+37,-5	10	14	311	40



ภาพที่ 4.12 แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์(IGBT) วงจรฮาฟบริดจ์ ที่ความถี่ 132kHz Duty cycle 20%

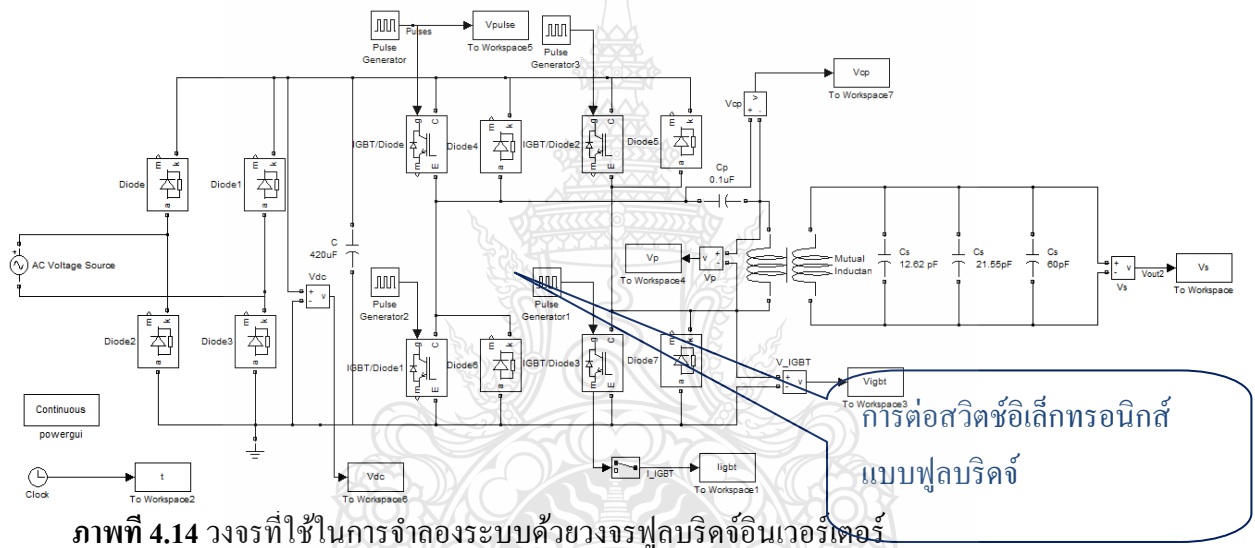


ภาพที่ 4.13 กระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) วงจรฮาฟบริดจ์ ที่ความถี่ 132kHz Duty cycle 20%

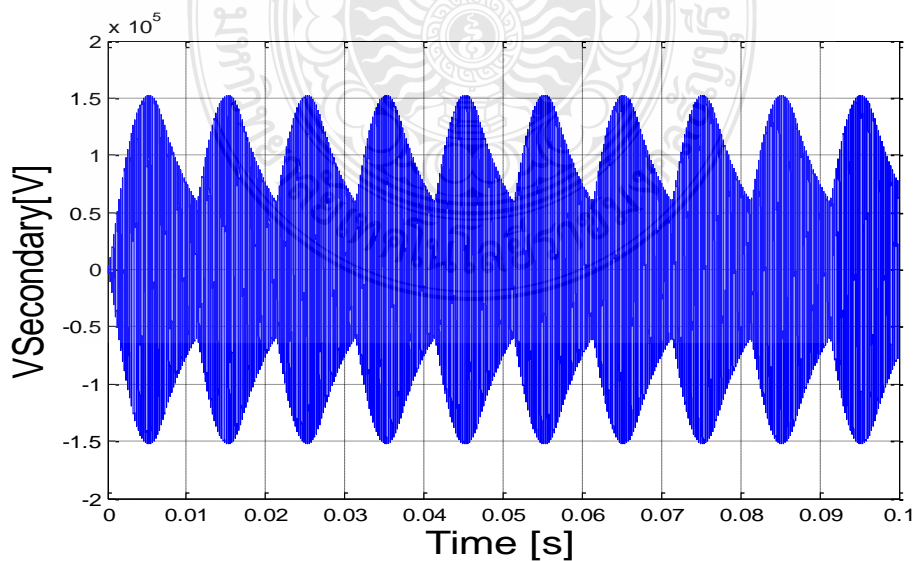
จากตารางที่ 4.2 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 จะสังเกตเห็นได้ว่ากรณีไม่มี  
 ลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นที่ 132 kHz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 145 kV เมื่อปรับ Duty  
 Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์(IGBT)อยู่ที่ 311V และกระแส  
 ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ +75 A ถึง -25 A

#### 4.1.4 การจำลองระบบแบบใช้วงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

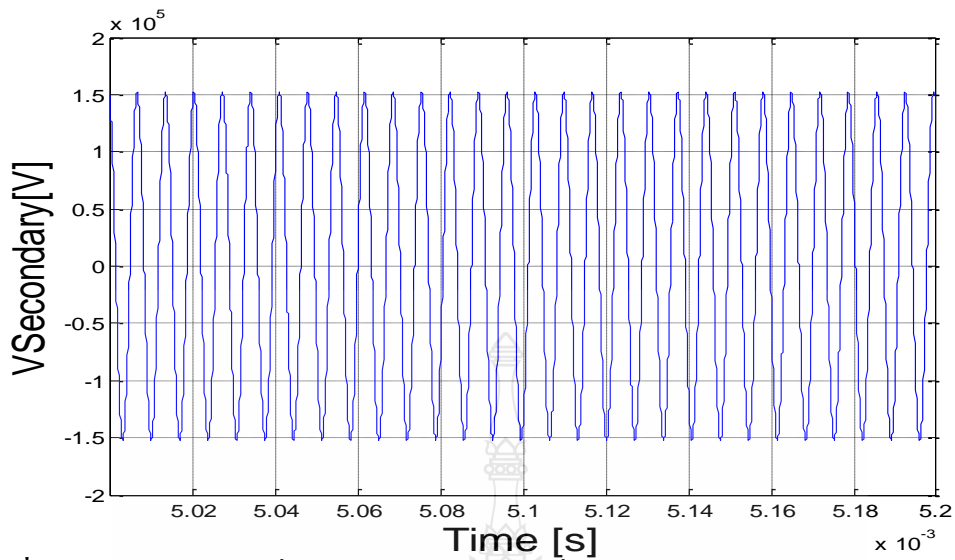
การจำลองระบบแบบใช้วงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ผู้วิจัยได้ทำการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ให้  
 ทำงานที่ย่านความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้แล้วจึงทำการปรับจูนให้ได้ความถี่ที่ถูกต้องเช่นเดียวกับ  
 วงจรฮาร์โมนิกอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 4.14 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรพูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 4.15 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 145 kHz Duty Cycle 20% ไม่ต่อลูกถ้วย



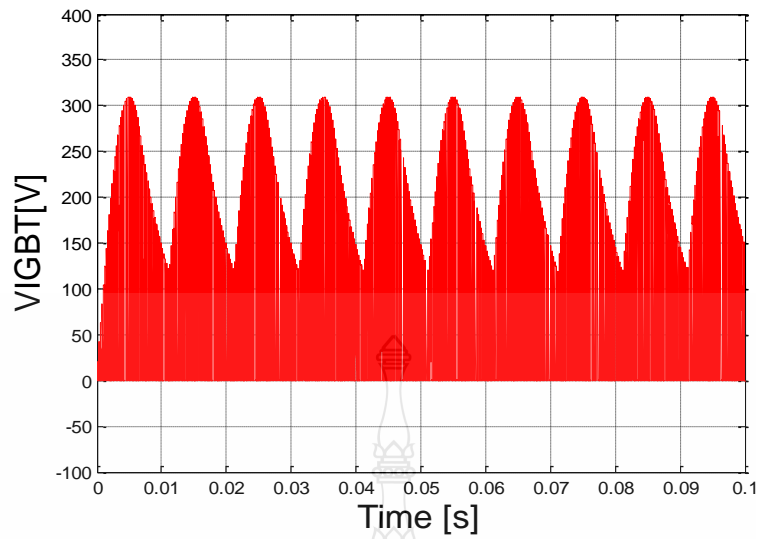
ภาพที่ 4.16 ขยายรูปแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 145 kHz Duty Cycle 20% ไม่ต่อลูกถ้วย

ตารางที่ 4.4 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกรวมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฟูลบริดจ์แบบไม่ต่อลูกถ้วย

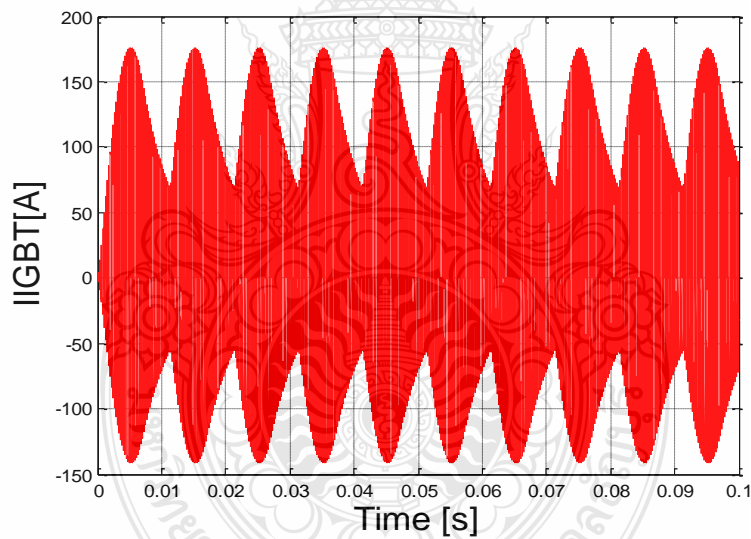
Duty cycle =40%				f=145kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	D	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
135	70	311	+50,-20	40	360	311	±400
140	125	311	+110,-75	30	350	311	±400
<b>145</b>	<b>360</b>	<b>311</b>	<b>±400</b>	<b>20</b>	<b>150</b>	<b>311</b>	<b>+175,-145</b>
150	70	311	±100	10	10	311	30

ตารางที่ 4.5 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกรวมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆของวงจรฟูลบริดจ์แบบต่อลูกถ้วย

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
<b>85</b>	<b>800</b>	<b>311</b>	<b>+1,100,-750</b>	<b>20</b>	<b>175</b>	<b>311</b>	<b>+250,-200</b>
90	40	311	+110,-75	10	7.5	311	30



ภาพที่ 4.17 แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) วงจรฟูแลบริดจ์ ที่ความถี่ 145 kHz D 20%



ภาพที่ 4.18 กระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) วงจรฟูแลบริดจ์ ที่ความถี่ 145 kHz D 20%

จากตารางที่ 4.4 และรูปคลื่นสัญญาณในภาพที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 จะสังเกตเห็นได้ว่ากรณีไม่ต่อลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นที่ 145 kHz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 150 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ +175 A ถึง -145 A

## 4.2 การเลือกรูปแบบในการสร้างโซลิตสเตตเทสล่าคอยล์จากผลการจำลองระบบ

จากการจำลองระบบในการหาความเหมาะสมในการสร้างหม้อแปลง โซลิตสเตตเทสล่า ทั้ง 4 รูปแบบพบว่า การสร้างโซลิตสเตตเทสล่าด้วยการใช้สวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำให้ หม้อแปลงเทสล่ามีประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกับ การใช้สวิตช์แบบสปาร์กแกป โดยการใช้สปาร์กแกป จะสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงได้ 150 kV 150 kHz ส่วนการใช้สวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ จะสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงได้ 240 kV 160 kHz แต่มีข้อสังเกตคือ หม้อแปลงเทสล่าแบบใช้สปาร์กแกป จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิในการป้อนให้สูงมากถึง 4000 V เมื่อเทียบกับแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิเพียง 220 V แต่ข้อเสียเปรียบของแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์คือ แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์มีค่าสูงมาก ทำให้จำเป็นต้องหาอุปกรณ์สวิตซ์ที่มีพิกัดกำลังสูง ซึ่งหายากและมีราคาแพง

จากข้อจำกัดทางพิกัด อุปกรณ์สวิตซ์ข้างต้นเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการสวิตซ์ ด้วยการเปรียบเทียบการจำลองระบบอีก 3 รูปแบบ คือแบบสวิตซ์โดยตรง แบบวงจรถาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และแบบวงจรถาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ตามพิกัดความต้องการในการออกแบบก็จะสามารถเลือกรูปแบบที่เหมาะสมได้

**ตารางที่ 4.6** เปรียบเทียบผลการจำลองระบบเพื่อเลือกรูปแบบในการสร้างหม้อแปลง โซลิตสเตตเทสล่า

รูปแบบ	เงื่อนไข		Vs (kV)	f kHz	V <sub>igbt</sub> V	I <sub>igbt</sub> A	Duty %
	A	B					
ออกแบบ			100	200			
Direct switch	/		100	160	1,500	1,450	30
		/	150	160	1,800	1,420	30
Half Bridge	/		145	132	311	+75,-25	20
		/	160	80	311	+125,-80	30
Full Bridge	/		150	145	311	+200,-200	20
		/	175	85	311	+250,-200	20

หมายเหตุ A คือกรณีไม่ต่อลูกถ้วย และ B คือกรณีต่อลูกถ้วย

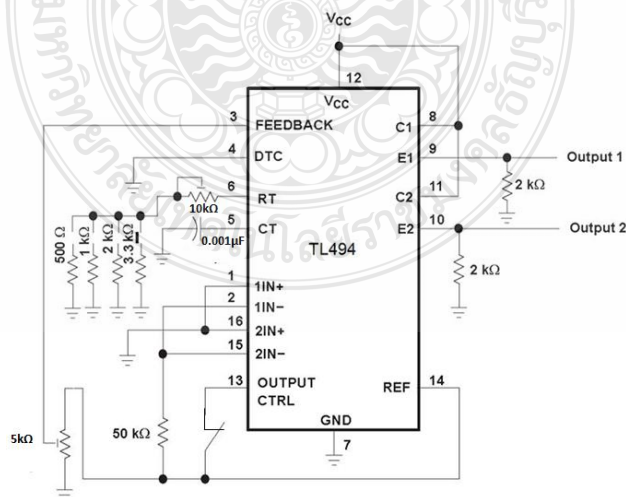
จากตารางที่ 4.6 พบว่าพิกัดที่เหมาะสมในการออกแบบสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลาอยู่ที่รูปแบบ วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากมีพิกัดแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ต่ำสุด

### 4.3 สร้างหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา

จากการจำลองระบบที่ได้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลไปใช้ในการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์สวิตซ์ที่เหมาะสม และสร้างหม้อแปลง โซลิตสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 145 kV 132 kHz โดยใช้ IGBT เบอร์ 1MBI300F-060 พิกัดแรงดัน 600 V กระแส  $\pm 300$  A ต่อแบบวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้วงจรสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรรวม TL494 และ ขับเกตด้วยวงจรรวม TLP250 เมื่อสร้างแล้วได้ขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz ใกล้เคียงกับการจำลองระบบ

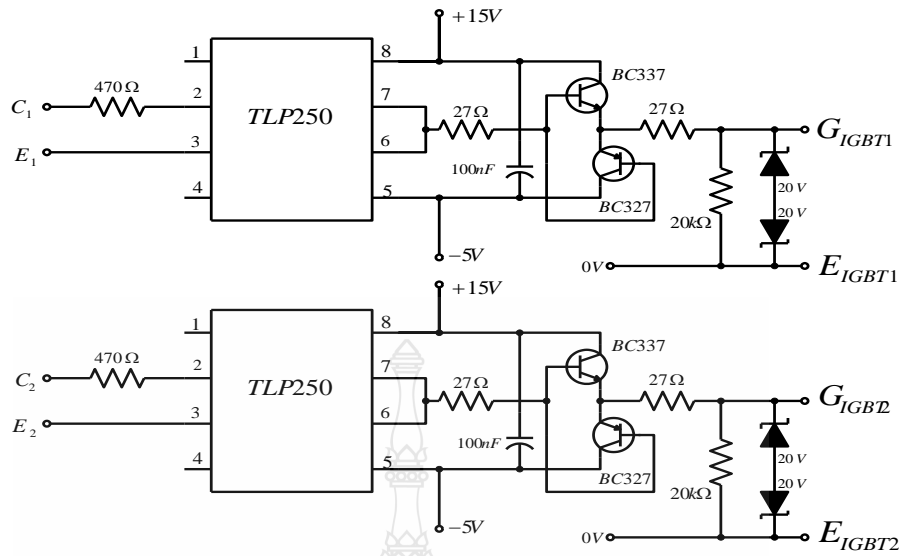


ภาพที่ 4.19 อุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT 1MBI300F-060)

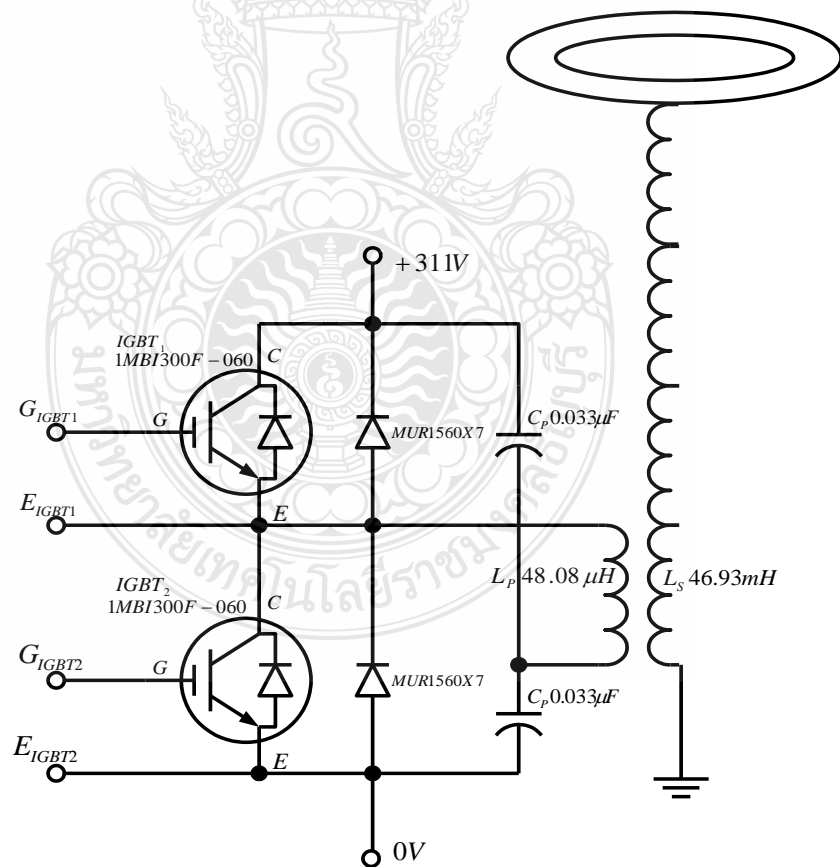


ภาพที่ 4.20 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ด้วยวงจรรวม เบอร์ TL494

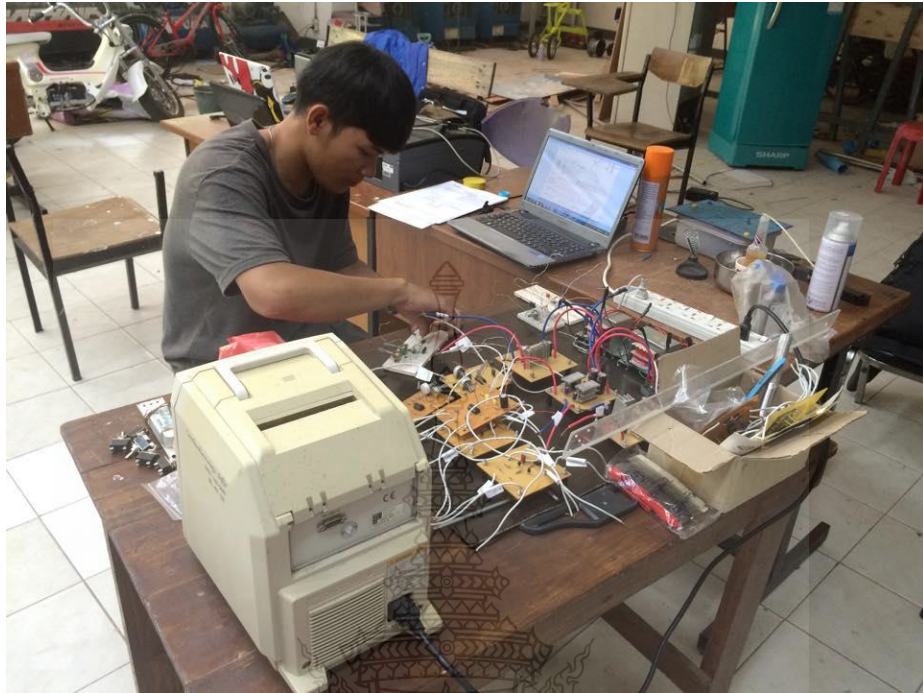




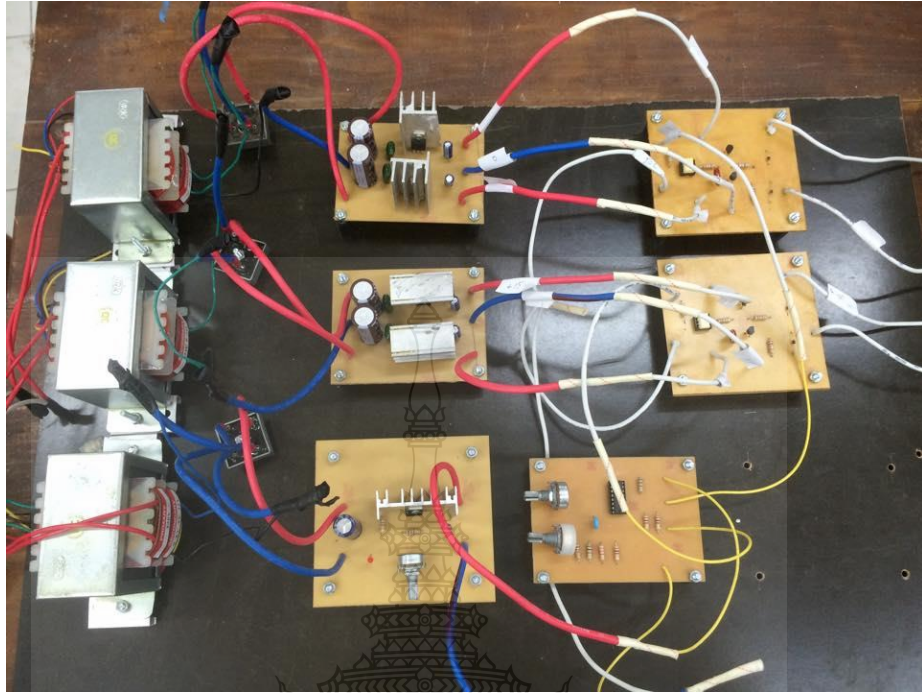
ภาพที่ 4.21 วงจรขับเกตด้วยวงจรรวม TLP250



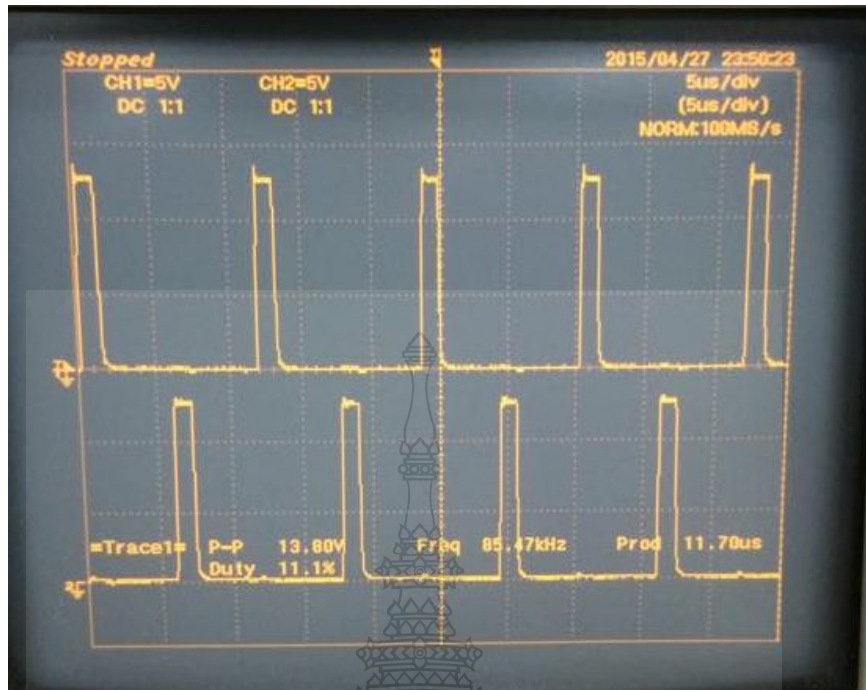
ภาพที่ 4.22 วงจรหม้อแปลงโซลิตสแตตเทสต่ำ



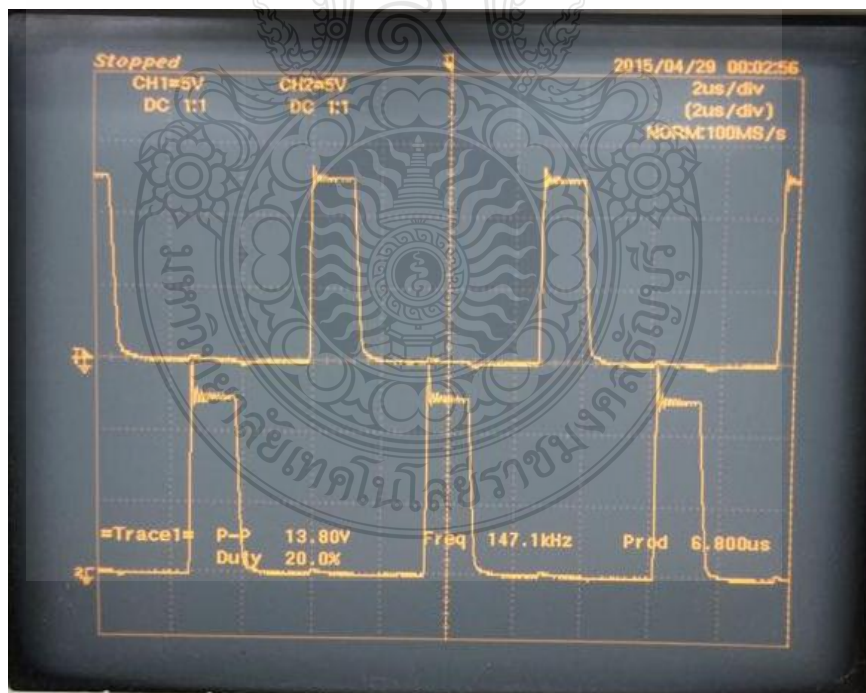
ภาพที่ 4.23 การจัดทำวงจรควบคุมหม้อแปลงโซลิตสเต็ดเตสล่า



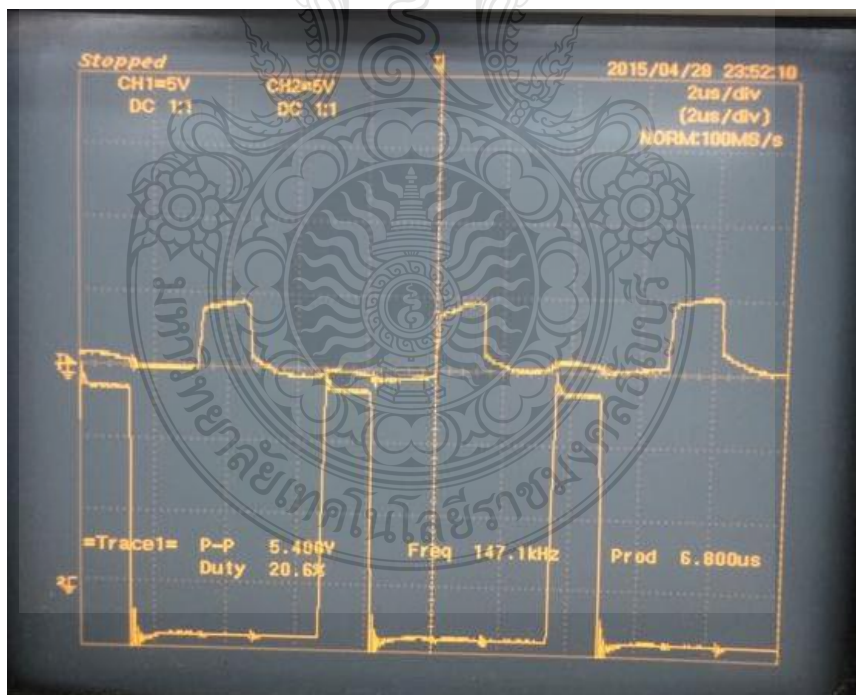
ภาพที่ 4.24 วงจรสร้างสัญญาณPWM และวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แปลงโซลิตสแตตเทสล่า



ภาพที่ 4.25 สัญญาณPWM จากวงจรรวม TL494 ที่ความถี่ 85.47 kHz Duty cycle 11%



ภาพที่ 4.26 สัญญาณPWM จากวงจรรวม TL494 ที่ความถี่ 147 kHz Duty cycle 20%



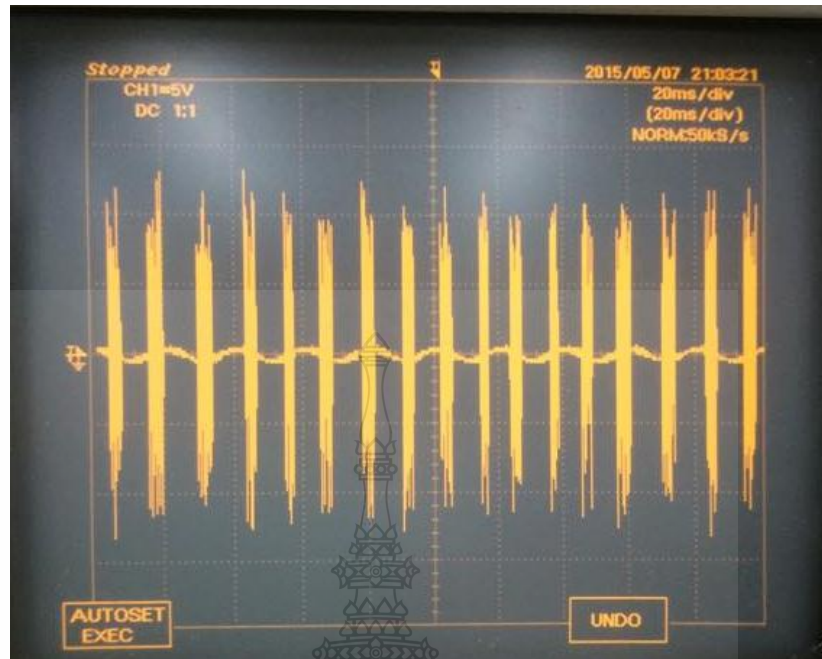
ภาพที่ 4.27 สัญญาณควบคุม จากวงจรรวม TLP250 ที่ความถี่ 147 kHz Duty cycle 20%



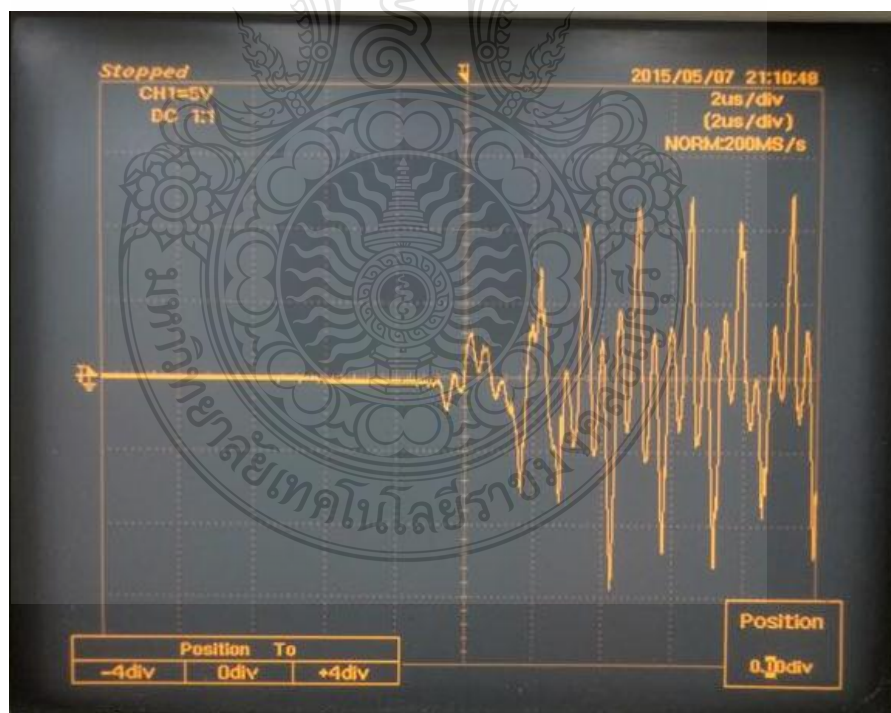
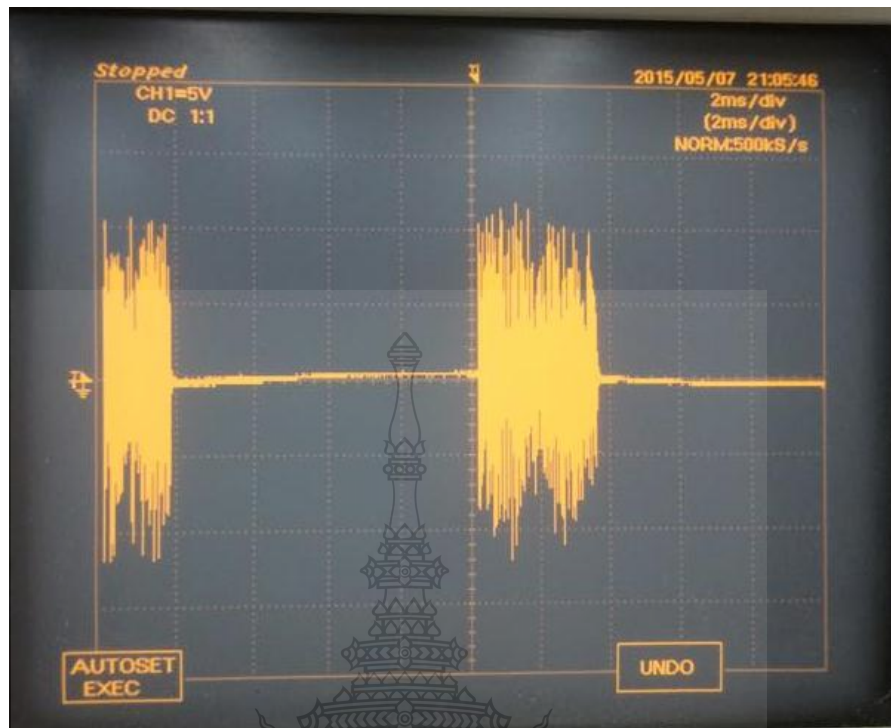
ภาพที่ 4.28 หม้อแปลงโซลิตสแตตเทสท่าขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz ที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 4.29 คลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันสูง ที่วัดด้วยวิธี Voltage divider



ภาพที่ 4.30 คลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันสูงที่แสดงการเกิดออสซิลชัน



ภาพที่ 4.31 ภาพขยายคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันสูงที่แสดงการเกิดออสซิลชัน





ภาพที่ 4.32 หม้อแปลงโซลิตสเตรตเตสต่ำ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 คำนำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลง โขลิตสเตรตเตสล่า ขนาด พิกัด 100 kV 150 kHz โดยมีสมมุติฐานว่าหม้อแปลง โขลิตสเตรตเตสล่าที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพ ใกล้เคียงกับหม้อแปลงเตสล่าที่ใช้การสวิตช์ด้วยสปาร์กแกป โดยได้ทำการออกแบบหม้อแปลงเตส ล่าสูงกว่าพิกัดที่กำหนดที่ 150 kV 200kHz เมื่อทำการออกแบบแล้ว จึงนำข้อมูลการออกแบบไปสร้าง ส่วนประกอบต่างๆของหม้อแปลงเตสล่า แล้วทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ แล้วนำไป จำลองระบบเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการสร้าง โดยมีเงื่อนไขสำคัญคือขนาดพิกัดของอุปกรณ์ สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ จะต้องมีความเหมาะสม ที่จะนำมาสร้างก็ต้องมีราคาไม่สูงจนเกินไป

#### 5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลง โขลิตสเตรตเตสล่า ขนาด พิกัด 100 kV 150 kHz โดยได้ออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่างๆหม้อแปลงเตสล่าแล้วทำการวัด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ แล้วนำไปจำลองระบบเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมในการสร้าง เพื่อให้การสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ได้ทำการจำลองใน 4 รูปแบบคือ

การจำลองระบบแบบใช้สวิตช์แบบสปาร์กแกป มีเป็นการจำลองระบบเป็นสองแบบคือ แบบ ที่มีการต่อลูกถ้วยเข้ากับด้านแรงดันสูง และแบบที่ไม่ต่อลูกถ้วยเข้ากับด้านแรงดันสูง โดยควบคุมการ ทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ให้ตัดต่อวงจรทุก 10 ms และควบคุมสวิตช์ด้วยการปรับ Duty Cycle พบว่า กรณีที่ Duty Cycle มีค่าน้อย จะส่งผลให้เกิดแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสล่ามีค่าลดลง หากเพิ่ม Duty Cycle จะทำให้แรงดันทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น กรณีที่ค่าแรงดันมีความใกล้เคียงกับ ขนาดพิกัดหม้อแปลงเตสล่าที่ออกแบบ คือ 150 kV 150 kHz อยู่ที่มีการปรับ Duty Cycle 50 % ขณะต่อ ลูกถ้วยที่ด้านแรงดันสูงมีข้อสังเกตคือการใช้สปาร์กแกปจะต้องจ่ายแรงดันทางด้านปฐมภูมิถึง 4,000 V

การจำลองระบบแบบใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบต่อโดยตรง มีเป็นการจำลองระบบเป็นสอง แบบคือ แบบที่มีการต่อลูกถ้วยเข้ากับด้านแรงดันสูง และแบบที่ไม่ต่อลูกถ้วยเข้ากับด้านแรงดันสูง โดย ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ให้ตัดต่อวงจรทุก 10 ms และควบคุมสวิตช์ด้วยการปรับ Duty Cycle พบว่ากรณีที่ Duty Cycle มีค่าน้อย จะส่งผลให้เกิดแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสล่า

มีค่าสูง หากเพิ่ม Duty Cycle จะทำให้แรงดันทางด้านทุติยภูมิลดลง กรณีที่ค่าแรงดันมีความใกล้เคียงกับขนาดพิกัดหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบ คือ 150 kV 160 kHz อยู่ที่มีการปรับ Duty Cycle 30 % ขณะต่อลูกถ้วยที่ด้านแรงดันสูง มีแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ที่ 1,800 V มีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ที่ 1,420 A จ่ายแรงดันทางด้านปฐมภูมิ 220 V

การจำลองระบบแบบต่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ มีเป็นการจำลองระบบเป็นสองแบบคือ แบบที่มีการต่อลูกถ้วยเข้ากับด้านแรงดันสูง และแบบที่ไม่ต่อลูกถ้วยเข้าด้านแรงดันสูง โดยควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ และควบคุมสวิตช์ด้วยการปรับ Duty Cycle พบว่ากรณีที่ Duty Cycle มีค่าน้อย จะส่งผลให้เกิดแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาที่มีลดลง หากเพิ่ม Duty Cycle จะทำให้แรงดันทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น กรณีที่ค่าแรงดันมีความใกล้เคียงกับขนาดพิกัดหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบ คือ 145 kV 132 kHz อยู่ที่มีการปรับ Duty Cycle 20 % ขณะไม่ต่อลูกถ้วยที่ด้านแรงดันสูง มีแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ที่ 311 V มีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ที่ +75 ถึง -25 A จ่ายแรงดันทางด้านปฐมภูมิ 220 V

การจำลองระบบแบบต่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ มีเป็นการจำลองระบบเป็นสองแบบคือ แบบที่มีการต่อลูกถ้วยเข้ากับด้านแรงดันสูง และแบบที่ไม่ต่อลูกถ้วยเข้าด้านแรงดันสูง โดยควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ และควบคุมสวิตช์ด้วยการปรับ Duty Cycle พบว่ากรณีที่ Duty Cycle มีค่าน้อย จะส่งผลให้เกิดแรงดันทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาที่มีลดลง หากเพิ่ม Duty Cycle จะทำให้แรงดันทางด้านทุติยภูมิเพิ่มขึ้น กรณีที่ค่าแรงดันมีความใกล้เคียงกับขนาดพิกัดหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบ คือ 150 kV 145 kHz อยู่ที่มีการปรับ Duty Cycle 20 % ขณะไม่ต่อลูกถ้วยที่ด้านแรงดันสูง มีแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ที่ 311 V มีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ที่ +175 ถึง -145 A จ่ายแรงดันทางด้านปฐมภูมิ 220 V

จากการจำลองทั้ง 4 รูปแบบ พบว่า การออกแบบสร้างหม้อแปลง โซลิตสเตตเตสลา สามารถสร้างให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์คแกป และรูปแบบการต่อวงจรแบบฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์มีความเหมาะสมที่สุดในการสร้างเนื่องจากมีพิกัดของอุปกรณ์สวิตช์ต่ำที่สุดคือพิกัดแรงดันที่ 311 V พิกัดกระแสที่  $\pm 75$  A จ่ายแรงดันให้กับด้านปฐมภูมิ 220 V เมื่อผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการสร้างหม้อแปลง โซลิตสเตตเตสลา สามารถสร้างได้ขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz

### 5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นแนวทางศึกษาวิเคราะห์การออกแบบสร้างหม้อแปลง โขลิตสเดตเตสล่า ซึ่งได้แสดงแนวคิด และเสนอแนวทางในการจำลองระบบในการเลือกขนาดพิกัดอุปกรณ์ที่เหมาะสมในการสร้างหม้อแปลง โขลิตสเดตเตสล่าเนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ที่มีพิกัดแรงดันและกระแสที่สูงนั้น มักมีราคาแพง งานวิจัยนี้จึงเหมาะกับผู้สนใจศึกษาในด้านไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงในการใช้เทคโนโลยีในการออกแบบสร้างหม้อแปลง โขลิตสเดตเตสล่า ที่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป



## บรรณานุกรม

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2528
- [2] อำนาจ สุขศรี, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 2543
- [3] ชีรพล เดโชเกียรติวัฒน์, ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2553
- [4] สมเกียรติ ทองแก้ว, การศึกษาผลกระทบชุดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเตสลาเพื่อหาแบบที่เหมาะสม, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2551
- [5] Plangklang B, Apiratikul P, Phumkittipich K, “ **Development of Low-Cost Tesla Transformer for High Performance testing 115 kV Line Post Insulator**” Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, 2008
- [6] Denicolai M, “**Tesla Transformer for Experimentation and Research.**” Helsinki University of Technology May 2001
- [7] Tilbury M, “ **The ULTIMATE Tesla Coil Design AND CONSTRUCTION GUIDE** ” The Mc Graw Hill Companies, 2008
- [8] ไชยพร หล่อทองคำ “หนังสือปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2550
- [9] ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, ทง ลานธารทอง “ **การออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลา 120 KV 120 KHz สำหรับทดสอบลูกถ้วยฉนวน**” การประชุมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล วิชาการ ครั้งที่ 2, 2552
- [10] สมเกียรติ ทองแก้ว, ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, บุญยัง ปลั่งกลาง, ชนากร น้ำหอมจันทร์ “**การวิเคราะห์ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแรงสูงในขดลวด LP และ LS ของหม้อแปลงเตสลาเพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ**” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 EECON30 25-26 ตุลาคม 2550, โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว รีสอร์ท, กาญจนบุรี

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] อุคม พรหมศรีจันทร์, นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร, ไชยพร หล่อทองคำ “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลาโดยเทคนิคฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์” การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 EECON 32
- [12] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแกป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์”, การประชุมทางวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 TREC 6 ,คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 13-15 พฤศจิกายน 2556
- [13] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแกป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์”, การประชุมทางวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 EENET 2014 มาริไทม์ ปาร์คแอนสปาร์ริสอร์ท จังหวัดกระบี่ 26-28 มีนาคม 2557
- [14] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง”, การประชุมทางวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 10 E-NETT 10 ,คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 4-6 มิถุนายน 2557
- [15] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ”, การประชุมทางวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 TREC 7,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตน โกสินทร์, 12-14 พฤศจิกายน 2557
- [16] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ”, การประชุมทางวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 EENET 2015 โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี 27-29 พฤษภาคม 2558

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [17] ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ 2550
- [18] บุญยั้ง ปลั่งกลาง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง 500 kV 200kHz, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี 2550
- [19] B. Plangklang, S. Woratipromma, P. Apiratikul and W. Plueksawan “ **Analysis of A Designed Solid State Tesla Transformer by Computer Simulation for Study the Effective**” The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH) , KMITL Bangkok, Thailand, June 12-13, 2015



ภาคผนวก



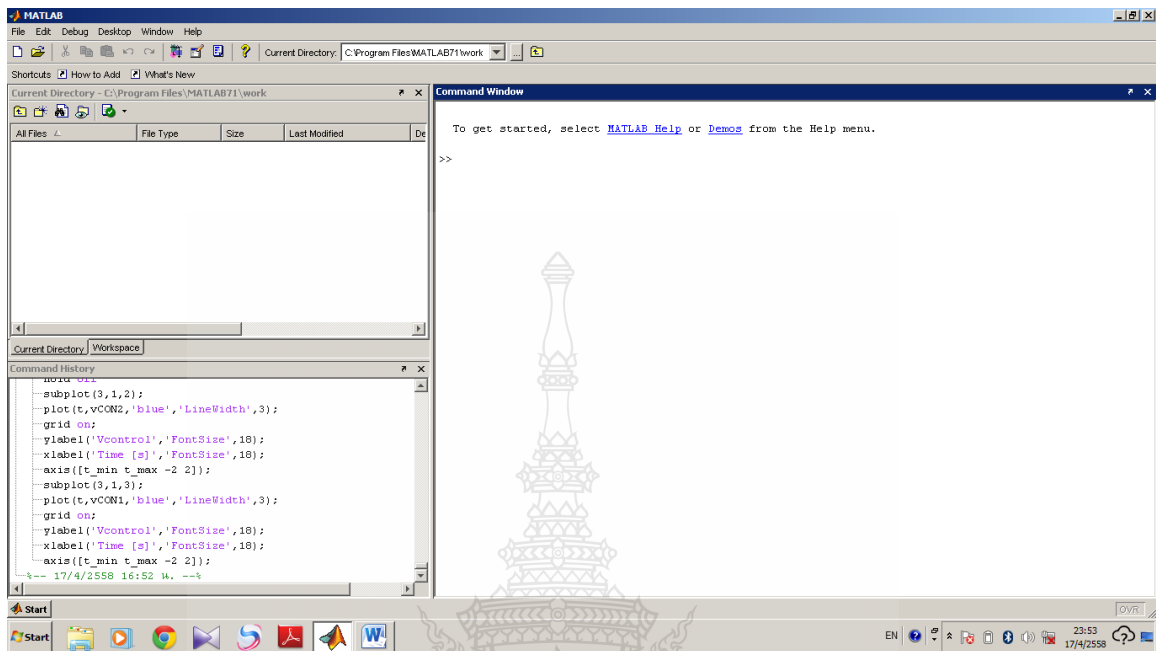


ภาคผนวก ก

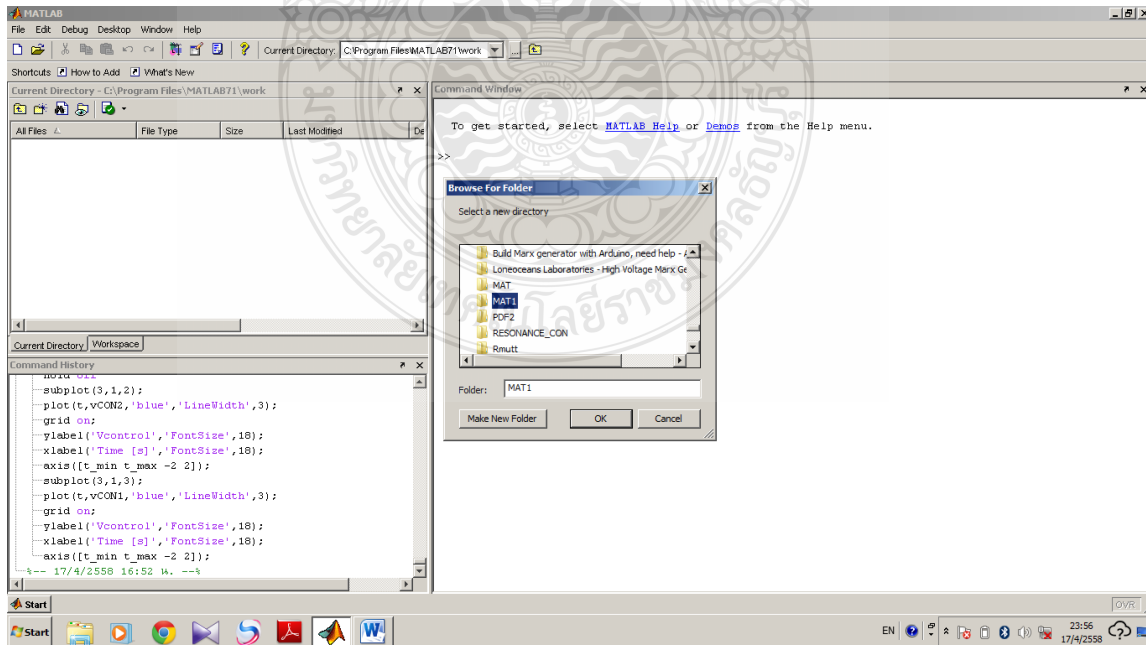
การใช้งานโปรแกรมMATLAB/Simulink ในการจำลองระบบ



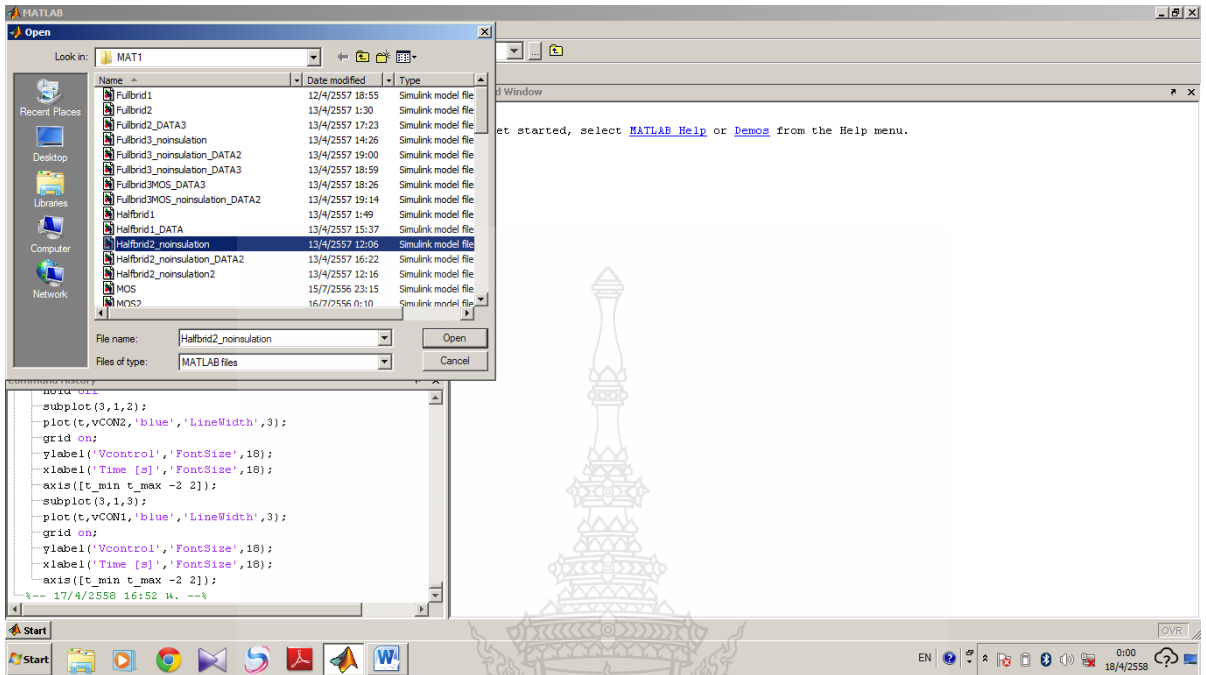
# 1. เปิดโปรแกรม MATLAB



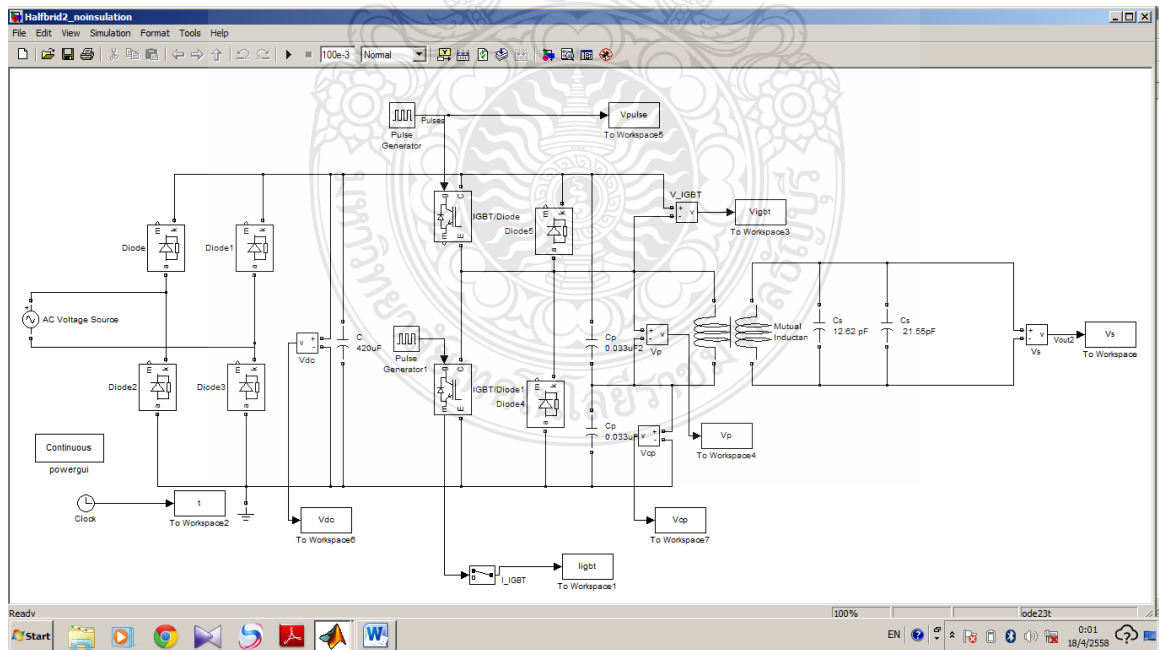
# 2. ไปที่ Current Directory เลือก Folder งานที่เขียนโปรแกรมไว้(MAT1)



### 3. เปิด Model ที่ต้องการจำลองระบบ ( ตัวอย่าง Halfbrid2\_noinsulation\_DATA2)

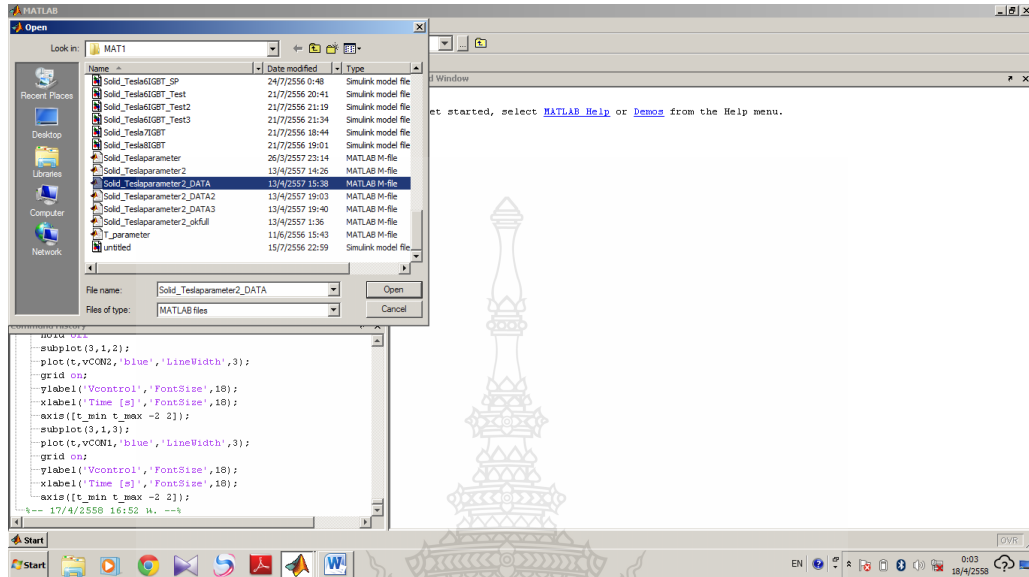


### 4. ได้ Model ที่ต้องการ

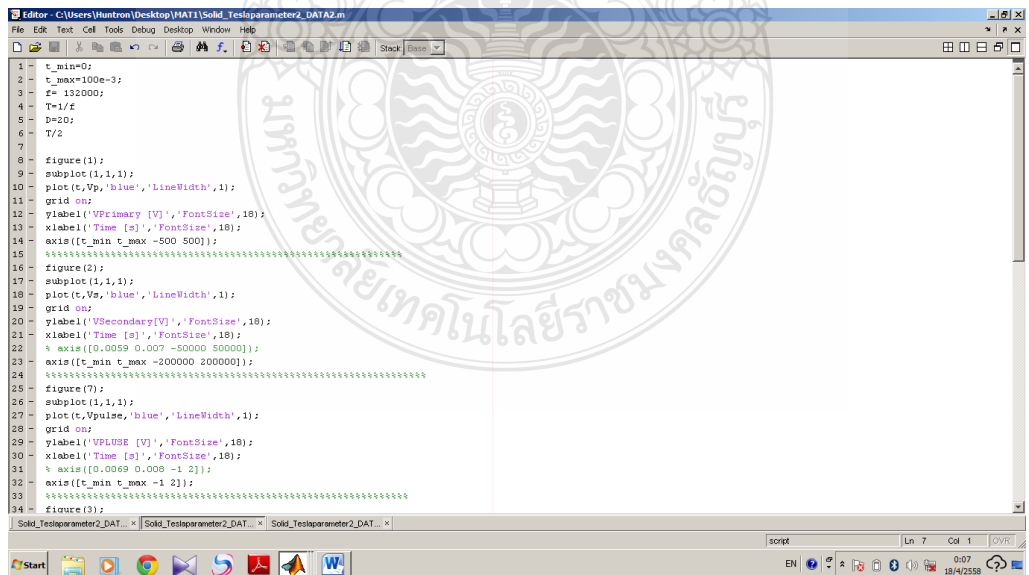


## 5. เปิด M-file ( M-file เป็นข้อมูลพารามิเตอร์ที่เราจะจำลองระบบ)

Solid\_Teslaparameter2\_DATA2



## 6. ได้ M-file ที่ต้องการ



```
t_min=0;
t_max=100e-3;
f= 132000;
T=1/f
D=20;
T/2
```

พารามิเตอร์ของการจำลองระบบ

```
figure(1);
subplot(1,1,1);
plot(t,Vp,'blue','LineWidth',1);
gridon;
ylabel('VPrimary [V]','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_min t_max -500 500]);
```

คำสั่งให้พล็อตกราฟแรงดันPrimary

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
figure(2);
subplot(1,1,1);
plot(t,Vs,'blue','LineWidth',1);
gridon;
ylabel('VSecondary[V]','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
% axis([0.0059 0.007 -50000 50000]);
axis([t_min t_max -200000 200000]);
```

คำสั่งให้พล็อตกราฟแรงดันSecondary

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

figure(7);
subplot(1,1,1);
plot(t,Vpulse,'blue','LineWidth',1);
grid on;
ylabel('VPLUSE [V]','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
% axis([0.0069 0.008 -1 2]);
axis([t_mint_max -1 2]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

คำสั่งให้พล็อตกราฟสัญญาณควบคุม

```

figure(3);
subplot(1,1,1);
plot(t,Iigbt,'red','LineWidth',1);
grid on;
ylabel('IIGBT[A]','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_mint_max -200 200]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

คำสั่งให้พล็อตกราฟกระแสIGBT

```

figure(4);
subplot(1,1,1);
plot(t,Vigbt,'red','LineWidth',1);
grid on;
ylabel('VIGBT[V]','FontSize',18);
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
% axis([t_mint_max -150000000 150000000]);
axis([t_mint_max -500 500]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

คำสั่งให้พล็อตกราฟแรงดันตกคร่อมIGBT

```

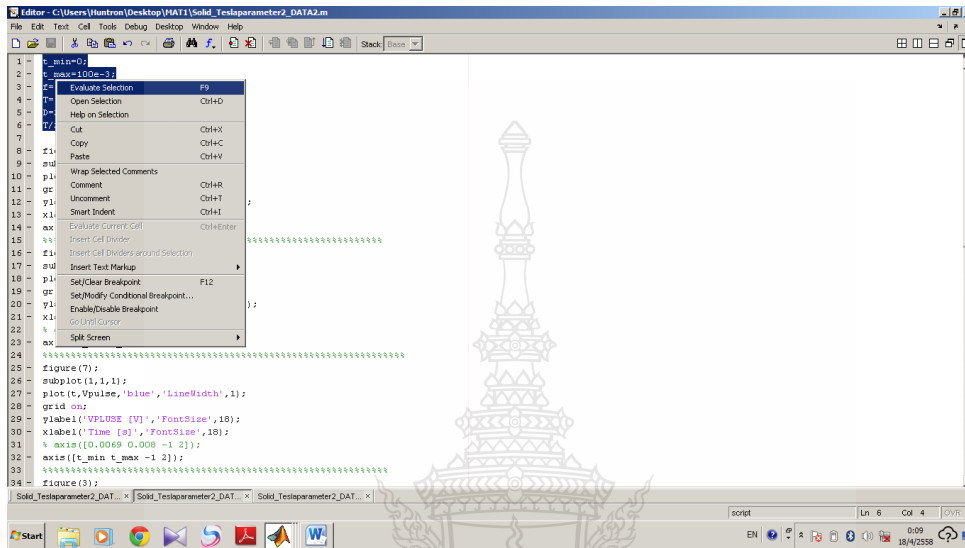
% figure(5);
% subplot(1,1,1);
% plot(t,Vigbt1,'red','LineWidth',1);
% grid on;
% ylabel('VIGBT1[V]','FontSize',18)
% xlabel('Time [s]','FontSize',18);
% % axis([t_mint_max -300000000 300000000]);
% axis([t_mint_max -4000 4000]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(6);
subplot(1,1,1);
plot(t,Vcp,'red','LineWidth',1);
grid on;
ylabel('VCprimary[V]','FontSize',18)
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_mint_max -15000 15000]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(8);
subplot(1,1,1);
plot(t,Vdc,'red','LineWidth',1);
grid on;
ylabel('Vdc[V]','FontSize',18)
xlabel('Time [s]','FontSize',18);
axis([t_mint_max -600 600]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

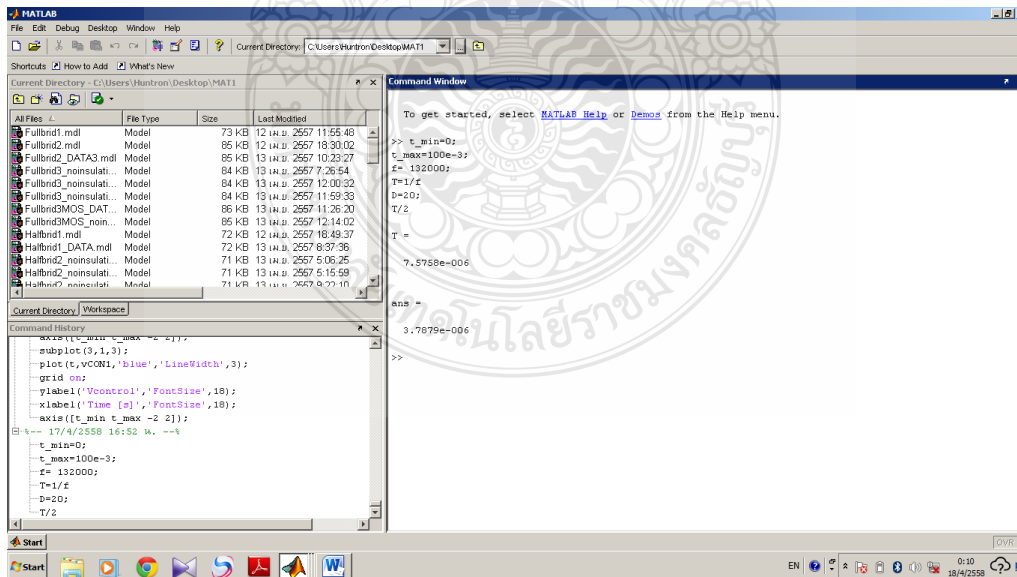
คำสั่งให้พล็อตกราฟแรงดันตกคร่อมCp

คำสั่งให้พล็อตกราฟแรงดันVdc

7. เริ่มการจำลองระบบด้วยการ Run ค่าพารามิเตอร์ ใช้เมาส์คลิกค่าพารามิเตอร์คลิกขวาแล้ว กด Evaluate Selection F9

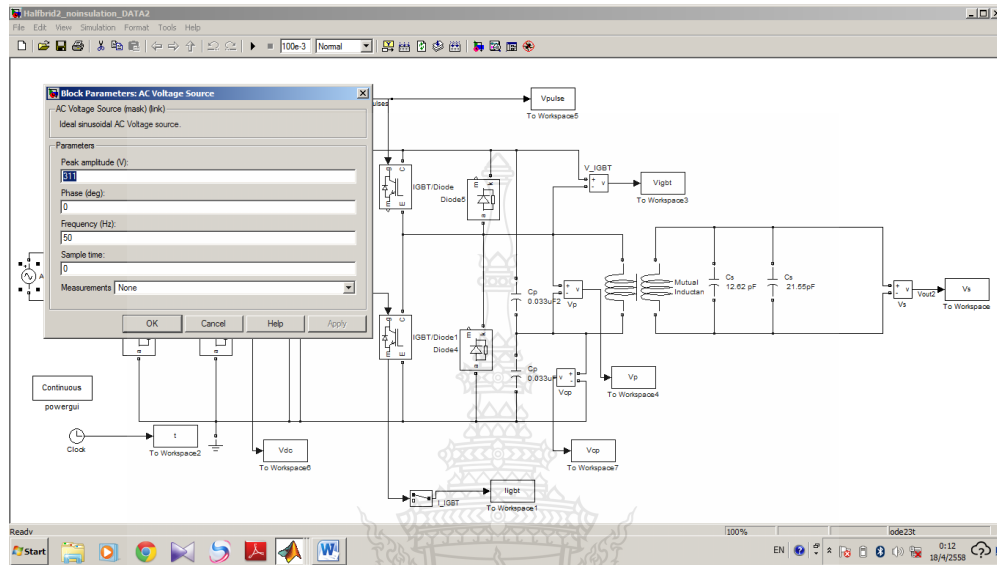


8. ดูผลการ Run ที่หน้า MATLAB ว่ามีข้อผิดพลาดหรือไม่

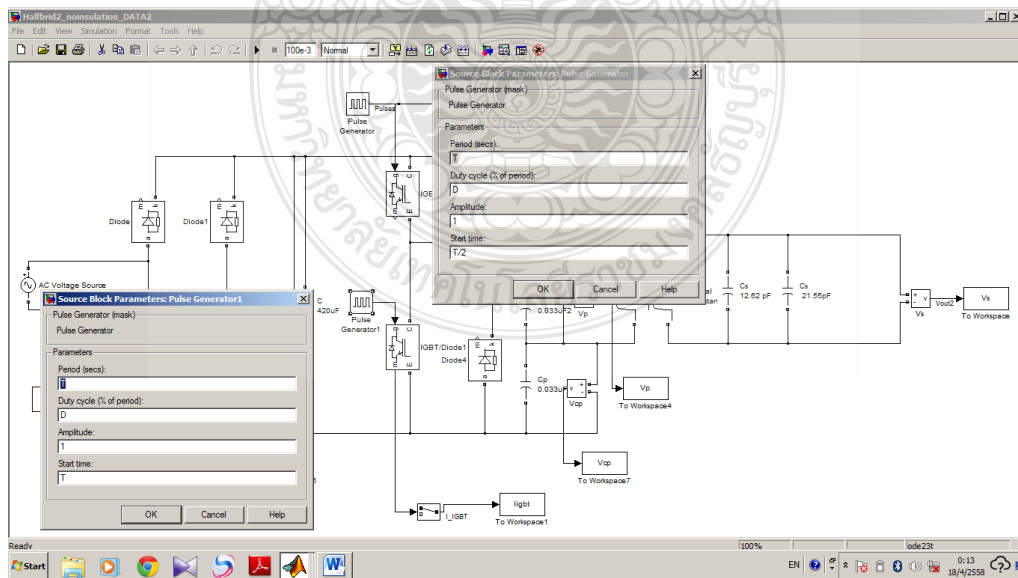




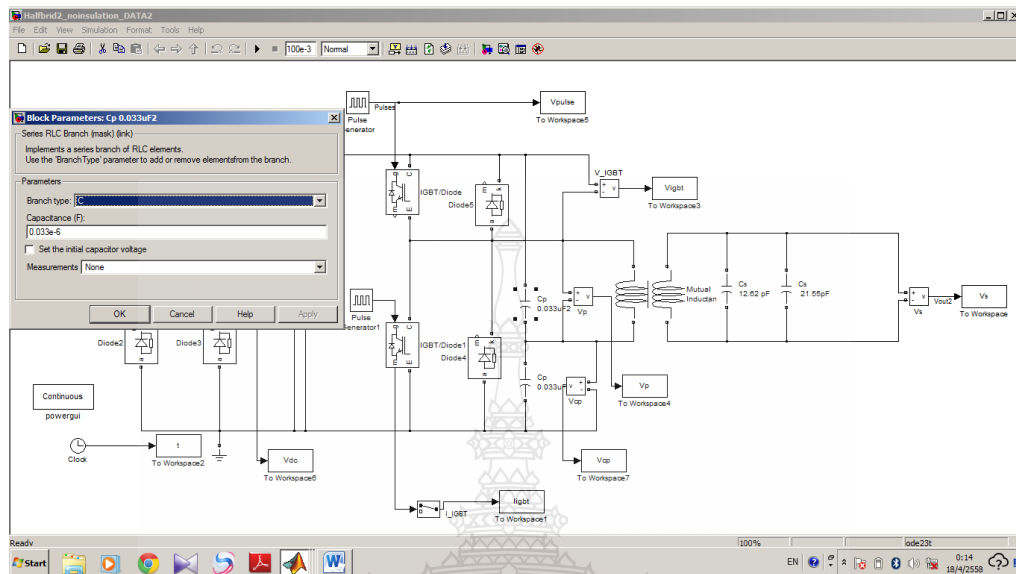
9. หากไม่มีข้อผิดพลาดให้ไปที่หน้า Model แล้วตรวจสอบพารามิเตอร์ต่างๆ (แรงดันอินพุท 311 V 50 Hz)



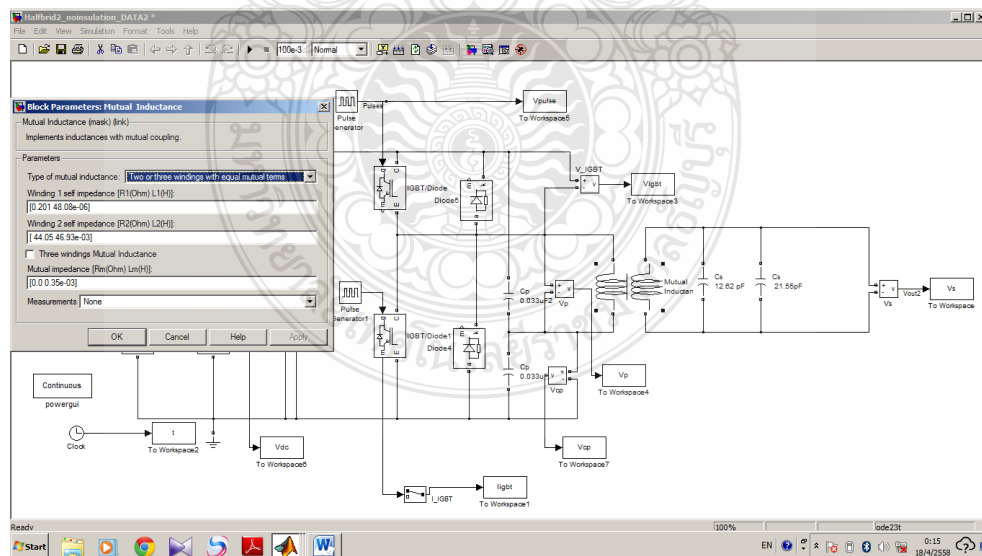
10. ตรวจสอบสัญญาณควบคุมเกต ของ IGBT



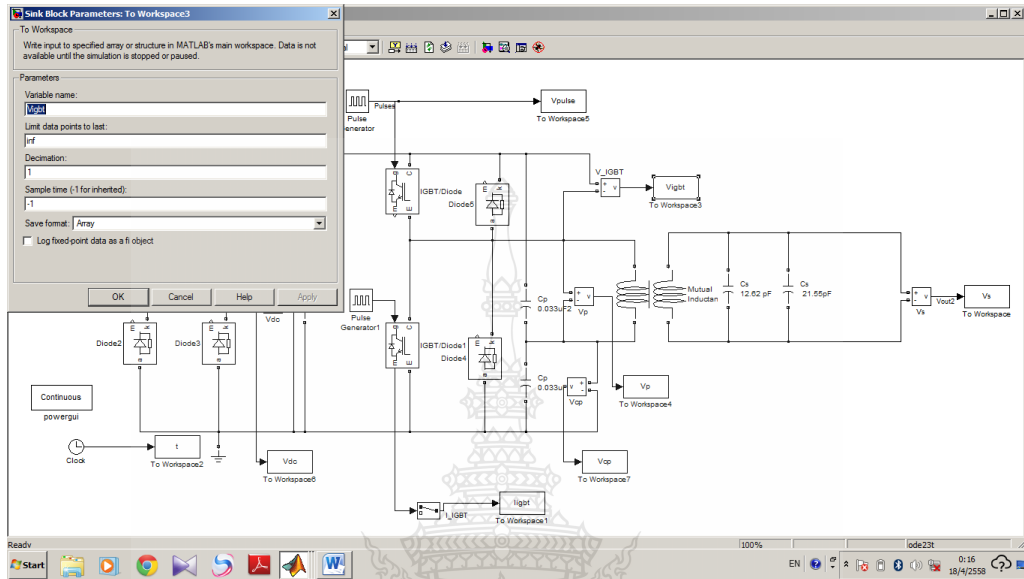
## 11. ตรวจสอบค่าคาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำ (0.033 $\mu\text{F}$ กรณีไม่ต่อถูกด้วยด้านแรงดันสูง)



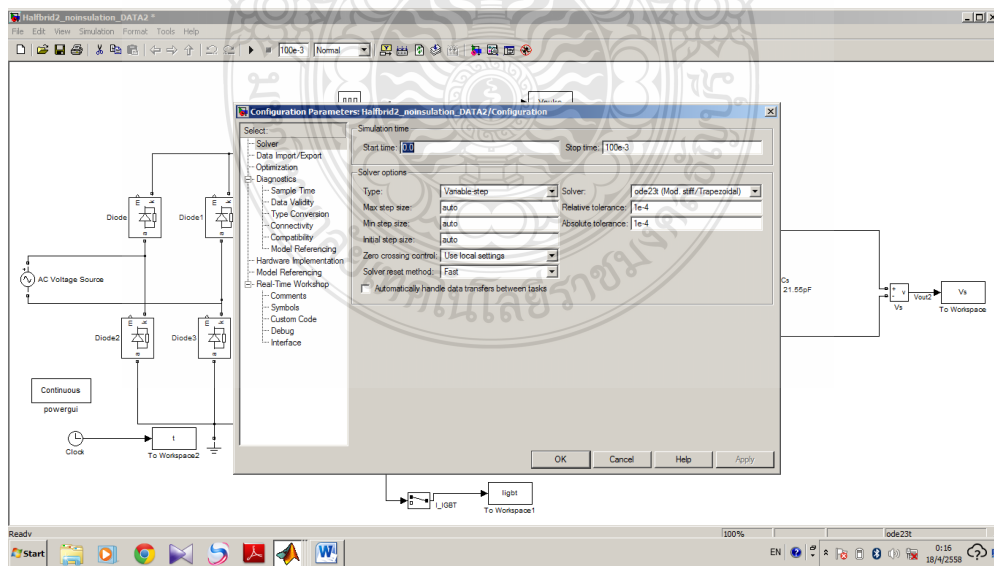
## 12. ตรวจสอบค่า L ของหม้อแปลงเตสส์



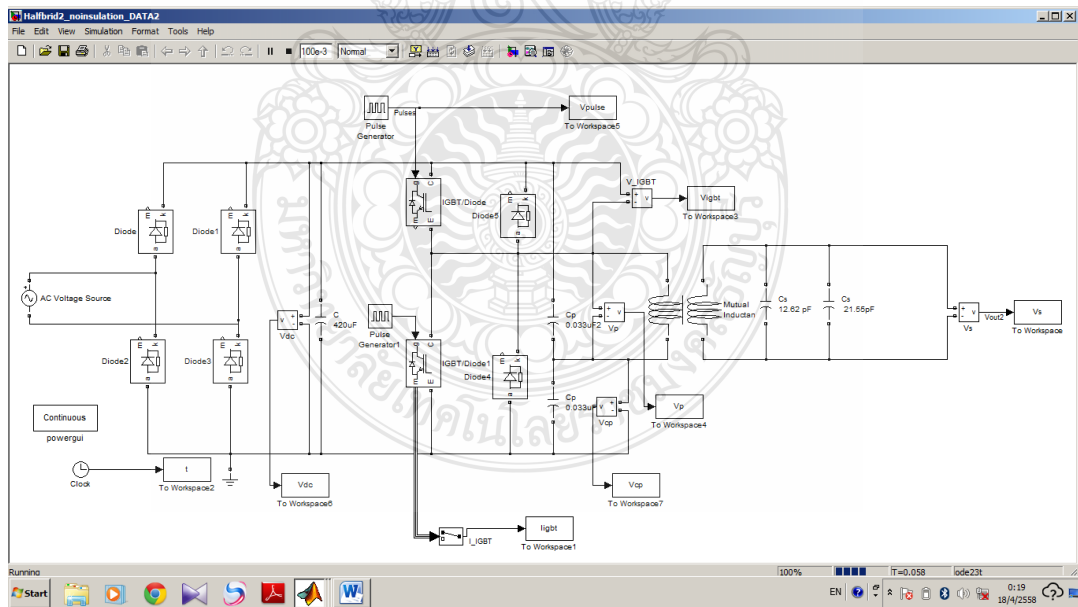
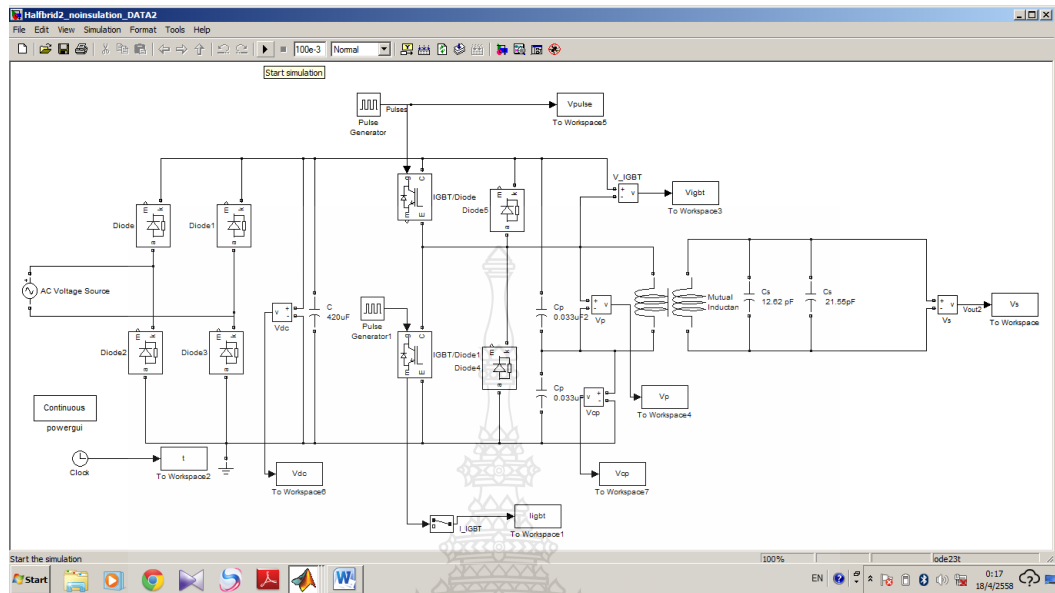
### 13. ตรวจสอบรูปแบบการวัดค่าจาก Workspace ให้เป็นชนิด Array



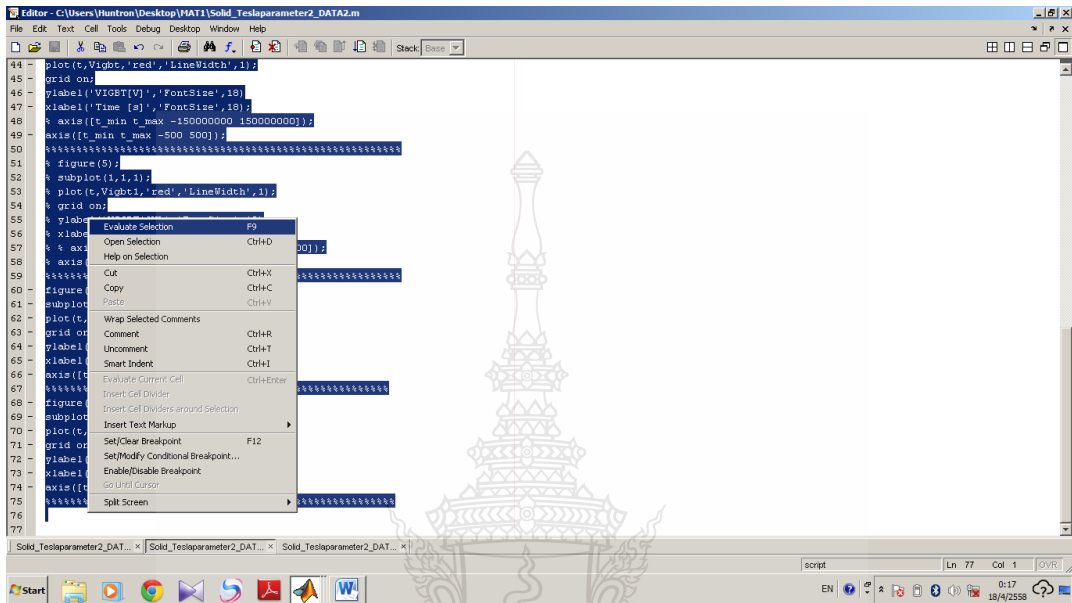
### 14. ตั้งค่า Configuration



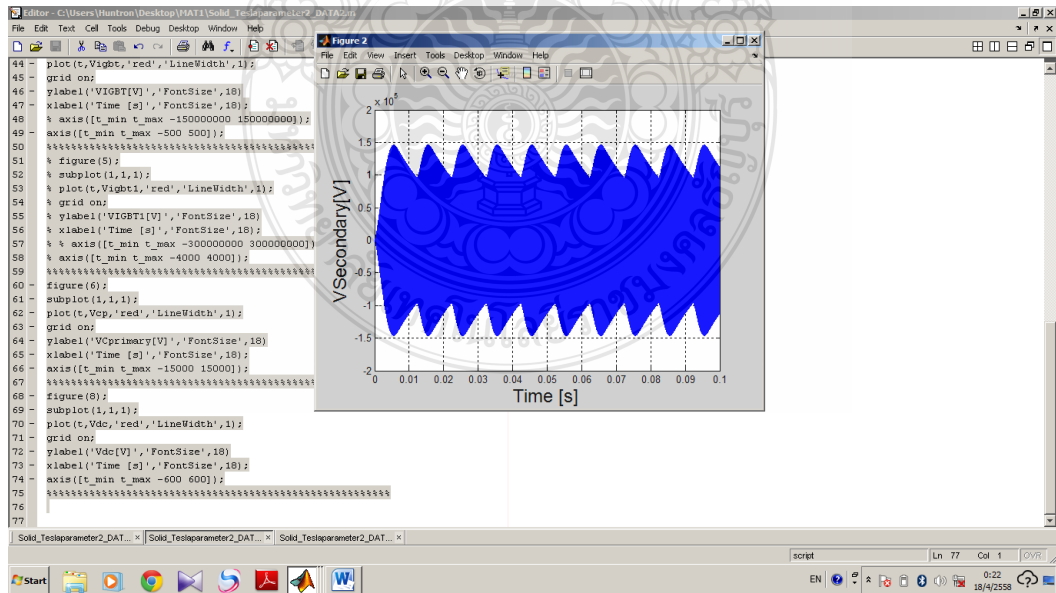
## 15. Start Simulation แล้วรอ การRun Model



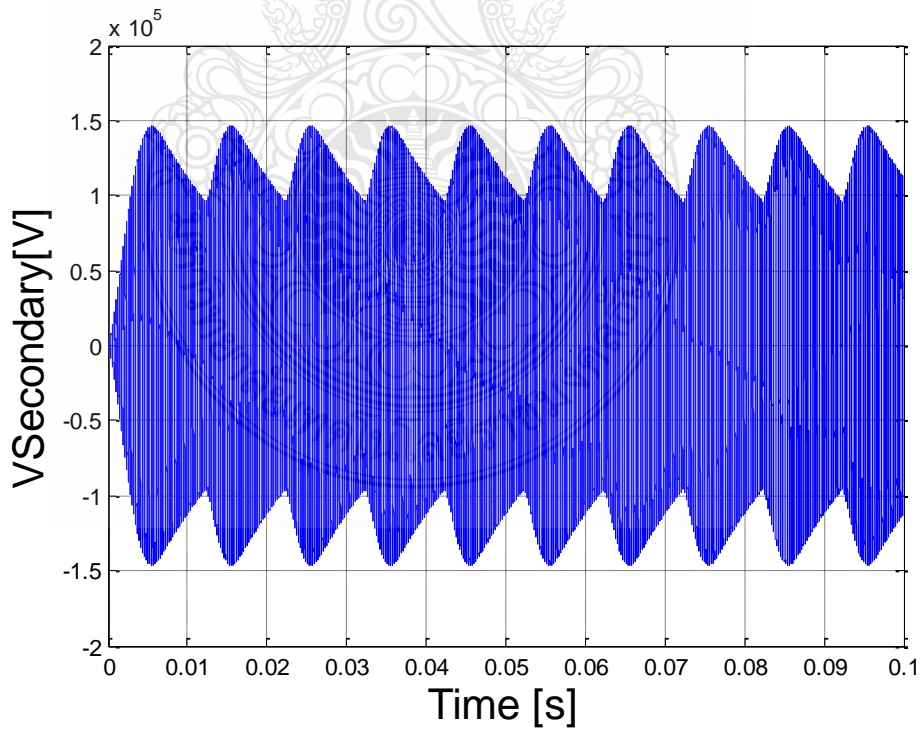
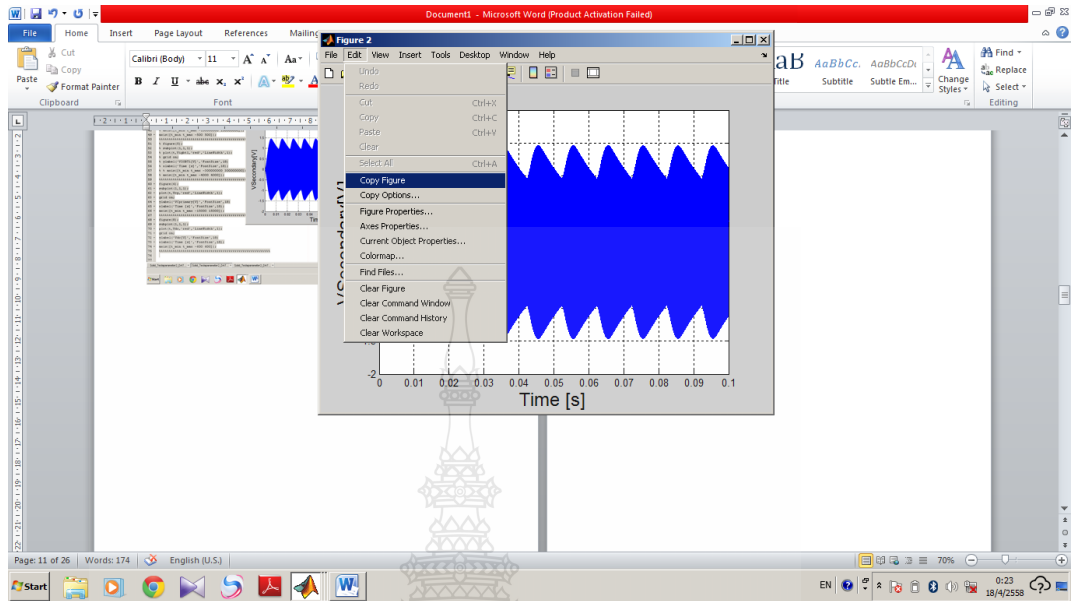
16. ตรวจสอบหน้า MATLAB ว่าเกิดข้อผิดพลาดหรือไม่ หากไม่มีไปเปิดหน้า M-file แล้ว  
 ครอบคำสั่งโปรดกราฟ แล้วคลิก Evaluate Selection F9



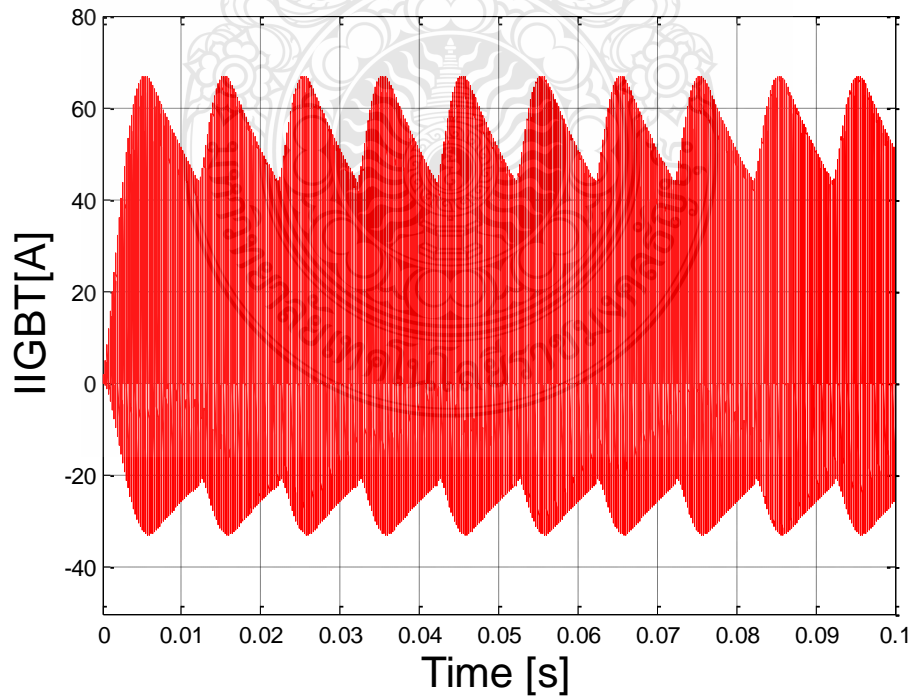
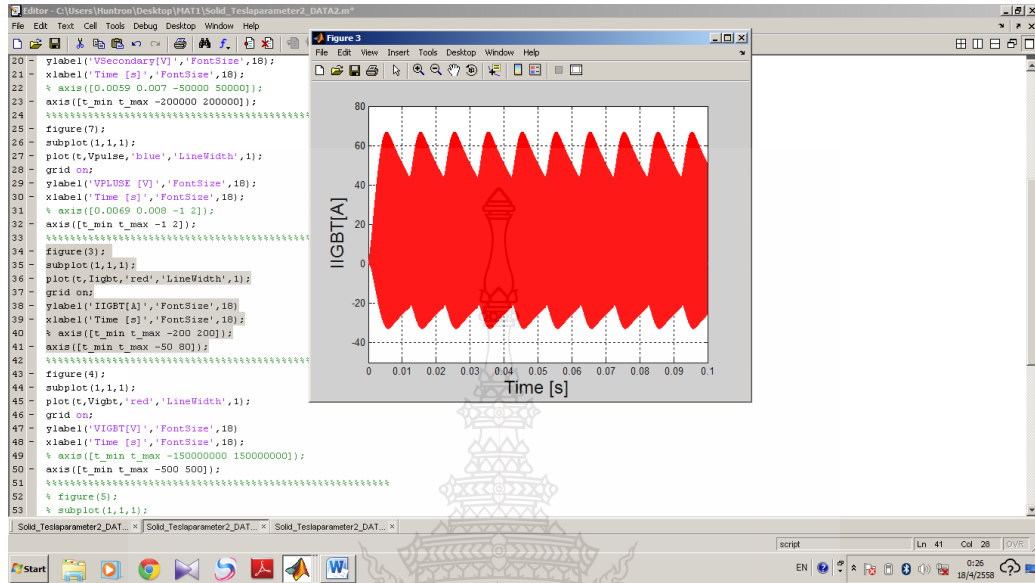
17. จะได้กราฟดังรูป (ตัวอย่างเป็นกราฟแรงดันด้านแรงดันสูง)

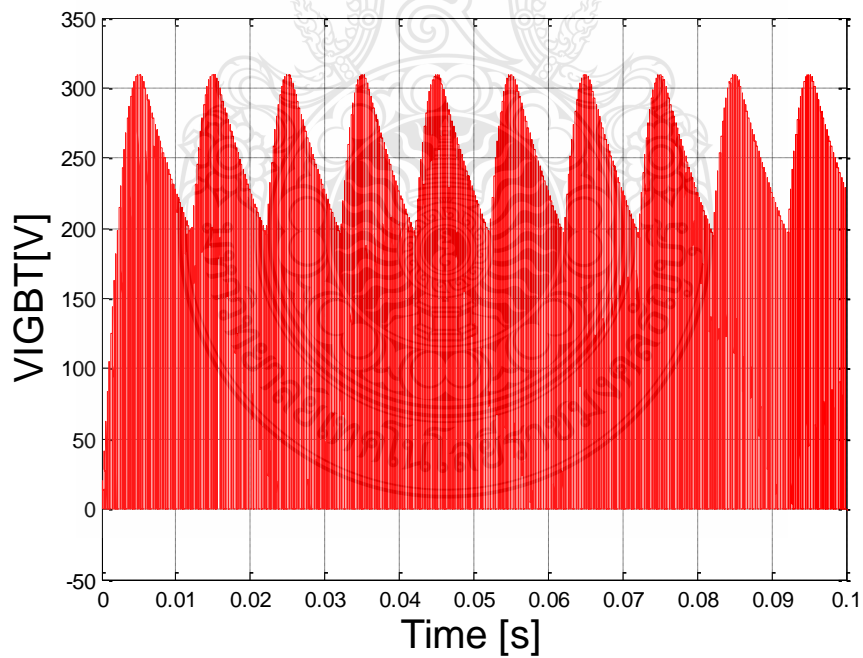
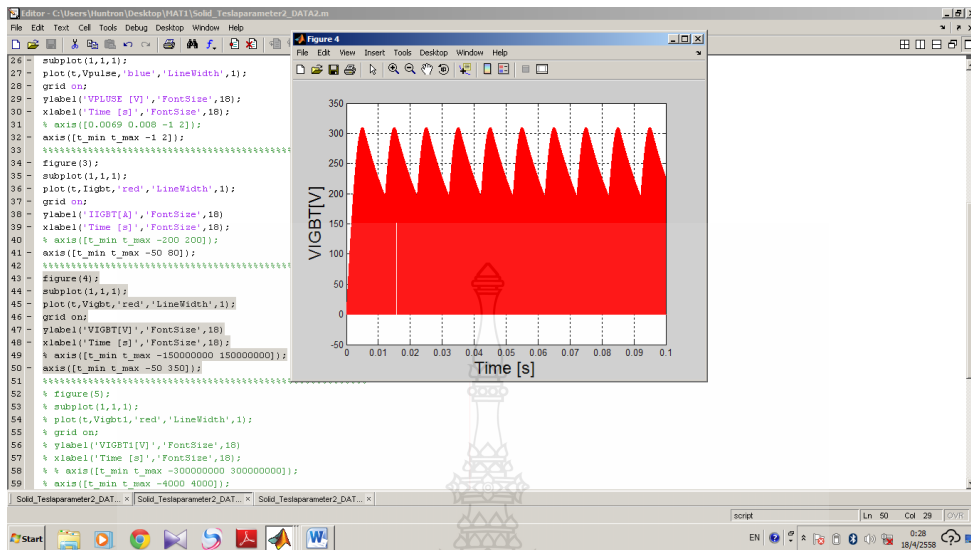


18. หากต้องการรูปภาพให้เลือก Edit แล้วกด Cope Figure จะได้รูปตามต้องการ



19. หากต้องการแก้สเกลของภาพให้แก้ไขที่ axis([t\_min t\_max -600 600]); แล้วRunใหม่เฉพาะรูปได้ทันที ไม่ต้องRun Model







ภาคผนวก ข  
ข้อมูลอุปกรณ์สวิตช์(IGBT)



# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

Silicon N-channel IGBT 4500V E2 version

**FEATURES**

- \* Low switching loss IGBT module.
- \* Low noise due to ultra soft fast recovery diode.
- \* High reliability, high durability module.
- \* High thermal fatigue durability.  
( $\Delta T_c=70^\circ\text{C}$ ,  $N>30,000$ cycles)
- \* Isolated heat sink (terminal to base).

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_c=25^\circ\text{C}$ )**

Item	Symbol	Unit	MBN800H45E2-H
Collector Emitter Voltage	$V_{CES}$	V	4,500
Gate Emitter Voltage	$V_{GES}$	V	$\pm 20$
Collector Current	DC	$I_c$	800 ( $T_c=80^\circ\text{C}$ )
	1ms	$I_{cp}$	1,600
Forward Current	DC	$I_F$	800
	1ms	$I_{FM}$	1,600
Junction Temperature	$T_j$	$^\circ\text{C}$	$-40 \sim +125$
Maximum Junction Temperature(1)	$T_{vj\max}$	$^\circ\text{C}$	150
Storage Temperature	$T_{stg}$	$^\circ\text{C}$	$-50 \sim +125$ (2)
Isolation Voltage	$V_{iso}$	$V_{RMS}$	10,200 (AC 1 minute)
Screw Torque	Terminals (M4/M8)	-	2/10 (3)
	Mounting (M6)	-	6 (4)

Notes: (1) Regarding the condition of  $T_{vj\max}$  for each operation mode, please refer to LD-ES-130737.  
 (2) Terminal temperature shall not exceed the specified temperature in any operation.  
 (3) Recommended Value  $1.8 \pm 0.2/9 \pm 1\text{N}\cdot\text{m}$  (4) Recommended Value  $5.5 \pm 0.5\text{N}\cdot\text{m}$

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

Item	Symbol	Unit	Min.	Typ.	Max.	Test Conditions
Collector Emitter Cut-Off Current	$I_{CES}$	mA	-	-	17	$V_{CE}=4,500\text{V}$ , $V_{GE}=0\text{V}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$
Gate Emitter Leakage Current	$I_{GES}$	nA	-500	-	67	$V_{CE}=4,500\text{V}$ , $V_{GE}=0\text{V}$ , $T_j=125^\circ\text{C}$
Collector Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	V	3.5	4.2	4.7	$I_c=800\text{A}$ , $V_{GE}=15\text{V}$ , $T_j=125^\circ\text{C}$
Gate Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(TH)}$	V	5.4	6.4	7.4	$V_{CE}=10\text{V}$ , $I_c=800\text{mA}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$
Input Capacitance	$C_{ies}$	nF	-	110	-	$V_{CE}=10\text{V}$ , $V_{GE}=0\text{V}$ , $f=100\text{kHz}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$
Internal Gate Resistance	$R_{ge}$	$\Omega$	-	1.2	-	$V_{CE}=10\text{V}$ , $V_{GE}=0\text{V}$ , $f=100\text{kHz}$ , $T_j=25^\circ\text{C}$
Switching Times	Rise Time	$t_r$	1.0	2.1	4.2	$V_{cc}=2,600\text{V}$ , $I_c=800\text{A}$
	Turn On Time	$t_{on}$	1.3	2.7	5.4	$L_s=180\text{nH}$
	Fall Time	$t_f$	1.2	2.4	3.6	$R_g=4.7\Omega$ (5)
	Turn Off Time	$t_{off}$	2.4	4.8	7.2	$V_{GE}=\pm 15\text{V}$ , $T_j=125^\circ\text{C}$
Peak Forward Voltage Drop	$V_{FM}$	V	3.0	3.7	4.2	$I_F=800\text{A}$ , $V_{GE}=0\text{V}$ , $T_j=125^\circ\text{C}$
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$\mu\text{s}$	0.3	0.7	1.4	$V_{cc}=2,600\text{V}$ , $I_F=800\text{A}$ , $L_s=180\text{nH}$ $T_j=125^\circ\text{C}$
Turn On Loss	$E_{on(10\%)}$	J/p	-	2.1	TBD	$V_{cc}=2,600\text{V}$ , $I_c=I_F=800\text{A}$ , $L_s=180\text{nH}$ $R_g=4.7\Omega$ (5)
	$E_{on(full)}$	J/p	-	2.5	-	
Turn Off Loss	$E_{off(10\%)}$	J/p	-	2.1	TBD	$V_{GE}=\pm 15\text{V}$ , $T_j=125^\circ\text{C}$
	$E_{off(full)}$	J/p	-	2.5	-	
Reverse Recovery Loss	$E_{rr(10\%)}$	J/p	-	1.7	TBD	$V_{GE}=\pm 15\text{V}$ , $T_j=125^\circ\text{C}$
	$E_{rr(full)}$	J/p	-	1.9	-	
Thermal Impedance	IGBT	$R_{th(j-c)}$	K/W	-	0.013	Junction to case
	FWD	$R_{th(j-c)}$	K/W	-	0.026	
Contact Thermal Impedance		$R_{th(c-f)}$	K/W	-	0.007	Case to fin ( $\lambda_{grease}=1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , Heat-sink flatness $\leq 50\mu\text{m}$ )

Notes: (5)  $R_g$  value is the test condition's value for evaluation of the switching times, not recommended value.  
 Please, determine the suitable  $R_g$  value after the measurement of switching waveforms (overshoot voltage, etc.) with appliance mounted.

- \* Please contact our representatives at order.
- \* For improvement, specifications are subject to change without notice.
- \* For actual application, please confirm this spec sheet is the newest revision.

**HITACHI**

# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

## DEFINITION OF TEST CIRCUIT

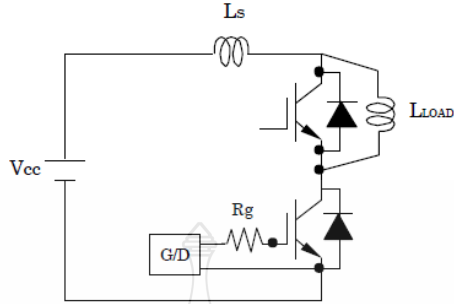


Fig.1 Switching test circuit

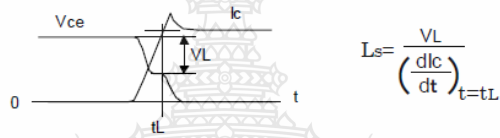


Fig.2 Definition of Ls

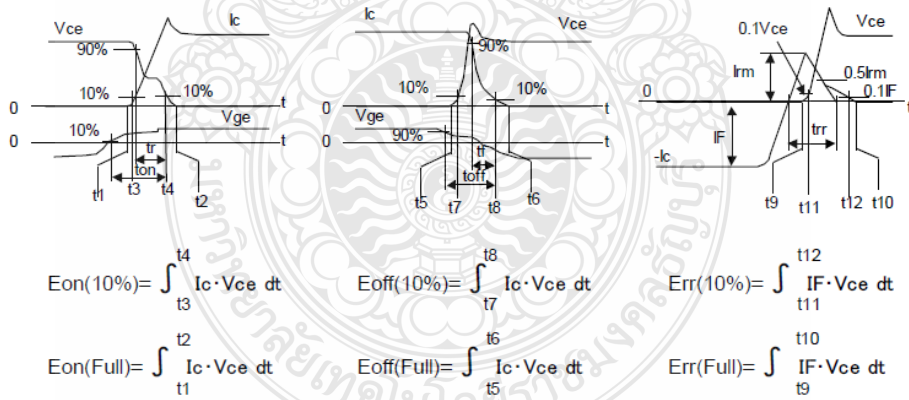


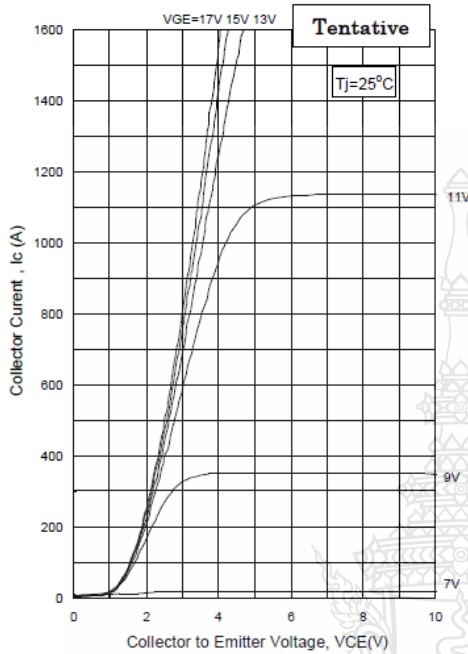
Fig.3 Definition of switching loss

**HITACHI**

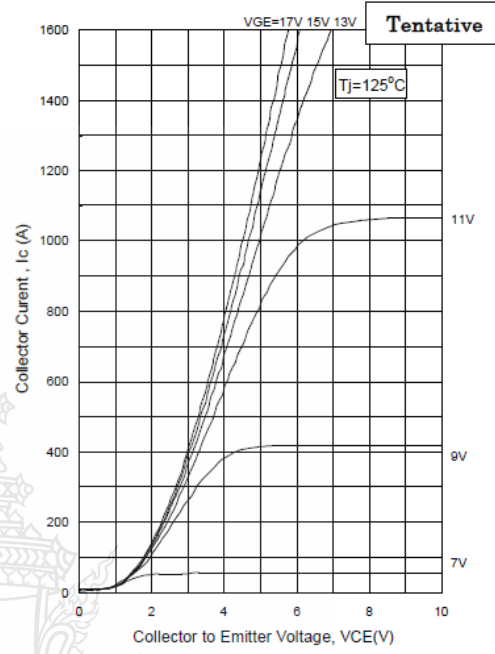
# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

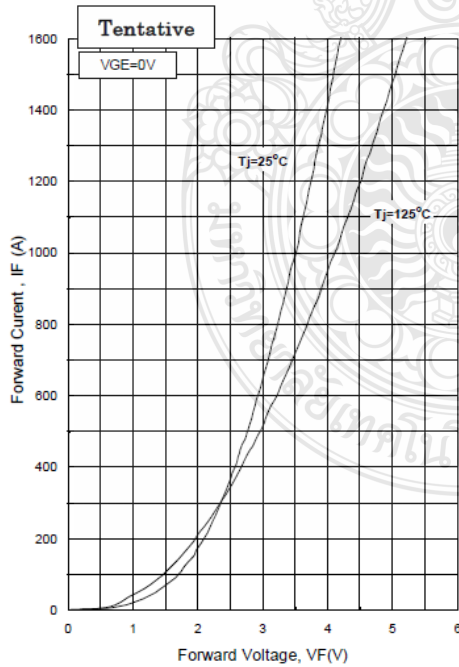
## STATIC CHARACTERISTICS



Ic vs. VCE(Tj=25°C)



Ic vs. VCE(Tj=125°C)



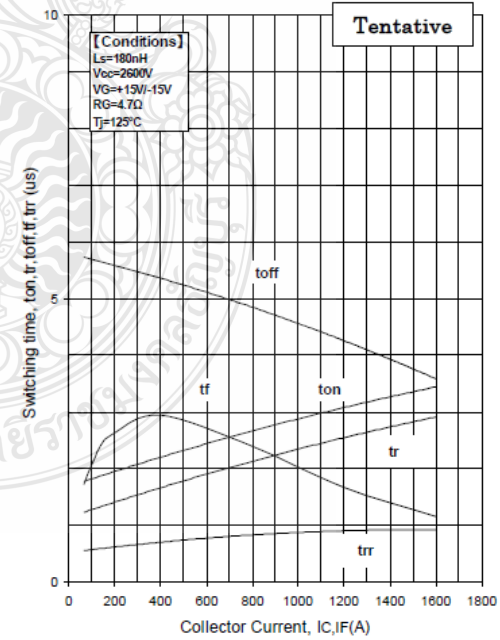
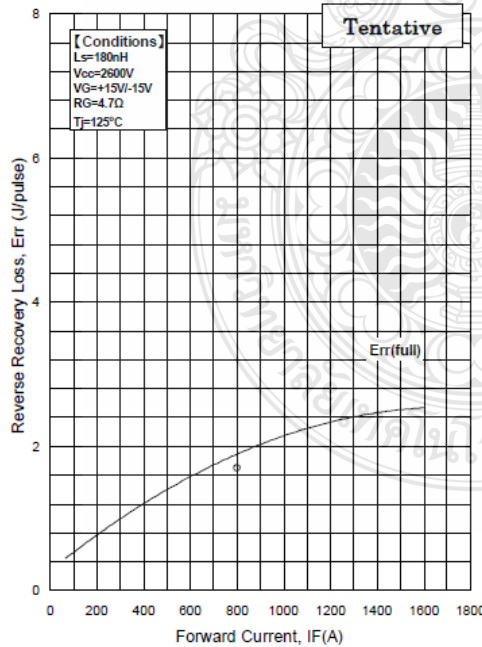
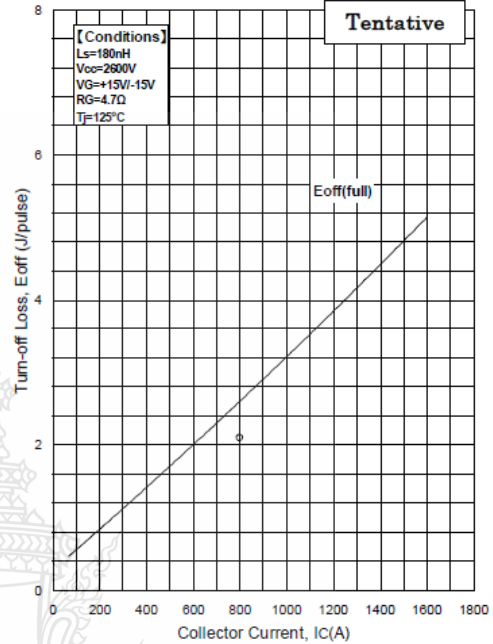
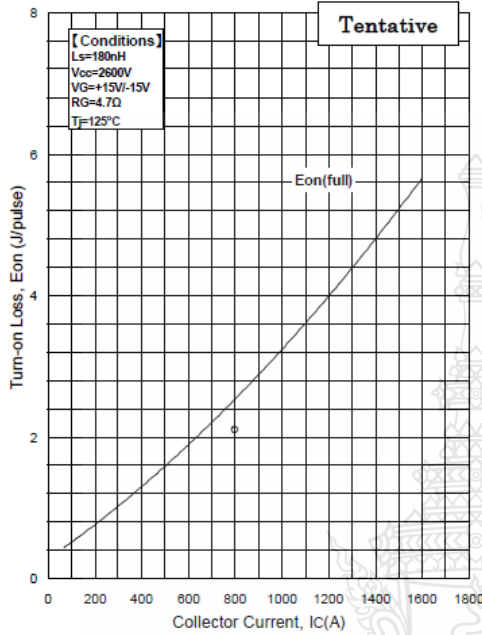
IF vs. VF



# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

## DYNAMIC CHARACTERISTICS



Recovery loss vs. Forward current

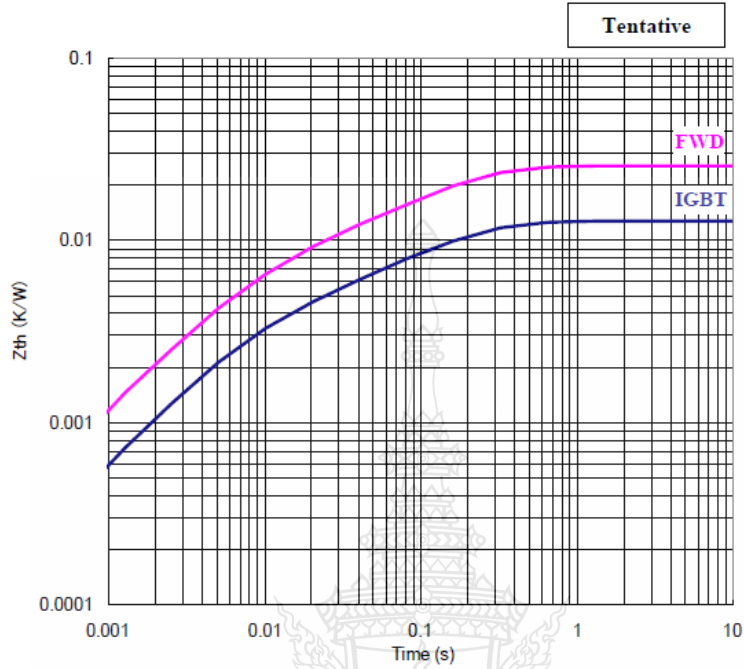
Switching time vs. Collector current



# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

**TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE**



**Transient Thermal Impedance Curve (Maximum Value)**

● **Material declaration**

Please note that following materials are contained in the product  
In order to keep characteristics and reliability level.

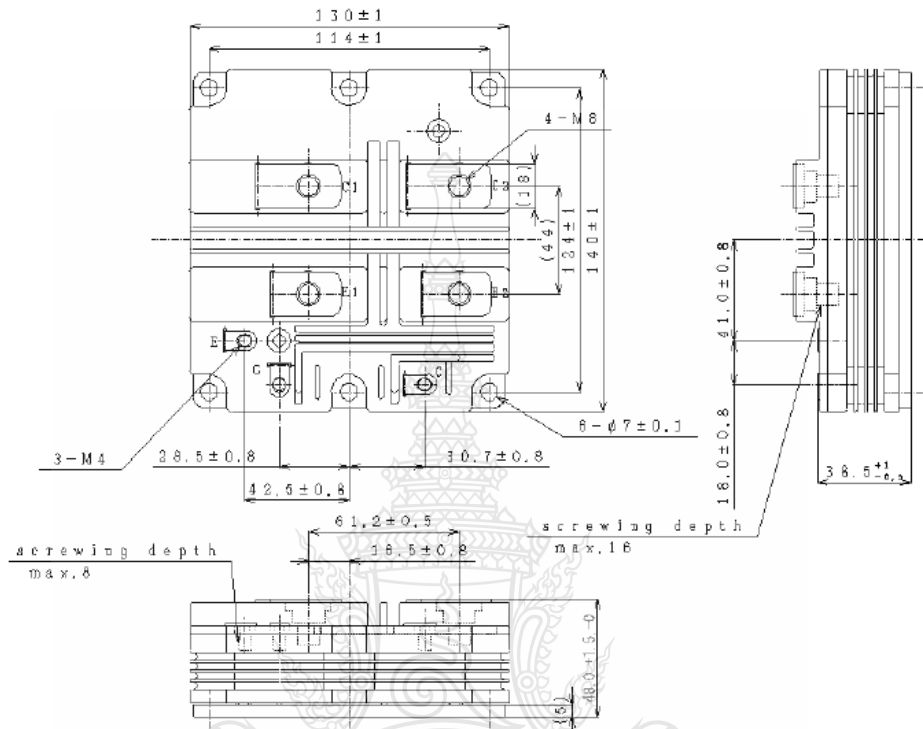
Material	Contained part
Lead (Pb) and its compounds	Solder

# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

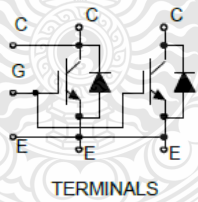
## Module Outline Drawing

Unit: mm



Weight: 1050(g)

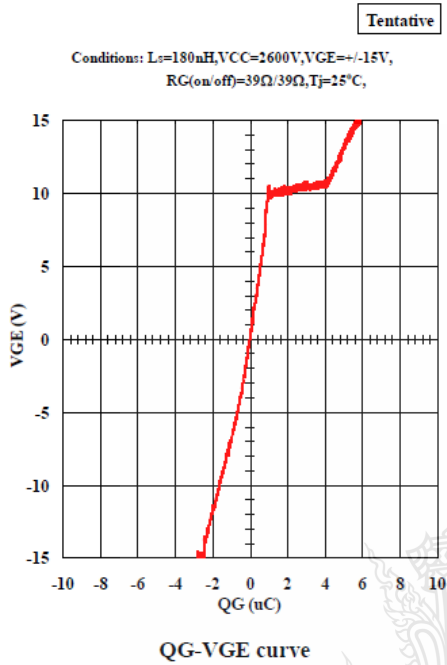
## Circuit diagram



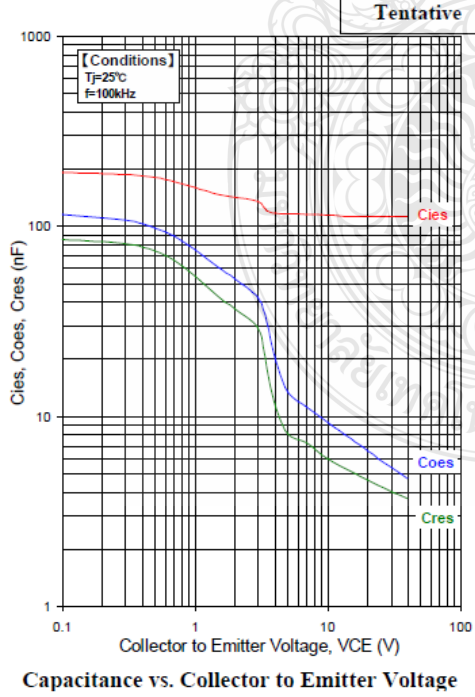
# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

**QG-VGE Curve**



**Cies, Coes, Cres Curve**



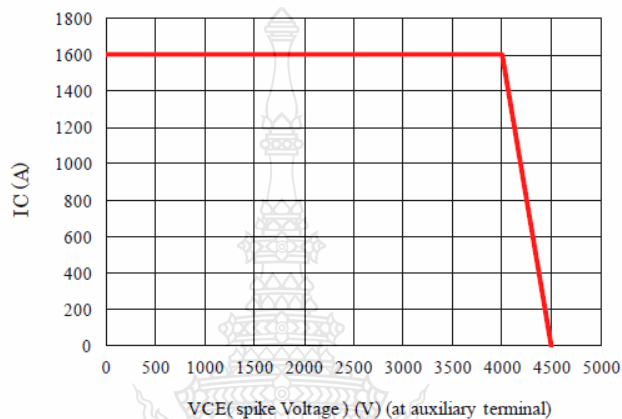
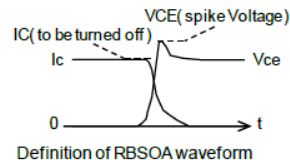


# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

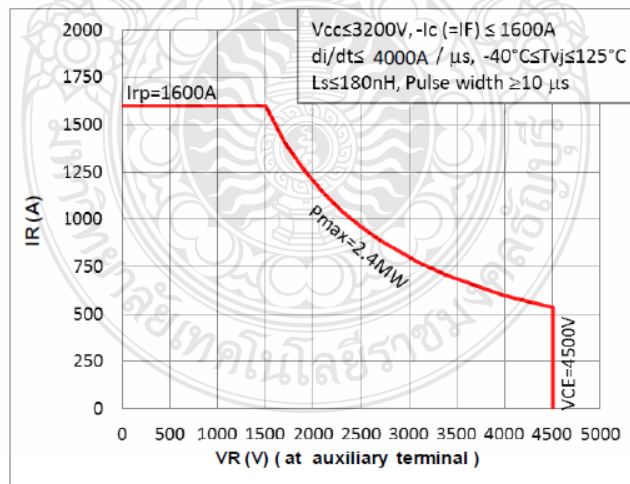
## RBSOA

Conditions:  $V_{cc} \leq 3000V$ ,  $I_c \leq 1600A$ ,  
 $R_g \geq 4.7\Omega$ ,  
 $V_{GE} = \pm 15V$ ,  $-40^\circ C \leq T_j \leq 125^\circ C$ ,  
 $L_s \leq 180nH$ , on pulse width  $\geq 10\mu s$   
 ( Vce spike voltage and  $L_s$  are defined at auxiliary terminal)



## Reverse bias safe operation area ( RBSOA )

### Reverse Recovery SOA



# MBN800H45E2-H

Preliminary Specification

## HITACHI POWER SEMICONDUCTORS

### Notices

1. The information given herein, including the specifications and dimensions, is subject to change without prior notice to improve product characteristics. Before ordering, purchasers are advised to contact Hitachi sales department for the latest version of this data sheets.
2. Please be sure to read "Precautions for Safe Use and Notices" in the individual brochure before use.
3. In cases where extremely high reliability is required (such as use in nuclear power control, aerospace and aviation, traffic equipment, life-support-related medical equipment, fuel control equipment and various kinds of safety equipment), safety should be ensured by using semiconductor devices that feature assured safety or by means of users' fail-safe precautions or other arrangement. Or consult Hitachi's sales department staff.
4. In no event shall Hitachi be liable for any damages that may result from an accident or any other cause during operation of the user's units according to this data sheets. Hitachi assumes no responsibility for any intellectual property claims or any other problems that may result from applications of information, products or circuits described in this data sheets.
5. In no event shall Hitachi be liable for any failure in a semiconductor device or any secondary damage resulting from use at a value exceeding the absolute maximum rating.
6. No license is granted by this data sheets under any patents or other rights of any third party or Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd.
7. This data sheets may not be reproduced or duplicated, in any form, in whole or in part, without the expressed written permission of Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd.
8. The products (technologies) described in this data sheets are not to be provided to any party whose purpose in their application will hinder maintenance of international peace and safety not are they to be applied to that purpose by their direct purchasers or any third party. When exporting these products (technologies), the necessary procedures are to be taken in accordance with related laws and regulations.

- For inquiries relating to the products, please contact nearest overseas representatives that is located "Inquiry" portion on the top page of a home page.

Hitachi power semiconductor home page address <http://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/en/>

**HITACHI**  
Inspire the Next

## IGBT MODULE ( F series)

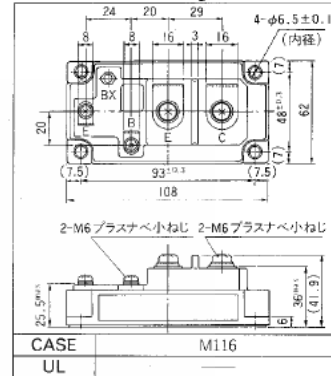
### ■ Features

- Low Saturation Voltage
- Voltage Drive
- Variety of Power Capacity Series

### ■ Applications

- Inverter for Motor Drive
- AC and DC Servo Drive Amplifier
- Uninterruptible Power Supply
- Industrial Machines, such as Welding Machines

### ■ Outline Drawings



### ■ Maximum Ratings and Characteristics

#### ● Absolute Maximum Ratings

Items	Symbols	Ratings	Units
Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	600	V
Gate-Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 20$	V
Collector Current	Continuous	$I_C$	300
	1ms	$I_{C\ pulse}$	600
	Continuous	$-I_C$	300
	1ms	$-I_{C\ pulse}$	600
Max. Power Dissipation	$P_C$	1080	W
Operating Temperature	$T_J$	+150	$^{\circ}C$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 to +125	$^{\circ}C$
Net. Weight		415	g
Isolation Voltage	AC, 1min.	$V_{isol}$	2500
Screw Torque	Mounting *1	3.5 [35]	N · m
	Terminals *2	4.5 [45]	(kg · cm)
	Terminals *3	1.7 [17]	

\*1 Recommendable Value 2.5 to 3.5N·m {25 to 35 kg·cm} (M5)  
 \*2 Recommendable Value 3.5 to 4.0N·m {35 to 40 kg·cm} (M6)  
 \*3 Recommendable Value 1.3 to 1.6N·m {13 to 16 kg·cm} (M4)

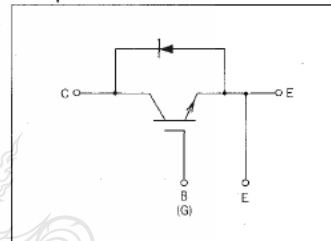
#### ● Electrical Characteristics (T<sub>C</sub>=25 $^{\circ}C$ )

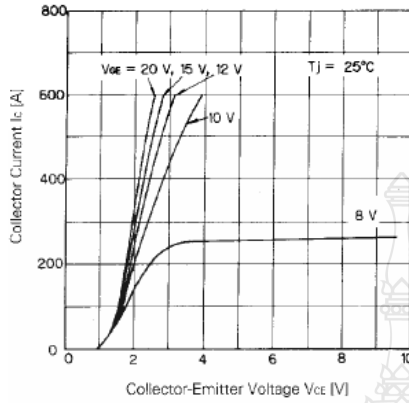
Items	Symbols	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Zero Gate Voltage Collector Current	$I_{CES}$	$V_{GE}=0V$ $V_{CE}=600V$ $T_J=25^{\circ}C$			4.0	mA
		$V_{GE}=0V$ $V_{CE}=600V$ $T_J=125^{\circ}C$			—	mA
Gate-Emitter Leakage Current	$I_{GES}$	$V_{CE}=0V$ $V_{GE}=\pm 20V$			200	nA
Gate-Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(th)}$	$V_{CE}=20V$ $I_C=300mA$	3.0		6.0	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE}=15V$ $I_C=300A$			2.5	V
Input Capacitance	$C_{ies}$	$V_{CE}=0V$		28500		pF
Output Capacitance	$C_{oes}$	$V_{CE}=10V$		—		
Reverse Transfer Capacitance	$C_{res}$	$f=1MHz$		—		
Turn-on Time	$t_{on}$	$V_{CC}=300V$			0.8	$\mu s$
	$t_r$	$I_C=300A$			0.6	
Turn-off Time	$t_{off}$	$V_{GE}=\pm 15V$			1.5	
	$t_f$	$R_G=6.8\Omega$			1.0	
Diode Forward On-Voltage	$V_F$	$I_F=300A$ , $V_{CE}=0V$			2.5	V
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$I_F=300A$ , $-di/dt=900A/\mu s$ $V_{GE}=-10V$			300	ns

#### ● Thermal Characteristics

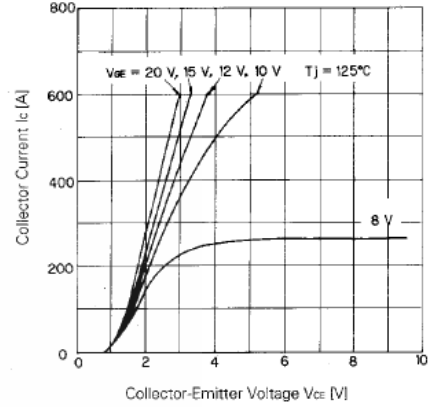
Items	Symbols	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Thermal Resistance	$R_{th(j-c)}$	IGBT			0.116	$^{\circ}C/W$
	$R_{th(j-e)}$	Diode			0.222	
	$R_{th(c-f)}$	With Thermal compound		0.015		

### ■ Equivalent Circuit Schematic

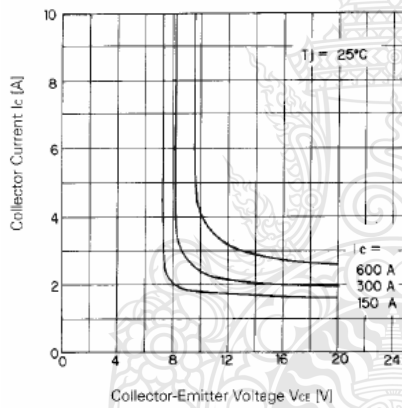




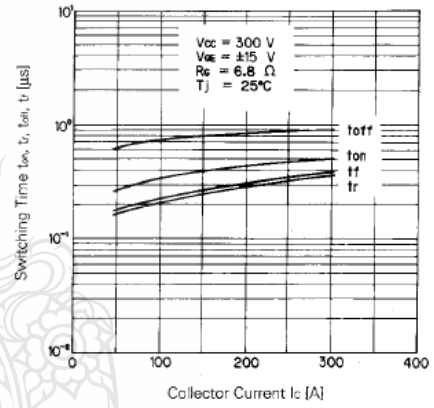
Collector Current vs. Collector-Emitter Voltage



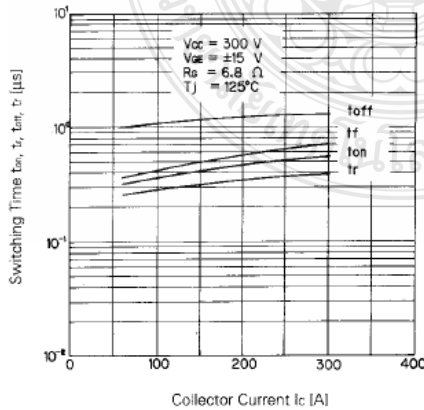
Collector Current vs. Collector-Emitter Voltage



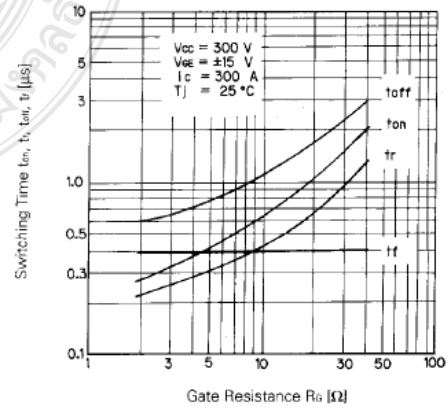
Collector Current vs. Collector-Emitter Voltage



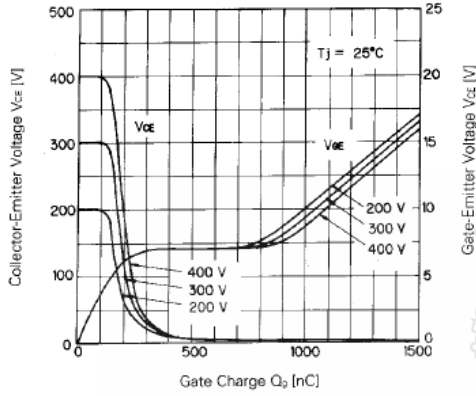
Switching Time



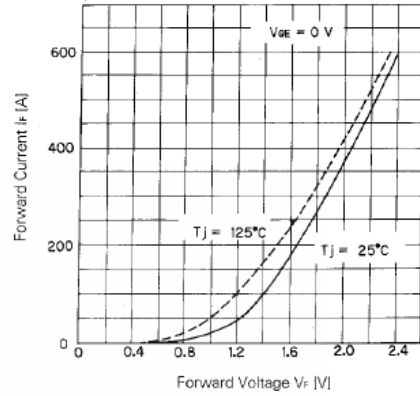
Switching Time



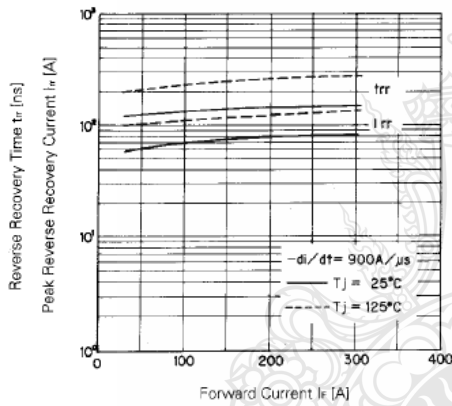
Switching Time-Gate Resistance



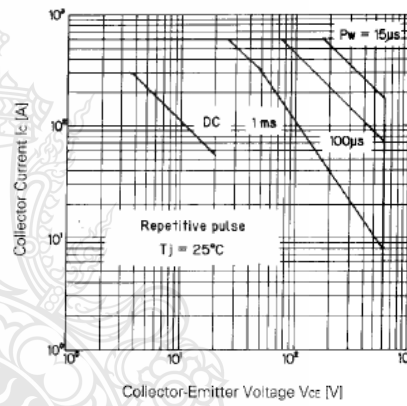
Dynamic Input Characteristic



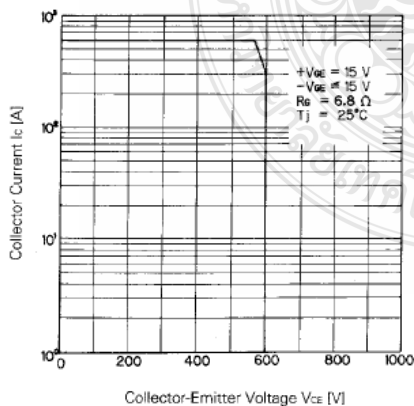
Forward Voltage of Free Wheel Diode



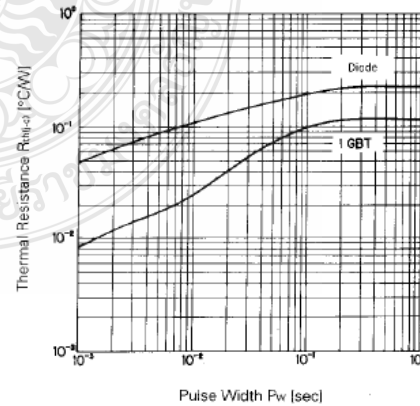
$T_{rr}, I_{rr}-I_f$



Safe Operating Area



Reverse Biased Safe Operating Area



Transient Thermal Resistance

## ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแก๊ป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์”, การประชุมทางวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 TREC 6 ,คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 13-15 พฤศจิกายน 2556
- [2] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแก๊ป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์”, การประชุมทางวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 EENET 2014 มารีไทม์ ปาร์คแอนสปาร์ริสอร์ท จังหวัดกระบี่ 26-28 มีนาคม 2557
- [3] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง”, การประชุมทางวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 10 E-NETT 10 ,คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 4-6 มิถุนายน 2557
- [4] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ”, การประชุมทางวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 TREC 7,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 12-14 พฤศจิกายน 2557
- [5] สุพจน์ วรธิพรหมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง, “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ”, การประชุมทางวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 EENET 2015 โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี 27-29 พฤษภาคม 2558
- [6] B. Plangklang, S. Woratipromma, P. Apiratikul and W. Plueksawan “ **Analysis of A Designed Solid State Tesla Transformer by Computer Simulation for Study the Effective**” The Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH) , KMITL Bangkok, Thailand, June 12-13, 2015



การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ

พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6

The 6<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference

**TREC-6**

13-15 พฤศจิกายน 2556

ณ มหาวิทยาลัยมหาสarakam

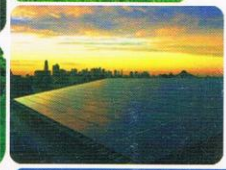
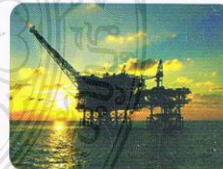
CP ไฟฟ้าชุมชน

CF เชื้อเพลิงชุมชน

CT ความร้อนชุมชน

EC การประหยัดพลังงาน

CE สิ่งแวดล้อมชุมชน



คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6

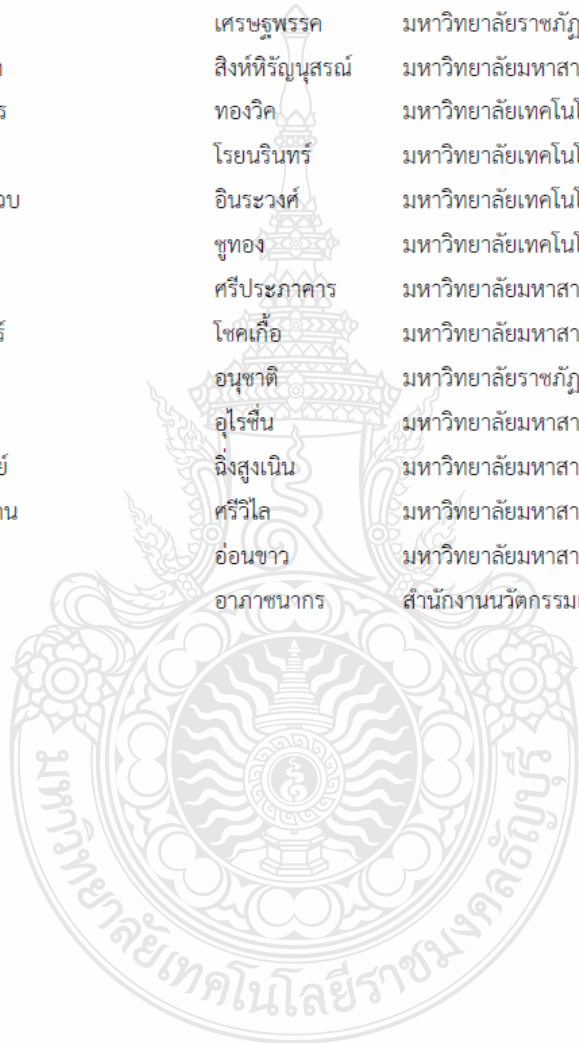
ชื่อ	สกุล	มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ชีรพจน์	พุทธิกัญญาวิวงศ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ศักดิ์เดช	สังคพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ	ทัศนภักดี	มหาวิทยาลัยศรีประทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จกกรี	ศรีนันท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ	ประทุมพนรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนวยการ	เรืองวารีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์	เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพิธาร์	ธนรักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช	แจ่มสว่าง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวงศ์	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤษดากรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุท	มุกข์กันต์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระวุฒิ	อรุณวรรณนะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ	วรศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะแห่งชาติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนพล	มีนา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	วิธินันทกิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ดร.บวรกิตติ	เนคมานุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ศุภชัย	ฤทธิเจริญวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ประเมษฐ์	จันทร์เพ็ญ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุชาติ	โอชคลัง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.อภิพงษ์	พุ่มคำ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.วิจิตรา	สิงห์ธีรานุสรณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.นิชุดา	สุวแพทย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุภกร	หาญสูงเนิน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สุรชัย	จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ



คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 6

ชื่อ	สกุล	มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร.เพชรรัตน์	ใจบุญ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
อาจารย์ ดร.พิมลวรรณ	กำพลานนท์วัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.วรจิต	เศรษฐพรรค	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
อาจารย์ ดร.วิจิตรา	สิงห์หิรัญสุนทรณ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.สถาพร	ทองวิค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.วิรัชชัย	โรยนรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ นุอร	ชูทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ปรีชา	ศรีประกาศาร	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ วุฒิศาสตร์	โชคเกื้อ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ชีรภัทร์	อนุชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
อาจารย์ ยุทธนา	อุไรชื่น	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.อาทิตย์	ฉิ่งสูงเนิน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ประธาน	ศรีวิไล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ ดร.ดาริน	อ่อนขาว	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร. อำพล	อภาชนากร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ



บทความวิจัย: ไฟฟ้าชุมชน (CP)		หน้า
CP001	การวิเคราะห์การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก TEG12750D ด้วยการทดลองเปรียบเทียบกับจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MatLab Simulink นายคณิต พิมพ์คำไหล	233
CP002	การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบใช้กังหันสองชุดติดตั้งบนแกนเดียวกัน นายวินัย บุญน้อย	242
CP003	การประเมินศักยภาพพลังงานลมจากข้อมูลสถานีตรวจวัดอุตุณิยมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา นายวรสิทธิ์ ศรีบุญ	251
CP004	เครื่องวัดพลังงานและคำนวณค่าไฟฟ้าของหลอดแอลอีดีฟลูออเรสเซนต์กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบเวลาจริง นายผดุง กิจแสวง	259
CP005	การควบคุมการแกว่งความถี่ต่ำของระบบเชื่อมโยงพลังงานทดแทนในชนบท นายอมร อ้นกรอง	267
CP006	การผลิตไฟฟ้าจากคลื่นทะเลสำหรับชุมชนห่างไกล นางสาวณัฐวรรณ หรั่งแก้ว	276
CP007	การควบคุมกำลังแอกทิฟโรงต้นกำลังเซลล์เชื้อเพลิงในระบบจำหน่ายโดยใช้ตัวแปลงผันพีดับเบิลยูเอ็ม นายบรรณณัติ บริบูรณ์	280
CP008	การศึกษาและออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทางสำหรับระบบพลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์ นางสาวเสาวนีย์ กันต๊ะ	290
CP009	ศึกษาการออกแบบฟิวส์สวิตช์แรงต่ำโดยใช้ฉนวนเรซิน นายวิทยา ไสสีทา	297
CP010	การจำลองเส้นโค้งสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนนอน นายอภิชาติ ไชยจันทร์	305
CP011	การศึกษาชุดควบคุมประจุไฟฟ้าแบบสมาร์ตสำหรับแบตเตอรี่ในระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ นายยุทธพงษ์ ทองช่วง	314
CP012	การออกแบบกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กแบบครอสฟลัวร์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล นายบัณฑิต เสร็จกิจ	322
CP013	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพใบกังหันลมด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล นายชาคริต จินลอย	332
CP014	การออกแบบระบบโพลีโวลตาอิกสำหรับชุมชนในชนบทไทย นายมนตรี สุขเศรษฐ์	337
CP015	การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแกปโดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นายสุพจน์ วรธิพรหมมา	346



ที่ ศธ ๐๕๓๐.๔(๕)/ว๒๓๓

คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย  
จังหวัดมหาสารคาม ๔๔๑๕๐

๒๑ ตุลาคม ๒๕๕๖

เรื่อง ตอบรับบทความการประชุมสัมมนาวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๖

เรียน คุณสุพจน์ วรจิพรหมมา

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการงานประชุมสัมมนาวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๖

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตลล่า ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปรักเกบ โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์” รหัส CP๐๑๖ เข้าร่วมนำเสนอในการประชุมสัมมนาพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๖ (The ๖<sup>th</sup> Renewable Energy for Community Conference, TREC-๖) ระหว่างวันที่ ๑๓ - ๑๕ พฤศจิกายน ๒๕๕๖ ณ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม ความละเอียดทราบแล้วนั้น

คณะกรรมการได้พิจารณาบทความของท่านเข้าสู่กระบวนการตีพิมพ์ (Proceeding) และท่านมีสิทธิ์นำเสนอผลงานได้ ในการนี้ บทความของท่าน ได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิ โดย

( ) มีการแก้ไข ตามเอกสารแนบ โดยส่งไฟล์เป็น Microsoft Word ๒๐๐๓

( / ) ไม่มีการแก้ไข โดยส่งไฟล์เป็น Microsoft Word ๒๐๐๓

ทั้งนี้ ท่านสามารถส่งแบบตอบรับการลงทะเบียนพร้อมหลักฐานการชำระค่าลงทะเบียนโดยดาวน์โหลดแบบฟอร์มการลงทะเบียนที่ <http://www.acad๒.msu.ac.th/trec-๖/index.php> แล้วส่งมาที่เบอร์โทรสาร ๐๔๓-๗๕๔๓๗๙

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ชีรพจน์ พุทธิกัญญ์วิงศ์)  
ประธานฝ่ายวิชาการ

ภาคิวิชาพิสิทธ์ คณะวิทยาศาสตร์  
โทรศัพท์ /โทรสาร ๐-๔๓๗๕-๔๓๗๙



สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ประกาศนียบัตรฉบับมอบไว้เพื่อแสดงว่า

**นายสุพจน์ วรวิพรหมมา**

ได้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมสัมมนาวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6  
ณ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ระหว่างวันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2556

ผลงานวิจัยเรื่อง

“การวิเคราะห์ผลกระทบแบบเปลี่ยนแปลงทดถล่า ที่ใช้การสวิตซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปรังค์แกป  
โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์”

ให้ไว้ ณ วันที่ 15 พฤศจิกายน 2556

(ดร.วีรชัย โรจนรินทร์)

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

(ศาสตราจารย์ ดร.ละอศรี เสมาะเมือง)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์



CP015

การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเทสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแกป  
โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

**Analysis of a designed tesla transformer with electronic switching  
Spark gap by computer simulation**

สุพจน์ วรวิพรหามา และ บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3386 โทรสาร 0-2549-3422

E-mail: suphot\_power2@yahoo.com, boonyang.p@en.rmutt.ac.th

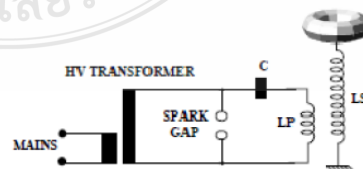
#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอ การวิเคราะห์ผลการออกแบบ หม้อแปลงเทสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Solid State Tesla Transformer) เปรียบเทียบกับหม้อแปลงเทสลา แบบสปาร์กแกปทั่วไป ที่ใช้สำหรับการทดสอบลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า การวิเคราะห์จะจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างหม้อแปลงเทสลาแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากหม้อแปลงเทสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อดีคือ สามารถทำให้หม้อแปลงเทสลาที่มีขนาดเล็กลง ไม่เกิดเสียงดัง และสามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้ การจำลองระบบจะใช้ขนาดพิกัดแรงดันด้านอินพุตจะออกแบบที่พิกัด 4 KV เพื่อให้เกิดแรงดันทางด้านเอาพุต 150 KV ที่ความถี่ 200 KHz การจำลองระบบพบว่าการใช้ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือ โซลิตสเตร์เลย์ เป็นสวิตช์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สปาร์กแกป สามารถทำให้หม้อแปลงเทสลาที่มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: หม้อแปลงเทสลา, โซลิตสเตร์เลย์, สปาร์กแกป

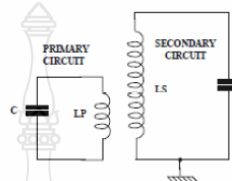
#### 1. บทนำ

1.1 หม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า หม้อแปลงเทสลา หม้อแปลงเทสลา เป็นหม้อแปลงแกนอากาศ ใช้สร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง จะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ในวงจร LC โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงเทสลา และ C คือค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงเทสลา (Stray Capacitance) ซึ่งสภาวะแรงดันสูงและความถี่สูงนี้ สามารถนำไปใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน (Insulator) ในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้



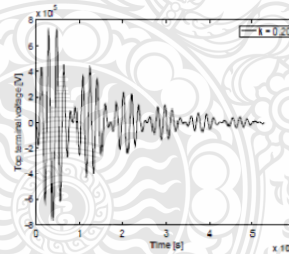
รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสลา

จากวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเตสลา[6] ในรูปที่ 1 สามารถอธิบายหลักการของหม้อแปลงเตสลาได้โดย พิจารณาวงจรโซ่ขนาน 2 วงจร ที่มีการเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (Magnetically Coupled Circuits) วงจรแรกประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ และขดลวดหม้อแปลงเตสลา ด้านปฐมภูมิ (Primary Coil) ต่ออนุกรม กับสปาร์กแกป ในขณะที่วงจรที่ 2 ประกอบด้วย ขดลวดหม้อแปลงเตสลา ด้านทุติยภูมิ (Secondary Coil) ต่ออนุกรมกับตัวนำทรงกลมรูปโดมที่ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ และต่อลงกราวด์



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลา

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลาในรูปที่ 2 เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ให้กับวงจรด้านปฐมภูมิ ตัวเก็บประจุ จะทำการเก็บประจุ จนได้ระดับแรงดันถึงค่าที่สามารถเกิดการเบรกดาวน์ ระหว่างช่องอากาศที่สปาร์กแกป ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเปิด-ปิดสวิตช์ การเกิด Spark Over ที่สปาร์กแกปจะทำให้วงจรด้านปฐมภูมิครบวงจร พลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุ ในรูปสนามไฟฟ้าจะถ่ายเทประจุมายังขดลวด ปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา และขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาจะเก็บพลังงานในรูปสนามแม่เหล็ก เมื่อเก็บเต็มที่แล้ว ก็ จะถ่ายเทพลังงานกลับไปให้ตัวเก็บประจุ (Transfer Energy) โดยการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุและขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา นี้จะมีการถ่ายเทกลับไปกลับมาทำให้เกิดการออสซิลเลท (Oscillate) แบบต่อเนื่องในลักษณะ คลื่นขบวนหน่วง (Damped Oscillation) ที่ความถี่สูง โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบให้มีความถี่ระหว่าง 150-250 KHz ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความจุของตัวเก็บประจุ และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดนั้น



รูปที่ 3 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณ ออสซิลเลชันของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา

การเกิด ออสซิลเลชัน ในวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลา จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าทางด้าน ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา ซึ่งมีค่าที่ความถี่เดียวกัน อัตราส่วนแรงดันระหว่างด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ารากที่ 2 ของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิต่อขดลวดปฐมภูมิ

## 1.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงเตสส์

### 1.2.1 กราวด์อ้างอิง (RF Ground)

อ้างอิงเป็นส่วนที่อยู่ด้านล่างสุดของด้านทุติยภูมิจะมีกระแสไหลอย่างมากมาย กราวด์ที่จะนำมาใช้งานจำเป็นจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ต่ำมาก ๆ ถึงจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานกับหม้อแปลง

### 1.2.2 แยกป้องกัน (Safety Gap)

การทำงานของหม้อแปลงที่แรงดันของด้านทุติยภูมิ บางครั้งจะมีแรงดันสูงย้อนกลับไปยังแหล่งจ่าย (Supply) แรงดันสูง ที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่าคิกแบค (Kickback) แยกป้องกัน ออกแบบขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับแหล่งจ่าย (power Supply) ได้ เนื่องจากการเกิดคิกแบค

### 1.2.3 สปาร์กแกป (Spark gap)

สปาร์กแกป จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ความเร็วสูง ตัวสปาร์กแกปต้องครอบคลุมระดับแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ไม่ต่างไปจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) หรือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) การออกแบบต้องสามารถเป็นสวิตช์ (Switch) ที่ระดับกำลังไฟฟ้าสูง ๆ อย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่าสปาร์กแกป เมื่อแรงดันคร่อมสปาร์กแกปมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างตัวนำของแกปจะเริ่มเกิดการไอออไนซ์ (Ionize) หากว่าการเกิดไอออไนซ์ที่เพิ่มขึ้นเพียงพอ จะทำให้เกิดเป็นสื่อที่แก่กระโดดไปยังอีกแกปหนึ่ง เมื่อแรงดันที่คร่อมสปาร์กแกปตกลง จะทำให้การไอออไนซ์ลดลงด้วยและแกปก็จะกลับสภาพเดิม คือเปิดวงจร (Open Circuit)

ตารางที่ 1.1 จำนวนตัวนำของแกปต่อขนาดของหม้อแปลงแรงดันสูง

แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง	จำนวนของตัวนำ	จำนวนของสปาร์กแกป
9 kV	7	6
12 kV	9	8
15 kV	11	10

สำหรับบทความนี้จะได้นำเสนอการ นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) มาทำหน้าที่แทนสปาร์กแกป ซึ่งมีข้อดีที่สามารถเปลี่ยนแปลงระดับความถี่ในการสวิตช์ได้ง่าย

### 1.2.4 ทอรอยด์ (Toroid)

ทอรอยด์ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุของชุดทุติยภูมิของหม้อแปลง เป็นส่วนช่วยให้เกิดการเรโซแนนซ์ ถ้าทอรอยด์มีขนาดใหญ่ก็จะได้ค่าความจุของตัวเก็บประจุมาก เมื่อขดลวดทำงานก็จะทำให้เกิดหมอกอากาศ หรือการไอออไนซ์ขึ้นรอบ ๆ จุดต่อของทอรอยด์ แต่ถ้าทำการต่อทอรอยด์ ที่จุดต่อจะทำให้การไอออไนซ์มีความราบเรียบและสมบูรณ์มากขึ้นทอรอยด์จะทำให้มีเสถียรภาพขึ้นรอบ ๆ ส่วนบนสุดของ ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง คือพยายามทำให้แรงดันลาดเอียง (Voltage gradient) ลดลงอย่างมาก ในส่วนของระดับแรงดันที่เกิดขึ้น จุดต่อทอรอยด์จะกลายเป็นแรงดันที่มีค่าสูงมาก ทอรอยด์ทำหน้าที่ช่วยในการสร้างสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ส่วนบนสุด ที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

## 2. การออกแบบหม้อแปลงเตสส์

### 2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

จากทฤษฎีพื้นฐานของหม้อแปลงเตสส์ จะนำไปใช้ในการออกแบบ ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญได้แก่ ขดลวดหม้อแปลงเตสส์ ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตัวเก็บประจุทางด้านแรงต่ำ และตัวเก็บประจุด้านแรงสูง

ในการออกแบบเบื้องต้นต้องคำนึงถึงขนาดตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากค่าประจุทางด้านแรงดันสูงจะมีผลต่อค่าแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์เบื้องต้นในการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ก็เพื่อใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามผิวที่ 140 KV และความถี่มาตรฐานที่กำหนดไม่น้อยกว่า 150 KHz จึงทำการกำหนดพิกัดของการออกแบบดังนี้

แรงดันพิกัดทางด้านแรงดันสูง 150 KVrms  
 ความถี่พิกัด 200 KHz  
 แรงดันป้อนเข้า 4000 V

การออกแบบจะใช้พิกัดแรงดันเข้าที่ 4000 V เนื่องจากเป็นพิกัดแรงดันที่อุปกรณ์สวิตช์แบบอิเล็คทรอนิกส์ (IGBT) ทนได้ที่ 4500 V คิดค่าความปลอดภัยจึงลดพิกัดแรงดันเข้าที่ 4000 V

### 2.2 การกำหนดค่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง ซึ่งประกอบด้วย

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา ประมาณ 10 pF  
 ค่าความจุไฟฟ้าของทอรอยด์ มีค่าประมาณ 25 pF  
 ค่าความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน มีค่าสูงสุดประมาณ 60 pF  
 รวมค่าประจุไฟฟ้าทั้งสามอย่างประมาณ 95 pF

### 2.3 การออกแบบขดลวดแรงดันสูงหรือขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา

การออกแบบขดลวดแรงดันสูงนี้จะใช้ท่อ PVC ในการพันขดลวด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี มีความแข็งแรงไม่ดูดความชื้น ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย การเลือกขนาดของท่อสามารถเลือกได้ตามตารางความสัมพันธ์ ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ตามตารางที่ 2.1 และเลือกความสูงตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ตารางที่ 2.2 ตารางสำหรับเลือกความสูงท่อ

กำลังไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	อัตราส่วน	ความสูงท่อ(นิ้ว)
< 500W	3-4	3	6:1	18
500W-1500W	4-6	4	5:1	20
1500W-3KW	6-10	6	4:1	24
>3KW	10 ขึ้นไป	8 นิ้วขึ้นไป	3-5:1	24 นิ้วขึ้นไป

จากการกำหนดค่า ความจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูงที่ 95 pF จะสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาในเบื้องต้นได้จากสมการ

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 C_2} \quad (1)$$

ซึ่งจะได้ค่าเท่ากับ 7.04 mH โดยค่าที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดของเส้นลวดที่ใช้ในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา ด้วยการหาค่ากระแสลัดวงจรของขดลวดที่แรงดันออกแบบคือ 150 KV ด้วยสมการ



$$I_{sc} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{2\pi f_2 L_2} \quad (2)$$

$$I_{sc} = \frac{150KV}{2\pi \times 200KHz \times 7.04mH} = 16.955A$$

เนื่องจากกระแสตรงจรมีลักษณะเป็นพัลส์ที่เกิดประมาณครึ่งคาบความถี่ 200 KHz (2.5  $\mu$ s) และพัลส์จะเกิดทุกช่วงที่แรงดันป้อนเข้าที่คายอดคลื่น ที่ความถี่ 100 Hz (10 ms) จึงสามารถคำนวณกระแสประสิทธิผลได้ด้วยสมการ

$$I_{eff} = I_{sc} \sqrt{\frac{2.5\mu s}{10ms}} \quad (3)$$

$$I_{eff} = 16.955 \times \sqrt{\frac{2.5\mu s}{10ms}} = 0.268A$$

และเมื่อคิดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทองแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.5 A / mm<sup>2</sup> รวมถึงคิดผลของ สกินเอฟเฟค แล้ว จะใช้ขดลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.024 นิ้ว ในการพันขดลวด

การออกแบบขดลวดด้านทุติยภูมิ จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 6.5 นิ้ว และสูง 30 นิ้ว เมื่อนำความสูงของท่อหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหาความเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L = \frac{N^2 R^2}{9R + 10H} \quad (4)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด ( $\mu$ H)

N = จำนวนรอบของขดลวด

R = รัศมีของขดลวด (นิ้ว)

H = ความสูงของขดลวด (นิ้ว)

$$L = \frac{1250^2 \times 3.25^2}{(9 \times 3.25) + (10 \times 30)} = 50125.76 = 50.125mH$$

เมื่อนำจำนวนรอบ 1250 รอบที่ออกแบบไปทำการพันขดลวดพบว่าขดลวดมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 32 นิ้ว และเมื่อทำการคำนวณหาความเหนี่ยวนำของขดลวดใหม่จะได้ค่าเท่ากับ 47.255 mH

#### 2.4 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุแฝงในขดลวด (Stray Capacitor) ด้วยสมการ

$$C_{st} = 0.29H + 0.41R + 1.94 \sqrt{\frac{R^3}{H}} \quad (5)$$

$$C_{st} = (0.29 \times 32) + (0.41 \times 3.25) + 1.94 \sqrt{\frac{3.25^3}{32}} = 12.62 pF$$

2.5 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุทอรอยด์รูปโดนัทจากสมการ

$$C_{cor} = 1.4 \left( 1.2781 - \frac{D_I}{D_o} \right) \sqrt{\pi D_I (D_o - D_I)} \quad (6)$$

เมื่อ  $D_I$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอรอยด์(นิ้ว)

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอรอยด์(นิ้ว)

ในที่นี้จะออกแบบให้ทอรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับท่อที่ใช้พันขดลวดทุติยภูมิคือ 6.5 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะได้

$$C_{cor} = 1.4 \left( 1.2781 - \frac{6.5}{19.5} \right) \sqrt{\pi \times 6.5 (19.5 - 6.5)} = 21.55 pF$$

เมื่อนำค่า ของตัวเก็บประจุทั้ง 3 คือ ตัวเก็บประจุแผ่น ตัวเก็บประจุของทอรอยด์ และตัวเก็บประจุของลูกถ้วยมารวมกันจะได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าต้านแรงสูงหรือทุติยภูมิเท่ากับ 94.17 pF

2.6 หาค่าความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อคิดค่าความจุไฟฟ้าต่างๆของด้านทุติยภูมิ จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_2}} \quad (7)$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแผ่น

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{47.255mH \times 12.62 pF}} = 206.094KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแผ่น รวมกับประจุไฟฟ้าของทอรอยด์

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{47.255mH \times 34.17 pF}} = 125.248KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแผ่น รวมกับค่าประจุไฟฟ้าของทอรอยด์ และค่าประจุไฟฟ้าของลูกถ้วย

ฉนวน

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{47.255mH \times 94.17 pF}} = 75.446KHz$$

จากการคำนวณจะพบว่าหากนำไปทดสอบลูกถ้วยความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง เหลือเพียง 75.446

KHz

### 2.7 การหาความจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันต่ำหรือด้านปฐมภูมิ

ในการออกแบบเบื้องต้นจะใช้หม้อแปลงที่ใช้สำหรับจุดโหลดน็อนเป็นแหล่งจ่าย โดยจะนำหม้อแปลงจุดโหลดน็อนขนาดพิกัด Primary 230V 2A Secondary 15000 V 30 mA 4 ตัว มาต่อขนานกันเพื่อให้จ่ายกระแสได้เพิ่มขึ้นเป็น 120 mA และเมื่อนำมาหารกับแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิที่ได้กำหนดในการออกแบบหม้อแปลงเทสล่าที่ 4000 V จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็น  $33.334 \text{ K}\Omega$  และคำนวณหาค่า ความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเทสล่าได้จากสมการ

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi f Z} \quad (8)$$

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi \times 50 \times 33.334 \text{ K}\Omega} = 95.493 \text{ nF} \approx 0.1 \mu\text{F}$$

ในการจัดสร้างตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเทสล่า จะใช้ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.1  $\mu\text{F}$  1000 V อนุกรมกัน 5 ตัว และขนานกัน 5 แถว เพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุขนาด 0.1  $\mu\text{F}$  5000 V

### 2.8 การออกแบบขดลวดด้านปฐมภูมิหรือด้านแรงต่ำของขดลวดหม้อแปลงเทสล่า

จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 2.6 พบว่าหากต้องการนำหม้อแปลงเทสล่าไปใช้ในการทดสอบลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์ จะอยู่ที่ 75.446 KHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสล่าได้จากสมการ

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_1} \quad (9)$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 \times 75.446 \text{ KHz} \times 0.1 \mu\text{F}} = 44.5 \mu\text{H}$$

ในการจัดทำขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงเทสล่า จะพันในลักษณะทรงกระบอกเช่นเดียวกับขดลวดแรงดันสูง โดยขดลวด มีรัศมี  $R = 5.85$  นิ้ว สูง  $H = 6$  นิ้ว พันทั้งหมด 12 รอบ และแต่ละรอบห่างกัน 0.5 นิ้ว ใช้ท่อทองแดงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เมื่อคำนวณตามสมการที่ 4 จะได้

$$L = \frac{12^2 \times 5.85^2}{(9 \times 5.85) + (10 \times 6)} = 43.74 \mu\text{H}$$

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณด้วยสมการที่ 9

จากการออกแบบหม้อแปลงเทสล่าจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรได้ดังนี้

ความเหนี่ยวนำขดลวดแรงดันต่ำ  $L_1 = 43.74 \mu\text{H}$  ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ  $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$

ความเหนี่ยวนำขดลวดแรงดันสูง  $L_2 = 47.255 \text{ mH}$  ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันสูง  $C_2 = 94.17 \text{ pF}$

### 3. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากค่าที่ได้ในการออกแบบ เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการนำค่า พารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการจำลองระบบ ผู้เขียนบทความจึงได้ทำการจัดสร้างขดลวดของหม้อแปลงเทสล่า ทั้งขดลวดด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ รวมถึงหาค่า การเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (Magnetically Coupled Circuits) ของขดลวดโดยการต่อขดลวดทั้งสองแบบอนุกรม [2] แล้วคำนวณด้วยสมการ

$$M = \frac{L - L_1 - L_2}{2} \quad (10)$$

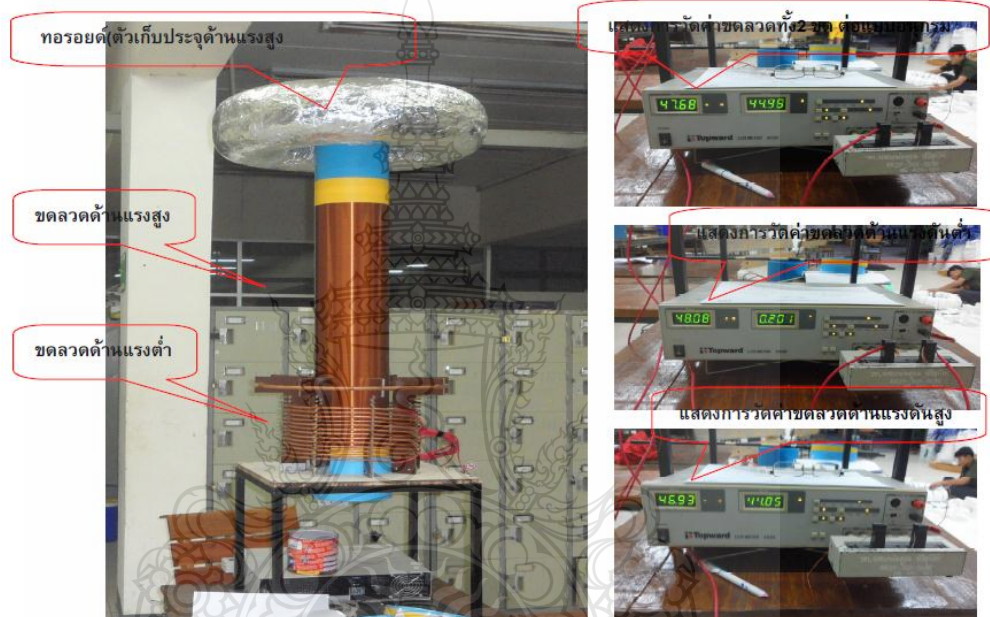
เมื่อ  $M$  = ค่าการเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (H)

$L$  = ค่าความเหนี่ยวนำรวมของขดลวดทั้งสองแบบอนุกรมแบบขั้วเสริม (H)

$L_1$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงต่ำ (H)

$L_2$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูง (H)

### 3.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลงเทสลาที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4 ขดลวดของหม้อแปลงเทสลาที่สร้าง แล้วทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของขดลวด

โดย  $L = 47.68mH$   $L_1 = 48.08\mu H$  และ  $L_2 = 46.93mH$

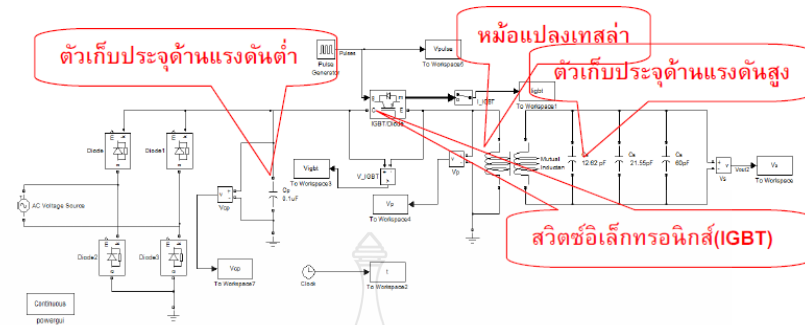
จากสมการที่ 10

$$M = \frac{47.68mH - 48.08\mu H - 46.93mH}{2} = 0.3509mH$$

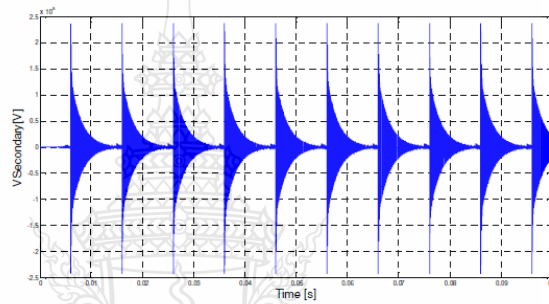
### 3.2 การนำค่าพารามิเตอร์ต่างไปทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink

#### 3.2.1 การจำลองระบบแบบใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์

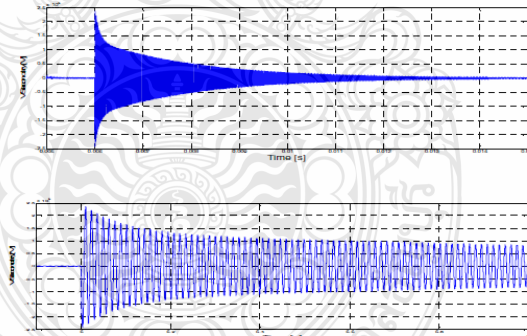
ในการจำลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขดลวด ของหม้อแปลงเทสลา ที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยได้ควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่คาบเวลา 10 ms โดยมี Duty Cycle ที่ 10 % ใช้แรงดันป้อนเข้า 220 V 50 Hz แล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆของวงจร รวมถึงปรับจูนให้วงจร มีค่าแรงดันและความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 10 ช่วง



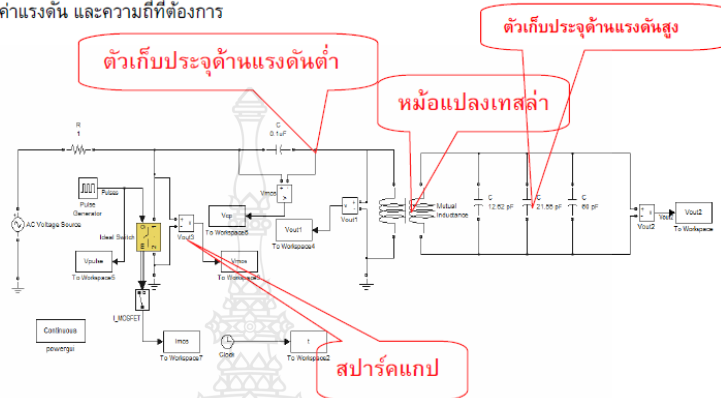
รูปที่ 7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 1 ช่วง

จากรูปที่ 6 และ 7 จะแสดงกราฟแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา ที่ได้ทำการจำลองระบบด้วยวงจรในรูปที่ 5 โดยได้แสดงการเกิดออสซิลเลชันจำนวน 10 ช่วง ในรูปที่ 6 และแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 1 ช่วงในรูปที่ 7 เพื่อหาค่าความถี่ของสัญญาณ ซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ 160 KHz และมีแรงดันสุดที่ 240 KV

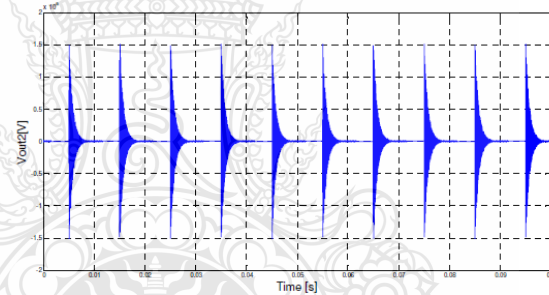
### 3.2.2 การจำลองระบบแบบใช้การสวิตช์ด้วยสปรักแกป

การจำลองได้ทำการควบคุมการทำงานของสปรักแกป ที่คาบเวลา 10 ms โดยมี Duty Cycle ที่ 50 % ใช้แรงดันป้อนเข้า 4000 V 50Hz แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆของวงจร รวมถึงปรับจูนให้วงจร มี

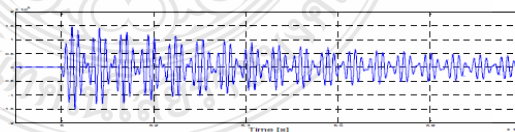
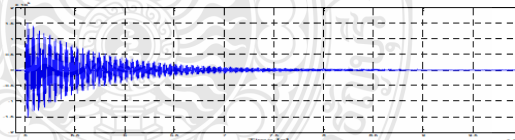
ค่าแรงดัน และความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 8 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสปรักแกป



รูปที่ 9 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชั่น 10 ช่วง



รูปที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชั่น 1 ช่วง

จากรูปที่ 9 และ 10 จะแสดงกราฟแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา ที่ได้ทำการจำลองระบบด้วยวงจรในรูปที่ 8 โดยได้แสดงการเกิดออสซิลเลชันจำนวน 10 ช่วง ในรูปที่ 9 และแสดงการเกิดออสซิลเลชัน 1 ช่วงในรูปที่ 10 เพื่อหาค่าความถี่ของสัญญาณ ซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ 150 KHZ และมีแรงดันสูงสุดที่ 150 KV

#### 4. สรุปผลการจำลองระบบ

จากการดำเนินการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ผู้เขียนบทความ ได้นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขนาดของหม้อแปลงเตสลาที่ได้จัดทำขึ้น นำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ ของหม้อแปลงเตสลาแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ กับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์คแกป

ผลการจำลองระบบพบว่าหม้อแปลงเตสลาทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน กล่าวคือ หม้อแปลงเตสลาแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ออสซิลเลชันได้ง่าย และใช้ระดับแรงดันป้อนเข้าที่ต่ำกว่า แบบสปาร์คแกป แต่มีข้อเสียคือ อุปกรณ์สวิตช์มีอัตรา การทอดแรงดันและ กระแสต่ำ เมื่อเทียบกับสปาร์แกป

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำราญ สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2528
- [2] ชีรพล เดโชเกียรติกุลย์, ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า 2, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, 2553
- [3] สมเกียรติ ทองแก้ว, การศึกษาผลกระทบชุดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงเตสลาเพื่อหาแบบที่เหมาะสม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2551
- [4] Plangklang B , Apiratikul P, Phumkittipich K, “ Development of Low-Cost Tesla Transformer for High Performance testing 115 kV Line Post Insulator” Rajamangala University of Technology Thanyaburi ,Thailand,2008
- [5] Denicolai M, “Tesla Transformer for Experimentation and Research.” Helsinki University of Technology May 2001
- [6] Tilbury M, “ The ULTIMATE Tesla Coil Design AND CONSTRUCTION GUIDE ” The Mc Graw Hill Companies, 2008



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

## มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล **ครั้งที่ ๖**

6<sup>th</sup> Electrical Engineering Network 2014  
of Rajamangala University of Technology Conference

นวัตกรรมวิจัยแห่งเทคโนโลยี ตอบสนองเออีซีด้านโครงข่ายพลังงาน  
Technology Research Innovation for Responding to the Energy Network of AEC

### Volume I

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)



๒๖ - ๒๘ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๕๗

ณ มารีไทม์ พาร์คแอนสปารีสอร์ท จังหวัดกระบี่

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี กาญจนะเคชะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร ภิรมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ งามวนิชเลิศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.เทิรติ ชยะกุลศิริ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร.บัลลังก์ เนียมมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพนพานโค	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร.เสถียร รัชฎูศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ อุดมพรธนากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.กานจน์ เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์สมพันธ์ อ้าพานัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐานจินดาเพชร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมากรรณ์ อารีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์ถิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำเริง สีนท่าไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ จารุมิตร	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุดมলেখกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา สากะรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภักดิ์วัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์ เอกบูรณะ วัฒน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล ป้อมสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เคชรรวมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันไชย คำแสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พานิช อินต๊ะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา ยืนยงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาคยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ โสทรโยม	มหาวิทยาลัยสยาม

26-28 มีนาคม 2557 มหาวิทยาลัยปาร์กแอนสปีร์สอร์ท จังหวัดกระบี่

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งยงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี คัมภานูช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชชัยย์ ทางรัตนสุวรรณ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทง ลานธาทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ์ คารพวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรวิฑูรย์ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราวุฒิ กวดพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธ์พงศ์ อภิชาคกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ พงษ์เทพคุณธำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมศักดิ์ ลีลาชนะชัยพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร. วรฤทธิ์ วิชกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อาจารย์ ดร. ณัฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. พุศยน นินทนาวงศา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ศิริชัย เตรียมล้ำเลิศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์ นิ่มเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. วิเชียร อุบแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. กฤษดา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. พรเทพ ปัญญาแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. พิชัย อยู่เปล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. เมธา ทิศกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. สันทวิจิตร ทองแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. เสกสรร พลสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. ณัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. พนา คูสิดากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ เคนฟู้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. พิสิทธิ์ สุวรรณภิงคาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. อุมารินทร์ แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร.ศรีสุดา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.สมพร ศรีวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร.ประจวบ อินระวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.วรรณวิทย์ วงศ์ไครรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.มงคล คูพิมาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.ประสพโชค โห้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.มนตรี สมคุดยอกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ เขยชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.วิฑูรย์ พรหมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.นพพร พืชประภคิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ เคลือบวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.พลกฤษณ์ ทูนคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.ยุพดี หัดถสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.ขวัญชัย เอื้อวิธานูกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.สุบงกช โคไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.อนนท์ นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.ศุภกิต แก้วควงดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.จัดคุณฤทธิ์ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.ธีรศักดิ์ สมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.สายชล ชูคเจือจัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร.ปฏิมากร จันทร์พริ้ม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร.ชยานันธุ์ บุญสนิท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.สุวิทย์ อังริยะเมต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.อรรถ พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
อาจารย์พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์นิติพงศ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมยศ สันติมาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ตะวัน ขุนอาสา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์มนัส บุญเกียรติทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ศาสกร วุฒิพัฒน์พันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์เวรินทร์ รัชฎีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์อดิศักดิ์ วิทยกรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ธนาวัฒน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์อานนท์ สิงห์เสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์อภิษฎา ทองวัณท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์นิลมิต นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์พัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์มาลีญา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ธานี สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ปวีติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์อานนท์ พ่วงชิงงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์วิสุทธิ์ คณิตรุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ชูศักดิ์ กมลขันดิสร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์บุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์เอกพล อนุสุเรนทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์วินัย เมธาวีทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์มงคล คำนำรุ่งตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์อดิศักดิ์ แข็งสาริกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์โสภณ แซ่เฮ็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์คิสาพล น้ำเขียวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์กาญจน์บุษยา พาณิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ปกรณ์ ฟูไเราะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ชาญยุทธ อุปายโกศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์พีรวัฒน์ มีสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์อาภาพล มหาวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์นิกร แสงงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์คนใจ ปานทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์อัมพร บุญรวม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์พิทักษ์ สติธรรมธนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์กิติ มินา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ชัช สัตยรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ธีรพงษ์ ฉิมเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ภราดร เรืองกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์สาธิต ละอองโชค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง (PW)		หน้า
<b>PW-B</b>		
PW09	การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแก๊ป โดยการจัดระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ศุภจน์ วรวิพรหมมา บุญยัง ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	33
PW10	การลดปริมาณแบคทีเรียด้วยโอโซนจากปรากฏการณ์โคโรนา ขวัญใจ นาชัยภูมิ สักดิ์ระวี ระวีกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	37
PW11	ชุดทดลองแรงดันคกซ์วงจรงานสองหน้าที่ 'พินิต แสงวัฒนะ 'โกศล โอฬารไพโรจน์ 'วรจักร เมืองใจ 'วิชาญ ชันที 'ชนิด บุญใส 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	41
PW12	อุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ วิวัฒน์ ทิพจร ชีระวัฒน์ ศุภคี กมลชัย กฤษณสมบัติ ชนกานต์ อินทร์ชา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	45
PW13	เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบแรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูง กำลังไฟฟ้าค่า โดยใช้พลังงานลม เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า 'ประสพโชค ให่ทองคำ 'ศุภาพร อร่ามรุณ 'สิทธิ์ชัย บุญปัยทัศน์ 'ณรงค์ชัย ททพร 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 'มหาวิทยาลัยสยาม	49
PW14	การวิเคราะห์ผลของคาปาซิแตนซ์แรงที่มีผลต่อหม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงและความถี่สูง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและข้อกำหนดในการออกแบบ พลากร พรหมมศรี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์	53
PW15	การจัดองการทำงานของรีเลย์ระยะทางแบบโม สำหรับการป้องกันสายส่งไฟฟ้ากำลัง พิชัย อยู่เปล่า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	57
<b>PW-C</b>		
PW16	คุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จชนิดเมทัลออกไซด์โดยกล้องภาพถ่ายความร้อน วิษณุ ทิพย์ประเสริฐ จาตุรงค์ ภีระบรรณ เทอดกิต คงคา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	61



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ ๒

๑๕ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๗

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความ EENET2014

เรียน นาย สุพจน์ วรธิพรหมมา  
ผศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ ๒ (EENET2014) ระหว่างวันที่ ๒๖ - ๒๘ มีนาคม ๒๕๕๗ ณ มาร์ทีม ปาร์ค แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่ ในหัวเรื่อง

" การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ แทนสปาร์กแก๊ป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ "

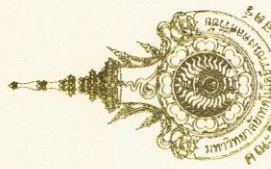
ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการประจำเครือข่ายมีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ " ผ่านการพิจารณา " โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ ๒ (EENET2014) แล้ว

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ลงชื่อ

( รองศาสตราจารย์มนัส อนุศิริ )  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
ประธานกรรมการดำเนินงาน  
การประชุมวิชาการ EENET2014

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
๑ ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ๙๐๐๐๐  
โทรศัพท์และโทรสาร ๐๗๕-๓๑๗๑๖๘



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6  
The 6<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2014)

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้เพื่อแสดงว่า

**สุพจน์ วรชีพพรหมมา บุญยิว ปลืงกลาง**

ผู้เขียนบทความเรื่อง

การวิเคราะห์ผลการออกแบบแผงเซลล์ ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสภาราคีเทบ  
โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความ สาขาไฟฟ้ากำลัง

รองศาสตราจารย์มนัส อนุศิริ  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
ประธานจัดงานการประชุมวิชาการ EENET 2014

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

### การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ แทนสปาร์กแก๊ป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### Analysis of a designed tesla transformer with electronic switching Spark gap by computer simulation

สุพจน์ วรจิรพรมมา และ บุญยัง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ค.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3386 โทรสาร 0-2549-3422

E-mail: suphot\_power2@yahoo.com, boonyang.p@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรณีศึกษา การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Solid State Tesla Transformer) เปรียบเทียบกับหม้อแปลงเตสลาแบบสปาร์กแก๊ป การวิเคราะห์จะจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างหม้อแปลงเตสลาแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากหม้อแปลงเตสลาที่ใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อดีคือ สามารถทำให้หม้อแปลงเตสลาที่มีขนาดเล็กงไม่เกิดเสียงดัง และสามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้ การจำลองระบบจะใช้ขนาดพิกัดแรงดันด้านอินพุตที่ 4 kV เพื่อให้เกิดแรงดันทางด้านเอาพุต 150 kV ที่ความถี่ 200 kHz การจำลองระบบพบว่าการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือ โซลิดสเตตเรเลย์ เป็นสวิตช์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สปาร์กแก๊ป สามารถทำให้หม้อแปลงเตสลาที่มีประสิทธิภาพในการทำงานใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: หม้อแปลงเตสลา, โซลิดสเตตเรเลย์, สปาร์กแก๊ป

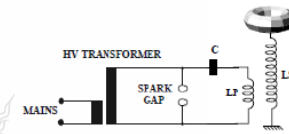
#### Abstract

This paper analyses performance of a designed Tesla Transformer with electronic switching (Solid State Tesla Transformer) which is compared with a typical Spark Gap Tesla Transformer. The analysis is carried out by Matlab/Simulink. The advantage of solid state Tesla Transformer is not only reduce its size but also has noise free and adjustably the frequency of testing. This investigation has input voltage of 4kV in order to generate the output voltage up to 150kV at frequency of 200kHz. From the results, it found that by using the proposed electronic switch, the performance results are similar to the typical spark gap. This can prove that the Solid State Switch can be used for Tesla transformer.

Keywords: Tesla Transformer, Solid state relay, Spark gap

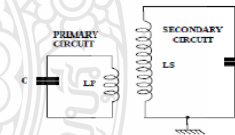
#### 1. บทนำ

หม้อแปลงเตสลา เป็นหม้อแปลงแกนอากาศ ใช้สร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง จะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ในวงจร LC โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงเตสลา และ C คือค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงเตสลา (Stray Capacitance)



รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเตสลา

จากวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเตสลา [3] ในรูปที่ 1 หม้อแปลงเตสลาที่มีส่วนประกอบสำคัญคือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สปาร์กแก๊ป คาปาซิเตอร์ ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลา

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงเตสลาในรูปที่ 2 เมื่อสปาร์กแก๊ปเกิดการสปาร์ก จะมีการถ่ายเทพลังงานที่สะสม ระหว่างคาปาซิเตอร์กับขดลวดต้นแรงดันต่ำ (LP) ในลักษณะออสซิลเลชันด้วยความถี่เรโซแนนซ์ และเหนี่ยวนำให้เกิดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันด้านความถี่สูง (LS) ในลักษณะเป็นคลื่นขบวนหน้าด้วยความถี่เรโซแนนซ์เช่นเดียวกัน ค่าแอมพลิจูดของการออสซิลเลทจะมีค่าสูงสุดถ้าคลื่นทั้งสองทิ้งมีเฟสตรงกัน โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบให้มีความถี่ระหว่าง 150-250 kHz

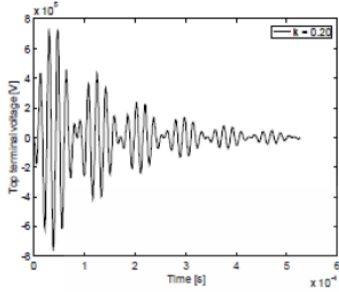
26-28 มีนาคม 2557 มริ โทม์ ปาร์คแอนสปิริตส์ จังหัดกระบี่



**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)



รูปที่ 3 การเกิด ออสซิลเลชันของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา

**2. การออกแบบหม้อแปลงเตสลา**

**2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ**

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด เนื่องจากค่าประจุทางด้านแรงดันสูงจะมีผลต่อค่าแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์ในการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามตัวที่ 140 kV และความถี่มาตรฐานที่กำหนดไม่น้อยกว่า 150 KHz จึงทำการกำหนดพิกัดของการออกแบบคือแรงดันพิกัดทางด้านแรงดันสูง 150 kVrms ความถี่พิกัด 200 kHz แรงดันป้อนเข้า 4000 V การใช้พิกัดแรงดันเข้าที่ 4000 V เนื่องจากเป็นพิกัดแรงดันที่อุปกรณ์สวิตช์เบรคอิเล็กทรอนิกส์(IGBT MBN800H45E2-H) ทนได้ที่ 4500 V คิดค่าความปลอดภัยจึงลดพิกัดแรงดันเข้าที่ 4000 V

**2.2 การกำหนดค่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง**

ค่าความจุไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาประมาณ 10 pF ค่าความจุไฟฟ้าของทรออด มีค่าประมาณ 25 pF ค่าความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน มีค่าสูงสุดประมาณ 60 pF รวมค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมดอย่างประมาณ 95 pF

**2.3 การออกแบบขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงเตสลา**

การออกแบบขดลวดแรงดันสูงนี้จะใช้ท่อ PVC ในการพันขดลวด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี มีความแข็งแรงไม่ดูดความชื้น ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย การเลือกขนาดของท่อสามารถเลือก ได้ตามตารางความสัมพันธ์ ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ตามตารางที่ 2.1 และเลือกความสูงตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

กำลังไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)
< 500W	3-4
500W-1500W	4-6
1500W-3KW	6-10
>3KW	10 ขึ้นไป

ตารางที่ 2.2 ตารางสำหรับเลือกความสูงท่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)	อัตราส่วน	ความสูง(นิ้ว)
3	6:1	18
4	5:1	20
6	4:1	24
8 นิ้วขึ้นไป	3-5:1	24 นิ้วขึ้นไป

ที่ความจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง 95 pF จะสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลาได้จากสมการ

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 C_2} \tag{1}$$

ซึ่งจะได้ค่าเท่ากับ 7.04 mH นำไปคำนวณหาขนาดของเส้นลวดที่จ่ายใช้ในการพันขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตสลา ด้วยการหาค่ากระแสลัดวงจรของขดลวดที่แรงดันออกแบบคือ 150 kV ด้วยสมการ

$$I_{sc} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{2\pi f_2 L_2} \tag{2}$$

จะได้กระแสเท่ากับ 16.955 A เนื่องจากกระแสลัดวงจรมีลักษณะเป็นพัลส์ที่เกิดประมาณครึ่งคาบความถี่ 200 kHz (2.5 μs) และพัลส์จะเกิดทุกช่วงที่แรงดันป้อนเข้าที่ล้าออกคลื่น ที่ความถี่ 100 Hz (10 ms) จึงสามารถคำนวณกระแสประสิทธิภาพได้ด้วยสมการ

$$I_{eff} = I_{sc} \sqrt{\frac{2.5\mu s}{10ms}} \tag{3}$$

จะได้กระแสเท่ากับ 0.268 A และเมื่อคิดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทองแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.5 A/mm<sup>2</sup> รวมถึงคิดผลของ สกินเอฟเฟกต์ แล้ว จะใช้ลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.024 นิ้ว ในการพันขดลวด

การออกแบบขดลวดด้านทุติยภูมิ จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 6.5 นิ้ว และสูง 30 นิ้ว เมื่อนำความสูงของท่อหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L = \frac{N^2 R^2}{9R + 10H} \tag{4}$$

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

ได้ค่า L = 50.125mH เมื่อนำลวดจำนวน 1250 รอบที่ออกแบบไปทำการพันขดลวดพบว่าขดลวดมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 32 นิ้ว และเมื่อทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดใหม่จะได้ค่าเท่ากับ 47.255 mH

**2.4 หากค่าความจุแฝงในขดลวด(Stray Capacitor) ด้วยสมการ**

$$C_{sr} = 0.29H + 0.41R + 1.94\sqrt{\frac{R^3}{H}} \tag{5}$$

ได้ค่า C = 12.62 pF

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

**2.5 หากำความจุของตัวเก็บประจุทอรอยด์รูปโดหน้าจากสมการ**

$$C_{tor} = 1.4(1.2781 - \frac{D_I}{D_o})\sqrt{\pi D_I (D_o - D_I)} \quad (6)$$

เมื่อ  $D_I$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอรอยด์(นิ้ว)

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอรอยด์(นิ้ว)

ในที่นี้จะออกแบบให้ทอรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับที่ใช้พันขดลวดฟูดขุมคือ 6.5 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะได้ค่า  $C = 21.55 \text{ pF}$  เมื่อมีค่า ของตัวเก็บประจุทั้ง 3 มารวมกันจะได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าที่เส้นแรงสูงเท่ากับ  $94.17 \text{ pF}$

**2.6 หากำความถี่เรโซแนนซ์ จากสมการ**

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (7)$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 12.62pF}} = 206.094KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง รวมกับประจุไฟฟ้าของทอรอยด์

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 34.17pF}} = 125.248KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง รวมกับค่าประจุไฟฟ้าของทอรอยด์ และค่าประจุไฟฟ้าของขดลวดด้วยจนวน

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 94.17pF}} = 75.446KHz$$

จากการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จะลดลงเหลือเพียง 75.446 KHz

**2.7 การหาความจุของตัวเก็บประจุทางด้านต้นปฐมภูมิ**

ในการออกแบบจะใช้หม้อแปลงที่ใช้ส่วนรับจุดหลอดนิออนเป็นแหล่งจ่าย โดยจะนำหม้อแปลงจุดหลอดนิออนชนิดที่ติด Primary 230V 2A Secondary 15000 V 30 mA 4 ตัว มาต่อขนานกันเพื่อให้จ่ายกระแสได้เพิ่มขึ้นเป็น 120 mA และเมื่อนำมาหารกับแรงดันไฟฟ้าที่ด้านปฐมภูมิที่ 4000 V จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็น 33.334 KΩ และคำนวณหา ค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเตสลาได้จากสมการ

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi Z} \quad (8)$$

ได้ค่า C ประมาณ 0.1 μF ในการจัดสร้างตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเตสลา จะใช้ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.1 μF 1000 V อนุกรมกัน 5 ตัว และขนานกัน 5 แฉว เพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF 5000 V

**2.8 การออกแบบขดลวดด้านปฐมภูมิ**

จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 2.6 พบว่า หากต้องการนำหม้อแปลงเตสลาไปใช้ในการทดสอบขดลวดด้วย ความถี่

เรโซแนนซ์ จะอยู่ที่ 75.446 KHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเตสลาได้จากสมการ

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_1} \quad (9)$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 \times 75.446KHz \times 0.1\mu F} = 44.5\mu H$$

ในการจัดทำขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงเตสลา จะพันในลักษณะทรงกระบอกเช่นเดียวกับขดลวดแรงดันสูง โดยขดลวด มีรัศมี R = 5.85 นิ้ว สูง H = 6 นิ้ว พันทั้งหมด 12 รอบ และแต่ละรอบห่างกัน 0.5 นิ้ว ใช้ทองแดงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เมื่อคำนวณตามสมการที่ 4 จะได้

$$L = \frac{12^2 \times 5.85^2}{(9 \times 5.85) + (10 \times 6)} = 43.74\mu H$$

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณด้วยสมการที่ 9

จากการออกแบบหม้อแปลงเตสลาจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรได้ดังนี้  $L_1 = 43.74\mu H \cdot C_1 = 0.1\mu F \cdot L_2 = 47.255mH$  และ  $C_2 = 94.17pF$

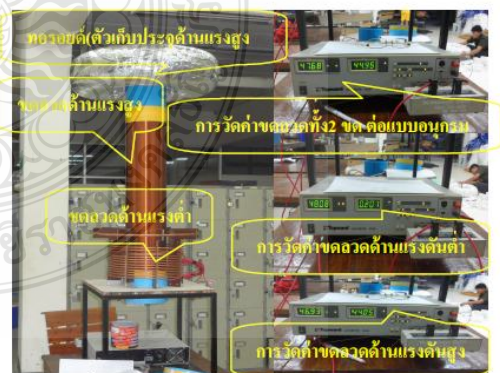
**3. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์**

เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการนำค่า พารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการจำลองระบบ ผู้เขียนบทความจึงได้ทำการจัดสร้างขดลวดของหม้อแปลงเตสลา แล้วหาค่า การเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก ของขดลวดโดยการต่อขดลวดทั้งสองแบบอนุกรม แล้วคำนวณด้วยสมการ

$$M = \frac{L - L_1 - L_2}{2} \quad (10)$$

เมื่อ M = ค่าการเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (H) L = ค่าความเหนี่ยวนำรวมของขดลวดทั้งสองแบบอนุกรมขั้วเสริม (H)  $L_1 =$  ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงต่ำ (H) และ  $L_2 =$  ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูง (H)

**3.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลงเตสลา**



รูปที่ 4 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงเตสลา

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

โดย  $L = 47.68mH$   $L_1 = 48.08\mu H$  และ  $L_2 = 46.93mH$

จากสมการที่ 10

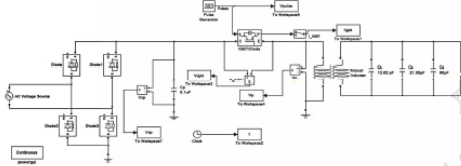
$$M = \frac{47.68mH - 48.08\mu H - 46.93mH}{2} = 0.3509mH$$

**3.2 การนำค่าพารามิเตอร์ต่างไปทำการจำลองระบบด้วย**

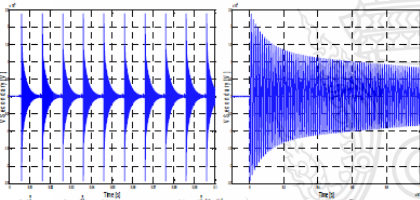
**โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink**

**3.2.1 การจำลองระบบแบบใช้การสวิตช์แบบอิเล็กทรอนิกส์**

ในการจำลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขนาดของหม้อแปลงเทสลา ที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยได้ควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่สลับเวลา 10 ms โดยมี Duty Cycle ที่ 10 % ใช้แรงดันป้อนเข้า 220 V 50 Hz แล้ววัดค่าแรงดันไฟที่ที่จุดต่างของวงจร



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

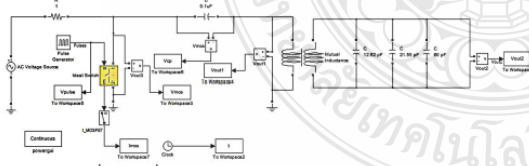


รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชั่น 10 ช่วง

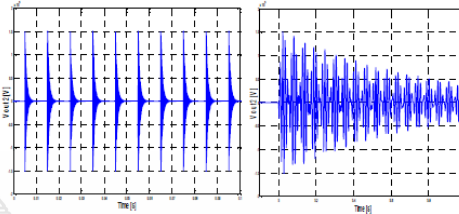
จากรูปที่ 6 กราฟที่แรงดันคัมมูลิวแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา ที่ได้ทำการจำลองระบบด้วยวงจรในรูปที่ 5 โดยได้แสดงการเกิดออสซิลเลชั่นจำนวน 10 ช่วง ซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ 160 kHz และมีแรงดันสูงสุดที่ 240 KV

**3.2.2 การจำลองระบบแบบใช้การสวิตช์ด้วยสปาร์กเกป**

การจำลองได้ทำการควบคุมการทำงานของสปาร์กเกป ที่สลับเวลา 10 ms โดยมี Duty Cycle ที่ 50 % ใช้แรงดันป้อนเข้า 4000 V 50Hz แล้วทำการวัดค่าแรงดันไฟที่ที่จุดต่างของวงจร



รูปที่ 7 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสปาร์กเกป



รูปที่ 8 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบโดยแสดงการเกิดออสซิลเลชั่น 10 ช่วง

จากรูปที่ 8 กราฟที่แรงดันคัมมูลิวแรงสูงของหม้อแปลงเทสลา ที่ได้ทำการจำลองระบบด้วยวงจรในรูปที่ 7 โดยได้แสดงการเกิดออสซิลเลชั่นจำนวน 10 ช่วงซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ 150 kHz และมีแรงดันสูงสุดที่ 150 kV

**4. สรุปผลการจำลองระบบ**

จากการดำเนินงานวิจัย ผู้เขียนบทความ ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขนาดของหม้อแปลงเทสลา ที่ได้จัดทำขึ้น นำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ ของหม้อแปลงเทสลาแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ กับหม้อแปลงเทสลาแบบสปาร์กเกป

ผลการจำลองระบบพบว่าหม้อแปลงเทสลาทั้ง 2 แบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน กล่าวคือ หม้อแปลงเทสลาแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ออสซิลเลชั่นได้ง่าย และใช้ระดับแรงดันป้อนเข้าที่ต่ำกว่า แบบสปาร์กเกป แต่มีข้อเสียคือ อุปกรณ์สวิตช์มีอัตรา การทลแรงดันและกระแสต่ำเมื่อเทียบกับสปาร์กเกป

**เอกสารอ้างอิง**

[1] Plangklang B., Apiratikul P., Phumkittipich K., "Development of Low-Cost Tesla Transformer for High Performance testing 115 kV Line Post Insulator" Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, 2008  
 [2] Dencic M., "Tesla Transformer for Experimentation and Research." Helsinki University of Technology May 2001  
 [3] Tilbury M., "The ULTIMATE Tesla Coil Design AND CONSTRUCTION GUIDE" The Mc Graw Hill Companies,

**อุทธรณ์ วรวิทย์ธรรมา** สำเร็จการศึกษา ส.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มจร. ปัจจุบันศึกษาหลักสูตร วศ.ม.ที่ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

**บุญยัง ปั้งกลาง** สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก Kassel University, Germany ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



26-28 มีนาคม 2557 มาริโน้ ปาร์คแอนสปริสเตอร์ท จังหวัดกระบี่



งานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10  
Conference on Energy Technology Network of Thailand: ENETT

วันที่ 4-6 มิถุนายน 2557

ณ ห้อง BSc4 อาคารเรียนและปฏิบัติการพื้นฐานคณะวิศวกรรมศาสตร์ (BSc)  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



PTS Combination

สนับสนุนโดย



โรงไฟฟ้าจันนะ  
จันนะพลังงาน  
CHULA POWER PLANT, SONGKHLA  
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสงขลา



ประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10  
4-6 มิถุนายน 2557 ณ BSC4 อาคารศูนย์จัดการพื้นฐานคณะวิทยาศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา  
<http://www.enett2014.scl.psu.ac.th>





### บทคัดย่อบทความ

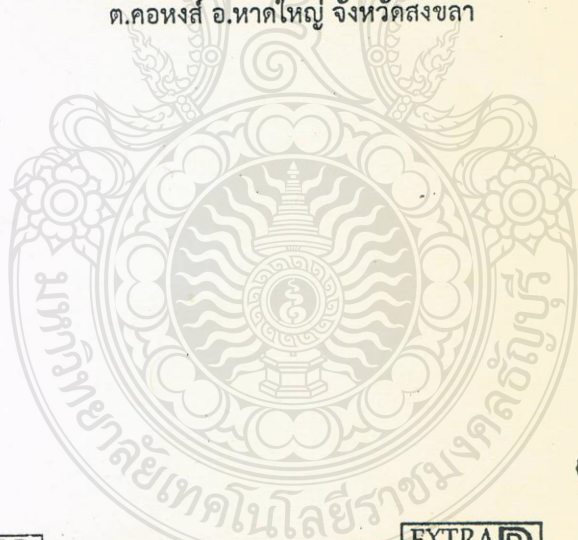
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10

วันที่ 4-6 มิถุนายน พ.ศ. 2557

ณ.อาคารเรียนรวมและปฏิบัติการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ (BSc building)

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่

ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา



PTS Combination



www.extrad.co.th





การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10  
วันที่ 4-6 มิถุนายน พ.ศ. 2557 ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

ลำดับ	ชื่อ - สกุล	บทความ	กลุ่มบรรยาย	หน้าที่
33	สมพลชีวมงคลกานต์	สมรรถนะของการทำนายแหล่งลมทาง คั้งด้วยการจำลองแบบพลศาสตร์ของ ไหลเชิงคำนวณ	ENETT-10- RS009	57
34	สมภพภูติฉิมพาลี	การศึกษาระบบท่อไอเสียที่มีผลต่อการ สิ้นเปลืองพลังงานในเครื่องยนต์	ENETT-10- EM008	59
35	สลิลทิพย์สินธุสนธิ ชาติ	การเปรียบเทียบระบบควบคุมการ ทำงานสำหรับเครื่องอบไฟฟ้าแบบแผ่ รังสีความร้อนชนิดรังสีอินฟราเรดช่วง ไกล	ENETT-10- DT002	61
36	สุพจน์วีรวิพรหมมา	การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อ แปลงโซลิดสเตตเตสลาโดยการจำลอง ระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อ หาประสิทธิภาพของการ ออกแบบสร้าง	ENETT-10- I012	62
37	สุภวรรณ ภูริระวีนิษฐ์ กุล	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการ อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและลมร้อน สำหรับปลาหมึกสดและปลาหมึกต้ม	ENETT-10- DT003	63
38	อรธกร ทองทา	การพัฒนาสมบัติทางกายภาพและความ ร้อนของอิฐมวลเบาแบบอบไอน้ำด้วย ตะกอนน้ำตาล	ENETT-10- I013	65

ที่ ศธ 0521.1.0908/0088



ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
อ.หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา  
90112

12 พฤษภาคม 2557

เรื่อง คอรับบทความได้รับการเข้าร่วมนำเสนอในงานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 10

เรียน คุณสุพจน์ วรธิพรหมมา

- สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. โครงการจัดประชุมวิชาการ จำนวน 1 ชุด  
2. กำหนดการการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง *Analysis of a designed solid state tesla transformer by computer simulation for studying the efficiency design.*” เพื่อนำเสนอในงานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 (Conference on Energy Technology Network of Thailand; ENETT) ระหว่างวันที่ 4-6 มิถุนายน 2557 ณ ห้องสัมมนา BSc4 อาคารเรียนรวม BSc คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ในกรณีนี้ คณะกรรมการจัดงานประชุมฯ ขอขอบคุณในความสนใจในการนำเสนอบทความของท่านในงานประชุมวิชาการฯ ในครั้งนี้ และทางคณะกรรมการฯ ได้ตรวจสอบและพิจารณาบทความของท่านเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยบทความของท่านได้ผ่านการคัดเลือกเพื่อนำเสนอในแบบการบรรยาย (Oral presentation) จึงเรียนมาเพื่อทราบ และบทความของท่านจะได้รับการตีพิมพ์ทศกัณฐ์ในเล่มหนังสือทศกัณฐ์ ตลอดจนบทความฉบับเต็มจะได้รับการบรรจุไว้ในแผ่นดิสเก็ตต์ของงานประชุมฯ โดยในการจัดประชุมครั้งนี้ข้าราชการ พนักงานรัฐวิสาหกิจจากส่วนราชการต่าง ๆ ที่ได้รับอนุมัติจากผู้บังคับบัญชาแล้วสามารถเข้าร่วมประชุมฯ ได้โดยไม่ถือเป็นวันลา และมีสิทธิ์เบิกค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ได้ตามระเบียบราชการ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวิชชกุล)

ประธานการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

โทร 074-288735, 074-288775

โทรสาร 074-558849





# งานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

มอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า



## คุณสุวัฒน์ วรพรหมภา

เป็นผู้นำเสนอผลงานวิชาการ

ในงานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

ณ ห้อง BSc.3 อาคารเรียนและปฏิบัติการวิทยาศาสตร์พื้นฐาน

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

วันที่ 4-6 มิถุนายน 2557

*Somyi Sornthanasri*

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระฉนิษย์กุล)

ประธานกรรมการผู้จัดงาน



สนับสนุนโดย





การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบสร้าง

**Analysis of a designed solid state tesla transformer by computer simulation  
for studying the efficiency design.**

สุพจน์ วรวิพรหมมา<sup>1</sup> และ บุญยัง ปลั่งกลาง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร 0-2549-3386 โทรสาร 0-2549-3422  
E-mail: suphot\_power2@yahoo.com, boonyang.p@en.rmutt.ac.th

#### **บทคัดย่อ**

บทความนี้เป็นการนำเสนอ การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ( Solid state tesla transformer ) โดยเปรียบเทียบวงจรสวิตซ์ 3 รูปแบบ คือ วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อเลือกรูปแบบของวงจร ขนาดพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแส ของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่เหมาะสม ในการสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 150 kV 200 kHz โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ผลการจำลองระบบ พบว่าวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง ต้องใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 2,000V 1450 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 240 kV 160 kHz วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V 95 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 145 kV 132 kHz และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V 400 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 145 kHz

**คำหลัก:** หม้อแปลงเตสลา, โซลิดสเตต, อินเวอร์เตอร์

#### **Abstract**

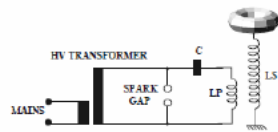
This paper analyses performance of a designed Tesla Transformer with electronic switching (Solid State Tesla Transformer) By comparison circuit switch 3 forms electronic switch switches the direct ,half bridge inverter and full bridge inverter. To select the appropriate circuit and rated of Electronic switching device (IGBT) is appropriate. In building solid state tesla transformers solution Estes coordinates 150 kV 200 kHz. By simulating the system with a computer program. MATLAB / Simulink. The simulation results showed electronic switch directly to the electronic device coordinates to create 2,000 V 1400 can generate high voltage 240 kV 160 kHz ,half Bridge Inverter circuit using electronic devices at coordinates 311 V 95A can generate high voltage 145 kV 132 kHz and full bridge inverter circuit using electronic devices at coordinates 311V 400A can generate high voltage 150 kV 145 kHz.

**Keywords:** Tesla Transformer, Solid state, Inverter



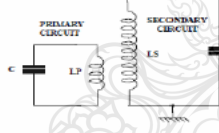
### 1. บทนำ

หม้อแปลงเทสลา เป็นหม้อแปลงแกนอากาศ ใช้สร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง จะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในวงจร LC โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงเทสลา และ C คือค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) ของหม้อแปลงเทสลา (Stray Capacitance)



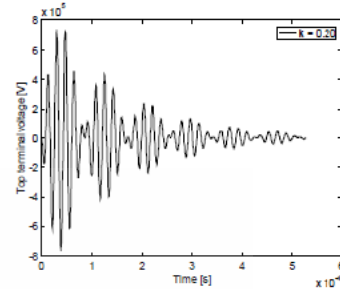
รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสลา

จากวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสลา[3] ในรูปที่ 1 หม้อแปลงเทสลามีส่วนประกอบสำคัญคือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง สปาร์กแกป คาปาซิเตอร์ ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของหม้อแปลงเทสลา

จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงเทสลาในรูปที่ 2 เมื่อสปาร์กแกปเกิดการสปาร์ก จะมีการถ่ายทอดพลังงานที่สะสม ระหว่างคาปาซิเตอร์กับขดลวดด้านแรงดันต่ำ (LP) ในลักษณะออสซิลเลชันด้วยความถี่เรโซแนนซ์ และเหนี่ยวนำให้เกิดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันด้านความถี่สูง (LS) ในลักษณะเป็นคลื่นขบวนหน่วงด้วยความถี่เรโซแนนซ์เช่นเดียวกัน ค่าแอมพลิจูดของการออสซิลเลชันมีค่าสูงสุดถ้าถ้าคลื่นทั้งสองฝั่งมีเฟสตรงกัน โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบให้มีความถี่ระหว่าง 150-250 kHz



รูปที่ 3 การเกิด ออสซิลเลชันของแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสลา

### 2. การออกแบบหม้อแปลงเทสลา

#### 2.1 เจือใจในการออกแบบ

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงขนาดตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง ว่ามีค่าน้อยเพียงใด เนื่องจากค่าประจุทางด้านแรงดันสูงจะมีผลต่อค่าแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์ในการออกแบบหม้อแปลงเทสลาที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามผิวที่ 140 kV และความถี่มาตรฐานที่กำหนดไม่น้อยกว่า 150 KHz จึงทำการกำหนดพิกัดของการออกแบบคือแรงดันพิกัดทางด้านแรงดันสูง 150 kVrms ความถี่พิกัด 200 kHz แรงดันป้อนเข้า 220 V

#### 2.2 การกำหนดค่าตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูง

ค่าความจุไฟฟ้าแฝงในขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเทสลา ประมาณ 10 pF ค่าความจุไฟฟ้าของทอรอยด์ มีค่าประมาณ 25 pF ค่าความจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน มีค่าสูงสุดประมาณ 60 pF รวมค่าประจุไฟฟ้าทั้งสามอย่างประมาณ 95 pF

#### 2.3 การออกแบบขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงเทสลา

การออกแบบขดลวดแรงดันสูงนี้จะใช้ท่อ PVC ในการพันขดลวด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี มีความแข็งแรงไม่ดูดความชื้น ราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย การเลือกขนาดของท่อสามารถเลือก ได้ตามตารางความสัมพันธ์ ของกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ตามตารางที่ 2.1 และเลือกความสูงตามตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเส้น

ผ่านศูนย์กลางท่อ	
กำลังไฟฟ้า	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ(นิ้ว)
< 500W	3-4
500W-1500W	4-6
1500W-3KW	6-10
>3KW	10 ขึ้นไป

ตารางที่ 2.2 ตารางสำหรับเลือกความสูงท่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (นิ้ว)	อัตราส่วน	ความสูง (นิ้ว)
3	6:1	18
4	5:1	20
6	4:1	24
8 นิ้วขึ้นไป	3-5:1	24 นิ้วขึ้นไป

ที่ความจุของตัวเก็บประจุทางด้านแรงสูง 95 pF จะสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดทวดิยภูมิของหม้อแปลงเตสลาได้จากสมการ

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_2} \quad (1)$$

ซึ่งจะได้ค่าเท่ากับ 7.04 mH นำไปคำนวณหาขนาดของเส้นลวดที่นำไปใช้ในการพันขดลวดด้านทวดิยภูมิของหม้อแปลงเตสลา ด้วยการหาค่ากระแสคังจรของขดลวดที่แรงดันออกแบบคือ 150 kV ด้วยสมการ

$$I_{sc} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{2\pi f_1 L_2} \quad (2)$$

จะได้กระแสเท่ากับ 16.955 A เนื่องจากกระแสคังจรมีลักษณะเป็นพัลส์ที่เกิดประมาณครึ่งคาบความถี่ 200 kHz (2.5 μs) และพัลส์จะเกิดทุกช่วงที่แรงดันป้อนเข้าที่ค่ายอดคลื่น ที่ความถี่ 100 Hz (10 ms) จึงสามารถคำนวณกระแสประสิทธิผลได้ด้วยสมการ

$$I_{eff} = I_{sc} \sqrt{\frac{2.5 \mu s}{10 ms}} \quad (3)$$

จะได้กระแสเท่ากับ 0.268 A และเมื่อคิดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทองแดง

ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.54/mm^2$  รวมถึงคิดผลของ สกินเอฟเฟคแล้ว จะใช้ลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.024 นิ้ว ในการพันขดลวด

การออกแบบขดลวดด้านทวดิยภูมิ จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 6.5 นิ้ว และสูง 30 นิ้ว เมื่อนำความสูงของท่อหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ

$$L = \frac{N^2 R^2}{9R + 10H} \quad (4)$$

เมื่อ L = ความเหนี่ยวนำของขดลวด (μH)

N = จำนวนรอบของขดลวด R = รัศมีของขดลวด (นิ้ว)

H = ความสูงของขดลวด (นิ้ว) ได้ค่า L = 50.125mH เมื่อ

นำลวดจำนวน 1250 รอบที่ออกแบบไปทำการพัน

ขดลวดพบว่าขดลวดมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 32 นิ้ว และ

เมื่อทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดใหม่

จะได้ค่าเท่ากับ 47.255 mH

2.4 หาค่าความจุแฝงในขดลวด(Stray Capacitor) ด้วยสมการ

$$C_{str} = 0.29H + 0.41R + 1.94 \sqrt{\frac{R^2}{H}} \quad (5)$$

ได้ค่า C = 12.62 pF

2.5 หาค่าความจุของตัวเก็บประจุทอรรอยด์รูปโดนัทจากสมการ

$$C_{tor} = 1.4(1.2781 - \frac{D_i}{D_o}) \sqrt{\pi D_i (D_o - D_i)} \quad (6)$$

เมื่อ  $D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอรรอยด์(นิ้ว)

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอรรอยด์(นิ้ว)

ในที่นี้จะออกแบบให้ทอรรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายในเท่ากับท่อที่ใช้พันขดลวดทวดิยภูมิคือ 6.5 นิ้ว และ

มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะได้ค่า

C = 21.55 pF เมื่อนำค่าของตัวเก็บประจุทั้ง 3 มา



รวมกันจะได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าด้านแรงสูงเท่ากับ 94.17 pF

2.6 หาค่าความถี่เรโซแนนซ์ จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \quad (7)$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 12.62pF}} = 206.094KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง รวมกับประจุไฟฟ้าของทอรอยด์

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 34.17pF}} = 125.248KHz$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าแฝง รวมกับค่าประจุไฟฟ้าของทอรอยด์ และค่าประจุไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวน

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{47.255mH \times 94.17pF}} = 75.446KHz$$

จากการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์จะลดลงเหลือเพียง 75.446 KHz

2.7 การหาความจุของตัวเก็บประจุทางด้านด้านปฐมภูมิ

คำนวณหาค่า ความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเทสตาได้จากสมการ

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi Z} \quad (8)$$

ได้ค่า C ประมาณ 0.1 μF ในการจัดสร้างตัวเก็บประจุด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเทสตา จะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF 1000 V อนุกรมกัน 5 ตัว และขนานกัน 5 แลว เพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF 5000 V

2.8 การออกแบบขดลวดด้านปฐมภูมิ

จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 2.6 พบว่าหากต้องการนำหม้อแปลงเทสตาไปใช้ในการทดสอบลูกถ้วย ความถี่ เรโซแนนซ์ จะอยู่ที่ 75.446 kHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงเทสตาได้จากสมการ

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C_1} \quad (9)$$

$$L_1 = \frac{1}{4\pi^2 \times 75.446KHz^2 \times 0.1\mu F} = 44.5\mu H$$

จัดทำขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงเทสตา จะพันใน

ลักษณะทรงกระบอกเช่นเดียวกับขดลวดแรงดันสูง โดยขดลวด มีรัศมี R = 5.85 นิ้ว สูง H = 6 นิ้ว พันทั้งหมด 12 รอบ และแต่ละรอบห่างกัน 0.5 นิ้ว ใช้ท่อทองแดงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เมื่อคำนวณตามสมการที่ 4 จะได้

$$L = \frac{12^2 \times 5.85^2}{(9 \times 5.85) + (10 \times 6)} = 43.74\mu H$$

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณด้วย

สมการที่ 9 จากการออกแบบหม้อแปลงเทสตาจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรได้ดังนี้

$$L_1 = 43.74\mu H, C_1 = 0.1\mu F, L_2 = 47.255mH$$

$$\text{และ } C_2 = 94.17pF$$

### 3. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการจำลองระบบ ผู้เขียนบทความจึงได้ทำการจัดสร้างขดลวดของหม้อแปลงเทสตา แล้วหาค่า การเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก ของขดลวด โดยการต่อขดลวดทั้งสองแบบอนุกรม แล้วคำนวณด้วยสมการ

$$M = \frac{L - L_1 - L_2}{2} \quad (10)$$

เมื่อ M = ค่าการเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (H) L = ค่าความเหนี่ยวนำรวมของขดลวดทั้งสองแบบอนุกรมขั้วเสริม (H) L<sub>1</sub> = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงต่ำ (H) และ L<sub>2</sub> = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูง(H)



รูปที่ 4 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงเทสตา



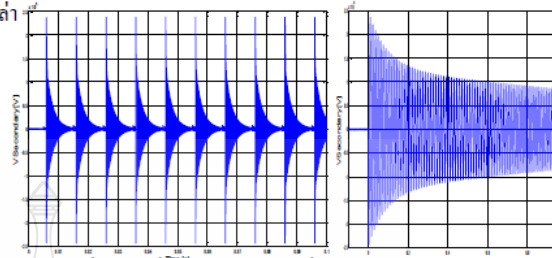
3.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหม้อแปลงเตสลา  
ค่าที่วัดได้จากขดลวดที่สร้างขึ้นคือ

$$L = 47.68mH \quad L_1 = 48.08\mu H \quad \text{และ} \quad L_2 = 46.93mH$$

จากสมการที่ 10

$$M = \frac{47.68mH - 48.08\mu H - 46.93mH}{2} = 0.3509mH$$

แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปทำการจำลองระบบด้วย  
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink



รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบ

3.2 การจำลองระบบแบบใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์แบบ  
ต่อโดยตรง

ในการจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการ  
แบ่งการจำลองระบบของแต่ละวงจรถอดออกเป็น 2 แบบ คือ  
แบบที่ด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา มีลูกถ้วย  
ทดสอบและแบบไม่มีลูกถ้วยทดสอบ โดยเมื่อไม่มีลูก  
ถ้วยทดสอบค่าประจุด้านแรงดันต่ำจะอยู่ที่ 0.033  $\mu F$   
และเมื่อมีลูกถ้วยทดสอบ ค่าประจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำจะ  
อยู่ที่ 0.1  $\mu F$  จากนั้นจะทำการจูน โดยการควบคุม  
อุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) ให้ทำการตัดต่อวงจรที่ยอดคลื่น  
ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ ป้อนเข้าคือ 220 V 50Hz โดย  
ทุก 10 ms จะตัดต่อ 1 ครั้ง พบว่าเมื่อปรับ Duty Cycle ที่  
10 % จะเกิดการอออสซิเลชันสูงสุด

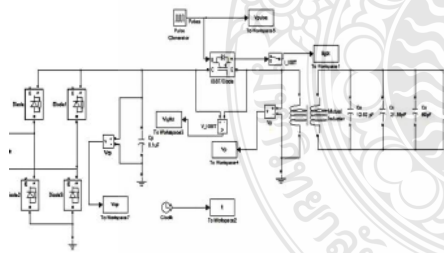
จากรูปที่ 6 กราฟแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลง  
เตสลา ที่ได้ทำการจำลองระบบด้วยวงจรในรูปที่ 5 โดย  
ได้แสดงการเกิดอออสซิเลชันจำนวน 10 ช่วง ซึ่งมี  
ค่าความถี่เท่ากับ 160 kHz และมีแรงดันสุดที่ 240 KV  
ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงเตสลา  
เมื่อปรับเปลี่ยน Duty Cycle

Duty Cycle(%)	ไม่มีลูกถ้วย(kV)	มีลูกถ้วย(kV)
50	18	18
40	50	90
30	100	150
20	250	210
10	300	240

จากตารางที่ 3.1 จะพบว่าเมื่อปรับ Duty Cycle  
ลดลงจะมีผลทำให้แรงดันเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมและค่ากระแสที่  
ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์(IGBT) กรณีไม่มีลูกถ้วย

Duty Cycle(%)	แรงดัน(V)	กระแส(A)
50	311	1,450
40	750	1,450
30	1,500	1,450
20	3,000	1,450
10	3,000	1,450



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรม  
คอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink แบบสวิตช์  
อิเล็กทรอนิกส์



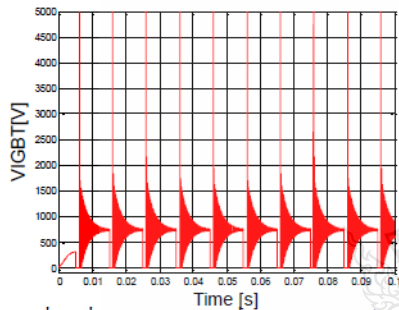
ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดันคคกรวมและค่ากระแสที่ไหลผ่าน  
อุปกรณ์สวิตช์(IGBT) กรณีไม่มีลูกถ้วย

Duty Cycle(%)	แรงดัน(V)	กระแส(A)
50	311	1,420
40	700	1,420
30	1,800	1,420
20	1,900	1,420
10	1,900	1,420

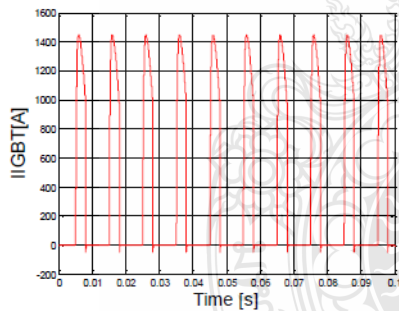
จำลองใน 2 รูปแบบเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 แล้วทำการ  
ควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่าน  
ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ในเรื่องคั่น  
จากสูตร

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

โดยเมื่อไม่มีลูกถ้วยความถี่จะอยู่ที่ 125.681 kHz และ  
หากมีลูกถ้วยจะอยู่ที่ 72.583 kHz แล้วจึงทำการค้นหา  
ความถี่ที่ถูกต้อง



รูปที่ 7 คลื่นสัญญาณแรงดันที่คคกรวมอุปกรณ์สวิตช์



รูปที่ 8 คลื่นสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์

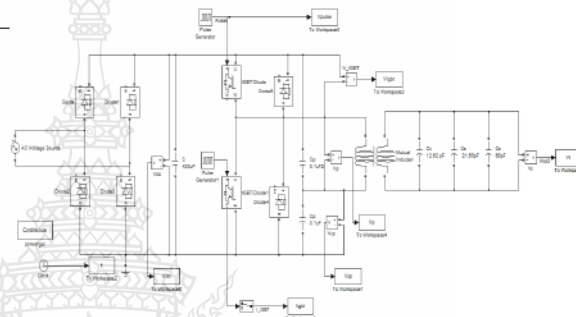
จะสังเกตได้ว่า แรงดันคคกรวมอุปกรณ์สวิตช์

มีค่าสูงมากในช่วงทรานเซียนส์ และกระแสก็มีลักษณะ

เป็นคลื่นพัลส์

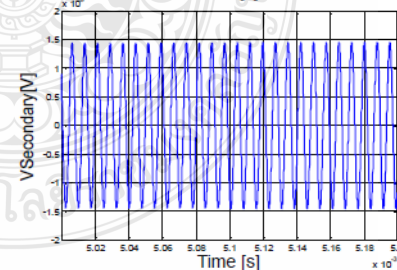
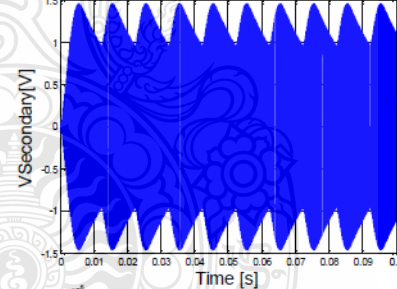
### 3.2 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฮาร์ดแวร์ อินเวอร์เตอร์

การใช้วงจรฮาร์ดแวร์อินเวอร์ต์ที่การสร้างหม้อ  
แปลงโซลิดสเตตเหล่านี้ ผู้เขียนบทความได้ทำการ



รูปที่ 9 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วย

วงจรฮาร์ดแวร์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลอง  
ระบบที่ 132kHz Duty Cycle 20 % ไม่มีลูกถ้วย

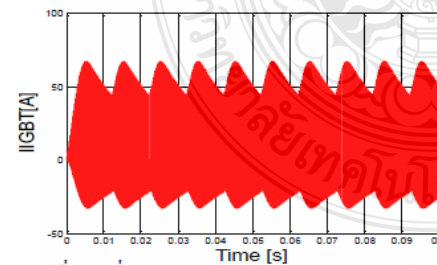
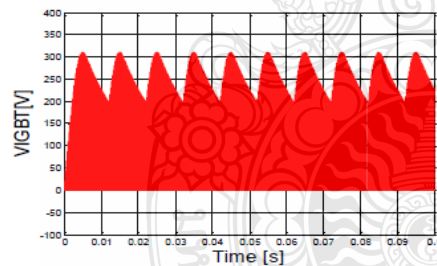


ตารางที่ 3.3 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกรวม  
และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์(IGBT) กรณีไม่มี  
มัลิกวลัย โดยการเปลี่ยนความถี่สวิตช์

f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
125	24	311	15
130	65	311	32
132	360	311	250
133	270	311	205
135	60	311	63

ตารางที่ 3.4 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกรวม  
และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) กรณีไม่มี  
มัลิกวลัย ที่ความถี่ 132 kHz โดยการเปลี่ยน Duty Cycle

D (%)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
40	360	311	250
30	350	311	240
20	145	311	95
10	25	311	25



รูปที่ 11 คลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของอุปกรณ์  
สวิตช์ที่ความถี่ 132kHz Duty Cycle 20% ไม่มีมัลิกวลัย

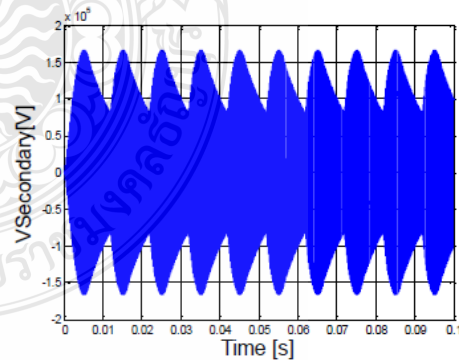
สังเกตได้ว่า ที่ความถี่ 132 kHz เป็นความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์และที่ D 20 % ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกรวมและค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.5 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกรวม  
และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์(IGBT) กรณีไม่มี  
มัลิกวลัย โดยการเปลี่ยนความถี่สวิตช์

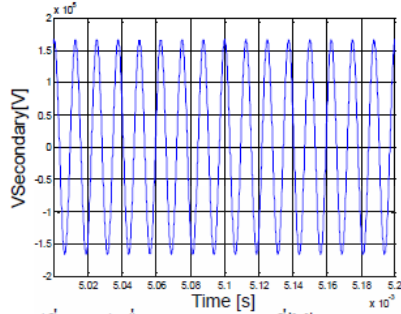
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
72	15	311	25
73	16	311	21
75	21	311	20
80	170	311	250
85	15	311	42

ตารางที่ 3.6 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกรวม  
และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) กรณีไม่มี  
มัลิกวลัย ที่ความถี่ 80 kHz โดยการเปลี่ยน Duty Cycle

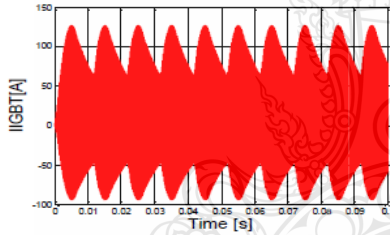
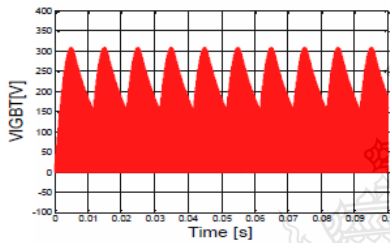
D (%)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
40	170	311	250
30	160	311	205
20	70	311	110
10	14	311	40







รูปที่ 12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลอง  
ระบบที่ 80 kHz Duty Cycle 30% มิถุนาลัย



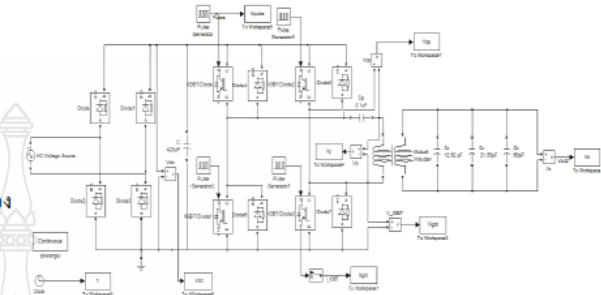
รูปที่ 13 คลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของอุปกรณ์  
สวิตช์ที่ความถี่ 80 kHz Duty Cycle 30% มิถุนาลัย

สังเกตได้ว่า ที่ความถี่ 80 kHz เป็นความถี่ที่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์และที่ D 30% ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกคร่อมและค่ากระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

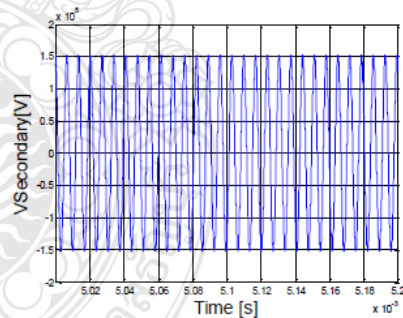
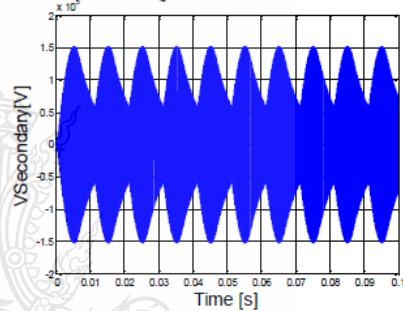
### 3.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฟลูบริคจิ้นเวอร์เคอร์

การใช้วงจรฟลูบริคจิ้นเวอร์เคอร์ในการสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสตา ผู้เขียนบทความได้ทำการจำลองใน 2 รูปแบบเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 และ 3.2 แล้วทำการควบคุมการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่เรโซแนนซ์ โดยเมื่อไม่มีมิกถั่วความถี่จะอยู่

ที่ 125.681 kHz และหากมีมิกถั่วจะอยู่ที่ 72.583 kHz  
แล้วจึงทำการหาค่าความถี่ที่ถูกต้อง



รูปที่ 14 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วย  
วงจรฟลูบริคจิ้นเวอร์เคอร์



รูปที่ 15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลอง  
ระบบที่ 145 kHz Duty Cycle 20% มิถุนาลัย

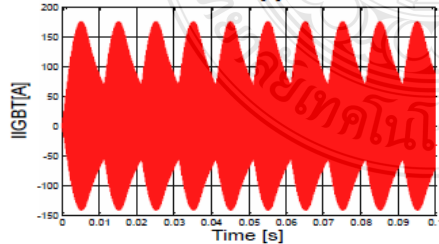
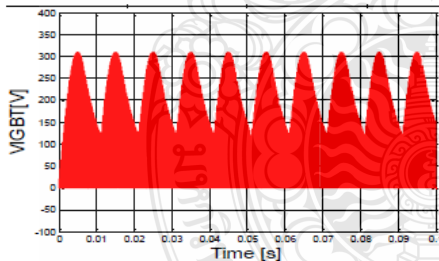


ตารางที่ 3.7 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกคร่อม และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) กรณีไม่มีลูกถ้วย โดยการเปลี่ยนความถี่สวิตช์

f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
125	50	311	20
130	55	311	25
135	70	311	70
140	125	311	185
145	360	311	800
150	70	311	200

ตารางที่ 3.8 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกคร่อม และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) กรณีไม่มีลูกถ้วย ที่ความถี่ 145 kHz โดยการเปลี่ยน Duty Cycle

D (%)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
40	360	311	800
30	350	311	800
20	150	311	400
10	10	311	30



รูปที่ 16 คลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ที่ความถี่ 145 kHz Duty Cycle 20% ไม่มีลูกถ้วย

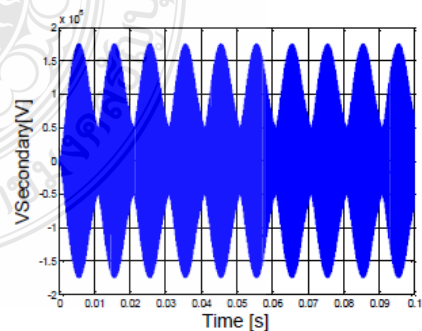
สังเกตได้ว่า ที่ความถี่ 145 kHz เป็นความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์และที่ D 20 % ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกคร่อมและค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

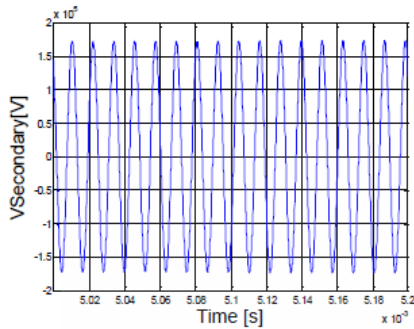
ตารางที่ 3.9 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกคร่อม และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) กรณีมีลูกถ้วย โดยการเปลี่ยนความถี่สวิตช์

f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
72	60	311	85
75	50	311	20
80	70	311	95
85	800	311	1,850
90	40	311	195

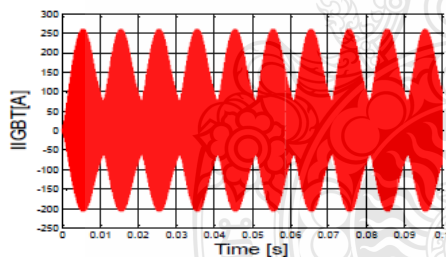
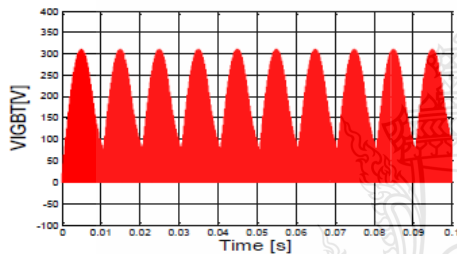
ตารางที่ 3.10 ค่าแรงดันด้านแรงสูง ค่าแรงดันคกคร่อม และค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์ (IGBT) กรณีไม่มีลูกถ้วย ที่ความถี่ 85 kHz โดยการเปลี่ยน Duty Cycle

D (%)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
40	800	311	1,850
30	600	311	1,350
20	175	311	450
10	7.5	311	30





รูปที่ 17 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 85 kHz Duty Cycle 20 % มีลูกถ้วย



รูปที่ 18 คลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ที่ความถี่ 85 kHz Duty Cycle 20% มีลูกถ้วย สังเกตได้ว่า ที่ความถี่ 85 kHz เป็นความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์และที่ D 20 % ค่าแรงดันค้ำแรงสูง ค่าแรงดันตกคร่อมและค่ากระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

#### 4. สรุปผลการจำลองระบบ

จากการดำเนินงานวิจัย ผู้เขียนบทความ ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดผลของหม้อแปลงเตสลาที่ได้จัดทำขึ้น นำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของหม้อแปลงเตสลาแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ทั้ง 3 รูปแบบ จากข้อจำกัด ของพิกัดอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลการจำลองระบบพบว่า สามารถหาค่าความเหมาะสมและรูปแบบของวงจรในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเคสเตสลา จากพิกัดที่กำหนดในการออกแบบได้ จากการปรับค่าความถี่และ Duty Cycle ในการควบคุม

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Plangklang B , Apiratikul P, Phumkittipich K, “ Development of Low-Cost Tesla Transformer for High Performance testing 115 kV Line Post Insulator” Rajamangala University of Technology Thanyaburi ,Thailand,2008
- [2] Denicolai M, “Tesla Transformer for Experimentation and Research.” Helsinki University of Technology May 2001
- [3] Tilbury M, “ The ULTIMATE Tesla Coil Design AND CONSTRUCTION GUIDE ” The Mc Graw Hill Companies,
- [4] สุพจน์ วรวิฑรพรมมา และบุญยัง ปลั่งกลาง “การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลา ที่ใช้การสวิตซ์แบบอิเล็กทรอนิกส์แทนสปาร์กแก๊ป โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 ระหว่างวันที่ 26-28 มีนาคม 2557 มหาวิทยาลัยปาร์คแอนสปาร์ตสอร์ท กระบี่
- [5] อุคม พรหมศรีจันทร์และคณะ “การออกแบบและสร้างหม้อแปลงเตสลาโดยใช้เทคนิคฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32) 28-30 ตุลาคม 2552 มหาวิทยาลัยมหิดล



**ptt**  
Group

**TREC-7**

**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ**  
**รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7**  
The 7<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-7)

**"ตามรอยพ่อ ถ่ายทอดวิถีต้นแบบ พลังงานทดแทนสู่ชุมชน"**

**ผลงานทางวิชาการ 7 สาขา**

CP ไฟฟ้าชุมชน

CT ความร้อนชุมชน

CF เชื้อเพลิงชุมชน

ES การประหยัดพลังงาน

EN สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

IR นวัตกรรมพลังงานทดแทน

EM การจัดการพลังงานในชุมชน



**RMUTR**

12-14 พฤศจิกายน 2557

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์



## คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ด้วยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ร่วมกับ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย กำหนดให้มีการจัดประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 (The 7<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Conference: TREC-7) ระหว่างวันที่ 12 - 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักวิจัย นิสิต นักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา ได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่แวดวงวิชาการ และแลกเปลี่ยนความรู้ประสบการณ์ด้านการวิจัย อีกทั้งเป็นการสร้างเครือข่ายความร่วมมือด้านการวิจัยร่วมกับเครือข่ายการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากภายนอก

ดังนั้น เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุวัตถุประสงค์ จึงแต่งตั้งคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนี้

### 1. คณะกรรมการอำนวยการ ประกอบด้วย

- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1. อธิการบดี   | ประธานกรรมการ       |
| 2. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย                       | กรรมการ             |
| 3. นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย            | กรรมการ             |
| 4. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ             | กรรมการ             |
| 5. ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย                   | กรรมการ             |
| 6. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา                        | กรรมการและเลขานุการ |
| 7. รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาฝ่ายส่งเสริมงานวิจัย | ผู้ช่วยเลขานุการ    |

### 2. คณะกรรมการพิจารณาบทความ ประกอบด้วย

- |                     |                 |                                     |
|---------------------|-----------------|-------------------------------------|
| 1. รศ.ดร.สิงห์ทอง   | พัฒนเศรษฐานนท์  | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                |
| 2. รศ.ทัศนีย์       | สิงห์เจริญ      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 3. ผศ.ดร.กฤษณ์ชนม์  | ภูมิภักดีพิชญ์  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 4. ผศ.ดร.บุญยัง     | ปลั่งกลาง       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 5. ผศ.ดร.บุญฤทธิ์   | ประสาธแก้ว      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 6. ผศ.ดร.พัฒนาพล    | มีนา            | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                |
| 7. ผศ.ดร.วารุณี     | อริยวิริยนันท์  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 8. ผศ.ดร.วิรัชชัย   | โรยนรินทร์      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 9. ผศ.ดร.สรพงษ์     | ภาสุปรีย์       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 10. ผศ.ดร.สุรจิตร   | พระเมือง        | มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย                |
| 11. ผศ.ดร.จักรี     | ศรีนนท์ฉัตร     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 12. ผศ.ดร.อำนาจ     | เรืองวารี       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 13. ผศ.ดร.บัณฑิต    | กฤตาคม          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน    |
| 14. ผศ.ดร.เจนศักดิ์ | เอกบูรณะวัฒน์   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 15. ผศ.ดร.วิทยา     | พวงสมบัติ       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 16. ผศ.ดร.กนกอร     | หัตถ์โรศ        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 17. ผศ.ดร.ไสรรัตน์  | มงคลมะไฟ        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 18. ดร.สำเนียง      | องสุพันธ์กุล    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 19. ดร.สันติ        | ไทยอินวงษ์      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  |
| 20. ดร.กิตติศักดิ์  | วิธินันท์กิตต์  | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก |
| 21. ดร.จักรกฤษ      | ศรีละออ         | มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม        |
| 22. ดร.ธนิท         | เรืองรุ่งชัยกุล | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์               |
| 23. ดร.ประจวบ       | อินระวงศ์       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน    |
| 24. ดร.พิสิษฐ์      | มณีโชติ         | มหาวิทยาลัยนครสวรรค์                |
| 25. ดร.มนต์ชัย      | พินิจจิตรสมุทร  | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์              |
| 26. ดร.รวิภา        | ยงประยูร        | มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง              |



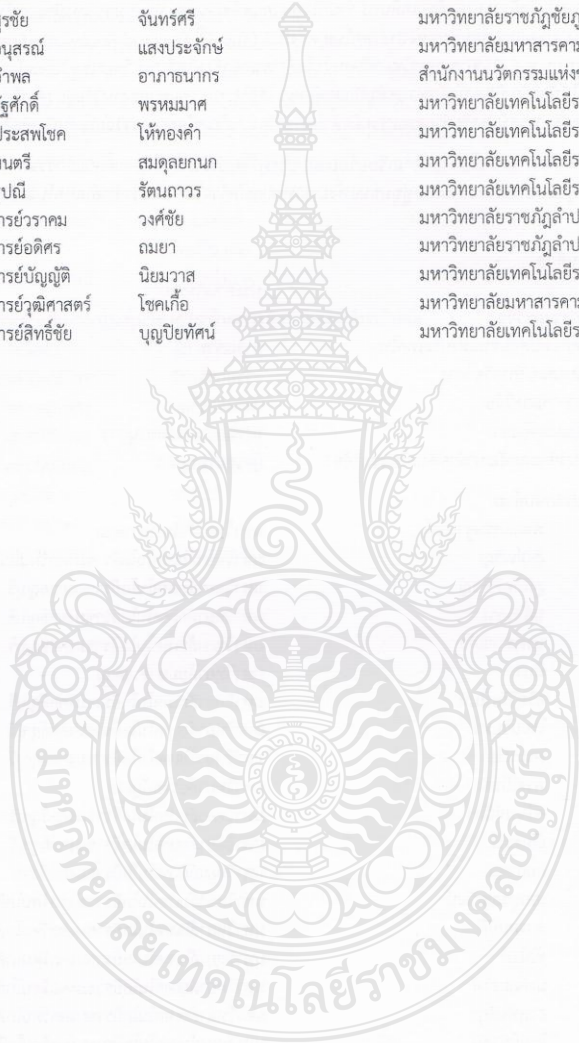
TREC-7

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ  
รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7  
The 7<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference.

- |                       |               |
|-----------------------|---------------|
| 27. ดร.วรจิตต์        | เศรษฐพรศักดิ์ |
| 28. ดร.วรราจิต        | พยอม          |
| 29. ดร.ศักดิ์ชาย      | เพชรตรา       |
| 30. ดร.ศุภกิจ         | รวศิลป์ชัย    |
| 31. ดร.สหัชญา         | ทองสาร        |
| 32. ดร.สุรัชย์        | จันทร์ศรี     |
| 33. ดร.อนุสรณ์        | แสงประจักษ์   |
| 34. ดร.อำพล           | อาณาจักร      |
| 35. ดร.รัฐศักดิ์      | พรหมมาศ       |
| 36. ดร.ประสพโชค       | โพทองคำ       |
| 37. ดร.มนตรี          | สมดุลยกนก     |
| 38. ดร.ฐปณี           | รัตนถาวร      |
| 39. อาจารย์วราคม      | วงศ์ชัย       |
| 40. อาจารย์อดิสร      | ถมยา          |
| 41. อาจารย์ปัญญาธิ    | นิยมวาส       |
| 42. อาจารย์วุฒิศาสตร์ | โชคแก้ว       |
| 43. อาจารย์สิทธิ์ชัย  | บุญปัทม์      |



- สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี  
มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ  
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง  
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์





สารบัญ

สาขาไฟฟ้าชุมชน (CP)		หน้า
O-CP01	การประยุกต์ระบบการผลิตไฟฟ้าแบบเคลื่อนที่ด้วยรถจักรยานยนต์ในภาวะภัยพิบัติ	เนตรชาย โพธิ์เขียว 1
O-CP02	การประเมินศักยภาพทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าชุมชนด้วยการใช้พลังงานทดแทน ก๊าซชีวภาพจากเศษพืชทางการเกษตรและมูลสัตว์ กรณีศึกษาชุมชนหมู่บ้านโนนข่า	ชำนาญ ใจประดิษฐ์ธรรม 6
O-CP03	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำพลังน้ำขนาดเล็กที่แปลงเป็นเชื้อเพลิง	จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล 15
O-CP04	การศึกษาคุณภาพไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก	ธีรวัฒน์ ผูกสมัคร 21
O-CP05	การศึกษาคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเทคนิคอินเวอร์ต	เสาวนีย์ กันดี 27
O-CP06	การศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบใบพัดผลิตกระแสไฟฟ้า	รณกร เทพวงษ์ 31
O-CP07	การผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำจากกังหันน้ำประปาประจำหมู่บ้านด้วยกังหันน้ำขนาดเล็ก	สุรจิตร พระเมือง 36
O-CP08	การลดพลังงานไฟฟ้าตามสถานะโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส	สัญญา ผาสุก 40
O-CP09	การผลิตไฟฟ้าจากการระบายอากาศของคอมพิวเตอร์เครื่องปรับอากาศด้วยกังหันลมขนาดเล็ก	สุรจิตร พระเมือง 46
O-CP10	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบไฟส่องสว่างถนนพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับพื้นที่ห่างไกล	กิตติพงษ์ ศรีพนากุล 50
O-CP11	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีผลมาจากช่องว่างอากาศ	พีรวัฒน์ มีสุข 55
O-CP12	อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สมรรถนะสูงสำหรับระบบที่ไม่เชื่อมต่อกับกริดในชุมชนห่างไกล	พร้อมรบ คำธาร 61
O-CP13	การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบต่อเข้าระบบกริด	ภานุพล ปิ่นรายันนท์ 67
O-CP14	การผลิตไฟฟ้าชุมชนขนาด 1 เมกะวัตต์จากกังหันน้ำโดยใช้หม้อไอน้ำ	สหทัย ทองสาร 73
O-CP15	การออกแบบ และใช้งานพลังงานทดแทนเพื่อใช้งานโหลดกระแสตรงและสลับร่วมกัน	รุ่งเพชร กองนอก 77
O-CP16	ระบบพัดลมไอน้ำแบบเคลื่อนที่ ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน ตำบลลานดอกไม้ตึก อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดกาฬงเพชร	वलันต์ เพชรพิมูล 83
O-CP17	การประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อกับระบบ จำหน่ายที่มีแบตเตอรี่สำรองสำหรับควบคุมคุณภาพไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน	นพพร พัชรประทีป 89
O-CP18	การตรวจจับการเกิดการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระภายใต้ระบบควบคุมโดยวิธีเฟสล็อกคูล ในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า	วุฒิจงค์ จันทeson 95
O-CP19	ระบบวัดความชื้นและอุณหภูมิภายในอาคารด้วยหัววัดแบบอาร์ซีใหม่	เด็ยว อภัยราช 101
O-CP20	โปรแกรมทำนายผลการผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และประเมินความคุ้มทุนภายใต้ ระบบ Feed in Tariff ของประเทศไทยในพื้นที่เป้าหมาย	ยอดธง มั่นสิน 105
O-CP21	การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตไฟฟ้าโดยใช้ความร้อนจากห้องเผาไหม้ ชีวมวล	ฉันทนา พันธุ์เหล็ก 109
P-CP22	การวัดและศึกษาคุณภาพไฟฟ้าของกระแสไหลชนิดต่างๆด้วย LabVIEW	องอาจ แสดใหม่ 114
P-CP23	ศักยภาพของไฟฟ้าพลังน้ำหัวน้ำต่ำขนาดย่อมในประเทศไทย	ทิวา ตันสถิตย์ 119
P-CP24	การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตรสเทสส์ โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ	สุพจน์ วรวิกรมมา 124

ที่ ศธ ๐๕๘๒.๑๖/๑๐๓๑



สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

๙๖ หมู่ ๕ ถนนพหลโยธินสาย ๕ ตำบลศาลายา

อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม ๗๓๑๗๐

๒ ตุลาคม ๒๕๕๗

เรื่อง ตอบรับบทความการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๗  
เรียน คุณสุพจน์ วรวิพรหมมา และคุณบุญยัง ปลั่งกลาง

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเทส  
เทสล่า โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ เข้าร่วม  
นำเสนอในประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๗ (The 7<sup>th</sup>  
Thailand Renewable Energy for Community Conference: TREC-7) ระหว่างวันที่ ๑๒ - ๑๔  
พฤศจิกายน ๒๕๕๗ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน  
จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ความละเอียดทราบแล้วนั้น

บัดนี้คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิได้พิจารณาบทความของท่านเรียบร้อยแล้ว และขอแจ้งให้ทราบ  
ว่าบทความวิจัยของท่านผ่านเกณฑ์การประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบบรรยาย  
(Oral presentation)

ทั้งนี้ ขอให้ท่านดำเนินการชำระค่าลงทะเบียน (อัตราปกติ ได้ตั้งแต่บัดนี้จนถึงวันที่ ๑๕ ตุลาคม  
๒๕๕๗ อัตราล่าช้า ตั้งแต่วันที่ ๑๖-๓๑ ตุลาคม ๒๕๕๗) และลงทะเบียนเข้าร่วมงาน พร้อมแนบหลักฐานการชำระ  
เงินในระบบลงทะเบียนเข้าร่วมงาน ท่านสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://trec7.rmut.ac.th/>  
หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
โทรศัพท์ ๐ ๒๔๔๑ ๖๐๕๙ อีเมล [trec7.2014@gmail.com](mailto:trec7.2014@gmail.com)

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและดำเนินการ

ขอแสดงความนับถือ

ดร.สำเนียง งามสุพันธุ์กุล

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

สถาบันวิจัยและพัฒนา

โทร ๐ ๒๔๔๑ ๖๐๕๙ โทรสาร ๐ ๒๘๘๙ ๔๕๘๕ ต่อ ๒๔๒๐





**TREC-7**

สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้เพื่อแสดงว่า

สุพจน์ วรวิพรหมมา และบุญยั้ง ปลั่งกลาง

ได้นำเสนอผลงานวิชาการภาคโปสเตอร์

เรื่อง การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตเลสเทสตา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์  
เพื่อหาประสิทธิภาพของกรอกแบบ

**ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๗**

**“ตามรอยพ่อ ถ่ายทอดวิถีต้นแบบ พลังงานทดแทนสู่ชุมชน”**

ระหว่างวันที่ ๑๒ - ๑๔ พฤศจิกายน ๒๕๕๗

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล  
อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ไรยนรินทร์)

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชระ วสุธรรากิจวัฒน์)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



# การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ

## Analysis of a designed solid state tesla transformer by computer simulation

### For studying the effective design

สุพจน์ วรรณิพรหมมา และ บุญยั้ง ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

โทร 0-2549-3386 โทรสาร 0-549-3422 E-mail: suphot\_power2@yahoo.com

#### บทคัดย่อ

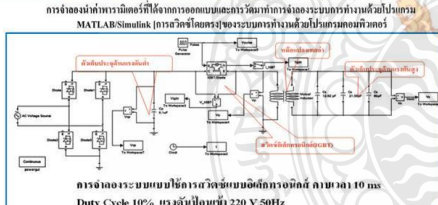
บทความนี้เป็นงานนำเสนอ การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่าแบบสวิตซ์อิเลกทรอนิกส์ (Solid state tesla transformer) โดยเปรียบเทียบวงจรสวิตซ์ 3 รูปแบบ คือ วงจรสวิตซ์อิเลกทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อเลือกรูปแบบของวงจรขนาดพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแส ของอุปกรณ์สวิตซ์อิเลกทรอนิกส์ (IGBT) ที่เหมาะสมในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า ขนาดพิกัด 150 kV 200 kHz โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ผลการจำลองระบบ พบว่า วงจรสวิตซ์อิเลกทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง ดีไซน์ อุปกรณ์อิเลกทรอนิกส์ที่พิกัด 1,800V 1,420 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 160 kHz วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ใช้ อุปกรณ์อิเลกทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±75 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 145 kV 132 kHz และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิเลกทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±175 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 145 kHz สำหรับการศึกษานี้พบว่า วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

#### การออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า

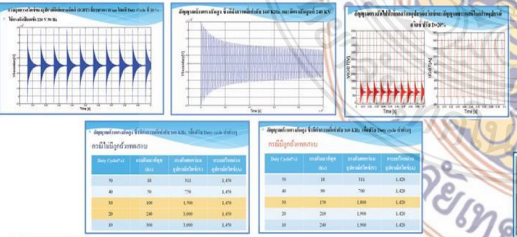
- ค่าพิกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- แรงดันพิกัดสำหรับแรงดัน 150 kV
- ความถี่พิกัด 200 kHz
- แรงดันอินพุต 4000 V
- ความถี่พิกัดของ IGBT 1.800 V 1.420 A
- ความถี่พิกัดของ IGBT 311 V 75 A
- ความถี่พิกัดของ IGBT 311 V 175 A
- ความถี่พิกัดของ IGBT 1.800 V 1.420 A
- ความถี่พิกัดของ IGBT 311 V 75 A
- ความถี่พิกัดของ IGBT 311 V 175 A

ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง 45.74 mH ค่าที่วัดได้ 46.09 mH  
 ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง 47.25 mH ค่าที่วัดได้ 46.95 mH  
 ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง 47.25 mH

#### การจำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

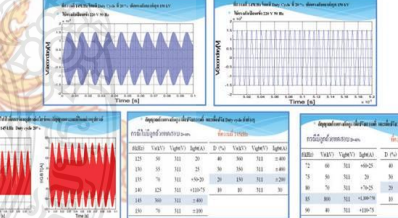
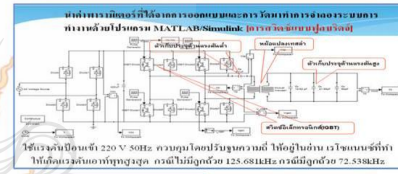
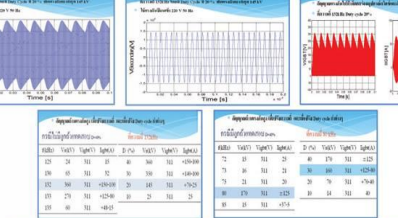


การจำลองระบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ขนาดเวลา 10 ms Duty Cycle 10% แร่ที่อินพุต 220 V 50Hz)



#### 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



#### สร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า

จากการจำลองระบบที่ได้ ผู้เขียนบทความได้นำข้อมูลไปใช้ในการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์สวิตซ์ที่เหมาะสม และสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า ขนาดพิกัด 145 kV 132 kHz โดยใช้ IGBT เบอร์ 1MB1300P-060 พิกัดแรงดัน 600 V กระแส ±300 A ต่อแบบวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และเมื่อสร้างแล้วได้ขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz

#### อภิปรายผลและสรุป

จากการคำนวณทางวิศวกรรม ผู้เขียนบทความได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขนาดของหม้อแปลงเทสล่าที่ได้จัดทำขึ้น นำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ ของหม้อแปลงเทสล่าแบบสวิตซ์อิเลกทรอนิกส์ ทั้ง 3 รูปแบบจากข้อจำกัดของพิกัดอุปกรณ์สวิตซ์อิเลกทรอนิกส์ ผลการจำลองระบบพบว่า สามารถหาค่าความเหมาะสมและรูปแบบของวงจรในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า จากพิกัดที่กำหนดในการออกแบบได้จากการปรับค่าความถี่และ ค่า Duty Cycle ในการควบคุม โดยผู้เขียนบทความได้สนับสนุนการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสล่า จากรูปแบบวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากมีค่าพิกัดอุปกรณ์ต่ำสุด จึงสามารถสร้างได้ทั้งแรงดันและความถี่ได้เทียบกับการจำลองระบบ



P-CP24

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

สุพจน์ วรวิกรมมา\* และ บุญยงค์ ปลั่งกลาง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110 E-mail: suphot\_power2@yahoo.com

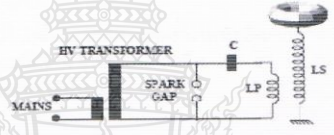
บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอ การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเทสลาแบบสวิตซ์อิล็กทรอนิกส์ ( Solid state tesla transformer ) โดยเปรียบเทียบกับวงจรสวิตซ์ 3 รูปแบบ คือ วงจรสวิตซ์อิล็กทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อเลือกรูปแบบของวงจร ขนาดพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแส ของอุปกรณ์สวิตซ์อิล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่เหมาะสม ในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตสเทสลา ขนาดพิกัด 150 kV 200 kHz โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink ผลการจำลองระบบ พบว่าวงจรสวิตซ์อิล็กทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง ต้องใช้ อุปกรณ์อิล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 1,800V 1,420 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 160 kHz วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±75 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 145 kV 132 kHz และวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±175 A สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 145 kHz สำหรับการศึกษาค้นคว้านี้พบว่าวงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: หม้อแปลงเทสลา, โซลิตสเตส, อินเวอร์เตอร์หม้อแปลงเทสลา

1. บทนำ

หม้อแปลงเทสลา เป็นหม้อแปลงแกนอากาศ ใช้สร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง จะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ในวงจร LC โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวด ของหม้อแปลงเทสลา และ C คือค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)



รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเทสลา

จากรูปที่ 1 เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงจ่ายแรงดันไฟฟ้า สปรกแกปเกิดการสปาร์ค จะมีการถ่ายเทพลังงานที่สะสมระหว่างคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำและขดลวดด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเทสลาในลักษณะออสซิลเลชั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์และเหนี่ยวนำให้เกิดรูปคลื่นสัญญาณแรงดันด้านแรงต่ำสูงในลักษณะรูปคลื่นขบวนหว่งด้วยความถี่เรโซแนนซ์ โดยค่าแอมพลิจูดของการออสซิลเลชั่นจะมีค่าสูงสุดถ้าคลื่นทั้งสองฝั่งมีเฟสตรงกัน

1. การออกแบบหม้อแปลงเทสลา

1.1 เลื่อนขในารออกแบบ การออกแบบ เบื้องต้นต้องคำนึงถึงตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูงเนื่องจากตัวเก็บประจุทางด้านแรงดันสูงมีผลต่อแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์ของการออกแบบหม้อแปลงเทสลาที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันวาบไฟตามผิว 140 kV และความถี่มาตรฐานที่กำหนดไม่น้อยกว่า 150 kHz จึงทำการกำหนดพิกัดในการออกแบบอยู่ที่ พิกัดแรงดันสูง 150 kV พิกัดความถี่ 200 kHz และใช้แรงดันป้อนเข้าที่ 4,000 V ตามพิกัดอุปกรณ์สวิตซ์อิล็กทรอนิกส์ (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 จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1,250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ

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

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

เมื่อปาลวดจำนวน 1,250 รอบ ที่ออกแบบไปทำการพันขดลวดพบว่าขดลวดมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 32 นิ้ว และเมื่อทำการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดใหม่จะได้ค่าเท่ากับ 47.255 mH

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

$$C_s = 0.29H + 0.41R + 1.94 \frac{R^2}{H} \tag{2}$$

ได้ค่า C = 12.62 pF และหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่รอยต่อจากสมการ



$$C_{var} = 1.4(1.2781 - \frac{D_1}{D_0})\sqrt{\pi D_1(D_0 - D_1)} \quad (3)$$

เมื่อ  $D_1$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอรรอยด์(นิ้ว)

$D_0$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอรรอยด์(นิ้ว)

ในที่นี้จะออกแบบให้ทอรรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับท่อที่ใช้พันขดลวดหตุยภูมิคือ 6.5 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะได้ค่า  $C = 21.55 \mu F$  เมื่อนำค่า ของตัวเก็บประจุทั้ง 3 มารวมกันจะได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าด้านแรงสูง เท่ากับ  $94.17 \mu F$  แล้วคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์เบื้องต้น จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_2}} \quad (4)$$

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าฝั่งจะได้ความถี่เรโซแนนซ์ 206.094 kHz  
คิดประจุฝั่งรวมกับค่าประจุทอรรอยด์ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 125.248 kHz  
คิดประจุทั้งสามรวมกัน ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 75.446 kHz

1.4 การออกแบบตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำ คำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุด้านแรงดันต่ำจากสมการ

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

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 125.248 kHz จะได้ค่าความจุประมาณ 0.033  $\mu F$   
ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 75.446 kHz จะได้ค่าความจุประมาณ 0.1  $\mu F$

สำหรับคาปาซิเตอร์ 0.033  $\mu F$  เป็นคาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำขณะไม่ต่อลูกถ้วยด้านแรงดันสูง จะใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033  $\mu F$  680V อนุกรมกัน 8 ตัวแล้วขนานกัน 8 ชุด เพื่อให้ทนแรงดันได้ 5,040 V  
และคาปาซิเตอร์ 0.01  $\mu F$  เป็นคาปาซิเตอร์ด้านแรงดันต่ำขณะต่อลูกถ้วยด้านแรงดันสูง จะใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 0.1  $\mu F$  1,000V อนุกรมกัน 5 ตัวแล้วขนานกัน 5 ชุด เพื่อให้ทนแรงดันได้ 5,000 V



รูปที่ 2 คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033  $\mu F$  5,040V และ 0.1  $\mu F$  1,000V ชนิดโพลีโพรพิลีน

1.5 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันต่ำ

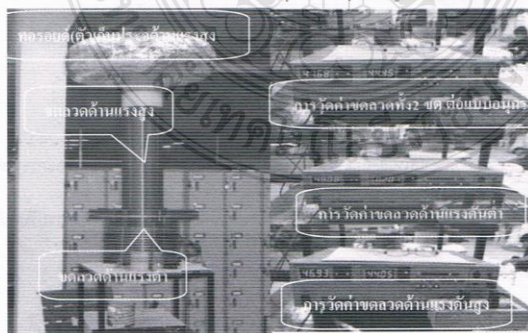
จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณไว้หัวข้อที่ 2.3 พบว่าหากต้องการนำหม้อแปลงเหล่านี้ไปใช้ในการทดสอบลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์ จะอยู่ที่ 75.446 kHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงเหล่านี้ได้จากสมการ

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

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

2. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

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

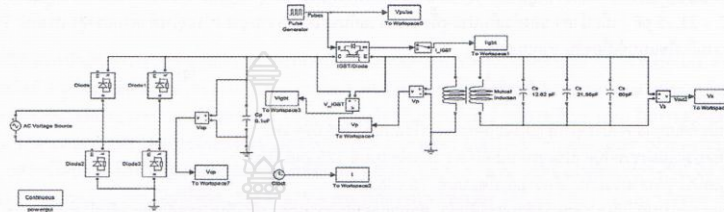




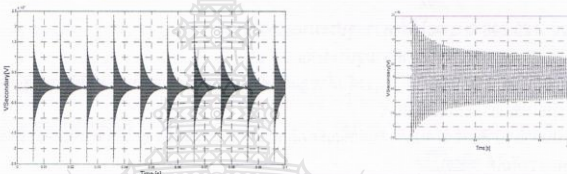
รูปที่ 3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงเตสลา

2.1 การจำลองระบบแบบใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อโดยตรง

การจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการจำลองระบบสองรูปแบบคือแบบที่ต่อลูกถ้วยฉนวนและแบบไม่ต่อลูกถ้วยฉนวน แล้วทำการจูนโดยการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ให้ตัดต่อวงจรที่สอดคล้องกับไฟฟ้ที่ป้อนเข้า 220V 50Hz โดยทุก 10 ms จะตัดต่อ 1 ครั้งพบว่า Duty cycle 10 % จะเกิดออสซิลเลชันสูงสุด



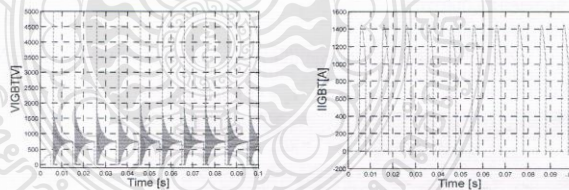
รูปที่ 4 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ แบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 5 แรงดันจากการจำลองระบบแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ แรงดัน 240 kV 160 kHz

ตารางที่ 3.1 แรงดันต่ำแรงดันสูง, 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



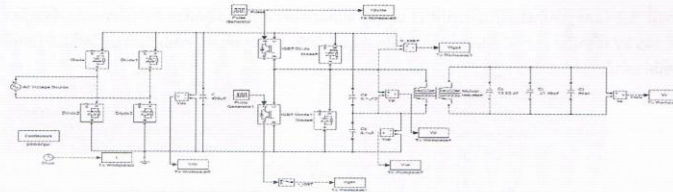
รูปที่ 6 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ที่ D=10%

จากตารางที่ 3.1 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 5 และ 6 จะสังเกตได้ว่า กรณีมีลูกถ้วย แรงดันเอาท์พุทสูงสุดจะอยู่ที่ 240 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ที่ 10% มีค่าแรงดันตกคร่อม IGBT อยู่ที่ 1,900V และมีกระแสไหลผ่าน IGBT 1,420 A เมื่อเพิ่ม Duty Cycle แรงดันและกระแสก็ยังมีค่าสูงอยู่

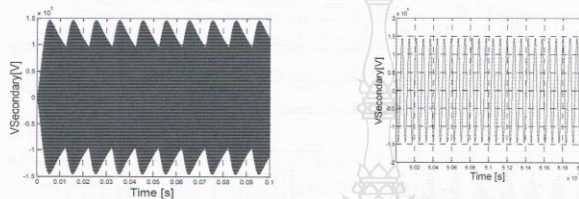
2.2 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฮาฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์

การจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ที่ย่านความถี่โชนแนซซ์ที่คำนวณได้แล้วจึงทำการปรับจูนให้มีความถี่ที่

ถูกต้อง



รูปที่ 10 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรพรีดิคชันเวอร์เตอร์



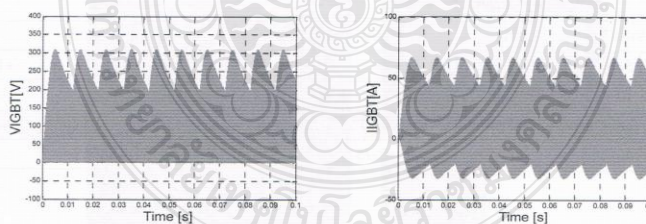
รูปที่ 11 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132kHz Duty Cycle 20 % ไม่มีลูกถ้วย

ตารางที่ 3.2 แรงดันต้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBTที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรพรีดิคชันแบบไม่มีลูกถ้วย

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 แรงดันต้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่าน IGBT ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรพรีดิคชันแบบมีลูกถ้วย

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

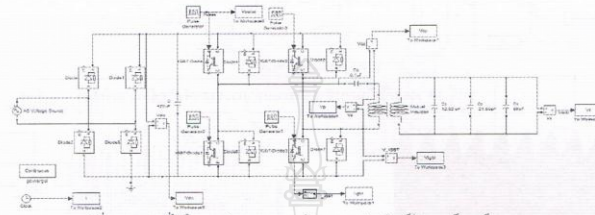


รูปที่ 12 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์วงจรพรีดิคชัน ที่ความถี่ 132kHz D 20%

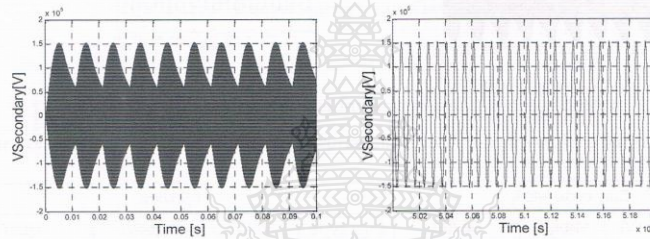


จากตารางที่ 3.2 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 11 และ 12 จะสังเกตเห็นได้ว่ากรณีไม่มีโหลดด้วย ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นที่ 132 kHz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 145 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์(IGBT)อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์มีค่าเท่ากับ +75 A ถึง -25 A

2.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 13 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



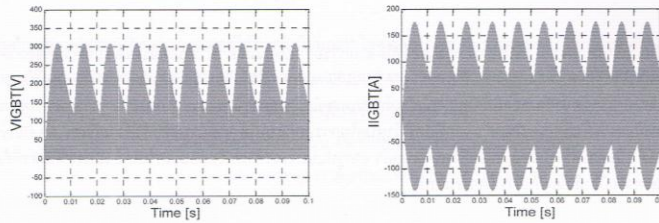
รูปที่ 14 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 145kHz Duty Cycle 20%ไม่มีโหลดด้วย

ตารางที่ 3.4 แรงดันด้านแรงดันสูง แรงดันตกคร่อมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT ที่ความถี่และ Duty cycle ค่าต่างๆ ของวงจรฟูลบริดจ์แบบไม่มีโหลดด้วย

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 ค่าต่างๆของวงจรฟูลบริดจ์แบบมีโหลดด้วย

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

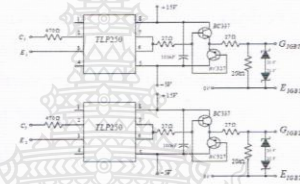


รูปที่ 15 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ช่วงจรพัลบริดจ์ ที่ความถี่ 145 kHz D 20%

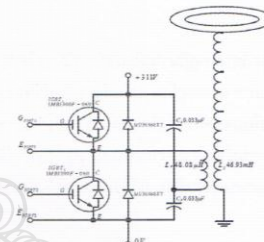
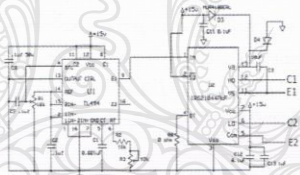
จากตารางที่ 3.4 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 14 และ 15 จะสังเกตได้ว่ากรณีไม่มีลูกถ้วย ความถี่เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นที่ 145 kHz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 150 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตช์(IGBT)อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตช์มีค่าเท่ากับ +175 A ถึง -145 A

3. สร้างหม้อแปลงโซลิตเดสเทสเสล่า

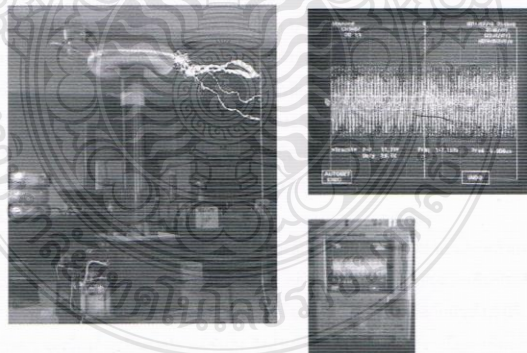
จากการจำลองระบบที่ได้ ผู้เขียนบทความได้นำข้อมูลไปใช้ในการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์สวิตช์ที่เหมาะสม และสร้างหม้อแปลง โซลิตเดสเทสเสล่า ขนาดพิกัด 145 kV 132 kHz โดยใช้ IGBT เบอร์ 1MBI300F-060 พิกัดแรงดัน 600 V กระแส ±300 A ต่อแบบวงจรฮาฟบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ และเมื่อสร้างแล้วได้ขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz



รูปที่ 16 อุปกรณ์สวิตช์ (IGBT 1MBI300F-060) และวงจรขับเกด TLP250



รูปที่ 17 วงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรโซลิตเดสเทสเสล่า



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





#### 4. อภิปรายผลและสรุป

จากการดำเนินงานวิจัย ผู้เขียนบทความ ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดขนาดของหม้อแปลง  
เทสลาที่ได้จัดทำขึ้น นำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ ของหม้อแปลงเทสลาแบบ  
สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ทั้ง 3 รูปแบบ จากข้อจำกัด ของฟลักซ์อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลการจำลองระบบพบว่า สามารถหาค่าความเหมาะสมและ  
รูปแบบของวงจรในการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตรสเทสลา จากพิกัดที่กำหนดในการออกแบบได้ จากการปรับค่าความถี่และ ค่า Duty Cycle ในการ  
ควบคุม โดยผู้เขียนบทความได้ดำเนินการสร้างหม้อแปลงโซลิตสเตรสเทสลา จากรูปแบบวงจรขาพรีดจันอินเวอร์เตอร์ เนื่องจากมีค่าฟลักซ์อุปกรณ์ต่ำสุด  
จึงผลการสร้างได้ค่าแรงดันและความถี่ใกล้เคียงกับการจำลองระบบ

#### 5. เอกสารอ้างอิง

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





# EENET2015

*Creative Technology for Green Energy*

27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel

## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network  
of Rajamangala University of Technology

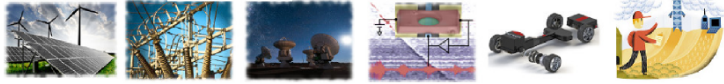


### Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

### คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120  
<http://www.eenet2015.org>



# Call for Papers

**EENET2015** เป็นการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม คอมพิวเตอร์ ตลอดจนสาขาที่เกี่ยวข้อง เกิดจากเครือข่ายความร่วมมือด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ของกลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง 9 แห่ง และสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลงานวิจัยและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นด้านวิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม คอมพิวเตอร์ ตลอดจนสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจัดการประชุมตั้งแต่ปี 2551 ถึงปัจจุบัน และในปี พ.ศ. 2558 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพในการจัดประชุมวิชาการระหว่างวันที่ 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 ณ โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

<p><b>คณะกรรมการวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอรสโรจน์ (มทร.ล้านนา) ประธานกรรมการ</li> <li>รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เกิดชื่น (มทร.อีสาน) รองประธานกรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน (มทร.ล้านนา) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี วัชรกุล (มทร.อีสาน) กรรมการ</li> <li>ดร. สุรียา แก้วอาษา (มทร.อีสาน) กรรมการ</li> <li>ดร. มนตรี สมดุลยกุล (มทร.รัตนโกสินทร์) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภุชงค์ นามิ (มทร.สัฏฐิติ) กรรมการ</li> <li>นายชาญฤทธิ์ อาราสันติสุข (มทร.กรุงเทพ) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มีชัย วัชโรจน์ (มทร.พระนคร) กรรมการ</li> <li>นายภัทรพงศ์ อัญญาภาณี (มทร.ตะวันออก) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ พงศ์เทพกุล (มทร.ศรีวิชัย) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสิทธิ์ นางหิน (สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ประมุข อุณหเลขกะ (มทร.สุวรรณภูมิ) กรรมการและเลขานุการ</li> </ol>	<p><b>การส่งบทความและพิจารณาบทความ</b></p> <p>บทความจัดทำเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ขนาด A4 ไม่เกิน 4 หน้ากระดาษ ตามรูปแบบ EENET template โดยขึ้นตอนและรายละเอียดในการส่งบทความแบบออนไลน์ได้จากเว็บไซต์ <a href="http://www.eenet2015.org">www.eenet2015.org</a> การพิจารณาบทความดำเนินการโดยผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขาวิชาจำนวน 3 ท่านต่อบทความ บทความที่ผ่านการพิจารณาจะได้รับการตีพิมพ์ในเอกสารการประชุมวิชาการ (Proceedings) ของ EENET2015 เมื่อลงทะเบียนบทความและต้องนำเสนอด่วนตนเองในการประชุมวิชาการ</p>
<p><b>คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการประจำเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์ (มทร.กรุงเทพ) ประธานกรรมการ</li> <li>ดร.มธุโรทัย พันธุ์คง (มทร.สัฏฐิติ) กรรมการ</li> <li>ดร.สายชล ชุตติเจตน์ (มทร.กรุงเทพ) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัญญา พันธุ์ (มทร.พระนคร) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กิ่งทะเลพะเยา (มทร.สุวรรณภูมิ) กรรมการ</li> <li>นายปฏิวัติ บุญมา (มทร.สุวรรณภูมิ) กรรมการ</li> <li>นายสิทธิชัย บุญปัทม์ (มทร.รัตนโกสินทร์) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิเชษฐ ทัพย์ประเสริฐ (มทร.ล้านนา) กรรมการ</li> <li>นายณรงค์ นันทกุล (มทร.ล้านนา) กรรมการ</li> <li>นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์ (มทร.ล้านนา) กรรมการ</li> <li>ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณาเจริญ (มทร.อีสาน) กรรมการ</li> <li>นายจิระยุทธ เนื่องรินทร์ (มทร.อีสาน) กรรมการ</li> <li>นายทศพร พรหมเสถียร (สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน) กรรมการ</li> <li>ดร.พรเทพ ปิณฑานแก้ว (มทร.อีสาน) กรรมการ</li> <li>นายศุภกร วิศวกรธรร (มทร.อีสาน) กรรมการ</li> <li>นายสมยศ สันติมาลัย (มทร.ตะวันออก) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญมั่น (มทร.ศรีวิชัย) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมคิด สีลาชนะชัยพงษ์ (มทร.ศรีวิชัย) กรรมการ</li> <li>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปวีร์ชกรณ์ อารีวัลย์ (มทร.ศรีวิชัย) กรรมการ</li> <li>นายชาญฤทธิ์ อาราสันติสุข (มทร.กรุงเทพ) เลขานุการ</li> </ol>	<p><b>สาขาบทความวิจัย</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ไฟฟ้ากำลัง (PW)</li> <li>อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)</li> <li>อิเล็กทรอนิกส์ (EL)</li> <li>ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)</li> <li>ระบบควบคุมและการวัด (CT)</li> <li>คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)</li> <li>การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)</li> <li>พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)</li> <li>นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)</li> <li>งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)</li> </ul>
<p><b>ต้องการข้อมูลเพิ่มเติมกรุณาติดต่อ</b></p> <p>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120 <a href="mailto:eenet2015@gmail.com">eenet2015@gmail.com</a></p>	<p><b>บทความวิชาการ</b></p> <p>เป็นบทความที่เรียบเรียงจากผลงานวิชาการของตนเองหรือผู้อื่นในลักษณะเป็นการวิเคราะห์ วิจัยงาน ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า</p> <p><b>กำหนดการสำคัญ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <b>หมดเขตรับบทความ</b> 27 กุมภาพันธ์ 2558</li> <li>▶ <b>ประกาศผลการพิจารณาบทความ</b> 3 เมษายน 2558</li> <li>▶ <b>หมดเขตรับบทความฉบับสมบูรณ์</b> 24 เมษายน 2558</li> <li>▶ <b>วันสุดท้ายของลงทะเบียนล่วงหน้า</b> 24 เมษายน 2558</li> <li>▶ <b>วันประชุมวิชาการ EENET2015</b> 27-29 พฤษภาคม 2558</li> </ul> <p>โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา</p>

 <http://www.eenet2015.org>



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๗

๑๐ เมษายน ๒๕๕๘

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณาบทความ EENET2015

เรียน นาย สุพจน์ วรธิพรหมมา  
ผศ.ดร.บุญยั้ง ปลั่งกลาง

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๗ (EENET2015) ระหว่างวันที่ ๒๗ - ๒๙ พฤษภาคม ๒๕๕๘ ณ โรงแรม A-ONE The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ในหัวเรื่อง

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

ในการนี้ คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการประจำเครือข่าย มีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ " ผ่านการพิจารณา " โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอปากเปล่า (Oral Presentation) ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า กลุ่มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลและสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ครั้งที่ ๗ (EENET2015) แล้ว

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ลงชื่อ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์ )  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
ประธานกรรมการดำเนินงาน  
การประชุมวิชาการ EENET2015

คณบดีวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
๒ ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ ๑๐๑๒๐  
โทรศัพท์และโทรสาร ๐๒-๒๘๗๖๐๐๐ ต่อ ๗๐๗๒ หรือ ๐๒-๒๘๗๗๗๓๓



## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2015)

### วอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้ให้เพื่อแสดงว่า

บทความวิจัยเรื่อง "การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเทสกลเสาโดยการจำลองระบบ  
ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ"

สุพจน์ วรธีพรหมมา และบุญยั้ง ปลั่งกลาง

ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7  
ระหว่างวันที่ 27-29 พฤษภาคม พ.ศ.2558 ณ โรงแรม A-one The Royal Cruise เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราโมทย์ อนันต์วรภาพษ์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ประธานจัดงานการประชุมวิชาการ EENET 2015

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศาสตราจารย์ ดร. ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร. โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. พรชัย พฤกษ์ภัทรานนต์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี กาญจนเดชะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. เวทิน ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. กิรติ ชยะกุลศิริ	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร. บัลลังก์ เนียมมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิพัทธ์ ทวนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ หวังนิพนพานโต	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร. เสถียร ธัญญศรีรัตน์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์ ดร. พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร สิริสำราญกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ อุดมทรรษากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร. กานท์ เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร. โกศล โอสถโรโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. อธิคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสถิธิกุลกิจ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร. พิสิฐ บุญศรีเมือง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ณีภูฏา จินดาเพ็ชร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ คณดิช เจษฎาพัฒนานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ นภัทร วัจนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ สมสิน วางขุนทด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมาตร ขำเกลี้ยง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิเชฐ ม่วงนวล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปกศรีชกรณธ์ อารีย์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยวัฒน์ สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ททรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อำนวย เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา ขำสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เดชสอนันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำเร็จ อินททำไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรพงษ์ จารุมิตร	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัย ครองกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิบาล พุกชานูบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข อุ่มหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา สาคระรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัควัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤตเดช บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจนศักดิ์ เอกบุรณชะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถพล ป้อมสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

### รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุเทน คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันไชย คำเสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พานิช อินต๊ะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิโรจน์ พิราจนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สวัสดิ์ ตันตนาช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธวัชชัย ทางรัตน์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทง ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิชญ์ ดาราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โกศล นิธิโสภาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กมลทิพย์ วัฒนกำจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สราวุธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วารุณี กรุดพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดนุพล คำปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันธุ์พงศ์ อภิชาติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธินันท์ ตันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ เพื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิษณุ ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิพนธ์ เลิศมโนกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิตติกร ชันแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร. กীরติ อินทวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร. วฤทธิ วิชกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อาจารย์ ดร. สันติ นุราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อาจารย์ ดร. ณัฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ แห่งมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. พศุขย นินทนาวงศา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ศิริชัย เจริญมล้ำเลิศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์ นิ่มเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. วิเชียร อุปกแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. แสนศักดิ์ ตี้อ่อน	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
อาจารย์ ดร. สุรียา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. กฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร.พรเทพ ปัญญาแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. พิชัย อยู่เปล่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. เมธา ทัตศร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. สัมพันธ์ ทอดแดง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ดร. เสกสรร พลสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. พนา ดุสิตากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ เดชฟุ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. พลิสฐ์ สุวรรณภิกการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. อุมารินทร์ แสงพานิช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร. นาดยา คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร. ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ดร. ศรีสุดา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. สมพร ศรีวัฒนพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. ประจวบ อินระวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน
อาจารย์ ดร. พินิจ ศรีธรร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน
อาจารย์ ดร. วรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน
อาจารย์ ดร. มงคล คูพิมาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน
อาจารย์ ดร. ประสพโชค โห้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. มนต์รี สมดุลยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. ไกรฤกษ์ เขยชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. พิเชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร. ศุภกิต แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. วิฑูรย์ พรหมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. นพพร พัชรประภคิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ชาญยุทธ์ ภาณุจันพิบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ เคลือบวัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. พลกฤษณ์ ทุนคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. นกมล มณีไศย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ยุพดี หัตถสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. นิวัตร มูลป่า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. ประชา ยืนยงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. สุปงกช โตไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ ดร. อนนท์ นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ รัก สกุลพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน
อาจารย์ อาภาพล มหาวีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน
อาจารย์ จีระพงศ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอัสสาน

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ ภาณุมาศ แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ เจษฎา พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ นครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สยาม ประจตุหะศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ มีชัย แจ่มใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สุขุม จุฬางตุรศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ อุรา คล่องแคล่ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ขอบคุณ ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ สุวัลยา ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ว่าที่ รต. กฤษณา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ นราวิทย์ กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ ปริญา กิตติสุทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อาจารย์ พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ สมชาย เบียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ นิตพงษ์ ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ สมยศ สันติมาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ ตะวัน ขุนอาสา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ มนัส บุญเที่ยงทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สาคร วุฒิพัฒน์พันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ จตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ อติศักดิ์ วิริยกรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ธนารัตน์ ต้นมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ อานนท์ สิงห์เสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ อภิษฎา ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ธนะกิจ วัฒนีกำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ นิลมิต นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ พิชรนนท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ มาลียา ตั้งจิตเชษฐา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ธานี สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ อานนท์ พ่วงชิงงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ วิสุทธิ์ ตันต๊ะรุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ สุวุฒิ ตุ่มทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ เอกชัย เนาวนิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
อาจารย์ ดร. วุฒิวัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ชุติกาญจน์ กมลขันดิธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ บุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ เอกพล อนุสุเรนทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ วินัย เมธาวิทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สายชล ชุตติเจ็จ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ชาญฤทธิ์ ธาราสันตีสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ สุภณ พลสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ กิตติวุฒิ จินนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์ รุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์ มงคล ต้านบำรุงตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน
อาจารย์ สิทธิชัย บุญปิยทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ อดิศักดิ์ แข็งสาริกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ โสภา แซ่เฮ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ เฉษฐาพร สถาณทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดิศพล ฉ่ำเฉียวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

อาจารย์ กาญจน์บุษยา พานิชเจริญ

อาจารย์ ปกรณ์ ฟูโพเราะ

อาจารย์ ชาญยุทธ อุบายโกศล

อาจารย์ พีรวัฒน์ มีสุข

อาจารย์ ภูชิต ถึงสุข

อาจารย์ ฌาณิน หาญณรงค์

อาจารย์ เรืองยศ เกตุรักษา

อาจารย์ โกวิท พิภก

อาจารย์ พุฒิพงศ์ เกิดพิพัฒน์

อาจารย์ ดร. สามารถ ยะเที่ยงคำ

อาจารย์ ไชยยันต์ บุญมี

ดร. สุวิทย์ อัจริยะเมต

ดร. อรรถ พยอมหอม

ดร. ชวงค์ วัฒนศักดิ์ภูบาล

ดร. ชนัญญา จันสุทธิ

อาจารย์ มนต์ศิริ จันสุทธิรา

อาจารย์ ปรัชญ์ สง่างาม

รองศาสตราจารย์ ดร. สุรนนท์ น้อยมณี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

การไฟฟ้านครหลวง

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กำแพงแสน)

บทความสาขาไฟฟ้ากำลัง (PW)		หน้า
PW20	การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าตกด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายที่มีการต่อขดลวดแบบต่างๆ ขณะเกิด ลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินด้านปฐมภูมิ // Analysis of voltage sag on secondary side of the distribution transformers to patterns of wiring while the single phase short circuit to ground on the primary side <i>ธีระพล สมธนาภิษฐ์, สรุเชษฐ เดชพิ้ง, สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ, พิชญ์ ตาราพงษ์ และ สมชาย ทรงศิริ</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.....</i>	738
PW21	การวิเคราะห์ระบบต่อลงดินเพื่อบรรเทาปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกในระบบจำหน่าย // Analysis of the grounding system to mitigate the voltage sag in the distribution system <i>ธรรมวุฒิ หนูแก้ว, อติศักดิ์ วิชัยกรรม, สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สมชาย ทรงศิริ</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 2 กองบำรุงรักษาในระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....</i>	742
PW23	การศึกษาปรากฏการณ์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนแข็ง // The study of partial discharge phenomena in solid insulator <i>วิเชษฐ หิพย์ประเสริฐ, วรณภา นามวงศ์ และ ศุภกร ใจมาดี</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย.....</i>	746
PW24	รูปแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำที่เหมาะสมเพื่อรองรับการรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา // The Optimal LV Distribution System Configuration to Support the Electricity Purchasing From The Rooftop PV System <i>วิโรจน์ บัวศรี และ คมสันต์ ทองสมบัติ</i> <i>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....</i>	750
PW25	การออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 แบบพาสซีฟสำหรับโหลดไม่เชิงเส้น // Design of Third Harmonic Passive Filter for Non-Linear Load <i>สุวิภา แก้วอาษา และ สันมอน หลวงสะลาต</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง.....</i>	754
PW28	ผลกระทบของฮาร์โมนิกที่มีต่ออุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับในระบบไฟฟ้ากำลัง // Harmonic Impact on Reactive Power Compensated Equipment in Power System <i>ศรัณย์ ฉลาดปิง, อรุณ ชลิ่งสุทธิ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.....</i>	758
PW29	การพยากรณ์ความต้องการของโหลดไฟฟ้าภายในโรงพยาบาลหนองหญ้าไซ // Demand Forecasting of Power Load in the Nong Ya Sai Hospital <i>พรชัย สารสุวรรณ และ เฉลียว เกตุแก้ว</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี.....</i>	762
PW30	การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิตสเตตเลสสา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ // Analysis of a designed solid state tesla transformer by computer simulation For studying the effective design <i>สุพจน์ วรธิพรหมมา และ บุญยัง ปลั่งกลาง</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....</i>	766
PW31	การเพิ่มเสถียรภาพแรงดันชั่วขณะในระบบ 1 เฟสด้วยเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ // Single-phase Voltage Stability Enhancement Using Power Converter <i>บุญยัง สิงห์เจริญ, สันติ สาแก้ว, ภูวนาท มากแสน, มงคล คำบำรุงตระกูล และ หินิจ ศรีธง</i> <i>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....</i>	770

### การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพของการออกแบบ

#### Analysis of a designed solid state tesla transformer by computer simulation

#### For studying the effective design

สุพจน์ วรธีรหมมา<sup>1</sup> และ บุญยัง ปลั่งกลาง<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี suphot\_power2@yahoo.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรนำเสนอ การวิเคราะห์ผลการออกแบบหม้อแปลงเตสลาแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์(Solid state tesla transformer)โดยเปรียบเทียบวงจรสวิตซ์ 3 รูปแบบ คือ วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง วงจรสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ และ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อเลือกรูปแบบของวงจร ขนาดพิกัดแรงดัน และพิกัดกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ (IGBT) ที่เหมาะสม ในการสร้างหม้อแปลงโซลิดสเตตเตสลา ขนาดพิกัด 150 kV 200 kHz โดยจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulinkผลการจำลองระบบ พบว่าวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตซ์โดยตรง ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 1,800V 1,420 Aสามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 150 kV 160 kHz วงจรสวิตซ์อินเวอร์เตอร์ ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด 311 V ±75 Aสามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง 145 kV 132 kHz และ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พิกัด311V±175 Aสามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูง150 kV 145 kHz สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่า วงจรสวิตซ์อินเวอร์เตอร์เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: หม้อแปลงเตสลา, โซลิดสเตต, อินเวอร์เตอร์หม้อแปลงเตสลา

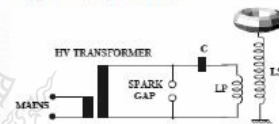
#### Abstract

This paper presents an analysis performance of a designed Solid State Tesla Transformer. The comparison study is also done based on 3 solid state switch types, the direct, half bridge inverter, and full bridge inverter. To select the appropriate solid state type and appropriate rated of power electronic switching device (IGBT), all 3 switch types are simulated and observed by MATLAB/Simulink. The investigated solid state tesla transformers capacity is 150 kV, 200 kHz. From the simulation, the results showed that directly switch created 1,800 V 1,420 to generate high voltage 150 kV 160 kHz, the half Bridge Inverter circuit had 311 V ±75 to generate high voltage 145 kV 132 kHz and the full bridge inverter circuit had 311V ±175A to generate high voltage 150 kV 145 kHz. From this study, the half Bridge Inverter is the best choice for the design.

**Keywords:** Tesla transformer, Solid state, Tesla Inverter

#### 1. บทนำ

หม้อแปลงเตสลา เป็นหม้อแปลงแกนอากาศ ใช้สร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง จะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในวงจร LC โดย L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวด ของหม้อแปลงเตสลา และ C คือค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance)



รูปที่ 1 วงจรพื้นฐานของหม้อแปลงเตสลา

#### 2. การออกแบบหม้อแปลงเตสลา

##### 2.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

การออกแบบ เบื้องต้นต้องคำนึงถึงตัวเก็บประจุทางคืนแรงดันสูง เนื่องจากตัวเก็บประจุทางคืนแรงดันสูงมีผลต่อแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกไป โดยจุดประสงค์ของการออกแบบหม้อแปลงเตสลาที่ใช้ในการทดสอบลูกถ้วยฉนวน ที่มีแรงดันไฟฟ้าตามผิว 140 kVและความถี่ไม่น้อยกว่า 150 kHz ตามมาตรฐาน มอก.354-2523 จึงทำการกำหนดพิกัดในการออกแบบอยู่ที่ พิกัดแรงดันสูง 150 kV พิกัดความถี่ 200 kHz

##### 2.2 การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง

การออกแบบขดลวดด้านแรงดันสูง จะใช้ทองเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 6.5 นิ้ว และสูง 30 นิ้ว เมื่อนำความสูงของท่อหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดทองแดง เบอร์ 23 SWG จะได้จำนวนรอบในการพันขดลวดเท่ากับ 1,250 รอบ แล้วนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณหา ค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ

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

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

2.3 การออกแบบตัวเก็บประจุต้านแรงดันสูง

ตัวเก็บประจุทางต้านแรงดันสูงประกอบด้วย ตัวเก็บประจุของถูก ด้วยขนาด ประมาณ 60 pF หากค่าความจุแฝงในขดลวด (Stray Capacitor) ด้วยสมการ

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

ได้ค่า C = 12.62 pF และหากค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ขจัดออกจากสมการ

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

เมื่อ  $D_I$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของทอโรอยด์(นิ้ว)

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของทอโรอยด์(นิ้ว)

โดยออกแบบให้ทอโรอยด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6.5 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 19.5 นิ้ว จะ ได้ค่า C = 21.55 pF เมื่อ นำค่า ของตัวเก็บประจุทั้ง 3 มารวมกัน จะ ได้ค่าความจุของประจุไฟฟ้าต้านแรงสูงเท่ากับ 94.17 pF แล้วคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์เบื้องต้น จากสมการ

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

เมื่อคิดเฉพาะ ค่าประจุไฟฟ้าเพียงจะได้ความถี่เรโซแนนซ์ 206.094 kHz คิดประจุแ่งรวมกับค่าประจุทอโรอยด์ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 125.248 kHz คิดประจุทั้งสามรวมกัน ได้ความถี่เรโซแนนซ์ 75.446 kHz

2.4 การออกแบบตัวเก็บประจุทางต้านแรงดันต่ำ

คำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุต้านแรงดันต่ำจากสมการ

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

ที่  $f = 125.248$  kHz จะได้ค่าความจุ 0.033  $\mu$ F และที่  $f = 75.446$  kHz จะได้ค่าความจุ 0.1  $\mu$ F สำหรับคาปาซิเตอร์ 0.033  $\mu$ F เป็นค่าคาปาซิเตอร์ต้านแรงดันต่ำเฉพาะ ไม่ต่อลวดด้วยเส้นแรงดันสูง จะใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033  $\mu$ F 680V อนุกรมกัน 8 ตัวแล้วขนานกัน 5 ชุดเพื่อให้ทนแรงดันได้ 5,040 V และคาปาซิเตอร์ 0.1  $\mu$ F เป็นค่าคาปาซิเตอร์ต้านแรงดันต่ำขณะต่อลวดด้วยเส้นแรงดันสูง จะใช้คาปาซิเตอร์ขนาด 0.1  $\mu$ F 1,000V อนุกรมกัน 5 ตัวแล้วขนานกัน 5 ชุด เพื่อให้ทนแรงดันได้ 5,000 V



รูปที่ 2 คาปาซิเตอร์ขนาด 0.033  $\mu$ F 5,040V และ 0.1  $\mu$ F 1,000V

2.5 การออกแบบขดลวดต้านแรงดันต่ำ

จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คำนวณในหัวข้อที่ 2.3 พบว่าหากต้องการนำหม้อแปลงเตสลาไปใช้ในการทดสอบลวดด้วยความถี่เรโซแนนซ์ จะอยู่ที่ 75.446 kHz และสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงเตสลาได้จากสมการ

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

ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.5  $\mu$ H และในการจัดทำขดลวดแรงดันต่ำ จะพันในลักษณะทรงกระบอกเช่นเดียวกับขดลวดแรงดันสูง โดยขดลวด มีรัศมี R = 5.85 นิ้ว สูง H = 6 นิ้ว พันทั้งหมด 12 รอบและแต่ละรอบห่างกัน 0.5 นิ้ว ใช้ทองแดงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว เมื่อคำนวณตามสมการที่ 1 จะได้เท่ากับ 43.74  $\mu$ H ซึ่งใกล้เคียงกับสมการที่ 6

3. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

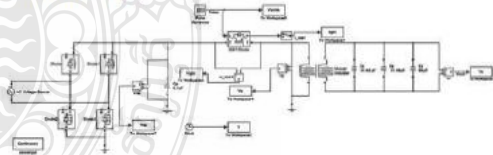
เพื่อให้การจำลองระบบมีความถูกต้องผู้วิจัยได้ทำการสร้างขดลวดหม้อแปลงเตสลาแล้ววัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าความเชื่อมโยงทางแม่เหล็กได้  $L_1 = 48.08\mu H$   $L_2 = 46.93mH$  และ  $M=0.3509$  mH



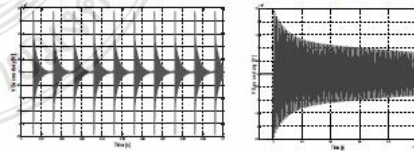
รูปที่ 3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงเตสลา

3.2 การจำลองระบบแบบใช้สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อโดยตรง

การจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการจำลองระบบสองรูปแบบคือแบบที่ต่อลวดด้วยขนานและแบบไม่ต่อลวดด้วยขนาน แล้วทำการจูนโดยการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ให้ตัดต่อวงจรที่ขดลวดเส้นไฟฟ้าที่ป้อนเข้า 220 V 50Hz โดยทุก 10 ms จะตัดคือ 1 ครั้งพบว่า Duty cycle 10 % จะเกิดออกสวิตซ์สูงที่สุด



รูปที่ 4 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบ แบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์

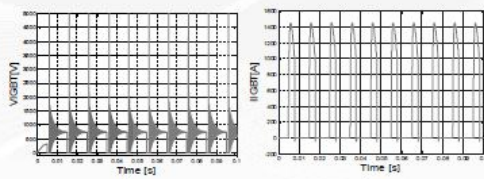


รูปที่ 5 แรงดันจากการจำลองระบบแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ แรงดัน 240 kV 160 kHz



ตารางที่ 3.1 แรงดันคั่นแรงดันสูง, แรงดันคั่นกรรอมและกระแสไหลผ่าน IGBT

D(%)	ไม่มีลูกถ้วยต่อด้านแรงดันสูง			มีลูกถ้วยต่อด้านแรงดันสูง		
	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

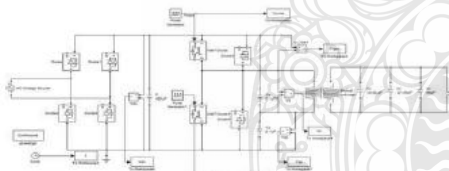


รูปที่ 6 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ที่ D=10%

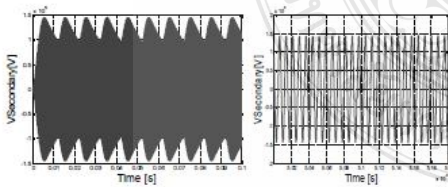
จากตารางที่ 3.1 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 5 และ 6 จะสังเกตเห็นว่ากรณีมีลูกถ้วย แรงดันเอาต์พุตสูงสุดอยู่ที่ 240 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ที่ 10% มีค่าแรงดันคั่นกรรอม IGBT อยู่ที่ 1,900V และมีกระแสไหลผ่าน IGBT 1,420 A เมื่อเพิ่ม Duty Cycle แรงดันและกระแสก็ยังมีค่าสูงอยู่

### 3.3 การจำลองระบบแบบใช้วงจรสวิตช์อินเวอร์เตอร์

การจำลองระบบผู้เขียนบทความได้ทำการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ที่ผ่านความถี่ไซเรนซ์ที่คำนวณได้แล้วจึงทำการปรับจนให้ได้ความถี่ที่ถูกต้อง



รูปที่ 7 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรสวิตช์อินเวอร์เตอร์



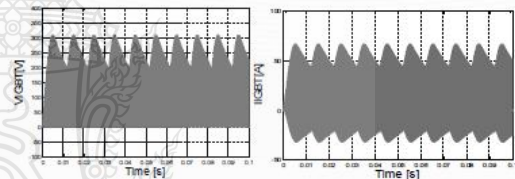
รูปที่ 8 แรงดันที่ได้จากการจำลองระบบที่ 132kHz Duty Cycle 20% ไม่ต่อลูกถ้วย

ตารางที่ 3.2 แรงดันคั่นแรงดันสูง แรงดันคั่นกรรอม IGBT และกระแสไหลผ่าน IGBT ที่ความถี่และ % D ต่างๆ ของวงจรสวิตช์แบบไม่ต่อลูกถ้วย

Duty cycle =40%				f=132kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	D	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 แรงดันคั่นแรงดันสูง แรงดันคั่นกรรอม IGBT และกระแสไหลผ่าน IGBT ที่ ความถี่ และ Duty cycle ต่างๆ ของวงจรสวิตช์แบบต่อลูกถ้วย

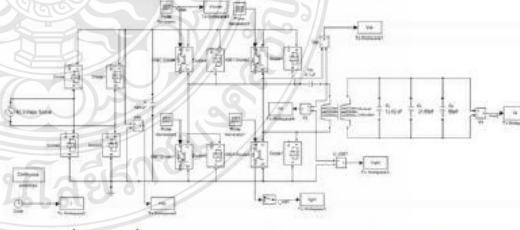
Duty cycle =40%				f=80kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	D	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)
73	16	311	21	40	170	311	+125
75	21	311	20	30	160	311	+125,-80
80	170	311	+125	20	70	311	+70,-40
85	15	311	+37,-5	10	14	311	40



รูปที่ 9 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์วงจรสวิตช์ที่ ความถี่ 132 kHz D 20%

จากตารางที่ 3.2 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 8 และ 9 จะสังเกตเห็นว่ากรณีไม่ต่อลูกถ้วย ความถี่ไซเรนซ์จะเกิดขึ้นที่ 132 kHz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 145 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันคั่นกรรอมอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์มีค่าเท่ากับ +75 A ถึง -25 A

### 3.4 การจำลองระบบแบบใช้วงจรสวิตช์อินเวอร์เตอร์

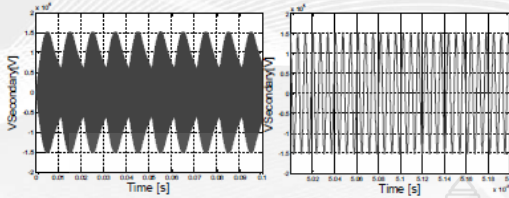


รูปที่ 10 วงจรที่ใช้ในการจำลองระบบด้วยวงจรสวิตช์อินเวอร์เตอร์

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EBNET 2015)

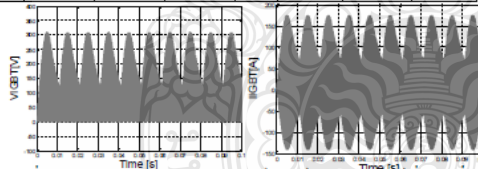


รูปที่ 11 แรงดันจากการจำลองระบบที่ 145kHz Duty Cycle 20% ไม่ต่ออุ้งด้วยตารางที่ 3.4 แรงดันค้ำแรงดันสูง แรงดันคกรวมIGBT และกระแสไหลผ่าน IGBT ที่ความถี่และ % D ค่าต่างๆ ของวงจรถูกปรับแบบไม่ต่ออุ้งด้วย

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 แรงดันค้ำแรงดันสูง แรงดันคกรวมIGBT และกระแสไหลผ่านIGBT ที่ความถี่และ % D ค่าต่างๆของวงจรถูกปรับแบบไม่ต่ออุ้งด้วย

Duty cycle =40%				f=85kHz			
f(kHz)	Vs(kV)	Vigbt(V)	Iigbt(A)	D	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



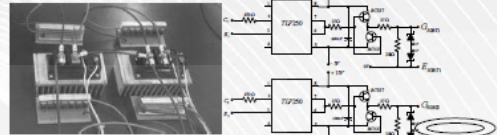
รูปที่ 12 แรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ วงจรถูกปรับที่ความถี่ 145 kHz D 20%

จากตารางที่ 3.4 และรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 11 และ 12 จะสังเกตเห็นได้ว่ากรณี ไม่ต่ออุ้งด้วย ความถี่ โชนั้นจะเกิดขึ้นที่ 145 kHz แรงดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 150 kV เมื่อปรับ Duty Cycle ของสัญญาณควบคุมที่ 20% มีค่าแรงดันคกรวมอุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT) อยู่ที่ 311V และกระแสไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์มีค่าเท่ากับ +175 A ถึง -145 A

**4. สร้างหม้อแปลงโซลิตเดสททส่า**

จากการจำลองระบบ สามารถ นำข้อมูล ไปใช้ในการเลือกขนาดพิกัดของอุปกรณ์สวิตซ์ที่เหมาะสม และสร้างหม้อแปลง โซลิตเดสททส่า ขนาดพิกัด 145 kV 132 kHz โดยใช้ IGBT เบอร์ 1MBI300F-060 พิกัด

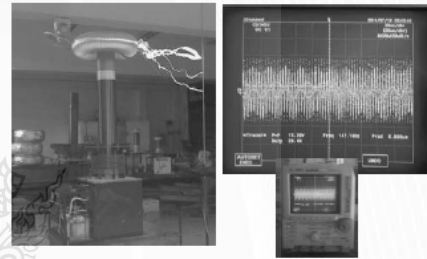
แรงดัน 600 V กระแส ±300 A คอแบบวงจรสลับพรีดิอินเวอร์เตอร์ และเมื่อสร้างแล้วได้ขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz



รูปที่ 13 อุปกรณ์สวิตซ์ (IGBT 1MBI300F-060) และวงจรขับเคลื่อน TLP250



รูปที่ 14 วงจรสร้างสัญญาณ PWM และวงจรโซลิตเดสททส่า



รูปที่ 15 หม้อแปลงโซลิตเดสททส่าขนาดพิกัด 152 kV 147 kHz ที่สร้างขึ้นและคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าค้ำแรงสูง ที่วัดด้วยวิธี Voltage divider

**5. อภิปรายผลและสรุป**

จากการค้นคว้างานวิจัย ผู้เขียนบทความ ได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ และจากการวัดผลทดลองหม้อแปลงทส่าที่ได้จัดทำขึ้นนำไปจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink โดยใช้วิธีการควบคุมแบบปรับค่าความถี่และDuty Cycle เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของหม้อแปลงทส่าแบบสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ทั้ง 3 รูปแบบ จากข้อจำกัด ของพิกัดอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีอัตราการทนกระแส และแรงดันที่ต่ำ ผลการจำลองระบบพบว่า วงจรสลับพรีดิอินเวอร์เตอร์เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการสร้าง เนื่องจากมีค่าพิกัดอุปกรณ์ต่ำสุด และเมื่อนำผลที่ได้ไปสร้างหม้อแปลงโซลิตเดสททส่าพบว่าค่าแรงดันและความถี่ที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับการจำลองระบบเอกสารอ้างอิง

[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



## Welcome to The First International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH2015)

June 12 - 13, 2015 at ECC Building, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, THAILAND

The First International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2015) provides good opportunity to present and discuss latest findings in the field of lightning protection, high voltage engineering, and related fields. The symposium is organized by Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

The 1st International Symposium on Lightning Protection and High Voltage Engineering (ISLH 2015) in Bangkok, Thailand will provide an opportunity for the specialists in the field of fundamentals and applications of electrical discharge and high voltage engineering for exchanging and sharing their research achievement and experiences.

New Update !!

Download >>> [Program of ISLH 2015](#)

### TECHNICAL SUBJECT AREAS

- Switchgear, Power apparatus and Industrial applications
- Lightning, Over voltage, Fast Transients
- High voltage measurement & testing
- Insulation materials and systems; Gas, liquid, solid, vacuum and combined material, Plasma application
- Outdoor insulation
- Electrical discharges, Partial discharges and their applications
- Field calculation, Measurement & EMC, EMF

### STEERING COMMITTEE

- A. Ametani, (Ecole Polytechnique de Montreal)
- B. T. Phung, (University of New South Wales)
- N. Nagaoka, (Doshisha University)
- Y. Baba, (Doshisha University)
- K. Yamabuki, (Wakayama National College of Technology)
- K. Yamamoto, (Chubu University)
- H. T. Tran, (Tsuruoka National College of Technology)
- M. Kando (Tokai University)
- S. Sangkasaad, (Outstanding Graduate Fellow, Thailand)
- S. Pothivekui, (KMITL, Thailand)
- A. Kunakorn, (KMITL, Thailand)
- N. Pattanadech, (KMITL, Thailand)
- P. Yutthagowth, (KMITL, Thailand)

### LOCAL ORGANIZING COMMITTEE

- S. Polmai, Chairperson (KMITL, Thailand)
- P. Chaisiri, Secretary (KMITL, Thailand)
- N. Pattanadech, (KMITL, Thailand)
- P. Yutthagowth, (KMITL, Thailand)

### IMPORTANT DATES

Full Paper Submission Deadline

**April 30, 2015**

Full Paper Acceptance Notice

**May 15, 2015**

Camera ready Submission Deadline

**May 31, 2015**

[Call for paper ISLH 2015](#)

# KMITL

**HVLE**  
High Voltage Engineering Laboratory  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



TRF

## Program

### International Symposium on Lightning Protection And High Voltage Engineering 2015 (ISLH 2015)

12 – 13 June 2015

At Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

12 June 2015		
08.00 – 09.00	Registration	ECC – 301
09.00 – 09.30	Opening ceremony - Dean of Faculty of Engineering - Head of Dept. of Electrical Engineering - Honorary Chair of High Voltage Engineering Laboratory, KMITL	ECC – 302
09.30 – 10.10	Keynote speech 1 : Electromechanics of particles under charged and uncharged conditions by Prof. Boonchai TECHAUMNAT	
10.10 – 10.40	Coffee Break	ECC – 302
10.40 – 11.20	Keynote speech 2 : Lightning Protection and High Voltage Engineering Based on Electromagnetic Compatibility and Buddhist's precept by Assoc.Prof.Dr.Veerachet KHAN-NGERN	ECC – 302
11.20 – 12.00	Keynote speech 3 : Lightning protection system By Mr.Boonsak KIATJAROONLERT (Specialist from KUMWELL)	
12.00 – 13.00	Lunch	ECC – 301
13.00 – 14.40	Oral presentation session 1	ECC – 302
14.40 – 15.20	Coffee Break	ECC – 301
15.20 – 17.00	Oral presentation session 2	ECC – 302
13 June 2015		
09.00 – 10.00	Oral presentation session 3	ECC – 302
10.00 – 10.30	Coffee Break	ECC – 301
10.30 – 11.30	Oral presentation session 4	ECC – 302
11.30 – 12.00	Closing ceremony	ECC – 302
12.00 – 13.30	Lunch	ECC – 301
13.30 – 14.30	High Voltage Engineering Laboratory Tour	ECC – 105

## Presentation Program

Oral presentation session 1	
Session chair : Dr. Chanin Bunlaksananusorn	
13.00 – 13.20 <i>ISLH-1</i>	Rotating Machine Insulation Analysis by means of Polarization and Depolarization Current Measurement <i>P.Thonginta, N.Pattanadech, P.Yutthagowith and T.Worthong</i>
13.20 – 13.40 <i>ISLH-2</i>	On-line Partial Discharge Assessment and Monitoring of MV to EHV Cables <i>Neil Davies and Victor Chan</i>
13.40 – 14.00 <i>ISLH-3</i>	Accelerated Thermal Degradation of Transformer Oil for 500 kVA Transformer <i>Panupong seaukeaw and Supakit Chotigo</i>
14.00 – 14.20 <i>ISLH-4</i>	The Partial Discharge Monitoring System for Power Distribution Transformer as a Basic Risk Assessment Insulation Evaluation <i>Promsak Apiratikul, Winai Plueksawan and Krischonme Bhumkittipich</i>
14.20 – 14.40 <i>ISLH-5</i>	Two-End Synchronous Data Sampling for Fault Location Algorithm without Line Parameter Requirement <i>D.Din and P.Yutthagowith</i>

Oral presentation session 2	
Session chair : Dr.Norasage Pattanadech	
15.20 – 15.40 <i>ISLH-6</i>	Study on Location of Degradation in Power Cables <i>Takeo Uchiki, Naohiro Hozumi, Yoshinobu Murakami, Masayuki Nagao, Takashi Kurihara, Tatsuki Okamoto, Taizo Tsuji and Katsumi Uchida</i>
15.40 – 16.00 <i>ISLH-7</i>	High-Voltage Measurement Standard in Thailand <i>ข้าหลวง คุรุภากรณ์ และ ดนัย กัทธกิจกุล</i>
16.00 – 16.20 <i>ISLH-8</i>	Analysis of a Designed Solid State Tesla Transformer by Computer Simulation for Studying the Effective Design <i>Boonyang Plang-Klang, Promsak Apiratikul and Suphot Woratiphomma</i>
16.20 – 16.40 <i>ISLH-9</i>	Design and Construction of a Combination Wave Generator <i>N. Marukatat and P.Yutthagowith</i>
16.40 – 17.00 <i>ISLH-10</i>	The Study of Electrical Characteristics of Pressboard Impregnated with Mineral Oil and Ester <i>K.Jariyanurat and N.Pattanadech</i>

<p>Oral presentation session 3</p> <p>Session chair : Dr.Anatawat Kunakorn</p>	
<p>09.00 – 09.20 ISLH-11</p>	<p>Study and Fabrication of 50/60 Hz Current Shunts for High Accuracy Phase Angle Measurements</p> <p><i>อัษฎญา ศุขวัฒน์ และ วรพล พระภักดี</i></p>
<p>09.20 – 09.40 ISLH-12</p>	<p>Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification</p> <p><i>P.Nimsanong and P.Pattanadech</i></p>
<p>09.40 – 10.00 ISLH-13</p>	<p>Lightning Impulse Voltage Generation Circuit for Low Inductive Loads</p> <p><i>S.Noimor and P.Yutthagowith</i></p>

<p>Oral presentation session 4</p> <p>Session chair : Dr.Anatawat Kunakorn</p>	
<p>10.30– 10.50 ISLH-14</p>	<p>Surface Tracking Resistance Investigation for Space Aerial Cable</p> <p><i>S. Kirapee, S. Potivejkul and N. Pattanadech</i></p>
<p>10.50 – 11.10 ISLH-15</p>	<p>A Study The Ratio of Transect Floating Under The Lightning Lmpulse Breakdown of Rod-Plane Gap</p> <p><i>จิรวุฒิ สิมวีระประจักษ์, ศุภกิตติ์ โจติโก และบุญเหนือ พึ่งศิริ</i></p>
<p>11.10 – 11.30 ISLH-16</p>	<p>Using Compensation Technique for Time Response Improvement of Saline Solution Voltage Divider</p> <p><i>P.Chaisiri, P. Yutthagowith and B.Paophon</i></p>

# Analysis of a Designed Solid State Tesla Transformer by Computer Simulation for Study the Effective

B. Plangklang<sup>1</sup> S. Woratipromma<sup>1</sup> P. Apiratikul<sup>1</sup> and W. Plueksawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
39 Klong 6, Thanyaburi, Pathumtani 12110  
boonyang.p@en.rmutt.ac.th

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Kasetsart University  
50 Ladyaow, Chatuchak Bangkok 10900  
winaipius@yahoo.com

## Abstract

A Tesla Transformer is an air core transformer generating maximum voltage, high frequency which depends on the resonance effect in LC circuit. L is an inductance of winding within the tesla transformer, and C is a capacitance.

**Keywords:** tesla transformer, solid state, computer simulation

## 1. Introduction

A basic design of Tesla Transformer has to be considered a high-voltage capacitor which effects to the output voltage and output frequency. The purpose of this design is to test an electrical insulator which has flashover voltage 140 kV and high frequency not less than 150 kHz of Thai Industrial Standards (TIS) 354-2523. The High Voltage and High Frequency rate are limited at 150 kV and 200 kHz for this design.

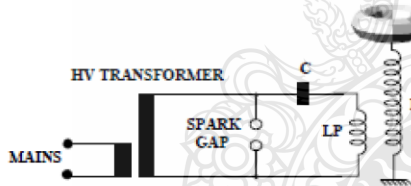


Fig. 1. Circuit of Tesla Transformer

## 2. Theory of High Voltage and High Frequency

### 2.1 High Voltage Winding

The design of High Voltage Winding comprises a tube, which has 6.5 inch diameter and 30 inch height. When the diameter of copper wire No. 23 SWG divided by the height of tube, the number of turns of the copper coil is 1,250 turns which is used to find the inductance from the equation. Please prepare your manuscript on A4 (21 cm x 29.7 cm) papers. The margins for the top and bottom are 25 mm. Left and right are 20 mm. respectively.

Title, authors' names and authors' affiliations are in single column. The rest of the paper are in two columns with 82 mm column widths and 6 mm spacing.

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

L = the inductance (μH), N = the number of turns of the copper coil, R = the radius of copper coil (inch), H = the height of copper coil (inch). L = 50.125 mH, when the

number of turns of the copper coil is 1,250 turns. The finding of this design found that the copper coil is higher 32 inches, and after calculating, the new inductance is 47.255 mH.

### 2.2 A High-Voltage Capacitor

A High-Voltage Capacitor consists of capacitors of electrical insulators about 60 pF, which calculate the stray capacitor equation:

$$C = 12.62 \text{ pF}$$

and finding the toroidal capacitor from the equation:

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

The design of toroidal capacitor, the inside diameter and the outside diameter are 6.5 inches and 19.5 inches. C = 21.55 pF. When combine three capacitors, the value of High-Voltage Capacitor is 94.17 pF. And calculate the resonance frequency equation:

When calculate only the stray capacitor, the resonance frequency is 206.094 kHz. When calculate the stray capacitor and toroidal capacitor, the resonance frequency is 125.248 kHz.

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

When calculate all three capacitors: the stray capacitor, the toroidal capacitor and the high voltage capacitor, the resonance frequency is 75.446 kHz.

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

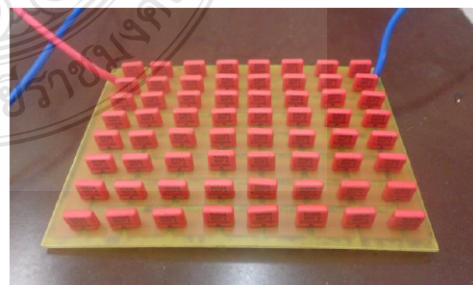


Fig. 2. High Voltage Capacitor 0.033μF, 5040 V

### 2.3 Low Voltage Capacitor

Calculate the low voltage capacitor from the equation;

$$f = 125.248 \text{ kHz}$$

It can receive the capacitor  $0.033 \mu\text{F}$  and  $f = 75.446 \text{ kHz}$  can receive the capacitor  $0.1 \mu\text{F}$ . For capacitor  $0.033 \mu\text{F}$ , it is the low voltage capacitor when without high voltage insulator. The capacitor  $0.033 \mu\text{F}$  680 V 8 series connection scan react 5,040 V.

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

The capacitor  $0.01 \mu\text{F}$  is the low voltage capacitor, which attaches with high voltage insulator, will use the capacitor  $0.1 \mu\text{F}$  1,000 V 5 series connections can react 5,000 V.

### 2.4 Low Voltage Winding

From 2.3, the resonance frequency, the finding shows that the Tesla Transformer can be used to test the insulator with the resonance frequency  $75.446 \text{ kHz}$ . Moreover, it can calculate the inductance of low voltage winding of the Tesla Transformer from the equation:

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



Fig. 3. Measurement of Parameter R, L

## 3 The Computer Simulation

### 3.1 Parameter of constructed device

To be accuracy, the researchers construct the winding of the Tesla Transformer and find the inductance and the electromagnetic induction,  $L_1 = 48.08 \mu\text{H}$   $L_2 = 46.93 \text{ mH}$  and  $M = 0.3509 \text{ mH}$

### 3.2 The Electric Switch Simulation

There are two types of testing, attached the insulator and without the insulator. Tuning by control the switch device for breaking an electrical circuit at power input  $220 \text{ V}$   $50\text{Hz}$ . Every  $10 \text{ ms}$  will be cut one time. It is found that the duty cycle  $10\%$  occur the highest oscillation.

### 3.3 The Electric Switch Simulation

There are two types of testing, attached the insulator and without the insulator. Tuning by control the switch device for breaking an electrical circuit at power input  $220 \text{ V}$   $50\text{Hz}$ . Every  $10 \text{ ms}$  will be cut one time. It is found that the duty cycle  $10\%$  occur the highest oscillation.

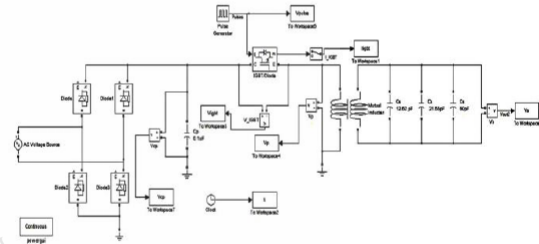


Fig. 4. Circuit of Simulation

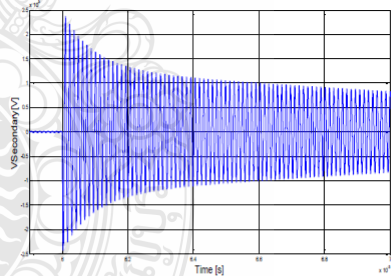
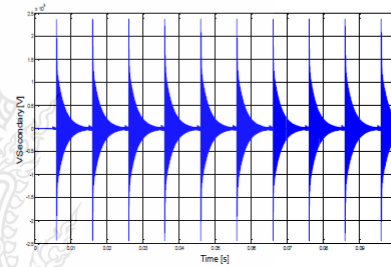


Fig. 5. Output Wave 240 kV, 160 kHz

### 2.3 The Half-Bridge Inverter Circuit Simulation

For the simulation, the researchers control the power electric switching device at the estimated resonant frequency, and then tune up the right frequency.

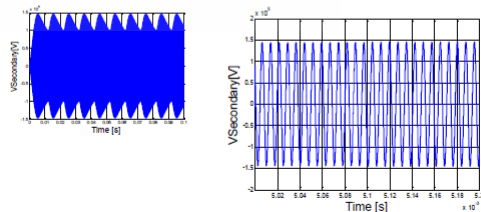


Fig. 6. Output Voltage 132 kHz, Duty Cycle 20%



#### 4 The Solid State Tesla Transformer

From the simulations, it could be considered the appropriate rate of the power electric switching device and construct the solid state tesla transformer 145 kV 132 kHz with IGBT No. 1MBI300F-060.

Voltage rate is 600 V, the current is  $\pm 300$  A, the circuit of half-bridge inverter. And after constructing, the appropriate rate is 152 kV 147 kHz.

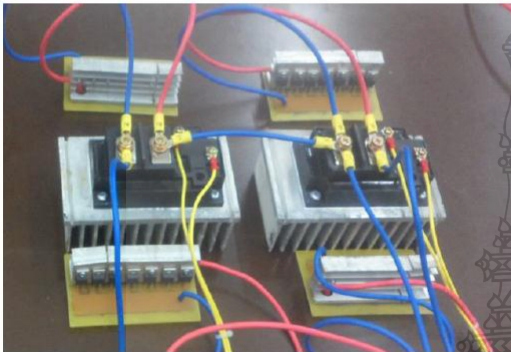


Fig. 7. IGBT 1MBI300F-060 Circuit and TLP250 Circuit

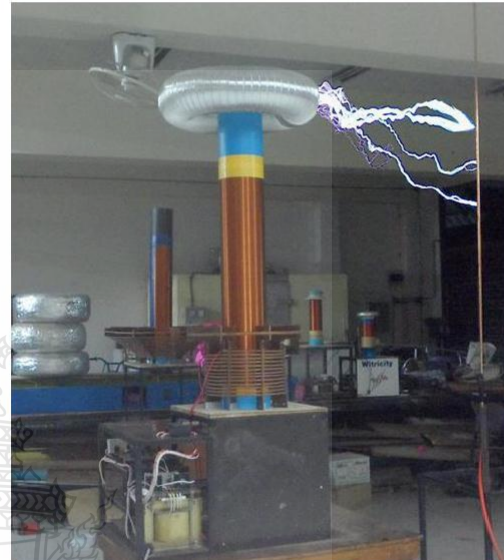


Fig. 9 Testing for Solid State Tesla

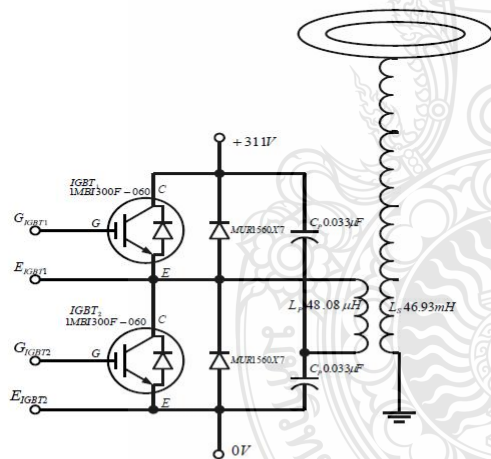


Fig. 8 Solid State Tesla Circuit

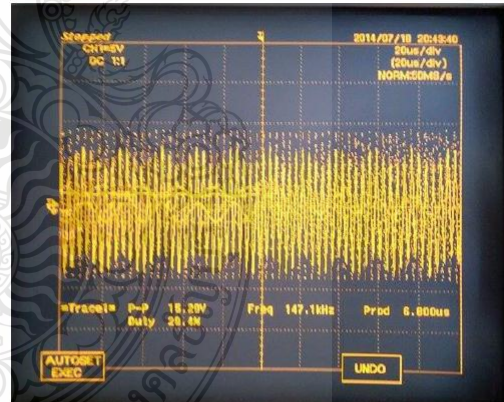


Fig.10. Output wave from: 152 kV, 147 kHz

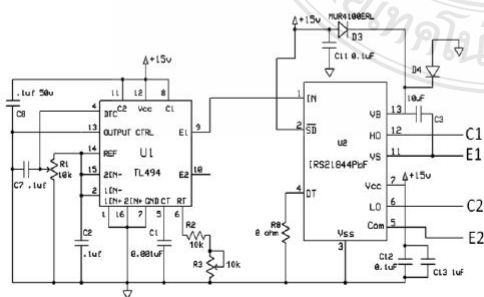


Fig. 9 PWM Circuit input

#### 5 Discussions and Conclusion

After conduct the research, the researchers use the calculation of the parameter and the measurement of winding of the designed Tesla Transformer making the computer simulation MATLAB/Simulink by controlling the frequency and duty cycle to compare the performance of three types of Solid State Tesla Transformer from the limitation of the rate of the power electric switching device which has reactance rate and low voltage. The result of the simulations found that the Half Bridge

Inverter Circuit is the most suitable for constructing because the rate of device is lower. Moreover, the voltage and the frequency, which are produced, are similar to the prototype.

#### ACKNOWLEDGMENT

Thanks to this work, the Department of Electrical Engineering. And high voltage laboratory to support the switch parameters. To perform the test the authorities advisor and consultant. In such research

#### References

- [1] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, Dec. 2007.
- [2] S. Bernet, R. Teichmann, A. Zuckerberger, and P. K. Steimer, "Comparison of high-power IGBTs and hard-driven GTOs for high-power inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, no. 2, pp. 487-495, Mar./Apr. 1999.
- [3] F. Filsecker, R. Alvarez, and S. Bernet, "Comparison of 4.5-kV presspack IGBTs and IGCTs for medium-voltage converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, no. 2, pp. 440-449, Feb. 2013.
- [4] H. Mirzaee, A. De, A. Tripathi, and S. Bhattacharya, "Design comparison of high-power medium-voltage converters based on a 6.5-kV Si-IGBT/Si-PiN diode, a 6.5-kV Si-IGBT/SiC-JBS diode, and a 10-kV SiCMOSFET/SiC-JBS diode," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, no. 4, pp. 2728-2740, Jul./Aug. 2014.
- [5] J. B. Baliga, *Fundamentals of power semiconductor devices*, 1st ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
- [6] A. Kadavelugu, S. Bhattacharya, S. H. Ryu, E. V. Brunt, D. Grider, A. Agarwal, and S. Leslie, "Characterization of 15 kV SiC n-IGBT and its application considerations for high power converters," in *proc. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, pp. 2528-2535, Sept. 2013.
- [7] K. Hatua, S. Dutta, A. Tripathi, S. Baek, G. Karimi, and S. Bhattacharya, "Transformerless intelligent power substation design with 15 kV SiC IGBT for grid interconnection," in *proc. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, pp. 4225-4232, Sept. 2011.
- [8] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.1, no.3, pp.186-198, Sept. 2013.
- [9] Q. Hengsi and J. W. Kimball, "Solid-state transformer architecture using ac-ac dual-active-bridge converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, no. 9, pp. 3720-3730, Sept. 2013.
- [10] H. Fan and H. Li, "High-frequency transformer isolated bidirectional dc-dc converter modules with high efficiency over wide loadrange for 20 kVA solid-state transformer," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, no. 12, pp. 3599-3608, Dec. 2011.
- [11] X. She, X. Yu, F. Wang, and A. Q. Huang, "Design and demonstration of a 3.6-kV/120-V/10-kVA solid-state transformer for smart grid application," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, no. 8, pp. 3982-3996, Aug. 2014.
- [12] S. Madhusoodhanan, K. Hatua, and S. Bhattacharya, "Control technique for 15 kV SiC IGBT based active front end converter of a 13.8 kV grid tied 100 kVA transformerless intelligent power substation," in *proc. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, pp. 4697-4704, Sept. 2013.
- [13] S. Madhusoodhanan, K. Hatua, and S. Bhattacharya, "A unified control scheme for harmonic elimination in the front end converter of a 13.8 kV, 100 kVA transformerless intelligent power substation grid tied with LCL filter," in *proc. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Fort Worth, TX, pp.964-971, Mar. 2014.
- [14] A. K. Tripathi, K. Hatua, H. Mirzaee, and S. Bhattacharya, "A three-phase three winding topology for dual active bridge and its D-Q mode control," in *proc. 2012 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, FL, pp. 1368-1372, Mar. 2012.
- [15] A. Tripathi, K. Mainali, D. Patel, K. Hatua, and S. Bhattacharya, "Closed loop D-Q control of high-voltage high-power three-phase dual active bridge converter in presence of real transformer parasitic parameters," in *proc. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, pp. 5488-5495, Sept. 2013.
- [16] S. Hazra, S. Madhusoodhanan, G. Karimi-Moghaddam, K. Hatua, and S. Bhattacharya, "Design considerations and performance evaluation of 1200 V, 100 A SiC MOSFET based converter for high power density application," in *proc. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, pp. 4278-4285, Sept. 2013.
- [17] A. Kadavelugu and S. Bhattacharya, "Design considerations and development of gate driver for 15 kV SiC IGBT," in *proc. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Fort Worth, TX, pp. 1494-1501, Mar. 2014.
- [18] J. Wang, T. Zhao, A. Q. Huang, R. Callanan, F. Husna, and A. Agarwal, "Characterization, modeling and application of 10 kV SiC MOSFET," *IEEE Trans. Electron. Devices*, Vol. 55, no. 8, pp.1798-1806, Aug. 2008.
- [19] G. Karimi-Moghaddam, R. D. Gould, S. Madhusoodhanan, K. Hatua, S. Bhattacharya, S. Leslie, S. H. Ryu, M. Das, A. Agarwal, and D. Grider "Thermal design considerations for 12 kV SiC n-IGBT based 3L NPC converter," in *proc. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Raleigh, NC, pp. 2180-2186, Sept. 2012.
- [20] B. Wu, *High-power converters and AC drives*, Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2006.
- [21] ICAR application notes [Online]. Available: [http://www.icar.com/content/1/pdf/LNK2013Rev01\\_1.pdf](http://www.icar.com/content/1/pdf/LNK2013Rev01_1.pdf)
- [22] H. Krishnamurthy and R. Ayyanar, "Stability analysis of cascaded converters for bidirectional power flow applications," in *proc. 2008 IEEE Telecommunications Energy Conference*, San Diego, CA, pp.1-8, Sept. 2008.
- [23] H. Krishnamurthy and R. Ayyanar, "Building block converter module for universal (ac-dc, dc-ac, dc-dc) fully modular power conversion architecture," in *proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp.483-489, June 2007.
- [24] J. M. Zhang, X. G. Xie, D. G. Jiao, and Z. Qian, "Stability problems and input impedance improvement for cascaded power electronic systems," in *proc. 2004 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Vol. 2, CA, pp.1018-1024.

## ประวัติผู้เขียน



**ชื่อ – สกุล** นายสุพจน์ วรธิพรหมมา

**วัน เดือน ปีเกิด** 24 พฤศจิกายน 2519

**ที่อยู่** 105/1 หมู่ที่ 18 บ้านศิลา ตำบลศิลา  
อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000

**การศึกษา**  
พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี  
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**ประสบการณ์การทำงาน** ครู วิทยฐานะ ครูชำนาญการ แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง  
วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อกุณ ประจวบคีรีขันธ์  
อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา

**เบอร์โทรศัพท์** 08-1593-9744

**อีเมล** [suphot\\_power2@yahoo.com](mailto:suphot_power2@yahoo.com), [suphot\\_power@yahoo.co.th](mailto:suphot_power@yahoo.co.th)