สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การแกว่งของสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์สำหรับระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

THE ANALYSIS OF DAMPED OSCILLATION BASED ON F-Z CHARACTERISTIC APPLIED FOR INDUCTION HEATING SYSTEM

T060523

จักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง

JAKKRIT ARTHITTANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60523
วัน,เดือน,ปี - 3 ก.ค. 2549

.b 11546785
.i

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1597-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ANALYSIS OF DAMPED OSCILLATION BASED ON F-Z CHARACTERISTIC APPLIED FOR INDUCTION HEATING SYSTEM

JAKKRIT ARTHITTANG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-15-1597-9



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การแกว่งของสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้กราฟคุณลักษณะ เฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์สำหรับระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
นักศึกษา	นายจักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง
รหัสนักศึกษา	44611004
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการวิเคราะห์การแกว่งของสัญญาณไฟฟ้าที่คร่อมอุปกรณ์สวิตซ์ในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำซึ่งได้ออกแบบไว้ที่พิกัดแรงดันด้านเข้า 220 โวล์ต กระแสด้านเข้า 13 แอมแปร์ โดยใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับความถี่ในการการสวิตซ์ได้ระหว่าง 10 ถึง80 กิโลเฮิรตซ์ เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดชนิดเหนี่ยวนำและใช้โหลดชนิดเหนี่ยวนำเป็นเป้าหมายหลักที่จะวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยในส่วนแรกเป็นการใช้หลักพื้นฐานของวงจรไฟฟ้าและคณิตศาสตร์วิเคราะห์ร่วมกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของโหลดชนิดเหนี่ยวนำ จนสามารถอธิบายกลไกการเกิดการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้า สามารถบอกเงื่อนไขในการเกิดการแกว่ง และสามารถทำนายคุณสมบัติเช่นความถี่ จำนวนยอดของการแกว่งได้ จนที่สุดสามารถสรุปเป็นหลักการ “ความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้ากับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์” หรือเรียกให้สั้นว่า หลักการ “ความสัมพันธ์ของการแกว่ง” ซึ่งจะใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์ส่วนต่อไปทั้งหมด มีการยืนยันอย่างกระจ่างชัดด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เทียบกับผลการจำลองวงจรด้วยโปรแกรมแมทแคดและออแคด พีสไปซ์ และยืนยันด้วยผลจากการทดลอง อีกทั้งได้เสนอวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่สอดคล้องกับการแกว่งที่เกิดขึ้นไว้ด้วย สำหรับส่วนที่สอง เป็นการนำหลักการข้างต้นมาวิเคราะห์เทคนิคเรโซแนนซ์แบบอนุพันธ์อันดับสองและอันดับสาม โดยในส่วนของเทคนิคเรโซแนนซ์อันดับสองมุ่งประเด็นการวิเคราะห์ไปที่ความเกี่ยวข้องกันของความถี่ในการสวิตซ์กับความถี่เรโซแนนซ์ และในส่วนของเทคนิคเรโซแนนซ์อันดับสามเป็นการใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์อธิบายให้เข้าใจง่าย ถึงข้อดีของเทคนิคนี้ที่ว่า ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม แทนการอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนยุ่งยาก และในส่วนสุดท้ายได้เสนอเทคนิคใหม่เพื่อจัดการกับการแกว่ง ซึ่งเป็นวิธีที่ประยุกต์มาจากหลักการเรื่องเรโซแนนซ์ทุกความถี่ โดยสามารถแสดงให้เห็นชัดด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ประกอบกับหลักการของการแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The analysis of damped oscillation based on f-z characteristic applied for induction heating system
Student	Mr. Jakkrit Arthittang
Student ID	44611004
Degree	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

The thesis presents a damped oscillation analysis across switching devices of full-bridge inverter which is applied to the induction heating using f-z (frequency-impedance characteristic) of an induction load. The rated input voltage and current of the induction system are 220 V and 13 A respectively. The adjustable switching frequency is between 10 kHz-80 kHz. The induction load is focused on this thesis. The thesis contents can be divided into three parts. The first part is principle of "the relationship between damped oscillation and f-z characteristic" or "the oscillated relation" using basic circuit principle, mathematics and f-z characteristics to analyze damped oscillation. It is able to describe generation mechanism of damped oscillation and predict its characteristics such as frequency and the number of peaks. The equivalent circuit of an induction load is purposed. All of them are verified by solvable mathematical, simulation using MathCAD and Orcad PSpice program and experimental results. The second part is analysis of the second and third order resonant techniques using the previous principle. The second order resonant technique is analyzed about relationship between switching and resonant frequencies. The third order resonant technique is analyzed about its advantage which is transformerless and its description is simplified by f-z ch. Finally, the third part, series RC technique is purposed to reduce the damped oscillation. It is the application of resonant at all frequency principle and it is described clearly by f-z ch and the oscillated relation principle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะแรงผลักดันจากท่านอาจารย์ วีระเชษฐ์ ขันเงิน ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งในความปรารถนาดี มีเมตตา ความเข้าใจ คำแนะนำและความช่วยเหลือทุกประการ ตั้งแต่ปริญญาตรีเรื่อยมา ขอบพระคุณ Prof. Shuichi Nitta ที่ได้ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการวิจัย อันล้วนเป็นประโยชน์และทรงคุณค่าต่องานวิจัยนี้อย่างมาก ขอบคุณอาจารย์วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ ที่ช่วยรับฟังและให้คำปรึกษาโดยเฉพาะช่วยแนะนำหนังสือแหล่งข้อมูลการวิจัยต่างๆได้อย่างยอดเยี่ยม ขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเป็นแบบอย่างของความพากเพียรและคุณงามความดี ขอบคุณศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรมที่เอื้อเฟื้อเรื่องสถานที่และเครื่องมือวัด ขอบคุณคุณประชา คำภักดี เพื่อนผู้มีน้ำใจอันดีเสมอมา และพี่น้องชาว EMC Lab ทุกคนที่ให้กำลังใจ ความอบอุ่นและความช่วยเหลือเอื้ออาทรต่อกันด้วยดีโดยตลอด ขอบคุณคุณนิตยา ลิ้นจี่ ที่ให้คำแนะนำการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ภาษาอังกฤษ และช่วยเหลือด้านการพิมพ์

ขอขอบคุณพี่ชาย และน้องสาวทั้งสอง ในความห่วงใยและปรารถนาดีไม่มีเสื่อมคลาย ที่มิอาจจะลืมเลือนไปได้และมีส่วนในทุกขั้นตอนการทำงานวิจัย ทั้งยามสุข ยามทุกข์ท้อ ขอกราบขอบพระคุณแม่ที่แสนดี

จักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ลักษณะของงานวิจัยนี้และหลักการใหม่ที่เสนอเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....2

1.2.1 ลักษณะของงานวิจัยนี้.....2

1.2.2 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2

1.2.3 มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร.....2

1.2.4 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....2

1.3 วัตถุประสงค์และเป้าหมาย.....3

1.4 ขอบเขตและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....4

1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....4

1.6 พิกัดกำลังและลักษณะของโหลด.....6

1.6.1 พิกัดเครื่องต้นแบบ.....6

1.6.2 ลักษณะของโหลด.....6

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....7

บทที่ 2. ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....8

2.1 ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....8

2.1.1 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน.....8

2.1.2 องค์ประกอบของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....13

2.2 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....14

2.2.1 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ.....15

2.2.2 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์.....16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่3 ความสัมพันธ์ของการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้ากับกราฟ
คุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์.....19
3.1 บทนำ.....19
3.2 หลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง.....19
3.2.1 การเกิดการแกว่งในวงจร *RLC* แบบขนาน.....20
3.2.2 การจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของ S_1.....24
3.3 การทดลองและการวิเคราะห์.....29
3.3.1 การทดลอง ผลการทดลองและประเด็นปัญหา.....29
3.3.2 การวิเคราะห์.....32
3.4 การจำลองด้วยโปรแกรม Pspice.....33
3.5. สรุปผล.....35

บทที่ 4 การวิเคราะห์เทคนิคเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม.....37
4.1 บทนำ.....37
4.2 การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์.....39
4.2.1 อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันแบบสี่เหลี่ยม.....40
4.2.2 อิมพีแดนซ์ของโหลด.....43
4.2.3 สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์.....44
4.2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแส
ด้วยอนุกรมฟูริเยร์.....45
4.3 การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยหลักการสับการแกว่ง.....55
4.3.1 การแกว่งของสัญญาณกระแสในวงจร RLC แบบอนุกรม.....56
4.3.2 หลักการสับการแกว่ง.....59
4.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแส
ด้วยการสับการแกว่ง.....62
4.4 การจำลองและการทดลอง.....71
4.4.1 การจำลอง.....71
4.4.2 การทดลอง.....78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5. การวิเคราะห์อิทธิพลของ S ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแส.....82
4.5.1 ตัวต้านทานวิกฤติ.....83
4.5.2 อัตราการหน่วง.....83
4.5.3 เขียนกราฟการแกว่งในเทอมของ S 84
4.5.4 วิเคราะห์อิทธิพลของค่า S ที่มีต่อลักษณะของสัญญาณกระแส ด้วยหลักการสับการแกว่ง.....86
4.6 การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอล โดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์.....88
4.6.1 ประเด็นในการวิเคราะห์.....88
4.6.2 หน้าที่ของหม้อแปลงแมทชิ่งในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ.....88
4.6.3 วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL แทนหม้อแปลงแมทชิ่งได้อย่างไร.....89
4.6.4 การวิเคราะห์กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL.....92
4.6.5 การวิเคราะห์วงจร LCL ด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ และหลักการสับการแกว่ง.....95
4.7 สรุป.....98

บทที่ 5 เทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ.....99
5.1 บทนำ.....99
5.2 หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่.....99
5.3 เสนอเทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ.....100
5.3.1 หลักการแปลงผัน อนุกรม-ขนาน.....100
5.3.2 ประยุกต์หลักการแปลงผัน อนุกรม-ขนานกับ วงจรสมมูลโหลดชนิดเหนี่ยวนำ.....101
5.4 การจำลองและการทดลอง.....103
5.4.1 การจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์.....103
5.4.2 การทดลองจริง.....105
5.5 วิเคราะห์และสรุปผล.....109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุป.....110
6.1 สรุปผลการวิจัย.....110
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการทำวิจัยต่อไป.....111

เอกสารอ้างอิง.....112

ภาคผนวก.....114
ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....115
ข. ตัวอย่างโปรแกรม MathCAD.....125
ค. ภาพอุปกรณ์ วงจร และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....135
ง. การคำนวณประสิทธิภาพของหลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่.....138

ประวัติผู้เขียน.....140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และจากการคำนวณเพิ่มเติม	33
3.2	ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์จากการจำลอง และจากการคำนวณเพิ่มเติม	34
5.1	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างวงจรสมมูล กราฟคุณลักษณะเฉพาะ ความถี่-อิมพีแดนซ์และการแกว่ง	98
5.2	ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และจากการคำนวณเพิ่มเติม	106
5.3	ค่า R-C ในแต่ละกรณี	107
5.4	ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ในรูปที่ 5.10	108
6.1	เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียระหว่างการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ และหลักการสับการแกว่ง	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังขั้นตอนในการวิจัย	5
1.2	ตัวอย่างผลการทดลองเริ่มต้นกับปัญหา 2 ประการ	6
2.1	ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	8
2.2	กฎของฟาราเดย์	9
2.3	กฎของเลนซ์	9
2.4	หลักการของกระแสไหลวน	10
2.5	องค์ประกอบของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	14
2.6	การเชื่อมโยงทางตัวเก็บประจุแฝง	15
2.7	การเชื่อมโยงผ่านทางตัวเหนี่ยวนำแฝง	15
2.8	การเกิดสัญญาณรบกวน	16
2.9	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ	17
2.10	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ	18
3.1	วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน RLC	20
3.2	การแกว่งรูปทั่วไปที่ยังไม่ถูกจัดให้อยู่ในเทอมของ S_1	24
3.3	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	28
3.4	กราฟการแกว่งในเทอมของ S_1	29
3.5	วงจรแทนระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง	30
3.6	แรงดัน v_{ds} ที่คร่อมสวิตช์ ณ จุดสังเกตแรงดัน	31
3.7	แรงดัน v_{ds} คร่อมสวิตช์ ณ จุดสังเกตแรงดันที่ขยายจากรูปที่3.6	31
3.8	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำ	32
3.9	วงจรสมมูลของหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำ	33
3.10	กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ ของวงจรสมมูลหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.9	34
3.11	วงจรจำลองและกราฟการแกว่ง	35
4.1	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่มีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแบบสี่เหลี่ยม	37
4.2	สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันแบบสี่เหลี่ยม	38
4.3	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม	39
4.4	แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	แรงดันแบบสี่เหลี่ยมของแหล่งจ่ายที่ได้จากการกระจายด้วยอนุกรมฟูริเยร์	42
4.6	อิมพีแดนซ์ของ *RLC* อนุกรม	43
4.7	สัญญาณกระแสกรณี F1 $[f_s << f_r]$	47
4.8	สัญญาณกระแสกรณี C1.1 $[f_s < f_r : i \text{ lead } v]$	49
4.9	สัญญาณกระแสกรณี C1.2 $[f_s < f_r : i \text{ inphase } v]$	51
4.10	สัญญาณกระแสกรณี C2 $[f_s = f_r : i \text{ lag } v]$	53
4.11	สัญญาณกระแสกรณี C2 $[f_s > f_r : i \text{ lag } v]$	54
4.12	สัญญาณกระแสกรณี C2 $[f_s >> f_r]$	55
4.13	วงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม *RLC*	56
4.14	การแกว่งของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	59
4.15	แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยการสับการแกว่ง	60
4.16	การสับการแกว่ง	60
4.17	การสับการแกว่งต่างกัน 3 แบบ	62
4.18	กรณีการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่ง	63
4.19	สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี A $[f_s << f_d]$	64
4.20	สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี B $[f_s < f_d]$	67
4.21	สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี C $[f_s = f_d]$	68
4.22	สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี C $[f_s > f_d]$	70
4.23	ผลการจำลองกรณี F1 $[f_s << f_r]$	72
4.24	ผลการจำลองกรณี C1.1 $[f_s < f_r : i \text{ lead } v]$	73
4.25	ผลการจำลองกรณี C1.2 $[f_s < f_r : i \text{ inphase } v]$	74
4.26	ผลการจำลองกรณี C2 $[f_s = f_r : i \text{ lag } v]$	75
4.27	ผลการจำลองกรณี C2 $[f_s > f_r : i \text{ lag } v]$	76
4.28	ผลการจำลองกรณี F2 $[f_s >> f_r : i \text{ lag } v]$	77
4.29	วงจรแทนระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	78
4.30	กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s << f_d]$	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.31	กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s < f_d]$	79
4.32	กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s = f_d]$	79
4.33	กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s > f_d]$	80
4.34	กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s >> f_d]$	80
4.35	กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์	82
4.36	กราฟ Second-order normalized response curve ในเทอมของ ξ	85
4.37	กราฟ Second-order normalized response curve ในเทอมของ S	85
4.38	การจำลองและลักษณะของสัญญาณกระแส แรงดันกรณีที่ $S = 1.26$	86
4.39	สัญญาณกระแสและแรงดันในแต่ละค่า S ของวงจร RLC แบบอนุกรม	87
4.40	วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL	88
4.41	หน้าที่ของหม้อแปลงแมทชิ่งในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ	89
4.43	กราฟ f-z ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL แบบลดระดับแรงดัน	90
4.45	กราฟ f-z ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL แบบเพิ่มระดับแรงดัน	91
4.46	ผลการจำลองวงจร LCL แบบลดระดับแรงดัน	97
5.1	หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่	100
5.2	การแปลงผัน อนุกรม-ขนาน	101
5.3	การแปลงผัน อนุกรม-ขนาน..ขนาน	102
5.4	วงจรสมมูลของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำและเทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ	103
5.5	ผลการจำลองกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์	104
5.6	แรงดันไฟฟ้าจากการจำลองทั้งกรณีไม่มีวงจร RC และกรณีที่มีวงจรRC	104
5.7	วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการทดลอง	105
5.8	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ	105
5.9	ผลการวัด v_{ds} ที่จุดสังเกต	106
5.10	กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบกัน 3 กรณี	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.11	แรงดัน V_{ds} ที่จุดสังเกต	108
5.12	ผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำทั้ง 3 กรณี	108
ค.1	วงจรโดยรวมทั้งระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบ	136
ค.2	เครื่อง impedance/gain phase analyzer รุ่น 4194A	136
ค.3	โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilizing Network; LISN)	137
ค.4	เครื่อง EMC analyzer รุ่น E17401A	137
ง.1	ประสิทธิภาพกรณียังไม่ต่อชุดอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ	139
ง.2	ประสิทธิภาพกรณีต่อชุดอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุภายใต้เงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย คือ การแกว่งของสัญญาณไฟฟ้าสำหรับระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เนื่องจากการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจะเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนได้ต้องมีโหลดชนิดเหนี่ยวนำและต้องมีการทำงานที่ความถี่สูง ซึ่งทำให้ค่าตัวเก็บประจุแฝง มีผลต่อการทำงานของวงจร โดยเฉพาะเป็นต้นเหตุของการแกว่ง และการรบกวนด้านแม่เหล็กไฟฟ้าที่มิอาจหลีกเลี่ยงได้หากสามารถที่จะเข้าใจถึงกลไกการเกิดการแกว่งที่แท้จริงได้ ย่อมสามารถที่จะทำนายลักษณะของการแกว่ง และหาวิธีจัดการกับการแกว่งได้อย่างมีประสิทธิภาพและ เป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ เพราะโดยทั่วไปมักใช้วงจรสนับเบอร์ในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งเป็นการแก้ที่ปลายเหตุ อีกทั้งยังทำให้เกิดการสูญเสียและสิ้นเปลือง

เพราะเหตุใดปัญหานี้ถึงน่าสนใจ

ปัญหาการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้าสำหรับระบบ ให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นปัญหาที่ต้องเกิดอย่างแน่นอนเพราะเป็นโหลดชนิดเหนี่ยวนำความถี่สูง และการแก้ปัญหานี้โดยทั่วไปใช้วงจรสนับเบอร์ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ อาศัยหลักการที่ว่าแรงดันไฟฟ้าไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้ในตัวเก็บประจุ ดังนั้นการใช้วงจรสนับเบอร์จึงเปรียบเสมือนการย้ายภาระอันเกิดจากการแกว่ง ที่ตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์มาไว้ที่วงจรสนับเบอร์ ในการที่จะแก้ที่ต้นเหตุของปัญหาจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่แท้จริงของการแกว่ง สามารถที่จะอธิบายกลไกการเกิดการแกว่งได้อย่างชัดเจนสามารถระบุถึงข้อจำกัดการวิเคราะห์สำหรับระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์หลายประการในเชิงวิชาการ อาทิเช่น

1. สามารถทำนายลักษณะการแกว่งได้
2. สามารถใช้ช่วยวิเคราะห์หลักการเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมในประเด็นของลักษณะสัญญาณกระแสไฟฟ้าในกรณีต่างๆ ได้เช่น 1. กรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน 2. กรณีที่กระแสกับแรงดันพอดีเฟสกัน 3. กรณีที่กระแสตามหลังแรงดันไฟฟ้า
3. สามารถอธิบาย หลักการเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอลได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะประเด็นที่ว่า "วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอลสามารถทดแทนหม้อแปลงแมตชิ่งได้"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ลักษณะของงานวิจัยนี้และหลักการใหม่ที่เสนอเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

1.2.1 ลักษณะของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแบบ วิเคราะห์เชิงเสนอหลักการ โดยใช้การทดลองและการจำลองยืนยันหลักการที่ได้เสนอนั้น

หลักการใหม่ที่นำเสนอ มีดังนี้

1. หลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง (oscillated relation)
2. หลักการสับการแกว่ง (oscillating chopping)
3. เทคนิคตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุ (RC series technique)

1.2.2 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. การเกิดปรากฏการณ์ชั่วขณะ (transient phenomena) และการหยุดขั้นตอนของปรากฏการณ์ชั่วขณะก่อนที่จะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว
2. หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ (resonance at all frequency)
3. กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำไม่อาจเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดได้

1.2.3 มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร

1. เสนอหลักการ "ความสัมพันธ์ของการแกว่ง"
2. ประยุกต์หลักการดังกล่าวในการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไปนี้
   ก. ลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม ทั้งสามกรณี คือ กรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน กรณีกระแสกับแรงดันมีเฟสพอดีกัน และกรณีกระแสตามหลังแรงดันนอกจากนี้ยังวิเคราะห์ในส่วนอิทธิพลของค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ที่มีผลต่อลักษณะของสัญญาณกระแสเพิ่มเติมด้วย
   ข. การไม่ต้องใช้หม้อแปลงแมตชิ่งในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอล
3. เสนอเทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุในการจัดการกับการแกว่ง

1.2.4 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

หลักการใหม่ที่นำเสนอเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม มีรายละเอียดดังนี้

1.) เป็นการนำเอาหลักการของวงจรไฟฟ้าพื้นฐานและการแก้สมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ร่วมกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของโหลด ในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เป็นหลักการที่ได้แนวความคิดมาจาก เรื่องกลไกการเกิดสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุในสายส่งกำลัง (Generation Mechanism of R.F. Noises on Power Lines) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) เสนอวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่สอดคล้องกับการเกิดการแกว่ง ซึ่งต่างจากแบบเดิมที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ แบบตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทานซึ่งไม่สามารถอธิบายถึงที่มาของการแกว่งได้อย่างชัดเจน [2-3]

3.) เสนอการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณกระแสไฟฟ้าในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมในกรณีต่างๆเช่น 3 กรณีหลักคือ 1.) กรณีที่กระแสนำหน้าแรงดัน 2.) กรณีที่กระแสกับแรงดันพอดีเฟสกัน 3.) กรณีที่กระแสตามหลังแรงดัน ซึ่งสามารถทำนายลักษณะของกระแสจริงได้ โดยการวิเคราะห์แบบเดิมมักจะวิเคราะห์เฉพาะที่ความถี่มูลฐาน หรือวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ซึ่งเป็นการยากที่จะบอกได้ถึงรูปร่างของกระแสจริงที่รวมทุกความถี่ วิธีการใหม่ที่ได้เสนอนี้จึงเป็นประโยชน์มากในการทดลองวิจัยเริ่มต้น เพราะจะสามารถทำนายลักษณะของกระแสจริงในกรณีต่างๆข้างต้นก่อนได้

4.) เสนอการวิเคราะห์ข้อดีของหลักการเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอล ในประเด็นที่ว่า "วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอลสามารถทดแทนหม้อแปลงแมตชิ่งได้" โดยเสริมจากหลักการเดิม [4] ที่วิเคราะห์ด้วยทฤษฎีส่วนเพิ่มพิเศษของมิดเดิ้ลบรูก (Middlebrook's Extra Element Theorem) ซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนยุ่งยาก วิธีการวิเคราะห์ใหม่ที่นำเสนอสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนด้วยกราฟ กล่าวคือวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอลสามารถทดแทนหม้อแปลงแมตชิ่งได้ มีเงื่อนไขและขอบเขตการทำงานอย่างไร

5.) เทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ เป็นเทคนิคที่ประยุกต์มาจากหลักการเดิมเรื่องเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ [5-6]

1.3 วัตถุประสงค์และเป้าหมาย

1. สามารถอธิบายกลไกการเกิดการแกว่งได้
2. สามารถหาวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่สอดคล้องกับการแกว่งที่เกิดขึ้นได้
3. สามารถทำนายลักษณะการแกว่งได้
4. สามารถอธิบายพฤติกรรมลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน
5. สามารถอธิบายถึงอิทธิพลของค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ที่มีต่อความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมได้
6. บอกได้ว่า ทำไมวงจรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL จึงสามารถแทนหม้อแปลงแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ได้
7. สามารถจัดการกับการแกว่งและลดผลของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic interference: EMI) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งรายละเอียดของการวิจัยทั้งหมดเป็น 6 บท โดยเริ่มจากอธิบายปัญหาและที่มา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์ปัญหาด้วนวิธีเดิมโดยทั่วไปควบคู่ไปกับการเสนอและอธิบายการวิเคราะห์ด้วยวิธีใหม่ มีการยืนยันด้วยผลการจำลองด้วยโปรแกรม PSpice ประกอบกับกระบวนการทางคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรม MathCAD อีกทั้งผลจากการทดลองจริง และมีการสรุปผลในส่วนสุดท้าย โดยเนื้อหาต่างๆ ถูกแบ่งเป็นบทๆ ดังนี้

บทที่ 1 บทนำจะกล่าวถึงความเป็นมา ปัญหา ความน่าสนใจ และเป้าหมาย

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการเหนี่ยวนำความร้อนพื้นฐาน หลักการโดยสังเขปของการเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า และระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ที่มีวงจรไฟฟ้าฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปให้โหลด

บทที่ 3 กล่าวถึงปัญหาแรกคือการแกว่งของสัญญาณแรงดัน มีการวิเคราะห์และเสนอหลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง ที่อธิบายได้ถึงกลไกการเกิดการแกว่ง สามารถทำนายการแกว่งได้ มีผลการจำลองประกอบกับการทดลองจริง

บทที่ 4 กล่าวถึงปัญหาข้อที่สอง คือลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนอันดับที่สองแบบอนุกรม ซึ่งมีการวิเคราะห์ด้วยวิธีอนุกรมฟูริเยร์ และเสนอวิธีการวิเคราะห์ ด้วยการสับการแกว่ง ซึ่งเป็นวิธีใหม่ มีการยืนยันด้วยการสร้างแบบจำลองและการทดลองจริง นอกจากนี้ยังมีส่วนของกรณีศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งเป็นการนำเอาหลักการการสับการแกว่งไปอธิบายอิทธิพลค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแส อีกทั้งนำไปวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL บางประเด็นด้วย

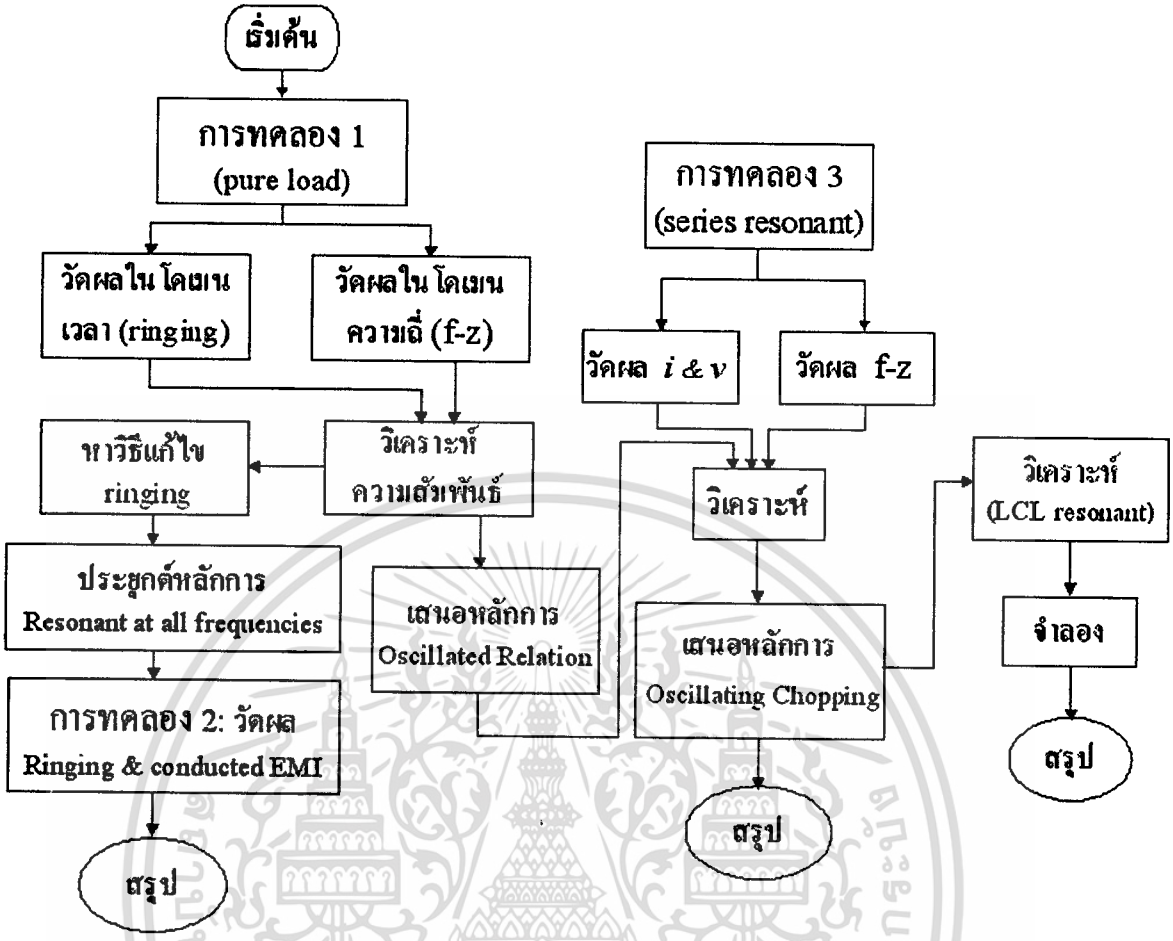
บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการลดการแกว่ง ด้วยเทคนิคตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ มีการจำลองและยืนยันด้วยผลการทดลองจริง

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

หลังจากเลือกงานวิจัยในเรื่องการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยเลือกแหล่งจ่ายเป็นแบบแหล่งจ่ายความดันที่มี วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดและได้ทำการสร้างวงจรต้นแบบทั้งระบบคือโหลด วงจรกำลัง และวงจรควบคุม เสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองพื้นฐานโดยที่ยังไม่มีการใช้เทคนิคใดๆ มาช่วย ปัญหาที่พบประการแรกคือ แรงดันด้านออกของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์มีการแกว่งผสมอยู่ด้วย ดังรูปที่ 1.2 และประการที่สองคือไม่สามารถอธิบายที่มาของลักษณะของสัญญาณกระแสได้ ซึ่งนำไปสู่การวิจัยมีขั้นตอนดังแผนผังในรูปที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



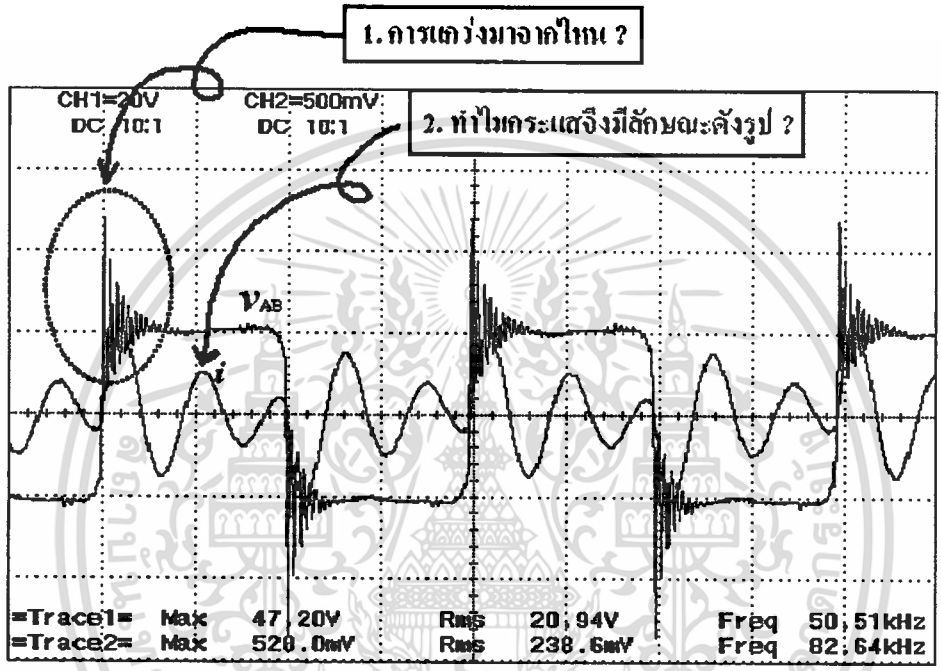
รูปที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนในการวิจัย

จากรูปที่ 1.1 เริ่มต้นด้วยการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลองโดยที่ไม่มีการใช้เทคนิคใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งนี้เพื่อศึกษาปัญหาพื้นฐานโดยแท้ที่นำไปสู่การคิดค้นเทคนิคต่างๆ มากมาย ทำการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ 1 ซึ่งมีทั้งผลในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ เพื่อหาความสัมพันธ์ของอาณาจักรทั้งสอง ทำให้ได้เสนอหลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง ซึ่งนำไปอธิบายปัญหาประการแรกดังกล่าวไว้ข้างต้น นอกจากนี้ยังมีการหาวิธีลดการแกว่งโดยเสนอเทคนิคตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นการประยุกต์หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่มาใช้ และยืนยันด้วยการจำลองและผลการจำลองที่ 2 และเพื่อเป็นการขยายผลหลักการความสัมพนธ์ของการแกว่ง จึงได้มีการนำไปวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม ซึ่งเป็นส่วนของการทดลองที่ 3 โดยผลการวิเคราะห์ทำให้ได้เสนอหลักการ "การสับการแกว่ง" ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสและอธิบายเรื่องอิทธิพลของ S ที่มีต่อความเป็น ไซน์ของสัญญาณกระแส และเพื่อเป็นการขยายผลหลักการการสับการแกว่งร่วมกับหลักการความสัมพันธ์ของการแกว่งและกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ จึงได้มีส่วนของการศึกษาเพิ่มเติมคือ การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะประด็นที่ว่า สามารถแทนหม้อแปลงได้ (transformerless) ในแต่ละขั้นตอนล้วนมีการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อยืนยันด้วยเสมอ

ตัวอย่างผลการทดลองในรูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นสัญญาณที่ไม่เป็นที่ต้องการ (unwanted signals) เกิดขึ้นคือการแกว่งของแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่มีการแกว่ง ซึ่งมีผลเสียต่อประสิทธิภาพการทำงาน พิกัดการทำงานของอุปกรณ์สวิตชิ่ง และระดับสัญญาณรบกวนความถี่สูง เป็นต้น



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างผลการทดลองเริ่มต้นกับปัญหา 2 ประการ

1.6 พิกัดกำลังและลักษณะของโหลด

1.6.1 พิกัดเครื่องต้นแบบ

แรงดันด้านเข้า	220	V
ความถี่ด้านเข้า	50	Hz
กระแสด้านเข้า	13	A
ความถี่สวิตชิ่ง	10-80	kHz

1.6.2 ลักษณะของโหลด

เป็นภาชนะชนิด Stainless steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.5 cm มีขดลวดหุ้มฉนวนกันความร้อนพันรอบประมาณ 25 รอบ สูง 9.0 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำหลักการที่นำเสนอและขั้นตอนการวิเคราะห์ไปใช้อย่างกว้างขวางอันประกอบไปด้วย

1. สามารถอธิบายเรื่องกลไกในการเกิดการแกว่งโดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ การทำนายการแกว่ง วงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่สอดคล้องกับการแกว่งที่เกิดขึ้นจริง

2. สามารถช่วยผู้สนใจโดยเฉพาะผู้ศึกษาเริ่มต้นด้านการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในการทำความเข้าใจถึงลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโดยละเอียด สะดวก ไม่ยุ่งยาก ทุกกรณี

3. สามารถอธิบายประเด็นเรื่องอิทธิพลของค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์หรือตัวประกอบคุณภาพ (Q) ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแสโดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ได้

4. สามารถอธิบายได้ว่าทำไมจึงไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่งในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ได้

5. สามารถกำจัดการแกว่งและลดสัญญาณการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้

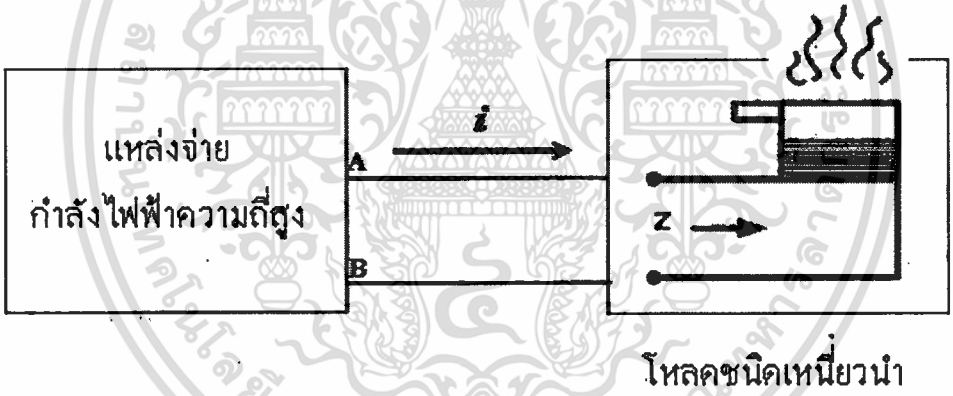
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

2.1.1 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (induction heating) ไม่ว่าจะเป็นการหลอมโลหะ การหล่อโลหะ การหุงต้มด้วยการเหนี่ยวนำหรือวิธีประยุกต์การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนวิธีอื่นๆ ล้วนอาศัยหลักการเดียวกันคือ การทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดลวด ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงตัดผ่านโลหะและเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นตามหลักการของกระแสไหลวน (eddy current)



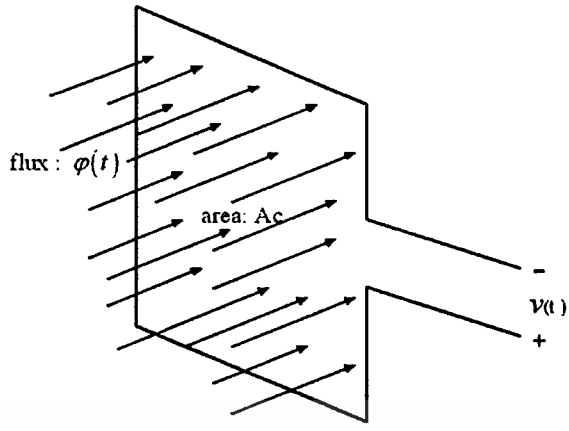
รูปที่ 2.1 ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกเป็นภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต้องมีความถี่สูง ในงานวิจัยปัจจุบันสามารถสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความถี่สูงถึงประมาณ 2 เมกกะเฮิรตซ์ [7] เพราะความถี่ยิ่งสูงการเหนี่ยวนำก็ยิ่งสูงตามไปด้วย สำหรับการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบให้ภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความถี่สามารถปรับได้ระหว่าง 10-80 กิโลเฮิรตซ์ ส่วนที่สองเป็นภาคโหลดชนิดเหนี่ยวนำ โดยมีหลักการและกฎพื้นฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.) กฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตัดลวดเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักดิ์ทำให้กระแสไหล ตามรายละเอียดในรูปที่ 2.2 และสมการที่ (2.1-2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.2 กฎของฟาราเดย์

$$v(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \tag{2.1}$$

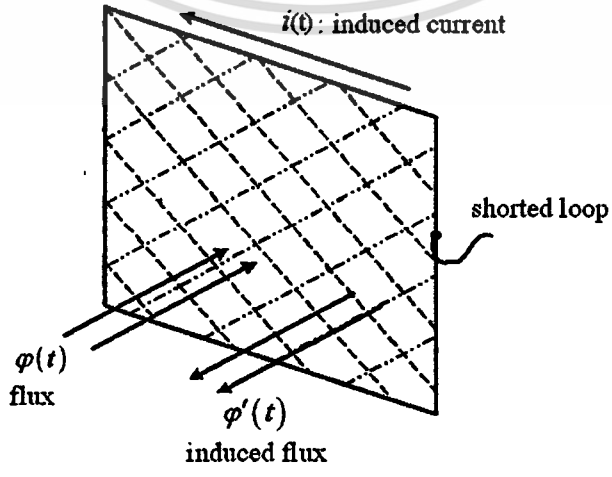
$$v(t) = A_C \frac{dB(t)}{dt} \tag{2.2}$$

เมื่อ $\varphi(t)$ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb)

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์แม่เหล็กผ่าน (m^2)

2.) กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

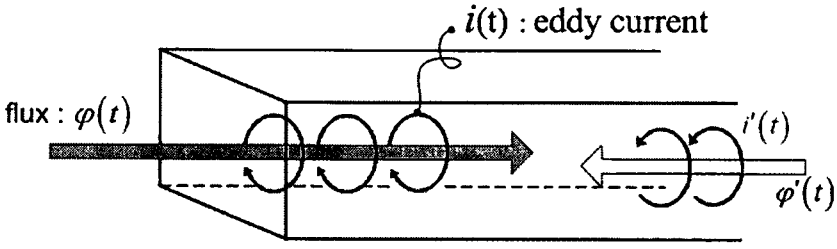
แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ $\varphi(t)$ ตัดผ่านขดลวด ทำให้เกิดกระแสไหลเรียกว่ากระแสเหนี่ยวนำ (induced current; $i(t)$) ซึ่งกระแสเหนี่ยวนำนี้ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความถี่ก็จะเหนี่ยวนำ ทำให้เกิด induced flux; $\varphi'(t)$ ขึ้นต้านกับฟลักซ์เดิม ซึ่งมีค่าเท่ากัน $\varphi(t) = \varphi'(t)$ มีรายละเอียดดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กฎของเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) กระแสไหลวน (Eddy Current)



Eddy current loss : $P_e = i(t)^2 R$

รูปที่ 2.4 หลักการของกระแสไหลวน

1. ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับ (AC flux $\varphi(t)$) เหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น $v(t)$ ที่แกนตามกฎของฟาราเดย์ สมการที่ (2.1-2.2) โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเหนี่ยวนำนั้นจะแปรผันตามความถี่ $\left[v(t) \alpha f\right]$
   ถ้าถือว่าอิมพีแดนซ์ของแกนเป็นเพียงตัวต้านทานอย่างเดียว $\left[Z = R\right]$ และไม่เปลี่ยนค่าไปตามความถี่ ขนาดของกระแสไหลวน (eddy current) จะมีค่าดังสมการที่ (2.3) จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสไหลวนก็แปรผันตามความถี่เช่นกันดังสมการที่ (2.4)

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \tag{2.3}$$

$$\left|i(t)\right| \alpha\ f \tag{2.4}$$

2. การสูญเสียจากกระแสไหลวน (eddy current loss; P_e) จะมีขนาดแปรผันตามความถี่ยกกำลังสองดังสมการที่ (2.5-2.6)

$$P_e = i(t)^2 \times R \tag{2.5}$$

$$P_e \alpha\ f^2 \tag{2.6}$$

4.) การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (induction heating)

การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีหลักการทำงานที่เทียบเคียงได้กับ การสูญเสียในแกนของหม้อแปลงซึ่งเกิดจากมีการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดการสูญเสียในแกน (core loss) 2 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss)
2. การสูญเสียจากฮีสเตอริซีส (hyterisis loss)

ดังสมการต่อไปนี้

$$P_C = P_h + P_e \tag{2.7}$$

$$P_C = K_h f B_{\max}^2 + K_e f^2 B_{\max}^2 \tag{2.8}$$

การสูญเสียในแกนหล็กหรือความร้อนบนชิ้นงาน จะเห็นว่าขึ้นอยู่กับ 2 ค่า คือ f และ $B_{\max}$ สำหรับในหม้อแปลงไฟฟ้าอาจต้องลดการสูญเสีย (P_C) พวกนี้ แต่ในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้องเพิ่มการสูญเสียเหล่านี้ให้มาก วิธีการเพิ่มต้องเพิ่มที่ความถี่ ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการเพิ่ม $B_{\max}$ ซึ่งทำได้เล็กน้อย

การเพิ่มความถี่ทำได้โดยการให้อุปกรณ์สวิทซ์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูง (ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect))

การเพิ่ม $B_{\max}$ ก็คือการแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (H) ทำได้โดยการใช้หม้อแปลงแมทชิ่ง (matching transformer) เพื่อให้สอดคล้องระหว่างโหลดกับพิกัดด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์

(ก.) หลักการเหนี่ยวนำพื้นฐาน

ไฟฟ้านั้นกำเนิดได้โดยเคลื่อนลวดตัวนำตัดสนามแม่เหล็ก ตราบใดที่ยังมีการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์อยู่ระหว่างตัวนำกับสนามแม่เหล็ก ตราบนั้นจะยังคงมีกระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นอยู่ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่าแรงดันเหนี่ยวนำ (induced voltage) และวิธีกำเนิดกระแสไฟฟ้าโดยให้ลวดตัวนำวิ่งตัดสนามแม่เหล็กเช่นนี้ เรียกว่าวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้า (induction)

ปริมาณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำ ขณะแล่นตัดสนามแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายแฟคเตอร์ แฟคเตอร์ที่หนึ่งคือความเร็วที่แล่นตัดสนามแม่เหล็ก วัดในแนวสัมพันธ์ต่อกันและกัน หากความเร็วยิ่งเร็ว แรงดันจะยิ่งสูง แฟคเตอร์ที่สองคือ ความเร็วของสนามแม่เหล็กนั่นเอง ความเข้มสนามแม่เหล็กยิ่งสูง แรงดันเหนี่ยวนำจะสูงขึ้นตาม แฟคเตอร์ที่สามคือ จำนวนรอบขดลวดตัวนำ ยิ่งมีมากรอบวิ่งตัดสนามแม่เหล็ก แรงดันเหนี่ยวนำจะยิ่งสูงมากขึ้น

แรงดันเหนี่ยวนำนี้มีขั้วไฟฟ้า ลักษณะของขั้วจะอยู่ในลักษณะที่เมื่อมีกระแสเหนี่ยวนำแล่นได้มากขึ้น กระแสเหนี่ยวนำดังกล่าวจะทำให้บังเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องไปด้านทานทิศทางการเคลื่อนที่ของขดลวดหรือคอยล์ ปรากฏการณ์เช่นนี้อธิบายได้ด้วยกฎของเล็นซ์ (Lenz's Law) ซึ่งกล่าวว่า "เมื่อมีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ทิศทางของแรงดันเหนี่ยวนำหรือทิศทางที่กระแสเหนี่ยวนำไหล จะเกิดขึ้นในลักษณะที่จะทำให้มีสนามแม่เหล็กใหม่ต้านการหมุนเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำหรือคอยล์นั้นๆ"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปองค์ประกอบที่กำหนดความเข้มของแรงดันเหนี่ยวนำ

1. ความเร็วที่ตัวนำแล่นตัดสนามแม่เหล็ก
2. ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
3. จำนวนรอบขดลวด

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในลวดตัวนำแต่ละเส้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่คูณกับความเร็วที่ลวดตัวนำนั้นแล่นตัดสนามแม่เหล็ก [8]
แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าประมาณผลคูณของฟลักซ์แม่เหล็กกับความเร็ว

อีกประการหนึ่งขั้วไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและทิศทางที่กระแสเหนี่ยวนำไหลพิจรณาได้จากทิศทางของการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับตัวนำที่แล่นตัดสนามแม่เหล็กนั้น

ทิศทางของการเคลื่อนที่สัมพันธ์ เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสเหนี่ยวนำดั้งนั้นเพื่อเป็นการทบทวนเรื่องไฟฟ้าจากอำนาจแม่เหล็กอีกครั้ง จะสรุปได้ดังนี้

1. ลวดตัวนำที่แล่นตัดสนามแม่เหล็กจะให้เกิดแรงไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นเป็นผลให้มีกระแสเหนี่ยวนำไหลในลวดตัวนำนั้นๆ
2. หากลวดตัวนำแล่นตัดสนามแม่เหล็กเร็วขึ้นเท่าไหร่ หากลวดตัวนำนั้นยิ่งมีมากรอบ และหากความเข้มสนามแม่เหล็กยิ่งสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะยิ่งมากขึ้นตาม ผลคือจะมีกระแสเหนี่ยวนำไหลได้มากขึ้น
3. หากกลับทางทิศเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ ขั้วไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าก็กลับทางกันด้วย ผลคือกระแสเหนี่ยวนำจะไหลกลับทางด้วยเช่นกัน
4. ไม่ว่าตัวเคลื่อนที่จะเป็นลวดตัวนำ หรือ สนามแม่เหล็ก ผลจะออกมาเหมือนกันเสมอ

(ข.) <u>หลักการเหนี่ยวนำเพิ่มเติม</u>

จากกฎของฟาราเดย์ที่กล่าวว่า "สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตัดผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นกระแสไหล" ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำและอิมพีแดนซ์ของตัวนำนี้เองที่ทำให้เกิดกระแสไหลขึ้นได้ กระแสที่เกิดขึ้นดังกล่าวนั้น คือ กระแสไหลวน

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าตามสมการที่ (2.9)

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}^2 \qquad (2.9)$$

เมื่อ

$$K_e = \frac{2\pi^2 N^2 A_C{}^2}{R} \qquad (2.10)$$

K_e ขึ้นอยู่กับรูปร่างและสมบัติของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากความร้อนจาก eddy current แล้วยังมีความร้อนจาก hyterisis loss $\left(P_h\right)$ ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ลูปของ B-H curve

$$P_h = k_h f B_{\max}^n \tag{2.11}$$

$n \approx 1.6$ สำหรับสารแม่เหล็ก

n คือ Steinmetz exponent (1.5-2.5)

k_h คือ ค่าคงที่ของสารที่ใช้

5.) ปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect)

ปรากฏการณ์ที่ผิว คือ ปรากฏการณ์อันเนื่องจากการทำงานที่ความถี่สูงทำกระแสไหลที่ผิวตัวนำที่ระดับความลึกของกระแสที่ไหลบนแท่งตัวนำ คือ

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \tag{2.12}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \tag{2.13}$$

d คือ ความลึกผิวที่กระแสไฟฟ้าลดลงเหลือ 37 % ของที่ผิว (m)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ของตัวนำ (Ω.m)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_r คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permeability)

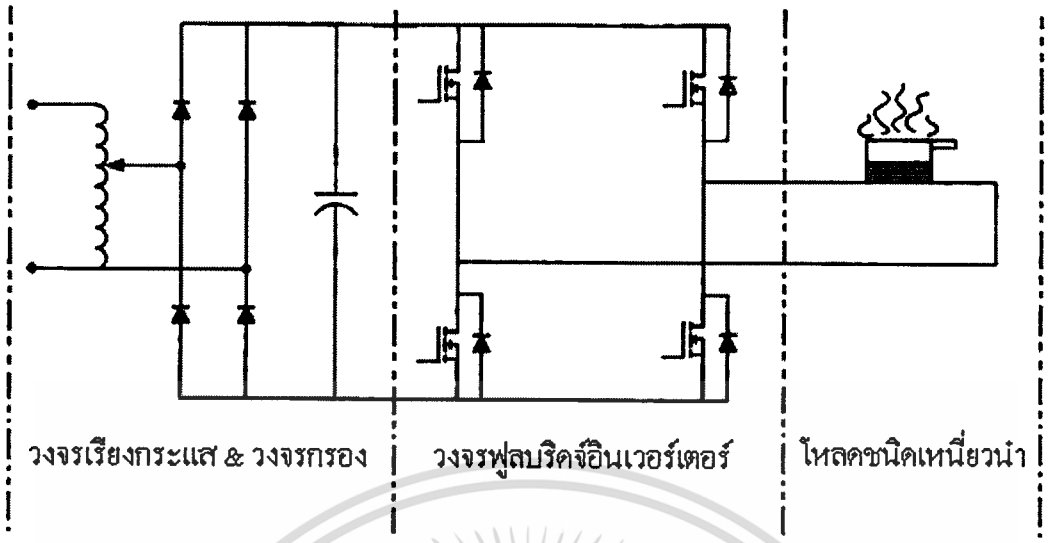
f คือ ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้โหลด (Hz)

2.1.2 องค์ประกอบของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

องค์ประกอบของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. วงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง
2. วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์
3. โหลดชนิดเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

2.2 ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC)

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) คือ ความสามารถของอุปกรณ์ หรือระบบที่จะทำงานในสภาวะแวดล้อมที่มีคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ [9] ตามต้องการ โดยไม่เสื่อมคุณภาพ หรือเกิดความเสียหาย ทำงานไม่ผิดพลาด และไม่ก่อให้เกิดคลื่นรบกวนแก่ตัวเอง และต่อสภาพแวดล้อม หรืออุปกรณ์อื่น หรือระบบอื่นด้วย หรือความหมายสั้นๆ คือ ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดย EMC เกิดขึ้นเนื่องจากมีการรบกวน หรือคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ซึ่งการรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ หรือระบบต่างๆ ของตัวเอง หรือที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด หรือเสื่อมสภาพ และนำไปสู่ความเสียหายในที่สุด ซึ่งมีแหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยกัน 2 กลุ่มคือ

1. แหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนตามธรรมชาติ ได้แก่ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า การคายประจุไฟฟ้า คลื่นคอสมิก และคลื่นจากดวงอาทิตย์

2. แหล่งกำเนิดคลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ หรือระบบที่มนุษย์สร้างขึ้น ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็ค-ทรอนิคส์ด้านการสื่อสาร ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เครื่องมือ เครื่องจักรกลฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าอุตสาหกรรม และที่ใช้ในบ้านเรือน รวมทั้งในสำนักงาน

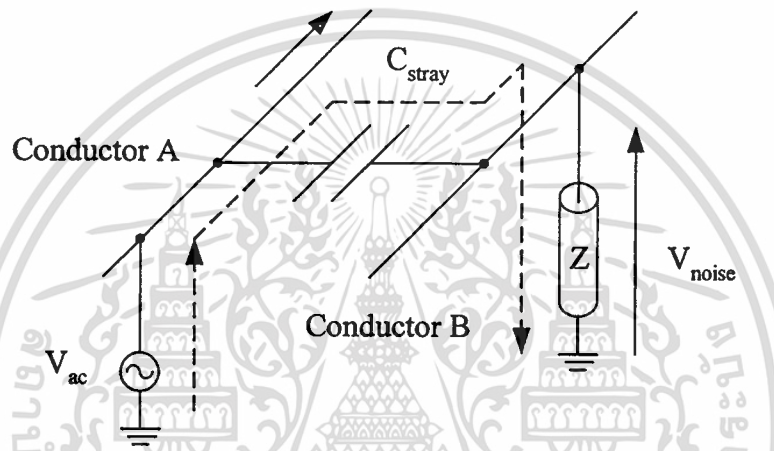
การแพร่กระจาย ของคลื่นสัญญาณรบกวนจะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ การแพร่กระจายผ่านทางอากาศและการแพร่กระจายผ่านทางตัวนำ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเน้นถึงการศึกษาการแพร่กระจายผ่านทางตัวนำเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

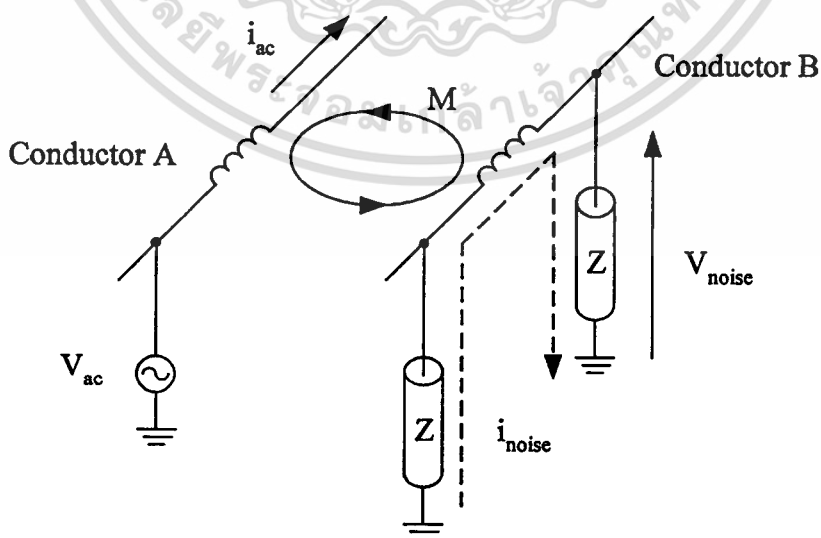
2.2.1 การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ

การเกิดสัญญาณรบกวนในตัวนำ หรือ จะเกิดขึ้นเนื่องจากมีการเชื่อมโยง (coupling) โดยผ่านค่าตัวเก็บประจุแฝง (stray capacitance) หรือเกิดจากการเหนี่ยวนำ (stray inductance) โดยผ่านตัวเหนี่ยวนำแฝง (stray inductance) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7

ซึ่งการแพร่กระจายผ่านทางตัวนำนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 โหมดด้วยกันคือ โหมดแตกต่าง (differential mode) ซึ่งเกิดจากสัญญาณระหว่างสายกับสาย และโหมดร่วม (common mode) ซึ่งเกิดจากสัญญาณระหว่างสายกับกราวนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) และรูปที่ 2.8 (ข) ตามลำดับ

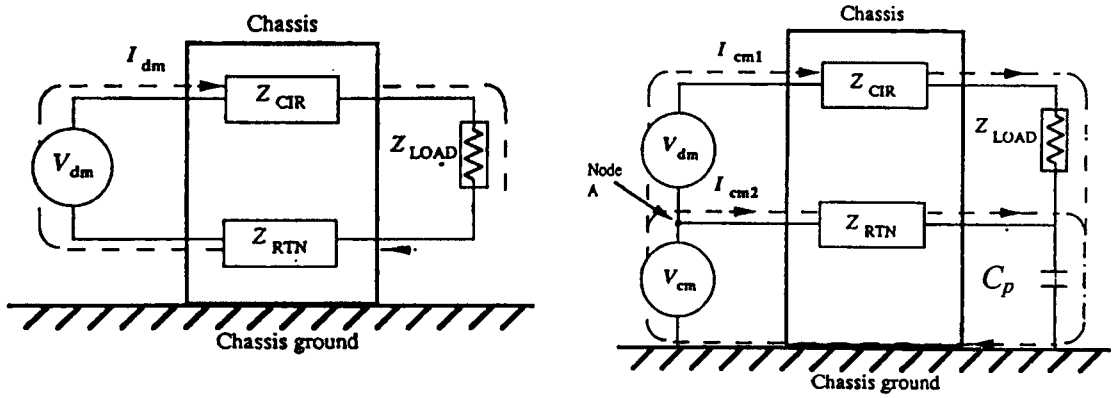


รูปที่ 2.6 การเชื่อมโยงทางตัวเก็บประจุแฝง



รูปที่ 2.7 การเชื่อมโยงผ่านทางตัวเหนี่ยวนำแฝง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 2.8 การเกิดสัญญาณรบกวน
(ก) โหมดแตกต่าง (differential mode)
(ข) โหมดร่วม (common mode)

2.2.2 องค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์

ในการออกแบบวงจรอิเล็คทรอนิกส์ หรือวงจรอื่นๆ ที่ทำงานที่ความถี่สูง โดยใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำก็ตาม ผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบแฝงที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์เหล่านั้นด้วย โดยพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ดังนี้

ก. ตัวเก็บประจุ

อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุในทางอุดมคติจะมีอัตราการลดลงที่ 20 dB/decade หรือ 1/f ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นจนถึงอนันต์ ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุคือ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.14}$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตัวเก็บประจุจะมีค่าอินดักทีฟ และค่าอิมพีแดนซ์จะเพิ่มขึ้น ด้วยอัตรา 20 dB/decade โดยค่าความเหนี่ยวนำ จะเป็นสัดส่วนกับความชันของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์โดยที่ย่านความถี่รอบๆ จุดเรโซแนนซ์ ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะไม่มีประโยชน์มากๆ ในการนำมาพิจารณาใช้งาน ซึ่งการวัดค่าความจุ ของตัวเก็บประจุ หรือค่าความเหนี่ยวนำจะมีความยากลำบากในการหาย่านความถี่ที่เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าเข้าใกล้เดียงศูนย์

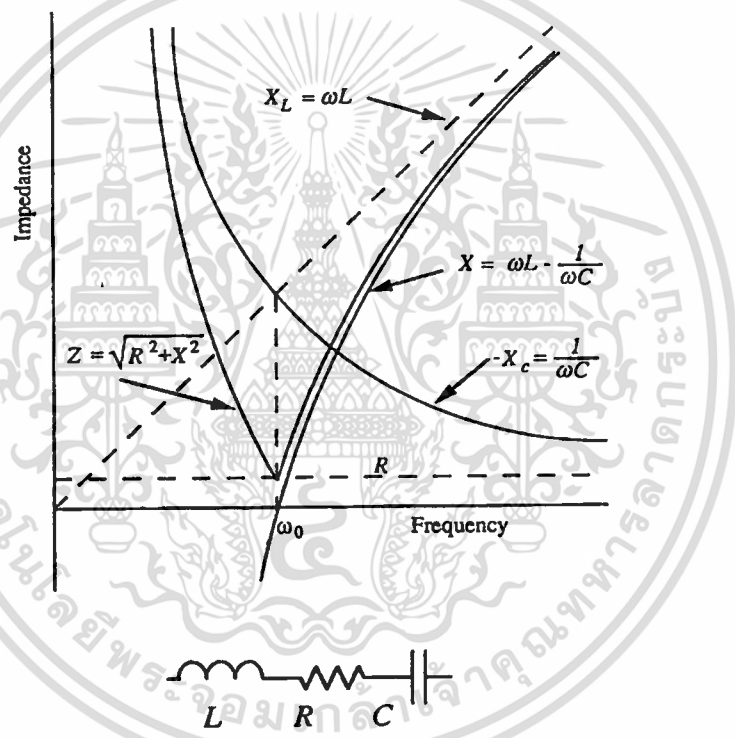
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กราฟในรูปที่ 2.9 แสดงการพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์โมเดลตัวเก็บประจุทั่วไป ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานตัวเก็บประจุ และค่าความต้านทาน โดยแยกกันในแต่ละเส้น ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.15)

$$Z = \sqrt{\left(R^2 + X^2\right)} \tag{2.15}$$

ซึ่งที่ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีผลของค่าตัวเก็บประจุ และที่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีผลของค่าตัวเหนี่ยวนำ โดยโมเดลนี้เป็นแบบอย่างง่ายที่นิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์ EMI และ ฟิลเตอร์ ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำมากตั้งแต่ดีซี ไปตลอดถึงย่านความถี่วิทยุ



รูปที่ 2.9 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

ข. ตัวเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุของตัวเก็บประจุ เป็นสิ่งที่พิจารณาควบคู่กัน โดยมีโมเดลของตัวเหนี่ยวนำที่เป็นแบบอย่างง่าย ซึ่งต่อแบบขนานกันกับอุปกรณ์ทางอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งอิมพีแดนซ์ในทางอุดมคติจะมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตรา 20 dB/decade โดยเป็นสัดส่วนกับความถี่ และ ค่าความเหนี่ยวนำจะเป็นสัดส่วนกับความชันของกราฟอิมพีแดนซ์ซึ่งค่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

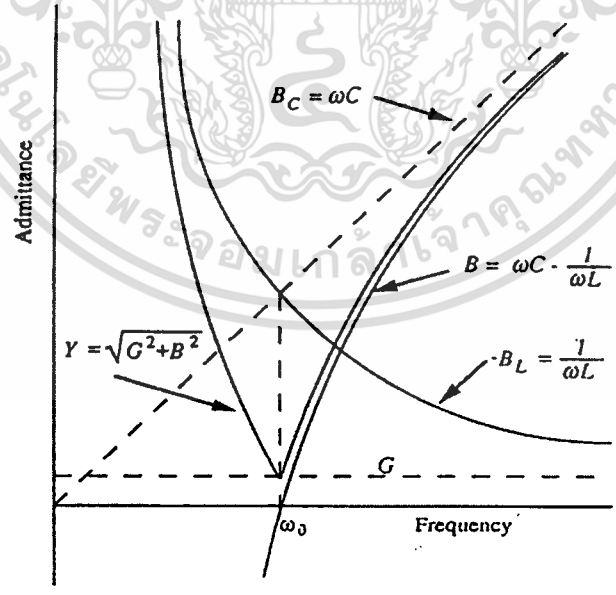
60523

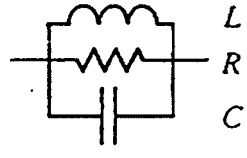
เมื่อ C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าของคาปาซิทีฟและค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตรา 20 dB/decade และที่ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะเป็นสัดส่วนกับความชันของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และในย่านความถี่รอบๆ จุดเรโซแนนซ์ ค่าความเหนี่ยวนำจะไม่มีประโยชน์มากๆในการนำมาใช้งาน ซึ่งการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ หรือค่าความเหนี่ยวนำจะมีความยากลำบากในการหาย่านความถี่ที่เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ เนื่องจากกราฟอิมพีแดนซ์จะมีค่าเข้าใกล้เดียงศูนย์ [10]

กราฟในรูปที่ 2.10 แสดงการพล็อตค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์โมเดลตัวเก็บประจุทั่วไป ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานตัวเก็บประจุ และค่าความต้านทาน โดยแยกกันในแต่ละเส้น ซึ่งค่าแอดมิตแตนซ์นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.17)

$$Y = \sqrt{\left(G^2 + B^2\right)} \tag{2.17}$$

ซึ่งที่ความถี่ที่ต่ำกว่า ω_0 จะมีผลของค่าตัวเก็บประจุ และที่ความถี่ที่สูงกว่า W_0 จะมีผลของค่าตัวเหนี่ยวนำ โดยโมเดลนี้เป็นแบบอย่างง่ายที่นิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์ EMI และ ฟิลเตอร์ ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำมาก





รูปที่ 2.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ความสัมพันธ์ของการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้า กับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์

3.1 บทนำ

การศึกษาการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (induction heating) ไม่ว่าจะเป็นการหลอมโลหะ การหล่อโลหะ การเชื่อมโลหะ การหุงต้มแบบเหนี่ยวนำหรือวิธีประยุกต์การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนวิธีอื่นๆ ล้วนอาศัยหลักการเดียวกันคือ การทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดลวด ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูง ตัดผ่านโลหะและเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น ตามหลักการของกระแสไหลวน (eddy current) ซึ่งในการศึกษาเรื่องนี้ มักประสบกับปัญหาที่เหมือนกันอย่างหนึ่งจากหลายๆ ปัญหานั่นคือ ปัญหาเรื่องการแกว่งของสัญญาณทางไฟฟ้า (damped oscillation) ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณกระแสหรือแรงดัน และมักแก้ปัญหานี้ด้วยวงจรสนับเบอร์ (snubber circuit) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ[9] อีกทั้งไม่สามารถอธิบายสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดการแกว่งได้ด้วยวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำเพียงตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำดังเช่นที่ใช้กันโดยทั่วไป

ในการวิจัยเฉพาะบทนี้จึงได้เสนอหลักการ ความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้ากับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์หรือเรียกโดยย่อว่า หลักการ "ความสัมพันธ์ของการแกว่ง (oscillated relation)" [11-12] ซึ่งเป็นการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ปรากฏการณ์ชั่วขณะร่วมกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์อธิบายการแกว่งดังกล่าว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการให้ความเข้าใจเป็นอย่างมาก สรุปได้ดังนี้

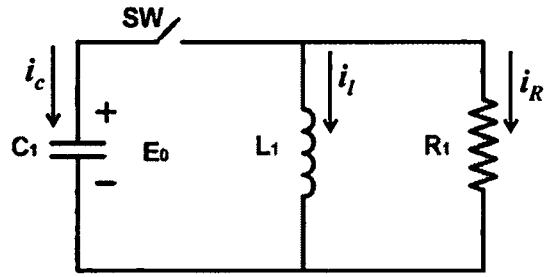
1. สามารถอธิบายและบอกสาเหตุของการเกิดการแกว่งได้อย่างชัดเจน
2. สามารถหาวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่สอดคล้องกับการแกว่งได้
3. สามรถหาค่า R, L และ C ของวงจรสมมูลได้โดยง่ายและแม่นยำสอดคล้องกับการแกว่งที่เกิดขึ้น
4. สามารถทำนายลักษณะการแกว่งได้ว่ามีความถี่และจำนวนยอดเท่าไหร่
5. เป็นหลักการที่สามารถประยุกต์ได้กับโหลดชนิดเหนี่ยวนำโดยทั่วไป

3.2 หลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง

3.2.1 การเกิดการแกว่งในวงจร *RLC* แบบขนาน

รูปที่ 3.1 แสดงวงจรขนานเรโซแนนซ์ประกอบไปด้วย R_1, L_1 และ C_1 โดย C_1 ถูกอัดประจุจนมีความต่างศักย์เริ่มต้นเป็น E_0 โวล์ท เมื่อสวิทซ์ SW เริ่มทำงานปรากฏการณ์ชั่วขณะก็เกิดขึ้นโดยมีเงื่อนไข ดังสมการที่ (3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน *RLC*

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's current law) ที่ว่า "ในวงจรไฟฟ้า ผลรวมทางพีชคณิตของกระแสไฟฟ้า ณ จุดใดๆมีค่าเป็นศูนย์" เมื่อสวิทช์ SW เริ่มทำงาน จะได้

$$i_c + i_l + i_R = 0 \tag{3.1}$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} + \frac{v_{C1}}{R_1} + \frac{1}{L_1}\int v_{C1} dt = 0 \tag{3.2}$$

$$\frac{d^2 v_{C1}}{dt^2} + \left(\frac{1}{R_1 C_1}\right)\frac{dv_{C1}}{dt} + \left(\frac{1}{L_1 C_1}\right) v_{C1} = 0 \tag{3.3}$$

$$D^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1}\right) D + \frac{1}{L_1 C_1} = 0 \tag{3.4}$$

$$D = -\frac{1}{2R_1 C_1} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2R_1 C_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C_1}} \tag{3.5}$$

$$D = -\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^{\,2} - \omega_0^{\,2}} \tag{3.6}$$

โดยที่ $\alpha_1 = \dfrac{1}{2R_1 C_1}$; $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{1}{L_1 C_1}}$; $\omega_1 = \sqrt{\alpha_1^{\,2} - \omega_0^{\,2}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ที่ (3.6) ตามหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1. กรณี Under damped oscillation เกิดเมื่อ $\alpha_1 < \omega_0$
2. กรณี Critical damped oscillation เกิดเมื่อ $\alpha_1 = \omega_0$
3. กรณี Over damped oscillation เกิดเมื่อ $\alpha_1 > \omega_0$

กรณีแรก Under damped oscillation เป็นกรณีที่มีการแกว่งเกิดขึ้นโดยมีเงื่อนไขดังอสมการที่ (3.7)

$$\alpha_1 < \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{3.7}$$

จากรูปที่ 3.1 สมมุติให้ $L_1 = 40\mu\text{H}, \quad C_1 = 60p\text{F}, \quad R_1 = 10\Omega$

และมีค่าความถี่เชิงมุม ω_1 ของการแกว่ง (ω_1: angular frequency of damped oscillation) ซึ่งในที่นี้จะแสดงผลด้วยค่าเป็นบวกเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (3.7ก)

$$\omega_1 = \left|\sqrt{\alpha_1^2 - \omega_0^2}\right| \tag{3.7ก}$$

แต่ในการวิเคราะห์การแกว่งในกรณีนี้ซึ่งเป็นผลมาจากขดลวดเหนี่ยวนำถือได้ว่าค่าของ α_1^2 มีผลต่อค่า ω_1 ในสมการที่ (3.7ก) น้อยมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า L_1, C_1 และ R_1 ด้วย ดังแสดงให้เห็นชัดในสมการที่ที่ (3.7ข-3.7ง) จนสามารถละได้ ดังนั้นค่าความถี่เชิงมุม ω_1 ของการแกว่งจะใกล้เคียงกับค่า ω_0 ดังแสดงในสมการที่ (3.8) และ (3.9)

$$\alpha_1^2 = \left(-\frac{1}{2R_1C_1}\right)^2 = 0.64\times10^{12} \tag{3.7ข}$$

$$\omega_0^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{L_1C_1}}\right)^2 = 400\times10^{12} \tag{3.7ค}$$

$$\omega_0^2 - \alpha_1^2 \approx \omega_0^2 \tag{3.7ง}$$

นำสมการที่ (3.7ง) แทนค่าในสมการที่ (3.7ก) จะได้ดังสมการที่ (3.8)

$$\omega_1 \approx \omega_0 \tag{3.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_1 \approx \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{3.9}$$

เพราะฉะนั้น

$$D \approx -\alpha_1 \pm \sqrt{-\omega_0^{\,2}} \tag{3.10}$$

จากวิธีการทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าแรงดัน $v_{C1}(t)$ **ในวงจรได้ ดังแสดงในสมการที่** (3.11)

$$v_{C1}(t) = e^{-\alpha_1 t}\left[A\cos(\omega_0 t) + B\sin(\omega_0 t)\right] \tag{3.11}$$

เมื่อค่าเริ่มต้น

$$v_{C1}(0) = E_0 \tag{3.12}$$

แทนค่าสมการที่ (3.11) **ด้วยสมการที่** (3.12) **จะได้ดังสมการที่** (3.13)

$$A = E_0 \tag{3.13}$$

จากสมการที่ (3.2) **เมื่อแทนค่าด้วย** $t = 0$ **จะได้ค่าเริ่มต้นอีกหนึ่งค่าดังสมการที่** (3.16)

$$C_1 \frac{dv_{C1}(0)}{dt} + \frac{v_{C1}(0)}{R_1} + \frac{1}{L_1}\int_0^t v_{C1}(0)\,dt = 0 \tag{3.14}$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}(0)}{dt} + 0 + \frac{v_{C1}(0)}{R_1} = 0 \tag{3.15}$$

$$\frac{dv_{C1}(0)}{dt} = -\frac{E_0}{R_1 C_1} \tag{3.16}$$

$$\frac{dv_{C1}(t)}{dt} = A\left[-\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\sin(\omega_0 t) - \alpha_1 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_0 t)\right] +$$

$$B\left[\,\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_0 t) - \alpha_1 e^{-\alpha_1 t}\sin(\omega_0 t)\right] \tag{3.17}$$

เนื่องจากค่า α_1 **มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า** ω_0 **เพราะฉะนั้นจากสมการที่** (3.17) **สามารถแทนได้ด้วยสมการที่** (3.18)

เอกสารนี้เป็นการสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dv_{C1}(t)}{dt} = A\left[-\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\sin(\omega_0 t)\right] + B\left[\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_0 t)\right] \tag{3.18}$$

แทนค่าสมการที่ (3.16) ในสมการที่ (3.18) ได้สมการที่ (3.19)

$$-\frac{E_0}{R_1 C_1} = A\left[-\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\sin(\omega_0 t)\right] + B\left[\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_0 t)\right] \tag{3.19}$$

เมื่อ $t = 0$ แก้สมการที่ (3.19) หาค่า B ได้ดังสมการที่ (3.20)

$$B = -\frac{E_0}{\omega_0 R_1 C_1} \tag{3.20}$$

เปรียบเทียบสมการที่ (3.13) กับสมการที่ (3.20) จะเห็นว่าค่า B มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับ A ดังนั้น จากสมการที่ (3.11) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (3.21)

$$v_{C1}(t) = E_0 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_1 t) \tag{3.21}$$

หาค่ากระแส $i_{C1}(t)$ จากสมการที่ (3.22)

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_{C1}(t)}{dt} \tag{3.22}$$

$$i_{C1}(t) = C_1 E_0 \frac{d}{dt}\left[e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_0 t)\right] \tag{3.23}$$

จากสูตรทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.24) สามารถจัดรูปโดยการละส่วนที่มีผลต่อสมการที่น้อยมากออกและแจงสมการที่ (3.23) ใหม่ ได้ดังสมการที่ (3.25) และ (3.27)

$$\int e^{ax}\cos(bx)dx = \left[\frac{e^{ax}}{a^2 + b^2}\right]\left[a\cos(bx) + b\sin(bx)\right] \tag{3.24}$$

$$i_{C1}(t) = C_1 E_0\left[-\omega_0 e^{-\alpha_1 t}\sin(\omega_0 t) - \alpha_1 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_0 t)\right] \tag{3.25}$$

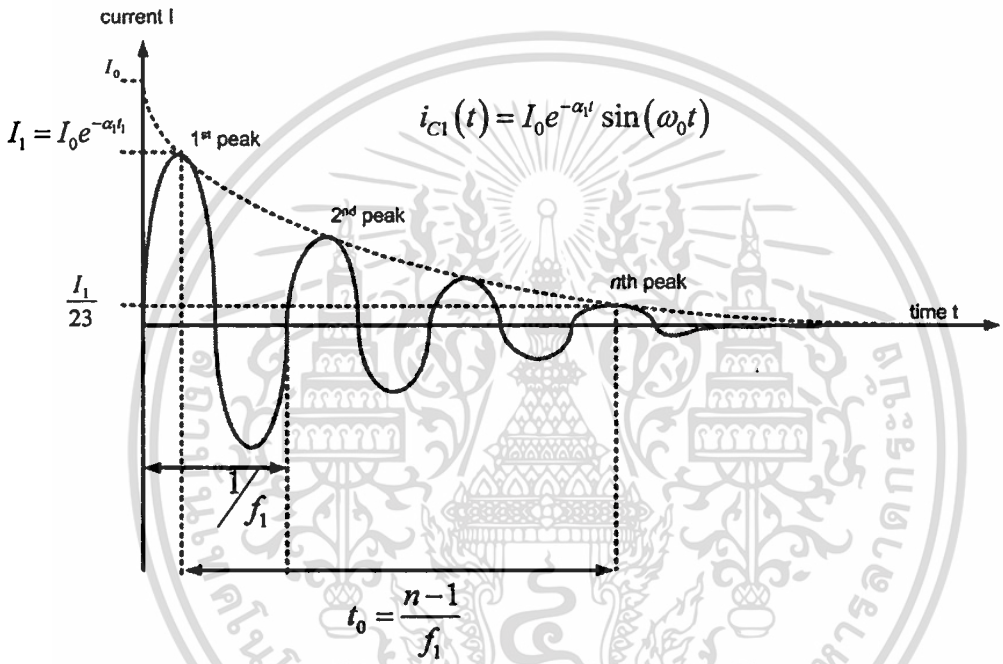
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_{C1}(t) = -\omega_0 C_1 E_0 e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega_0 t) \tag{3.26}$$

$$i_{C1}(t) = I_0 e^{-\alpha_1 t} \sin(\omega_0 t) \tag{3.27}$$

โดยที่

$$I_0 = -\frac{E_0}{\omega_0 C_1} = -\frac{E_0}{X_{C1}} \tag{3.28}$$



รูปที่ 3.2 การแกว่งรูปทั่วไปที่ยังไม่ถูกจัดให้อยู่ในเทอมของ S_1

จากรูปที่ 3.2 เป็นรูปกราฟการแกว่งของสัญญาณกระแส โดยที่ค่าต่างๆยังอยู่ในเทอมของตัวแปรที่ทราบค่าได้ยากสำหรับระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เช่น $\alpha_1 = \frac{1}{2R_1C_1}$, f_1 , L_1 เป็นต้น ซึ่งการหาค่าของตัวแปรเหล่านี้และจัดค่าต่างๆในรูปที่ 3.2 ในอยู่ในเทอมของตัวแปร S_1 ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยสะดวกจะได้อธิบายโดยละเอียดในส่วนต่อไป

3.2.2 การจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของ S_1

เหตุผลที่ต้องจัดรูปสมการที่ต่างๆให้อยู่ในรูปของ S_1 เพราะในหลักการความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์อาศัยนิยามของ S_1 เป็นตัวเชื่อมโยง ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในรายละเอียดดังสมการที่ (3.30) และ (3.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สภาวะเรโซแนนซ์จะได้

$$X_1 = \omega_1 L_1 = \frac{1}{\omega_1 C_1} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \tag{3.29}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{3.29ก}$$

จากค่าความคมที่ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรแบบขนาน S_1 นิยามได้ดังสมการที่ (3.30)

$$S_1 = \frac{R_1}{X_1} \tag{3.30}$$

จัดรูปใหม่จากอสมการที่ (3.7) และ สมการที่ (3.9), (3.29), (3.30) ทำให้ได้เงื่อนไขในเทอมของค่า S_1 ดังสมการที่ (3.30ข)

$$\alpha_1 = \frac{1}{2R_1 C_1} = \frac{1}{2S_1 X_1 C_1} = \frac{\omega_1 C_1}{2S_1 C_1} = \frac{2\pi f_1}{2S_1} \tag{3.30ก}$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi f_1}{S_1} \tag{3.30ข}$$

โดยที่ f_1 คือความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร

การจัดรูปอสมการที่เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแกว่งในเทอมของ S_1 แสดงได้ดังอสมการที่ (3.30ค-ฉ) และอสมการที่ (3.30ช)

$$\alpha_1 < \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{3.30ค}$$

$$\frac{1}{2R_1 C_1} < \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{3.30ง}$$

$$\frac{1}{2(S_1 X_1) C_1} < \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \tag{3.30จ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{2} < \frac{(S_1 X_1)C_1}{\sqrt{L_1 C_1}} \qquad (3.30ฉ)$$

จัดรูป

$$\frac{(S_1 X_1)C_1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \omega_1 S_1 \sqrt{L_1 C_1} = S_1 \frac{\sqrt{L_1 C_1}}{\sqrt{L_1 C_1}} = S_1 \qquad (3.30ช)$$

แทนค่าสมการที่ (3.30ช) ในอสมการที่ (3.30ฉ) จะได้อสมการที่เงื่อนไขการเกิดการแกว่งในเทอมของ S_1 ดังอสมการที่ (3.30ซ)

$$S_1 > \frac{1}{2} \qquad (3.30ซ)$$

ถ้าวงจรไม่มีการสูญเสียเลยกระแสจะมีค่าสูงสุด I_0 ที่ t = 0 ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ (3.30ฌ)

$$I_0 = \frac{E_0}{X_1} \qquad (3.30ฌ)$$

แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงวงจรย่อมต้องมีการสูญเสีย ดังนั้นค่ากระแสเริ่มต้นที่ $t = 0$ ไม่เท่ากับ I_0 แต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนมีค่าสูงสุดเมื่อสวิทซ์เริ่มทำงานผ่านไปได้เป็นเวลา t_1 วินาที

โดยที่

$$t_1 = \frac{1}{4f_1} \qquad (3.30ญ)$$

$$e^{-\alpha_1 t_1} = e^{-\frac{\pi}{4S_1}} \qquad (3.30ฎ)$$

ดังนั้นจะได้ค่ากระแสสูงสุดค่าแรก I_1 ดังสมการที่ (3.31)

$$I_1 = I_0 e^{-\frac{\pi}{4S_1}} \qquad (3.31)$$

กำหนดให้ t_0 เป็นค่าเวลาตั้งแต่ค่ากระแสสูงสุดยอดที่ 1 ถึงค่ากระแสสูงสุดยอดที่ n ของกราฟการแกว่งโดย t_0 แสดงได้ดังสมการที่ (3.32)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_0 = \frac{n-1}{f_1} \tag{3.32}$$

ถ้า I_n คือค่ายอดกระแสสูงสุด ณ ยอดที่ n ใดๆ

$$I_n = I_1 e^{-\alpha_1 t_0} \tag{3.33}$$

$$\frac{I_1}{I_n} = e^{-\frac{\pi(n-1)}{S_1}} \tag{3.34}$$

หากยอมรับว่าค่า 1/23 เท่าของค่ากระแสสูงสุดแรกนั้นมีค่าน้อยมากจนประมาณเป็นศูนย์ [1] จะได้ว่าค่า I_n มีค่าเป็น 1/23 เท่าของค่า I_1 ดังนั้นจากสมการที่ (3.34) จะได้

$$\frac{I_1}{\frac{1}{23}I_1} = e^{-\frac{n(n-1)}{S_2}} \tag{3.35}$$

เมื่อแก้สมการที่ (3.35) จะได้สมการที่ (3.36) ซึ่งเป็นค่าจำนวนยอดการแกว่งนั่นเอง

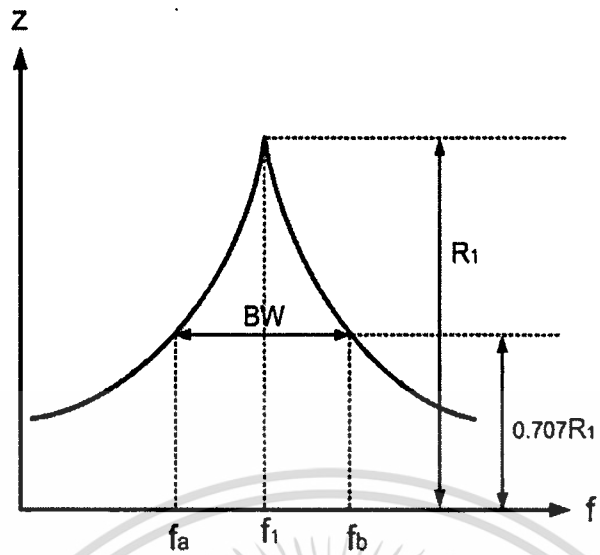
$$n \approx S_2 + 1 \tag{3.36}$$

แปลงสมการที่ (3.32) ด้วยอสมการที่ (3.36) จะได้ สมการที่ (3.37)

$$t_0 = \frac{S_2}{f_2} \tag{3.37}$$

จากสมการที่ทั้งหมดที่แสดงข้างต้น ถ้าพิจารณาจะเห็นได้ว่าถ้าทราบค่า f_1, S_1 และ X_1 ทั้ง 3 ตัวก็จะสามารถวาดกราฟการแกว่งได้ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากหลักการของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ ดังแสดงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานดังรูปที่ 3.3 สามารถหาค่า S_1 ได้ตามสมการที่ (3.38) [13]

$$S_1 = \frac{f_1}{BW} \tag{3.38}$$

$$BW = f_b - f_a \tag{3.39}$$

โดยที่ R_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดสูงสุดหรือค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์

f_1 คือ ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน

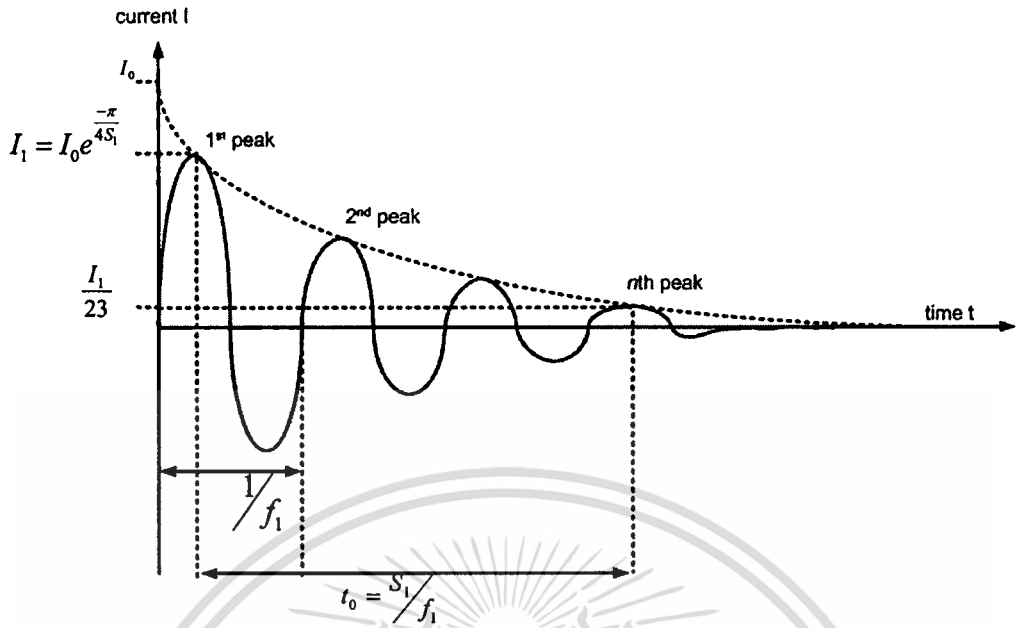
BW คือ ค่าแบนด์วิดท์ (bandwidth)

อาศัยนิยามค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์แบบขนานตามสมการที่ (3.30) จะสามารถหาค่า X_1 ได้ดังนี้

$$X_1 = \frac{R_1}{S_1} \tag{3.40}$$

เมื่อทราบค่าทั้ง 3 ค่า คือ f_1, S_1 และ X_1 แล้วก็สามารถเขียนกราฟการแกว่งได้และมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กราฟการแกว่งในเทอมของ S_1

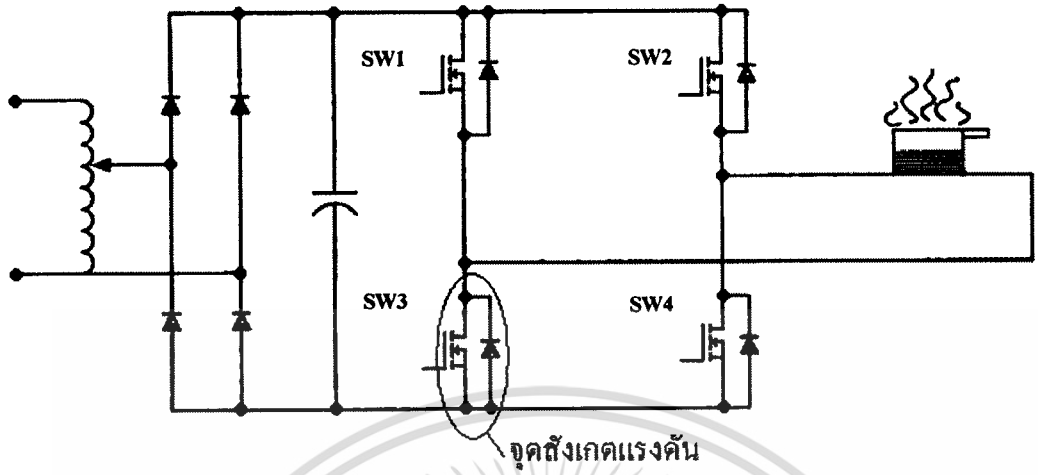
กล่าวได้ว่ากราฟการแกว่งในรูปที่ 3.4 ได้มาจากความสัมพันธ์ของหลักการและนิยามทางไฟฟ้าของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ในรูปที่ 3.3 ซึ่งความสัมพันธ์ของทั้งสองรูปดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น เสนอเป็นหลักการความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้ากับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ หรือเรียกให้สั้นว่า "หลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง" ซึ่งจะได้ยืนยัน แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการนำไปประยุกต์ใช้และประโยชน์ของหลักการนี้ในส่วนของการทดลองและการจำลองต่อไป

3.3 การทดลองและการวิเคราะห์

3.3.1 การทดลอง ผลการทดลองและประเด็นปัญหา

ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบที่ใช้ทดลอง มีวงจรฟูลบริดจ์เวอร์เตอร์เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลด มีวงจรแทนระบบดังแสดงในรูปที่ 3.5 โหลดเป็นหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำ ซึ่งนำไปวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และเมื่อระบบทำงานโดยที่ยังไม่ได้มีการใช้เทคนิคใดๆช่วย มีเพียงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงกับโหลดเท่านั้น ผลการวัด v_{ds} คร่อมสวิตช์ที่จุดสังเกตแรงดันมีลักษณะดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



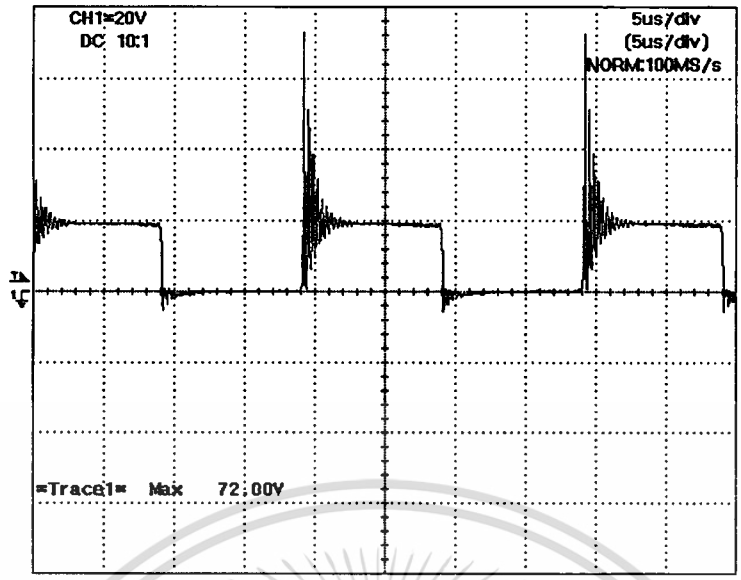
รูปที่ 3.5 วงจรแทนระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 3.5 ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบประกอบไปด้วยออโตทรานซ์ฟอร์เมอร์ (autotransformer) ที่ใช้ปรับแรงดันด้านเข้าให้อยู่ในระดับที่อุปกรณ์ในระบบโดยเฉพาะสวิตช์สามารถทนได้ โดยมีส่วนของวงจรเรียงกระแสบริดจ์แบบเต็มคลื่นทำงานร่วมกับตัวเก็บประจุทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกกรองให้เรียบแล้ว (มีแรงดันริปเปิ้ลต่ำ) ซึ่งอาจเรียกแรงดัน ณ จุดนี้ว่า แรงดันเชื่อมกระแสตรง (V_{dc} link) ซึ่งต่อไปก็จะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ที่สวิตช์ทำงานเป็นคู่ๆ สลับกันไป คือ

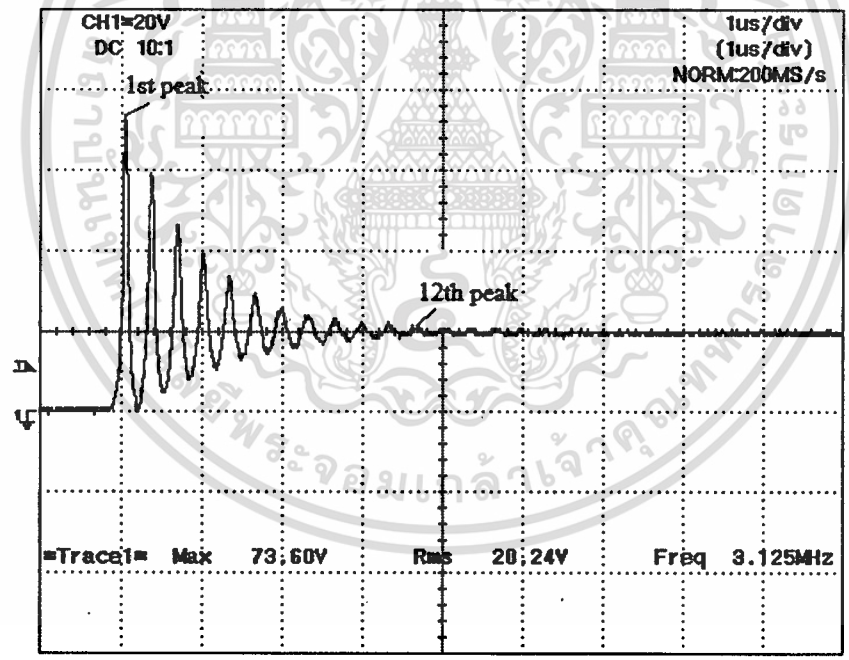
ขณะที่ SW1, SW4 ทำงาน SW2, SW3 ก็จะหยุดทำงาน
เมื่อ SW2, SW3 ทำงาน SW1, SW4 ก็จะหยุดทำงาน สลับกันไปอย่างนี้เรื่อยๆ ด้วยความถี่ที่สามารถปรับได้ระหว่าง 10-80 กิโลเฮิรตซ์ ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าความถี่สูงจ่ายให้แก่โหลดชนิดเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเป็นขดลวดพันรอบหม้อเหล็กชนิดสแตนเลส ทั้งนี้ชนิดของภาชนะหรือหม้อควรเป็นวัสดุประเภท Ferromagnetic ที่มีค่า permeability สูง

เมื่อทดลองให้ระบบทำงานที่ความถี่สวิตชิ่ง 50 กิโลเฮิรตซ์แล้ววัดแรงดันที่จุดสังเกตจะพบว่าแรงดันมีการแกว่งผสมอยู่ด้วยดังรูปที่ 3.6 ซึ่งไม่เป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเพียงอย่างเดียวตามหลักการโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แรงดัน v_{ds} ที่คร่อมสวิตช์ ณ จุดสังเกตแรงดัน



รูปที่ 3.7 แรงดัน v_{ds} คร่อมสวิตช์ ณ จุดสังเกตแรงดันที่ขยายจากรูปที่ 3.6

ประเด็นปัญหาของการแกว่ง

จากรูปที่ 3.5 หากเป็นในทางทฤษฎี v_{ds} ที่คร่อมสวิตช์ ณ จุดสังเกตแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ควรจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมปกติ แต่ในผลจากการทดลองจริงแรงดันนั้นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมที่มีการแกว่งรวมอยู่ด้วยดังรูปที่ 3.6 และ3.7 ประเด็นปัญหาในการวิเคราะห์คือ **"การแกว่งของแรงดันนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร มีสาเหตุมาจากอะไร"**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

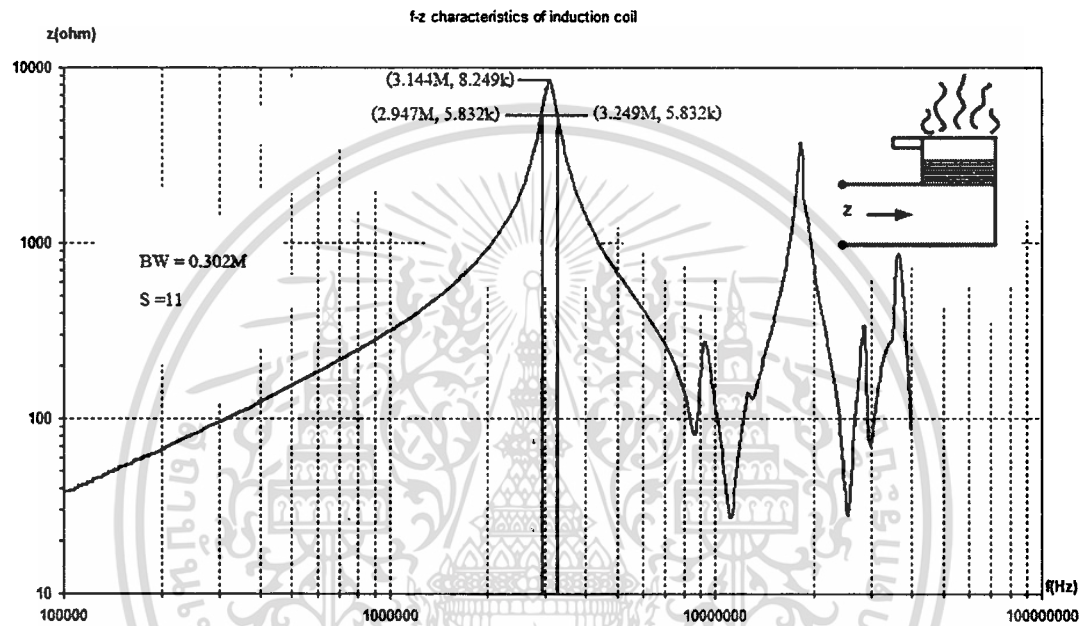
3.3.2 การวิเคราะห์

สมมุติฐาน

การแกว่งของแรงดันนี้น่าจะเป็นผลมาจากโหลดเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์

อาศัยหลักการ "ความสัมพันธ์ของการแกว่ง" ในข้างต้นพิจารณากราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของโหลดตัวถูกสันนิษฐานว่าเป็นต้นเหตุการแกว่งซึ่งมีผลดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟสอดคล้องกับกับกราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ ของวงจรขนานเรโซแนนซ์ดังอธิบายไว้ข้างต้น ซึ่งอาศัยหลักการดังกล่าวก็จะสามารถทราบค่าต่างๆได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1(ก) และคำนวนค่าเกี่ยวกับการแกว่งได้ดังตารางที่ 3.1(ข) โดยในการทดลองกำหนดให้ E_0 มีค่าเท่ากับ 50 โวล์ท จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ในตารางที่ 3.1(ข)กับผลการทดลองจริงดังแสดงในรูปที่ 3.7 มีความสอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และจากการคำนวณเพิ่มเติม

ข้อมูลจาก f-z ch.	
f_1	3.144 MHZ
BW_1	0.302 MHz
$S_1=f_1/BW_1$	11
R_1	8.249 kΩ
$X_1=R_1/S_1$	750 Ω

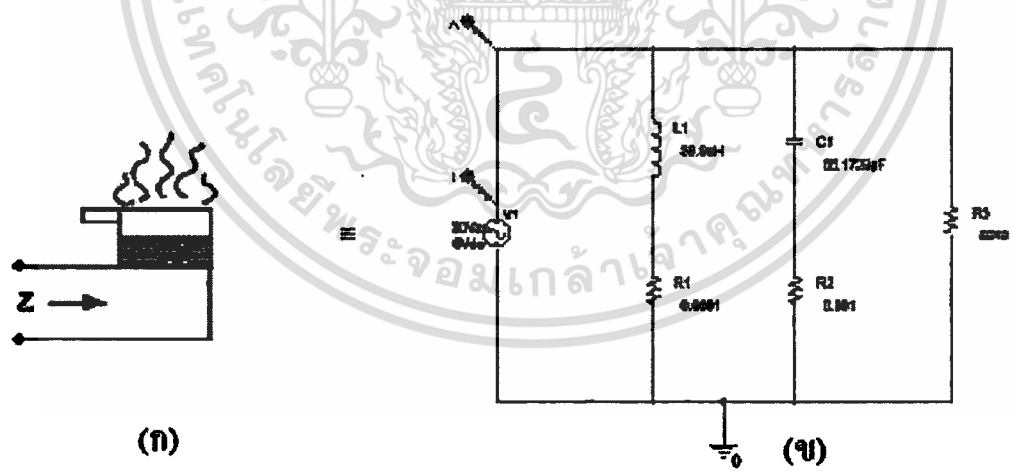
(ก)

ข้อมูลจากคำนวณเพิ่มเติม	
f_1	3.144 MHZ
$E_1=I_0X_1e^{A-\pi/4S_1}$	47 V
$n=S_1+1$	11+1=12
$t_0=S_1/f_1$	3.4987 Ω
$E_n=E_1/23$	2 V

(ข)

3.4 การจำลองด้วยโปรแกรม Pspice

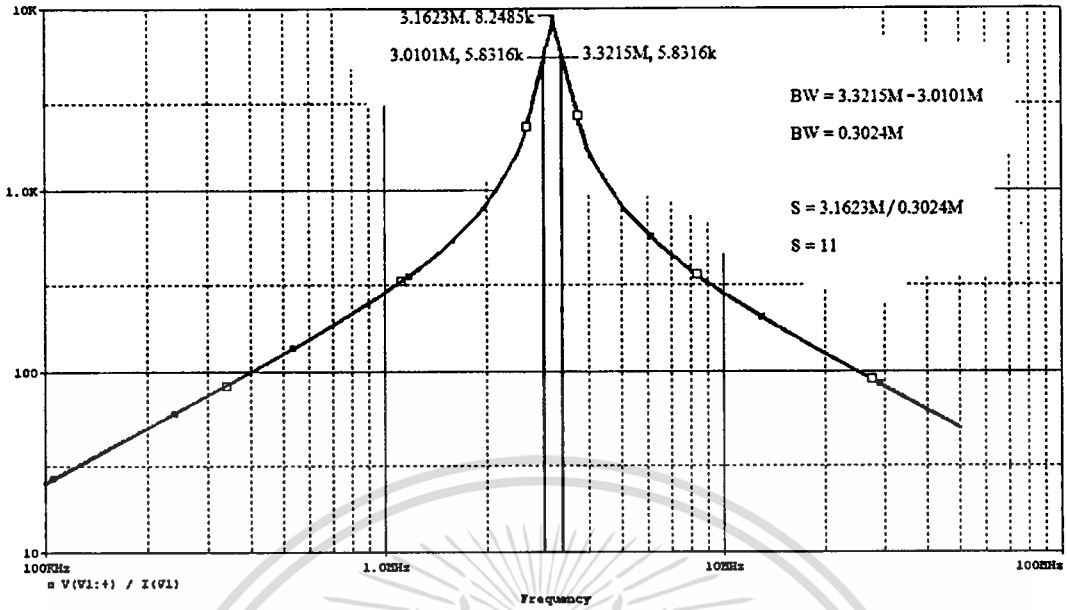
ถ้าสมมุติให้หม้อหุงต้มเหนี่ยวนำมีวงจรสมมูล (equivalent circuit) ดังรูปที่ 3.9 และนำวงจรสมมูลนี้มาจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ได้กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 3.10



(ก) (ข)

รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลของหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.9

จากรูปที่ 3.10จะเห็นว่าลักษณะของกราฟสอดคล้องกับกับกราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรขนานเรโซแนนซ์ดังอธิบายไว้ข้างต้น ซึ่งอาศัยหลักการดังกล่าวก็จะสามารถทราบค่าต่างๆได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2(ก) และคำนวนค่าเกี่ยวกับการแกว่งโดยให้ I_0 มีค่าเป็น 0.1 A ได้ดังตารางที่ 3.2(ข)

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์จากการจำลอง และจากการคำนวณเพิ่มเติม

ข้อมูลจาก f-z จากการจำลอง	
f_1	3.1623 MHZ
BW_1	0.3024 MHz
$S_1=f_1/BW_1$	11
R_1	8.2485 k Ω
$X_1=R_1/S_1$	750 Ω

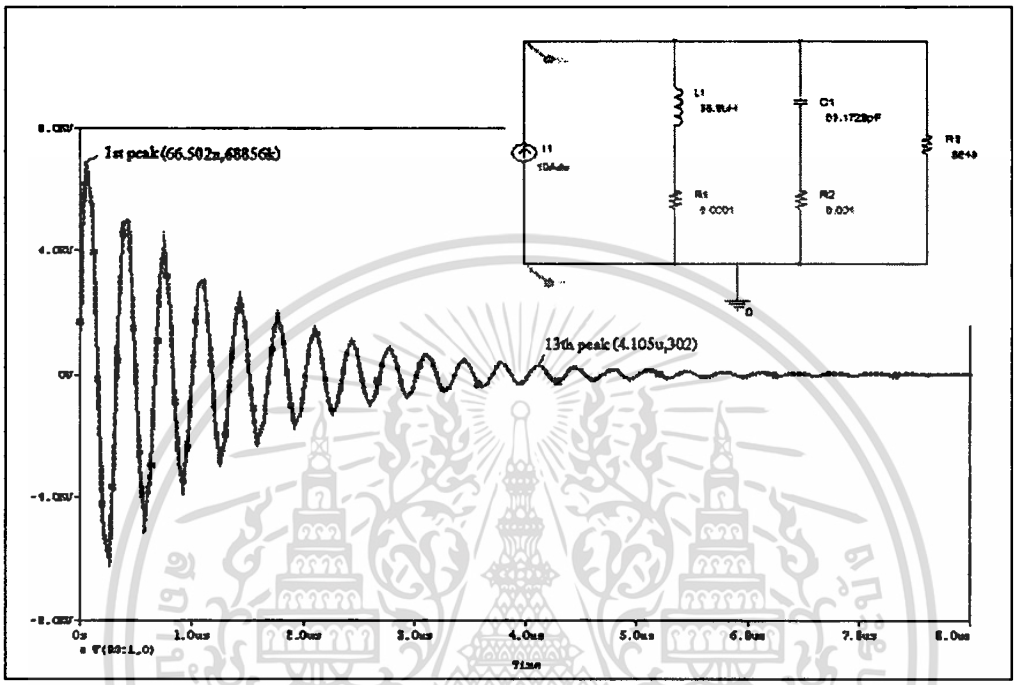
(ก)

ข้อมูลจากคำนวณเพิ่มเติม	
f_1	3.1623 MHZ
$E_1=I_0X_1e^{(-\pi/4S_1)}$	70 V
$n=S_1+1$	11+1=12
$t_0=S_1/f_1$	3.4784 μs
$E_n=E_1/23$	3 V

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการแกว่งของวงจรได้ผลดังรูปที่ 3.11 ซึ่งผลที่ออกมาสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการดังกล่าวใช้ได้ผลดี มีผลจากการจำลองโดยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมาก (รูปที่ 3.7 กับรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 วงจรจำลองและกราฟการแกว่ง

3.5. สรุปผล

1. สามารถใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์เสนอวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่สอดคล้องกับการแกว่งที่เกิดขึ้นและสามารถหาคำนวณหาค่าคงที่ R, L และ C ของวงจรสมมูลนั้นได้

2. การใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของโหลดชนิดเหนี่ยวนำสามารถอธิบายกลไกการเกิดการแกว่งในวงจรไฟฟ้าได้

3. หลักการความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ที่เสนอสามารถทำนายลักษณะของกราฟการแกว่งที่เกิดในวงจรนั้นได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะความถี่ของการแกว่ง และจำนวนยอดของการแกว่ง แต่ยังทำนายความสูงของยอดแรกของการแกว่งได้ไม่แม่นยำนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะยังคงมีองค์ประกอบอื่นที่สำคัญและมีอิทธิพลมากกว่าเช่นความชันของสัญญาณขับเกตเช่น rise time กับ fall time เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากหลักการความสัมพันธ์ของการแกว่งที่เสนอทำให้ทราบเงื่อนไขสำคัญในเทอมของค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ (S) คือสำหรับการจะกำจัดการแกว่งไม่ให้เกิดขึ้นนั้น ต้องทำให้ค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์มีค่าต่ำกว่า 1/2 ให้ได้

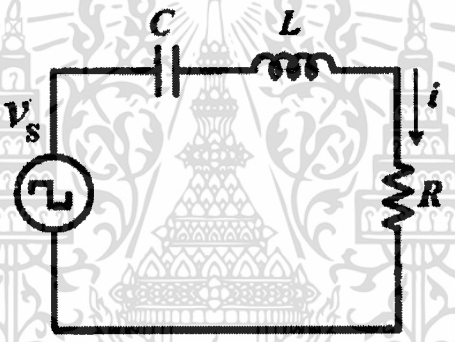
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การวิเคราะห์เทคนิคเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม

4.1 บทนำ

เทคนิคเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม เป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีโดยทั่วไป เรียกชื่อตามสมการคุณลักษณะเฉพาะทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองและลักษณะการต่อทางไฟฟ้าเป็นแบบอนุกรม ดังสมการที่ (4.1ก) และรูปที่ 4.1 ตามลำดับ

$$\frac{d^2v_C}{dt^2}+\left(\frac{R}{L}\right)\frac{dv_C}{dt}+\left(\frac{1}{LC}\right)v_C=0 \qquad (4.1ก)$$



รูปที่ 4.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่มีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแบบสี่เหลี่ยม

ในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้เทคนิคเรโซแนนซ์โดยสามารถเขียนวงจรจำลองได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรมีสองส่วนด้วยกันคือส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายกับส่วนที่เป็นโหลด สำหรับส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 4.2 และส่วนโหลดนั้นเป็น *RLC* ต่อกันแบบอนุกรม ถ้าสมมุติให้ค่า *RLC* แต่ละตัวมีค่าคงที่เมื่อความถี่เปลี่ยนไป จะสามารถเขียนจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของโหลดนั้นๆ ได้มีลักษณะทำนองเดียวกับรูปที่ 4.3

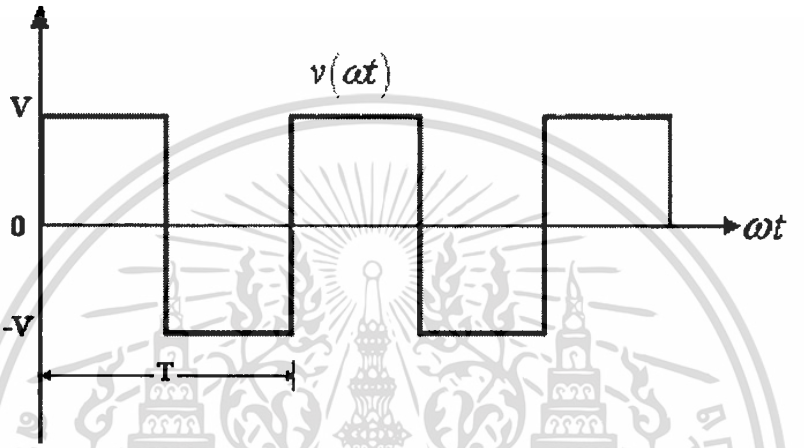
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์รวมของโหลดเปลี่ยนไปเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง ลักษณะของกราฟแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงขาลง จุดต่ำสุด และช่วงขาขึ้น

ช่วงขาลง ค่าอิมพีแดนซ์ค่อยๆลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแสดงว่าโหลดแสดงคุณสมบัติของตัวเก็บประจุตามสูตร $Z_C=\dfrac{1}{2\pi fC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>จุดต่ำสุด</u> เป็นจุดที่ขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเท่ากับขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำทำให้หักล้างกันพอดี โหลดจึงเปรียบเสมือนเป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ณ ความถี่นี้ที่เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์

<u>ช่วงขาขึ้น</u> ค่าอิมพีแดนซ์ค่อยๆเพิ่มเมื่อความถี่สูงขึ้นแสดงว่าโหลดมีคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำตามสูตร $Z_L = 2\pi fL$



รูปที่ 4.2 สัญญาณแหล่งจ่ายแรงดันแบบสี่เหลี่ยม

ปัญหาที่น่าสนใจ

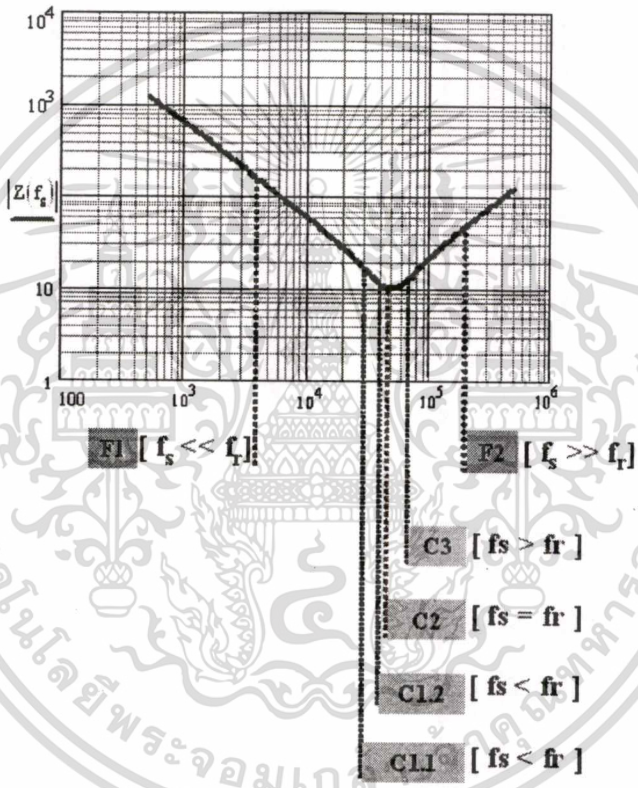
ในการศึกษาพฤติกรรมของวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม (รูปที่ 4.1) มักประสบปัญหาหลายประการด้วยกัน แต่ปัญหาที่น่าสนใจและมักจะเป็นปัญหาสำคัญพื้นฐานซึ่งได้อธิบายในวิทยานิพนธ์บทนี้มี 2 ประเด็นคือประเด็นการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณของกระแสที่ไหลในกรณีต่างๆและประเด็นอิทธิพลของค่าความคม (S) ณ จุดเรโซแนนซ์ ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแส

<u>ประเด็นแรก</u> การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสที่ไหลในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมชนิดที่มีแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม (เป็นชนิดที่ใช้ทั่วไป) ที่เป็นปัญหาเพราะแหล่งจ่ายไม่เป็นชนิดไซน์ (pure sine) แต่เป็นแบบสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์มูลฐานและฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่ ทำให้การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสจริงที่หาจากการรวมทุกความถี่ (แบบอนุกรมฟูริเยร์) มีขั้นตอนที่ยุ่งยากมากและถึงแม้จะสามารถหาลักษณะของสัญญาณกระแสได้จริง แต่ก็ไม่ก็ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมความสัมพันธ์ของสัญญาณกระแสในแต่ละกรณีได้ ในวิทยานิพนธ์บทนี้ได้เสนอการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสดังกล่าวด้วยวิธี “การสับการแกว่ง” (oscillating chopping) ที่มีความสะดวก ไม่ซับซ้อนยุ่งยากและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังสามารถแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณกระแสในแต่ละกรณีได้ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

<u>ประเด็นที่สอง</u> เป็นการวิเคราะห์ประกอบการจำลองเพื่ออธิบายในเรื่องอิทธิพลของค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ (S) ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแส โดยอาศัยการจัดรูปสมการทางคณิตศาสตร์ประกอบกับหลักการที่เกี่ยวกับการแกว่งข้างต้น ซึ่งจะทำให้สามารถเข้าใจได้โดยง่ายว่า S มีผลต่อลักษณะของสัญญาณกระแสได้อย่างไรและทำไมต้อง $S > 5$ กระแสถึงจะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์ที่สุด

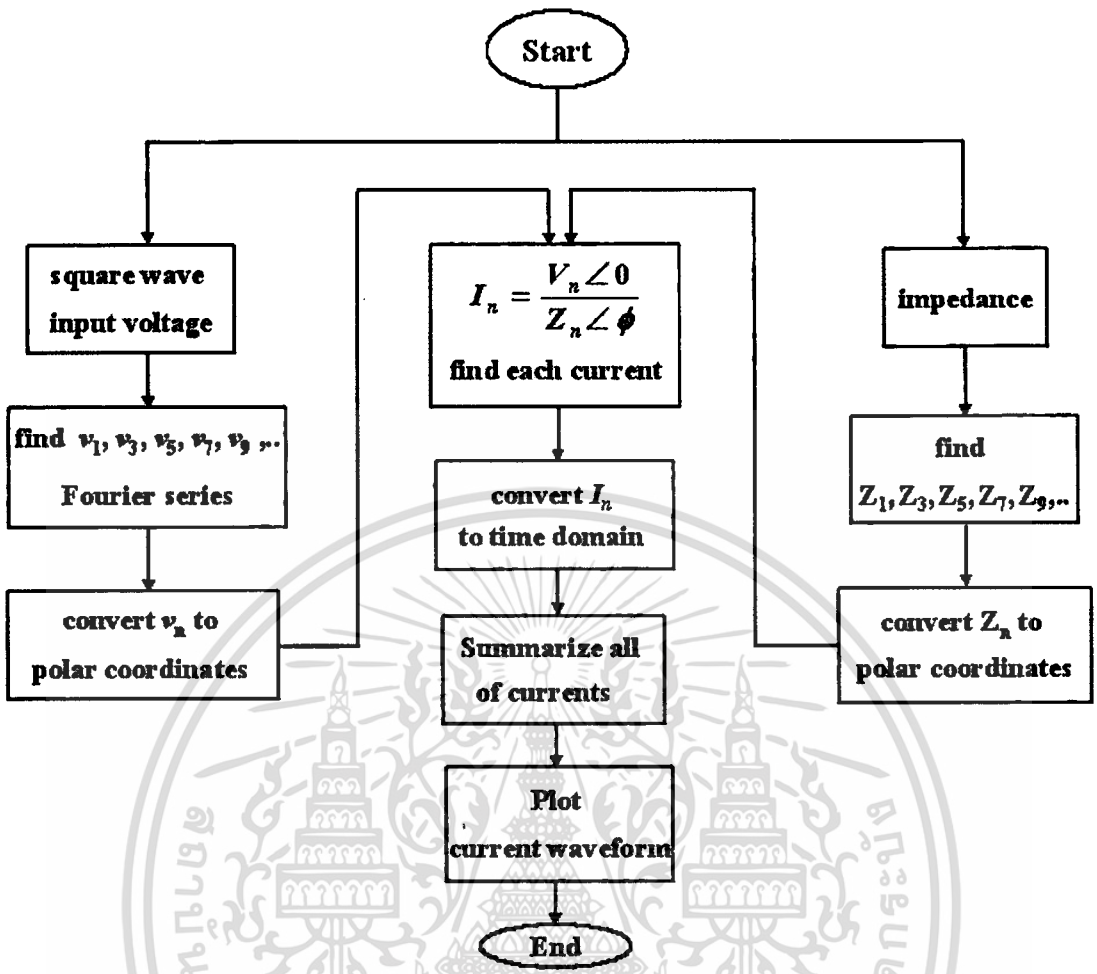


รูปที่ 4.3 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจร *RLC* แบบอนุกรม

4.2 การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series)

การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแส ในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่มีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 4.1 นั้นสามารถทำได้ด้วยหลักการของอนุกรมฟูริเยร์ซึ่งมีความยุ่งยากหลายขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์นั้น ต้องแปลงแรงดันด้านเข้าแบบสี่เหลี่ยมจากโดเมนเวลา (time domain) มาอยู่ในโดเมนความถี่ (frequency domain) ก่อน แล้วค่อยแปลงแรงดันแต่ละความถี่ให้อยู่ในรูปแบบโพลาร์ (polar form) ในทำนองเดียวกัน ก็ต้องแปลงค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่ให้อยู่ในรูปแบบโพลาร์ก่อนเช่นกัน จากนั้นก็สามารถหากระแสแต่ละความถี่ในรูปแบบโพลาร์ แล้วแปลงกระแสที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปแบบโพลาร์ให้อยู่ในโดเมนเวลา แล้วรวมกระแสแต่ละความถี่นั้น (ในโดเมนเวลา) ก็จะได้รูปกระแสรวมที่ต้องการ

4.2.1 อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันแบบสี่เหลี่ยม

แหล่งจ่ายแรงดันแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 4.2 สามารถกระจายด้วยหลักการของอนุกรมฟูริเยร์ ซึ่งมีสูตรรูปทั่วไป ดังสมการที่ (4.1) ถึง สมการที่ (4.3) และได้อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันแบบสี่เหลี่ยมดังสมการที่ (4.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \qquad (4.1ข)$$

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(\omega t)d\omega t \qquad (4.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(\omega t)\cos(n\omega t)d\omega t \qquad (4.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(\omega t)\sin(n\omega t)d\omega t \qquad (4.4)$$

กระจายแรงดันแบบสี่เหลี่ยมได้

$$v(t) = \frac{4V}{\pi}\left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) + \frac{1}{7}\sin(7\omega t) + \frac{1}{9}\sin(9\omega t) + \ldots\right] \qquad (4.5)$$

$$\omega = 2\pi f_1 \qquad (4.5ก)$$

โดยที่ $v(t)$ คือแรงดันแบบสี่เหลี่ยม

T คือคาบเวลา (period)

f_1 คือความถี่หลักมูล

n เป็นเลขจำนวนเต็ม 1, 2, 3, 4,.....

จากสมการที่ (4.5) จะเห็นว่าแรงดันแบบสี่เหลี่ยมประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นความถี่หลักมูล (fundamental frequency) ส่วนที่เป็นฮาร์มอนิกเลขคี่ ในวิทยานิพนธ์จะวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 9 เพราะถือว่า ฮาร์มอนิกลำดับอื่น ที่สูงกว่าฮาร์มอนิกอันดับที่ 9 มีผลต่อการวิเคราะห์น้อยมาก สำหรับส่วนที่เป็นความถี่หลักมูลและส่วนที่เป็นฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7, 9 เขียนแยกจากสมการที่ (4.5) ได้ดังสมการที่ (4.6) ถึงสมการที่ (4.10) ตามลำดับ

$$v_1(t) = \frac{4V}{\pi}\sin(\omega t) \quad \text{หรือ} \quad |V_1|\angle 0 \qquad (4.6)$$

$$v_3(t) = \frac{4V}{3\pi}\sin(3\omega t) \quad \text{หรือ} \quad |V_3|\angle 0 \qquad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

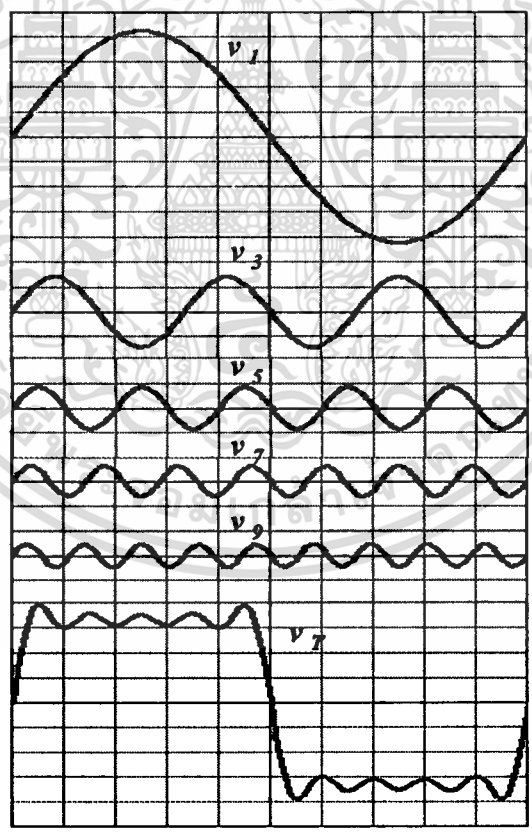
$$v_5(t) = \frac{4V}{5\pi}\sin(5\omega t) \quad \text{หรือ} \quad |V_5|\angle 0 \tag{4.8}$$

$$v_7(t) = \frac{4V}{7\pi}\sin(7\omega t) \quad \text{หรือ} \quad |V_7|\angle 0 \tag{4.9}$$

$$v_9(t) = \frac{4V}{9\pi}\sin(9\omega t) \quad \text{หรือ} \quad |V_9|\angle 0 \tag{4.10}$$

โดยที่ $$|V_n| = \frac{4V}{n\pi} \quad ; \text{ เมื่อ} \quad n = 1, 2, 3,..... \tag{4.11}$$

นำแรงดันมูลฐานถึงแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 9 ดังสมการที่ (4.6) ถึงสมการที่ (4.10) ตามลำดับและรวมแรงดันทั้งหมดเป็น $v_T(t)$ เขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แรงดันแบบสี่เหลี่ยมของแหล่งจ่ายที่ได้จากการกระจายด้วยอนุกรมฟูริเยร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 อิมพีแดนซ์ของโหลด

จากรูปที่ (4.1) สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด RLC อนุกรมได้ด้วยการมองในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถ้าถือว่าค่า RLC เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ การหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดสามารถหาได้ดังนี้

$$Z(f_s) = R + j\left(2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C}\right) \tag{4.12}$$

หรือเขียนสมการที่ (4.12) ให้อยู่ในรูปแบบโพลาร์ดังสมการที่ (4.13)

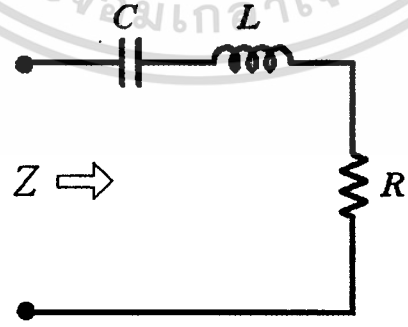
$$Z_n = |Z_n| \angle \theta_n \tag{4.13}$$

โดยที่

$$|Z_n| = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f_n L - \frac{1}{2\pi f_n C}\right)^2} \tag{4.14}$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi f_n L - \frac{1}{2\pi f_n C}}{R}\right) \tag{4.15}$$

$$n = 1, 2, 3, \ldots\ldots \tag{4.16}$$



รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ของ RLC อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแบบสี่เหลี่ยมที่ประกอบไปด้วยแรงดันมูลฐาน แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7, และ 9 ดังกล่าวไว้แล้วข้างต้น เพราะฉะนั้นการหาค่าอิมพีแดนซ์ก็ทำนองเดียวกัน คือต้องหาค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละความถี่ ซึ่งได้ค่าดังสมการที่ (4.17) ถึงสมการที่ (4.21)

$$Z_1 = R + j\left(2\pi f_1 L - \frac{1}{2\pi f_1 C}\right) \quad \text{หรือ} \quad |Z_1|\angle\theta_1 \tag{4.17}$$

$$Z_3 = R + j\left(2\pi f_3 L - \frac{1}{2\pi f_3 C}\right) \quad \text{หรือ} \quad |Z_3|\angle\theta_3 \tag{4.18}$$

$$Z_5 = R + j\left(2\pi f_5 L - \frac{1}{2\pi f_5 C}\right) \quad \text{หรือ} \quad |Z_5|\angle\theta_5 \tag{4.19}$$

$$Z_7 = R + j\left(2\pi f_7 L - \frac{1}{2\pi f_7 C}\right) \quad \text{หรือ} \quad |Z_7|\angle\theta_7 \tag{4.20}$$

$$Z_9 = R + j\left(2\pi f_9 L - \frac{1}{2\pi f_9 C}\right) \quad \text{หรือ} \quad |Z_9|\angle\theta_9 \tag{4.21}$$

4.2.3 สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์

การหาลักษณะของสัญญาณกระแสทำได้โดย การหากระแสแต่ละความถี่ก่อนแล้วค่อยนำมารวมกันและจัดให้อยู่ในฟังก์ชันโดเมนเวลา ซึ่งการหากระแสแต่ละความถี่นั้นหาได้ตามความสัมพันธ์พื้นฐานทั่วไป ดังสมการที่ (4.22)

$$I_n = \frac{|V_n|\angle 0}{|Z_n|\angle\theta_n} \quad \text{หรือ} \quad i_n(t) = |I_n|\sin(n\omega t) \tag{4.22}$$

$$|I_n| = \frac{|V_n|}{|Z_n|} \tag{4.23}$$

จากสมการที่ (4.22) นำมาเขียนตั้งแต่ค่ากระแสมูลฐานจนถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 9 ได้ดังสมการที่ (4.24) ถึงสมการที่ (4.28) และสมการที่ (4.29) เป็นการรวมสัญญาณกระแสแต่ละความถี่เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = \frac{|V_1|}{|Z_1|}\angle -\theta_1 \quad \text{หรือ} \quad i_1(t) = |I_1|\sin(\omega t + \theta_1) \tag{4.24}$$

$$I_3 = \frac{|V_3|}{|Z_3|}\angle -\theta_3 \quad \text{หรือ} \quad i_3(t) = |I_3|\sin(3\omega t + \theta_3) \tag{4.25}$$

$$I_5 = \frac{|V_5|}{|Z_5|}\angle -\theta_5 \quad \text{หรือ} \quad i_5(t) = |I_5|\sin(5\omega t + \theta_5) \tag{4.26}$$

$$I_7 = \frac{|V_7|}{|Z_7|}\angle -\theta_7 \quad \text{หรือ} \quad i_7(t) = |I_7|\sin(7\omega t + \theta_7) \tag{4.27}$$

$$I_9 = \frac{|V_9|}{|Z_9|}\angle -\theta_9 \quad \text{หรือ} \quad i_9(t) = |I_9|\sin(9\omega t + \theta_9) \tag{4.28}$$

$$I_T = I_1 + I_3 + I_5 + I_7 + I_9 \tag{4.29}$$

4.2.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์

การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยอนุกรมฟูริเยร์แบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 กรณี (ตามรูปที่ 3) คือกรณี F1, C1.1, C1.2, C2, C3 และF2

<u>กรณี F1</u> $[f_s << f_r]$

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- วงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 250$ kHz

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 10n$F

<u>การวิเคราะห์</u>

กระจายแรงดันแหล่งจ่ายด้วยอนุกรมฟูริเยร์ตามสมการที่ (4.6-4.10) ได้แรงดันมูลฐานและฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 และ 9 ดังนี้

$$v_1(t) = \frac{4\times 300}{\pi}\sin(3.14\times 10^6 t) \quad \text{หรือ} \quad 382\angle 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_3(t)=\frac{382}{3}\sin\left(3\times3.14\times10^6 t\right) \quad \text{หรือ} \quad 127\angle0$$

$$v_5(t)=\frac{382}{5}\sin\left(5\times3.14\times10^6 t\right) \quad \text{หรือ} \quad 76\angle0$$

$$v_7(t)=54\sin\left(7\times3.14\times10^6 t\right) \quad \text{หรือ} \quad 54\angle0$$

$$v_9(t)=42\sin\left(9\times3.14\times10^6 t\right) \quad \text{หรือ} \quad 42\angle0$$

แรงดันแต่ละความถี่จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 ถึงตอนนี้ถือว่าเสร็จขั้นตอนในส่วนของแรงดันแบบสี่เหลี่ยมตามแผนภาพ (ด้านซ้าย)ในรูปที่ 4.4 ต่อไปเป็นการหาค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Z_1=10+j\left\{2\pi(50{,}000)\left(40\times10^{-6}\right)-\frac{1}{2\pi(50{,}000)\left(10\times10^{-9}\right)}\right\} \quad \text{หรือ} \quad 305.9\angle-1.538$$

$$Z_3=10-68.40j \quad \text{หรือ} \quad 69.1\angle-1.426$$

$$Z_5=10-0.83j \quad \text{หรือ} \quad 10.0\angle-0.083$$

$$Z_7=10+42.5j \quad \text{หรือ} \quad 43.7\angle1.340$$

$$Z_9=10+77.7j \quad \text{หรือ} \quad 78.4\angle1.443$$

จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละความถี่มีค่าไม่เท่ากัน ถึงตอนนี้ถือว่าเสร็จสิ้นขั้นตอนในการหาค่าอิมพีแดนซ์ในแผนภาพ (ด้านซ้าย)ในรูปที่ 4.4 ต่อไปจะเป็นการหากระแสในแต่ละความถี่และกระแสรวมตามสมการที่ (4.24)-(4.29) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$I_1=\frac{382}{305.9}\angle1.538 \quad \text{หรือ} \quad i_1(t)=1.25\sin(\omega t+1.538)$$

$$I_3=\frac{127}{69}\angle1.426 \quad \text{หรือ} \quad i_3(t)=1.84\sin(3\omega t+1.426)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

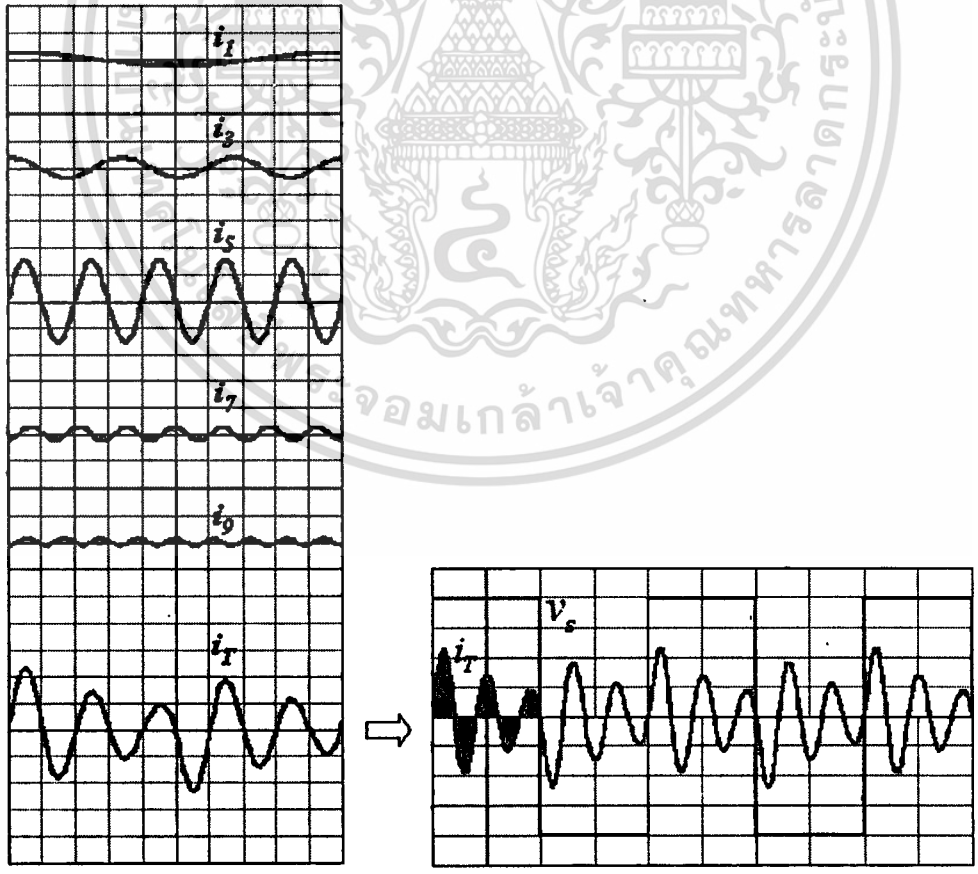
$$I_5 = \frac{76}{10}\angle 0.083 \qquad \text{หรือ} \qquad i_5(t) = 7.6\sin(5\omega t + 0.083)$$

$$I_7 = \frac{54}{43.7}\angle -1.34 \qquad \text{หรือ} \qquad i_7(t) = 1.25\sin(7\omega t - 1.340)$$

$$I_9 = \frac{42}{78.4}\angle -1.443 \qquad \text{หรือ} \qquad i_9(t) = 0.54\sin(9\omega t - 1.443)$$

ดังนั้นจะได้ $$I_T = I_1 + I_3 + I_5 + I_7 + I_9$$

เขียนกราฟของกระแสในแต่ละความถี่และกระแสรวมได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสที่หาได้ในแต่ละความถี่มีทั้งขนาดและมุมเฟสที่ยากจะคาดเดา ทำให้การหาลักษณะของสัญญาณกระแสรวมเป็นไปได้ยากมากโดยเฉพาะยิ่งเป็นการคาดคะเนโดยไม่ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.7 สัญญาณกระแสกรณี F1 $[f_s << f_r]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี C1.1</u> $[f_s < f_r : i \text{ lead } v]$

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- จงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 65$ kHz

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 0.15\mu$F

<u>การวิเคราะห์</u>

การกระจายแรงดันของแหล่งจ่ายด้วยอนุกรมฟูริเยร์เหมือนกรณี F1 ส่วนการหาค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$Z_1 = 10 - 8.65j \quad \text{หรือ} \quad 13.2\angle -0.713$$

$$Z_3 = 10 + 30.628j \quad \text{หรือ} \quad 32.2\angle 1.255$$

$$Z_5 = 10 + 58.588j \quad \text{หรือ} \quad 59.4\angle 1.402$$

$$Z_7 = 10 + 84.933j \quad \text{หรือ} \quad 85.5\angle 1.454$$

$$Z_9 = 10 + 110.739j \quad \text{หรือ} \quad 111.19\angle 1.481$$

หลังจากได้ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่ต่อไปก็สามารถหาค่ากระแสแต่ละความถี่และกระแสรวมได้

$$I_1 = 22.883\angle 0.713 \quad \text{หรือ} \quad i_1(t) = 22.883\sin(\omega t + 0.713)$$

$$I_3 = 3.952\angle -1.255 \quad \text{หรือ} \quad i_3(t) = 3.952\sin(3\omega t - 1.255)$$

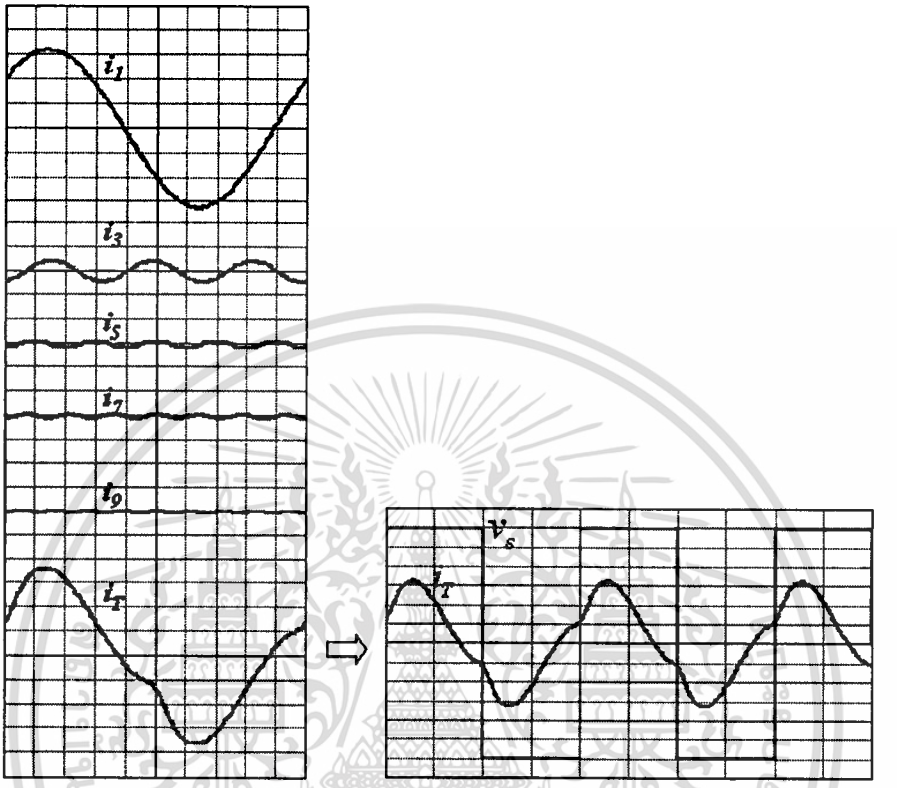
$$I_5 = 1.285\angle -1.402 \quad \text{หรือ} \quad i_5(t) = 1.285\sin(5\omega t - 1.402)$$

$$I_7 = 0.638\angle -1.454 \quad \text{หรือ} \quad i_7(t) = 0.638\sin(7\omega t - 1.454)$$

$$I_9 = 0.382\angle -1.481 \quad \text{หรือ} \quad i_9(t) = 0.382\sin(9\omega t - 1.481)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนกราฟของกระแสในแต่ละความถี่ กระแสรวม และกระแสรวมร่วมกับแรงดันแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสรวมนำหน้าแรงดัน



รูปที่ 4.8 สัญญาณกระแสกรณี C1.1 $[f_s < f_r : i \text{ lead } v]$

<u>กรณี C1.2</u> $[f_s < f_r : i \text{ inphase } v]$

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- วงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 54$ kHz

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 0.22\mu$F

<u>การวิเคราะห์</u>

การกระจายแรงดันของแหล่งจ่ายด้วยอนุกรมฟูริเยร์เหมือนกรณี F1 ส่วนการหาค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$Z_1 = 10 - 1.902j \quad \text{หรือ} \quad 10.179\angle -0.188$$

$$Z_3 = 10 + 32.876j \quad \text{หรือ} \quad 34.3636\angle 1.276$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_5 = 10 + 59.938j \quad \text{หรือ} \quad 60.766\angle 1.405$$

$$Z_7 = 10 + 85.898j \quad \text{หรือ} \quad 86.478\angle 1.455$$

$$Z_9 = 10 + 111.49j \quad \text{หรือ} \quad 111.938\angle 1.481$$

หลังจากได้ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่ต่อไปก็สามารถหาค่ากระแสแต่ละความถี่และกระแสรวมได้

$$I_1 = 37.524\angle 0.188 \quad \text{หรือ} \quad i_1(t) = 37.524\sin(\omega t + 0.188)$$

$$I_3 = 3.705\angle -1.276 \quad \text{หรือ} \quad i_3(t) = 3.705\sin(3\omega t - 1.276)$$

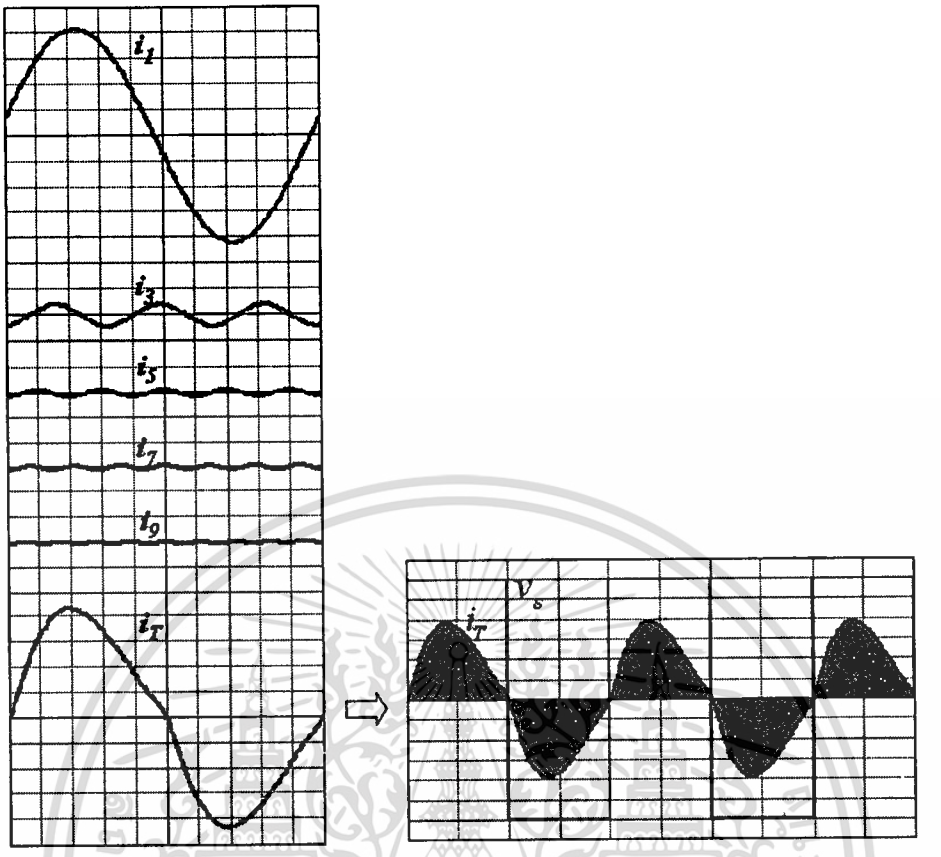
$$I_5 = 1.257\angle -1.405 \quad \text{หรือ} \quad i_5(t) = 1.257\sin(5\omega t - 1.405)$$

$$I_7 = 0.631\angle -1.455 \quad \text{หรือ} \quad i_7(t) = 0.631\sin(7\omega t - 1.455)$$

$$I_9 = 0.379\angle -1.481 \quad \text{หรือ} \quad i_9(t) = 0.379\sin(9\omega t - 1.481)$$

เขียนกราฟของกระแสในแต่ละความถี่ กระแสรวม และกระแสรวมร่วมกับแรงดันแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 4.9 **ซึ่งจะเห็นว่ากระแสและแรงดันพอดีเฟสกัน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สัญญาณกระแสกรณี C1.2 $[f_s < f_r : i \text{ inphase } v]$

<u>กรณี C2</u> $[f_s = f_r : i \text{ lag } v]$

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- จงจร *RLC* มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 50$ kHz

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 0.253\mu$F

<u>การวิเคราะห์</u>

การกระจายแรงดันของแหล่งจ่ายด้วยอนุกรมฟูริเยร์เหมือนกรณี F1 ส่วนการหาค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$Z_1 = 10 - 0.015j \quad \text{หรือ} \quad 10\angle 0.0015$$

$$Z_3 = 10 + 33.50j \quad \text{หรือ} \quad 34\angle 1.281$$

$$Z_5 = 10 + 60.316j \quad \text{หรือ} \quad 61.139\angle 1.406$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_7 = 10 + 86.167j \quad \text{หรือ} \quad 86.745\angle 1.455$$

$$Z_9 = 10 + 111.699j \quad \text{หรือ} \quad 112.146\angle 1.482$$

หลังจากได้ค่าอิมพีแดนซ์แต่ละความถี่ต่อไปก็สามารถหาค่ากระแสแต่ละความถี่และกระแสรวมได้

$$I_1 = 38.197\angle 0 \quad \text{หรือ} \quad i_1(t) = 38.197\sin(\omega t)$$

$$I_3 = 3.641\angle -1.281 \quad \text{หรือ} \quad i_3(t) = 3.641\sin(3\omega t - 1.281)$$

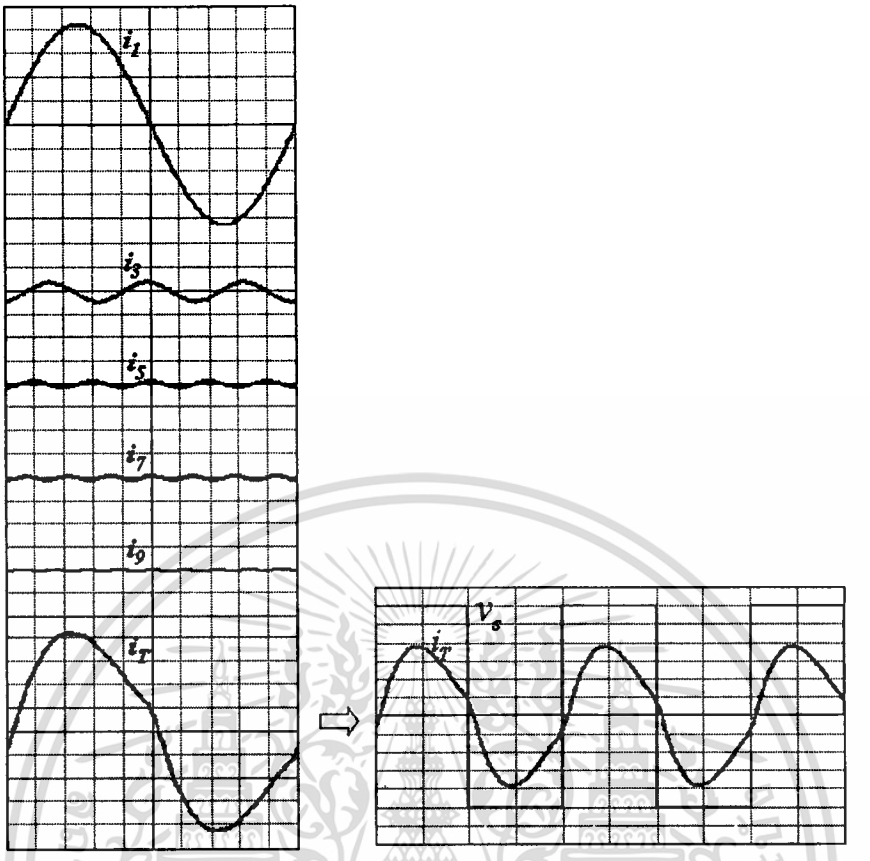
$$I_5 = 1.25\angle -1.406 \quad \text{หรือ} \quad i_5(t) = 1.25\sin(5\omega t - 1.406)$$

$$I_7 = 0.629\angle -1.455 \quad \text{หรือ} \quad i_7(t) = 0.629\sin(7\omega t - 1.455)$$

$$I_9 = 0.378\angle -1.482 \quad \text{หรือ} \quad i_9(t) = 0.378\sin(9\omega t - 1.482)$$

เขียนกราฟของกระแสในแต่ละความถี่ กระแสรวม และกระแสรวมร่วมกับแรงดันแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสรวมตามหลังแรงดันอยู่เล็กน้อยแม้ว่าความถี่สวิตชิ่งจะเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณกระแสกรณี C2 $[f_s = f_r : i \text{ lag } v]$

<u>กรณี C3</u> $[f_s > f_r : i \text{ lag } v]$

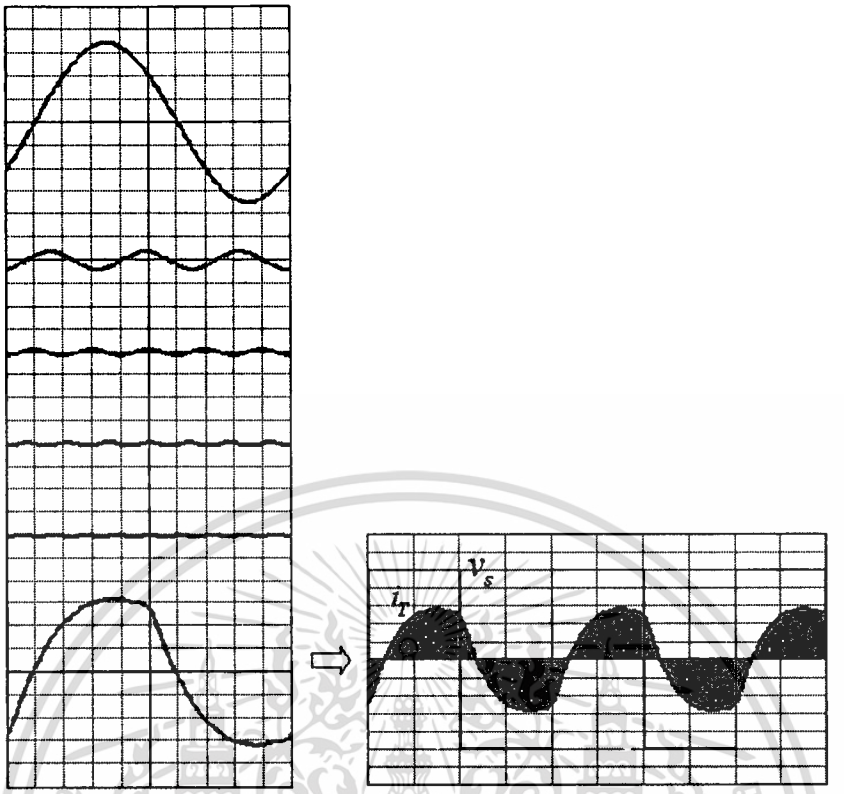
จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- จงจร *RLC* มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 32$ kHz

  ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 0.6\mu$F

การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสมีขั้นตอนเหมือนกับกรณีก่อนหน้านี้ทุกประการ โดยมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สัญญาณกระแสกรณี C2 $[f_s > f_r : i \text{ lag } v]$

<u>กรณี F2</u> $[f_s >> f_r]$

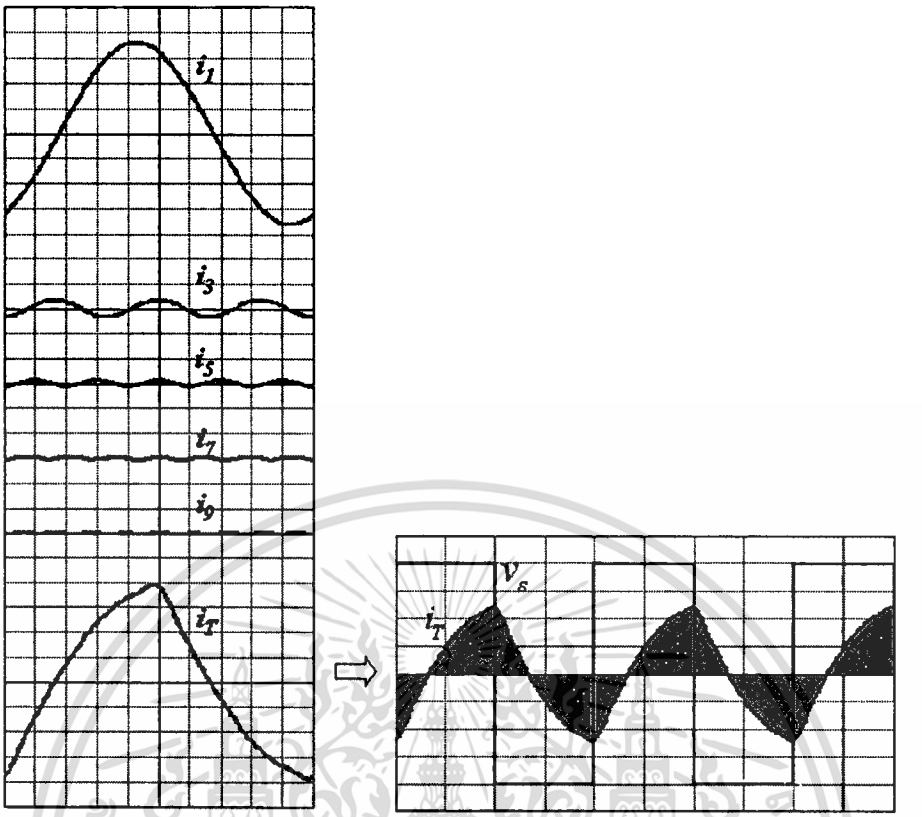
จากรูปที่ 4.1 **กำหนดให้**

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 100$ kHz
- วงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 50$ kHz.

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 0.25\mu$F

การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสมีขั้นตอนเหมือนกับกรณีก่อนหน้านี้ทุกประการ โดยมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สัญญาณกระแสกรณี C2 $[f_s >> f_r]$

จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการวิเคราะห์หาสัญญาณกระแสด้วยหลักการอนุกรมฟูริเยร์นั้นมีความยุ่งยาก หลายขั้นตอน ต้องหาแยกทีละความถี่แล้วมารวมกันภายหลัง ซึ่งแต่ละขั้นตอนหากไม่มีโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยแล้วถือว่าเป็นการวิเคราะห์ที่ยากมากๆ ต้องใช้เวลานานและอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์วิธีนี้จะสามารถหาลักษณะของสัญญาณกระแสได้จริง แต่ไม่สามารถอธิบายให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของลักษณะสัญญาณกระแสในแต่ละกรณีได้ ถือได้ว่าเป็นจุดอ่อนในการเรียนรู้ และทำความเข้าใจเรื่องเทคนิคเรโซแนนซ์ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์แบบใหม่ที่มีชื่อว่าหลักการสับการแกว่งในส่วนต่อไป

4.3 การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยหลักการสับการแกว่ง (oscillating chopping)

หลักการสับการแกว่ง (oscillating chopping) เป็นหลักการที่ถูกเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อใช้วิเคราะห์หาลักษณะสัญญาณกระแสที่ไหลในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม ในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถอธิบายให้เห็นถึงพฤติกรรมของเทคนิคเรโซแนนซ์ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

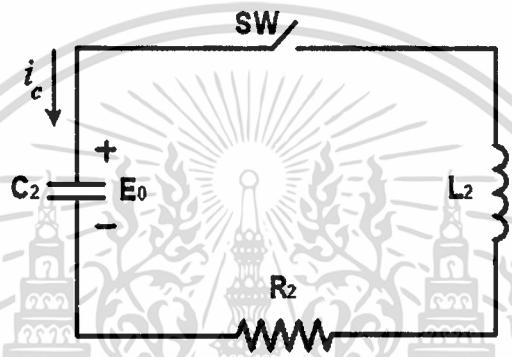
"หลักการสับการแกว่ง" ประกอบไปด้วย การสับและการแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การแกว่งของสัญญาณกระแสในวงจร RLC แบบอนุกรม (damped oscillation)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงกลไกการเกิดการแกว่งในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ที่มีค่า RLC แต่ละตัวคงที่ และจะแสดงถึงความสามารถในการเขียนกราฟการแกว่งได้โดยอาศัยเพียงข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์

รูปที่ 4.13 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมประกอบไปด้วย R_2, L_2 และ C_2 โดย C_2 ถูกอัดประจุจนมีความต่างศักย์เริ่มต้นเป็น E_0 โวล์ท เมื่อสวิทช์ SW เริ่มทำงานปรากฏการณ์ชั่วขณะ (transient -phenomena) ก็เกิดขึ้นโดยมีเงื่อนไขดังอสมการที่ (4.37)



รูปที่ 4.13 วงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม RLC

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's law) ที่ว่า "ในวงจรไฟฟ้า ผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าภายในวงจรปิดใดมีค่าเป็นศูนย์" เมื่อสวิทช์ SW เริ่มทำงาน จะได้

$$v_C + v_R + v_L = 0 \tag{4.30}$$

$$v_C + i_C R_2 + L_2 \frac{di_C}{dt} = 0 \tag{4.31}$$

$$v_C + R_2 C_2 \frac{dv_C}{dt} + L_2 C_2 \frac{d^2 v_C}{dt^2} = 0 \tag{4.32}$$

$$\frac{d^2 v_C}{dt^2} + \left(\frac{R_2}{L_2}\right)\frac{dv_C}{dt} + \left(\frac{1}{L_2 C_2}\right)v_C = 0 \tag{4.33}$$

$$D^2 + \left(\frac{R_2}{L_2}\right)D + \frac{1}{L_2 C_2} = 0 \tag{4.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = -\frac{R_2}{2L_2} \pm \sqrt{\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \frac{1}{L_2C_2}} \tag{4.35}$$

$$D = -\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^{\,2} - \omega_0^{\,2}} \tag{4.36}$$

โดยที่ $\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_2C_2}}$; $\omega_2 = \left|\sqrt{\alpha_2^{\,2} - \omega_0^{\,2}}\right|$

จากสมการที่ (3.6) ตามหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1. กรณี Under damped oscillation เกิดเมื่อ $\alpha_2 < \omega_0$
2. กรณี Critical damped oscillation เกิดเมื่อ $\alpha_2 = \omega_0$
3. กรณ Over damped oscillation เกิดเมื่อ $\alpha_2 > \omega_0$

กรณีแรก Under damped oscillation เป็นกรณีที่มีการแกว่งเกิดขึ้น โดยมีเงื่อนไขดังอสมการที่ (4.37)

$$\alpha_2 < \frac{1}{\sqrt{L_2C_2}} \tag{4.37}$$

ทำให้

$$D = -\alpha_2 - j\omega_2 \tag{4.38}$$

$$v_{C2}(t) = e^{-\alpha_2 t}\left[A\cos(\omega_2 t) + B\sin(\omega_2 t)\right] \tag{4.39}$$

เมื่อค่าเริ่มต้น

$$v_{C2}(0) = E_0 \tag{4.40}$$

แทนค่าสมการที่ (4.39) ด้วยสมการที่ (4.40) จะได้ดังสมการที่ (4.41)

$$A = E_0 \tag{4.41}$$

$$i_c = c\frac{dv_c}{dt} \tag{4.42}$$

จากสมการที่ (4.39) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{C}{C}\frac{d}{dt}v_{C2}(t)=\frac{d}{dt}\left[Ae^{-\alpha_2 t}\cos(\omega_2 t)+Be^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t)\right] \tag{4.43}$$

$$\begin{aligned}\frac{i_{C2}(t)}{C_2}=A\left[-e^{-\alpha_2 t}\omega_2\sin(\omega_2 t)-\alpha_2 e^{-\alpha_2 t}\cos(\omega_2 t)\right]+\\ B\left[e^{-\alpha_2 t}\omega_2\cos(\omega_2 t)-\alpha_2 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t)\right]\end{aligned} \tag{4.44}$$

ในทำนองเดียวกับบทที่ 3 ค่า α_2 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า ω_2

$$\frac{i_{C2}(t)}{C_2}=A\left[-e^{-\alpha_2 t}\omega_2\sin(\omega_2 t)\right]+B\left[e^{-\alpha_2 t}\omega_2\cos(\omega_2 t)\right] \tag{4.45}$$

ค่าเริ่มต้น
$$i_{C2}(0^+)=i_{L2}(0^+)=i_{L2}(0^-)=0 \tag{4.46}$$

แทนสมการที่ (4.46) ในสมการที่ (4.45) จะได้

$$0=A(0)+B\omega_2 \tag{4.47}$$

$$B=0 \tag{4.48}$$

แทนค่า A และ B จากสมการที่ (4.41) และ (4.48) ในสมการที่ (4.45) จะได้ดังสมการที่ (4.49)

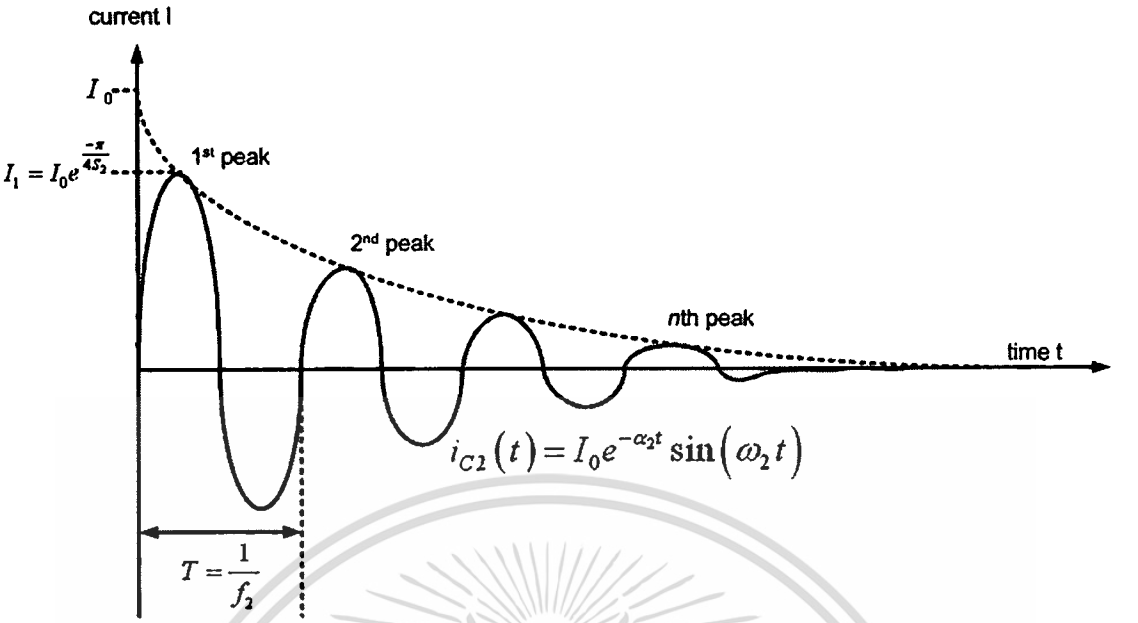
$$i_{C2}(t)=-E_0\omega_2 C_2 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t) \tag{4.49}$$

หรือ
$$i_{C2}(t)=I_0 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t) \tag{4.50}$$

โดยที่
$$I_0=-E_0\omega_2 C_2 \tag{4.51}$$

สมการที่ (4.50) แสดงการแกว่งของสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นในวงจร ซึ่งเมื่อนำมาเขียนได้ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การแกว่งของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

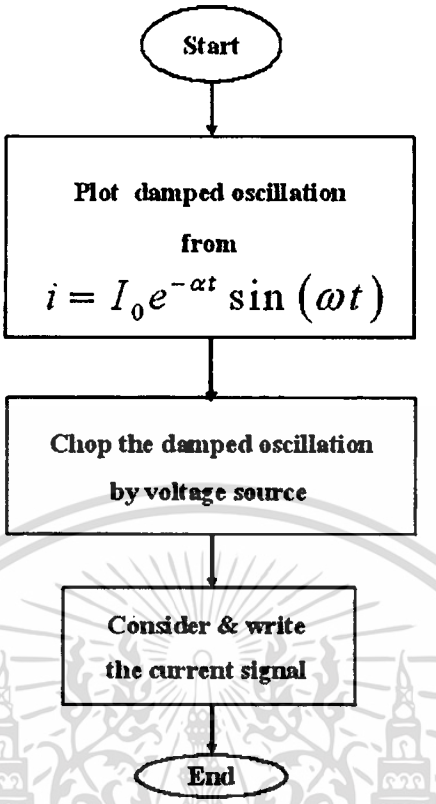
4.3.2 หลักการสับการแกว่ง (oscillating chopping)

<u>การสับ</u> เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นแบบเปิด-ปิด ซึ่งเหมือนการสับทำให้ได้สัญญาณแรงดันของแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม อาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การสับก็คือการเปิด-ปิดของอุปกรณ์สวิตช์นั่นเอง ดังนั้นการสับการแกว่งจึงหมายถึง**การนำสัญญาณแรงดันของแหล่งจ่ายมาสับบนการแกว่ง** ซึ่งมีขั้นตอนดังแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 4.15

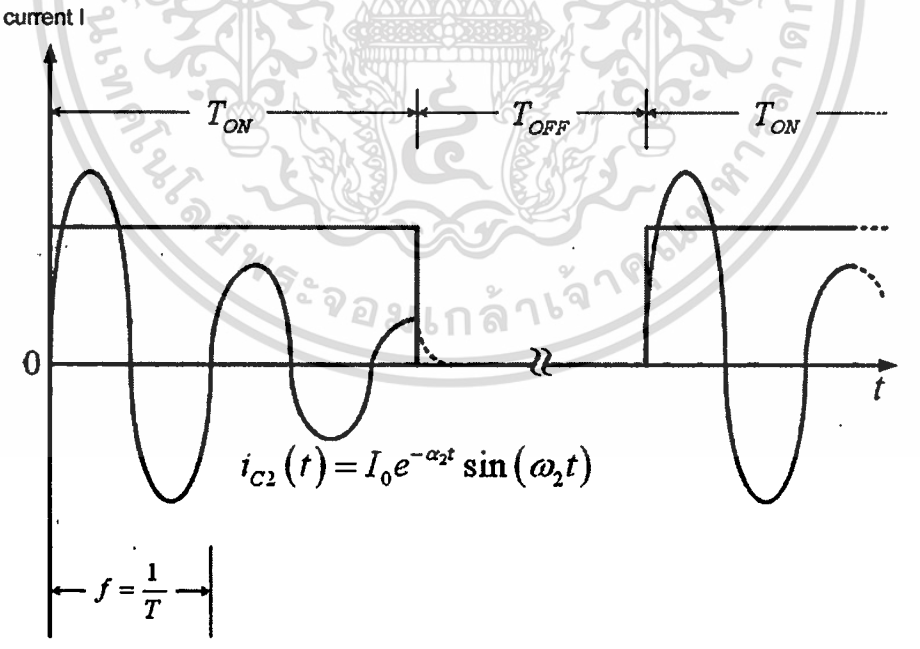
ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยหลักการสับการแกว่งเริ่มด้วยการเขียนกราฟการแกว่งของสัญญาณกระแสที่เกิดจากโหลด *RLC* ก่อนตามสมการที่ (4.50) จากนั้นนำสัญญาณแรงดันของแหล่งจ่ายมาสับบนการแกว่งดังกล่าว โดยต้องทำความเข้าใจในเบื้องต้นว่า เมื่อสวิตช์สับให้ทำงาน (on) ครั้งหนึ่งการแกว่งก็จะเกิดจนกว่าสวิตช์จะสับให้หยุดทำงาน (off) และเมื่อสวิตช์สับให้ทำงานอีกครั้งการแกว่งก็จะเกิดขึ้นอีกเช่นเดิม ซึ่งจะได้อธิบายพร้อมทั้งยกตัวอย่างประกอบโดยละเอียดในส่วนต่อไป

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเมื่อสวิทช์ SW สับให้เริ่มทำงาน ตัวเก็บประจุจะคายประจุไฟฟ้าทำให้กระแสไหลในวงจรดังสมการที่ (4.50) และมีลักษณะการแกว่งดังรูปที่ 4.14 จนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว ตราบเท่าที่สวิทช์ SW ยังคงทำงานอยู่ แต่ถ้าสวิทช์ SW หยุดทำงานก่อน กระแสย่อมไม่สามารถไหลต่อในวงจรได้ (กลายเป็นศูนย์ในทันที) แต่ในทางปฏิบัติจริงกระแสย่อมค่อยๆลดลงเป็นศูนย์ดังเส้นประ (ในช่วง T_{OFF}) ในรูปที่ 4.16 ซึ่งกระแสจะไม่ไหลในวงจรตราบเท่าที่สวิตช์ไม่ทำงานและเมื่อสวิตช์เริ่มทำงานใหม่อีกครั้ง กระแสก็จะไหลในลักษณะมีการแกว่งแบบเดิมอีก (รูปที่ 4.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยการสับการแกว่ง



รูปที่ 4.16 การสับการแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่ามีกราฟอยู่ 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นการแกว่งซึ่งได้มาจากคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม RLC และอีกส่วนที่สองเป็นการสับด้วยสัญญาณแรงดันของแหล่งจ่าย ในรูปนี้จะเห็นว่าความถี่ของการสับน้อยกว่าความถี่ของการแกว่งค่อนข้างมากและเป็นการสับเฉพาะซีกบวกเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้สัญญาณแรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม เพราะฉะนั้น การสับก็มีลักษณะ ทั้งซีกบวกและลบสลับกันไป

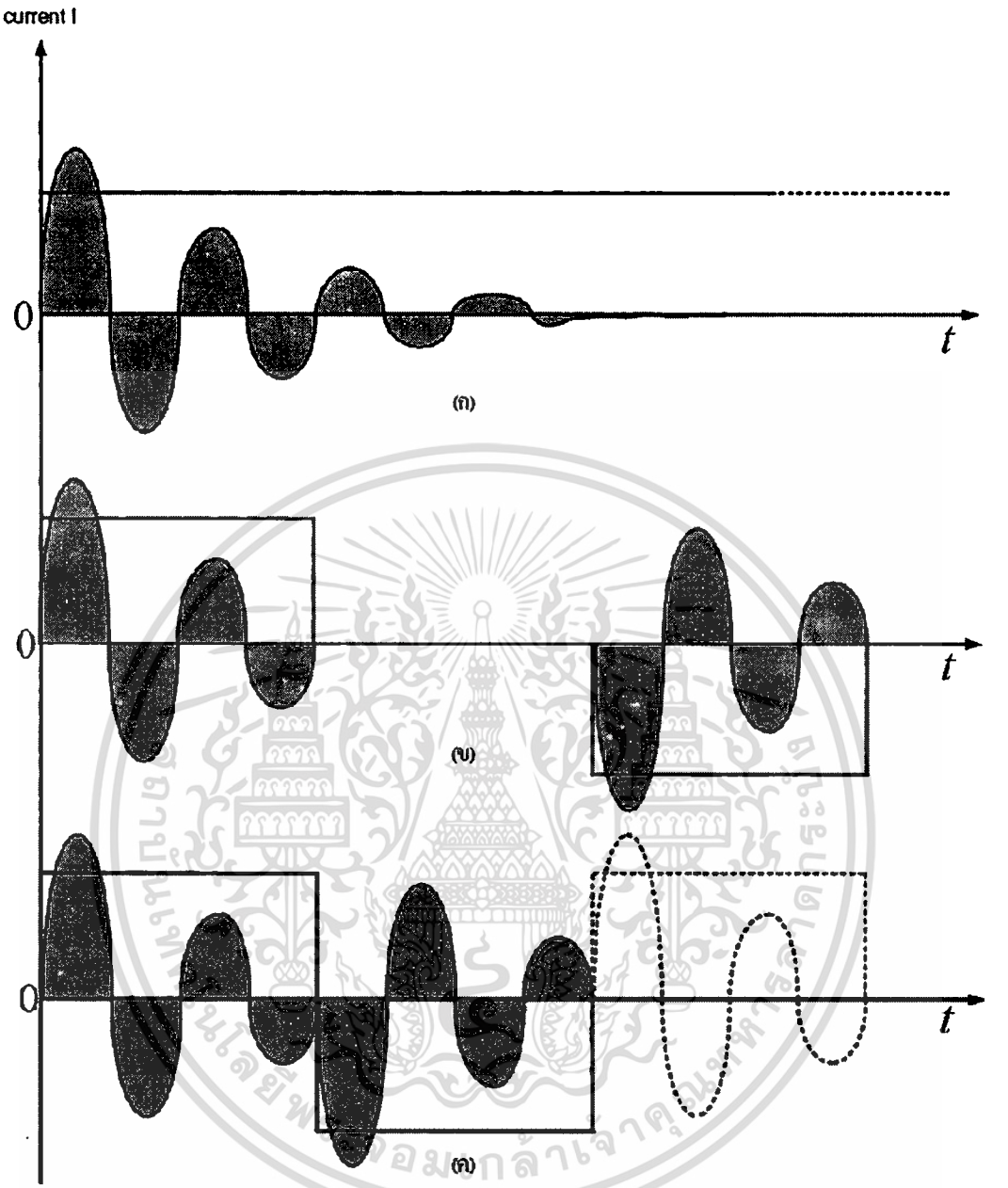
<u>หมายเหตุ</u> ความถี่ของการสับ ความถี่ของสัญญาณแรงดันของแหล่งจ่ายและความถี่สวิตชิ่งมีความหมายนัยเดียวกัน

<u>ตัวอย่างการสับการแกว่งเพิ่มเติม</u>

ถ้าค่า R_2, L_2 และ C_2 ในรูปที่ 4.13 มีค่าคงที่เท่าเดิมและ C_2 ถูกอัดประจุจนมีความต่างศักย์เริ่มต้นเป็น E_0 โวล์ทเหมือนเดิม เมื่อสวิทช์ SW เริ่มทำงานการแกว่งย่อมเกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนเดิม แต่ถ้าแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งขึ้นอยู่กับการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์มีลักษณะแตกต่างกันออกไปย่อมมีผลทำให้สัญญาณกระแสมีลักษณะแตกต่างกันตามไปด้วย ตามหลักการของการสับการแกว่งดังตัวอย่างต่อไปนี้ (รูปที่ 4.17)

ถ้าการทำงานของสวิตช์ SW ในรูปที่ 4.13 สับทำงานตลอดเวลา จะทำให้เกิดการแกว่งขึ้นจนเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพดังรูปที่ 4.17(ก) แต่ถ้าหากสวิตช์ SW สับทำงานทำให้การแกว่งเกิดขึ้นสองคาบเวลาแล้วหยุดทำงานทำให้กระแสเป็นศูนย์ระยะเวลาหนึ่ง แล้วให้สวิตช์ SW เริ่มทำงานอีกครั้งโดยบังคับให้กระแสไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางเดิม แต่ยังคงมีลักษณะการแกว่งของกระแสเหมือนเดิมดังรูปที่ 4.17(ข) และในรูปที่ 4.17(ค) การทำงานของสวิตช์จะมีลักษณะทำนองเดียวกับในรูปที่ 4.17(ข) ต่างเพียงไม่มีการทิ้งให้กระแสเป็นศูนย์ระยะเวลาหนึ่งแต่ให้สวิตช์สลับทำงานทันทีโดยที่บังคับให้กระแสไหลในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเดิม ซึ่งลักษณะบังคับให้กระแสไหลโดยการทำงานของสวิตช์แบบนี้มักพบในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ทำให้ได้สัญญาณแรงดันของแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การสับสวิตช์ลักษณะนี้ในส่วนต่อไปทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การสับการแกว่งต่างกัน 3 แบบ

4.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยการสับการแกว่ง

การวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสด้วยการสับการแกว่งแบ่งเป็น 4 กรณีคือกรณี A, B, C และ D ดังรูปที่ 4.18

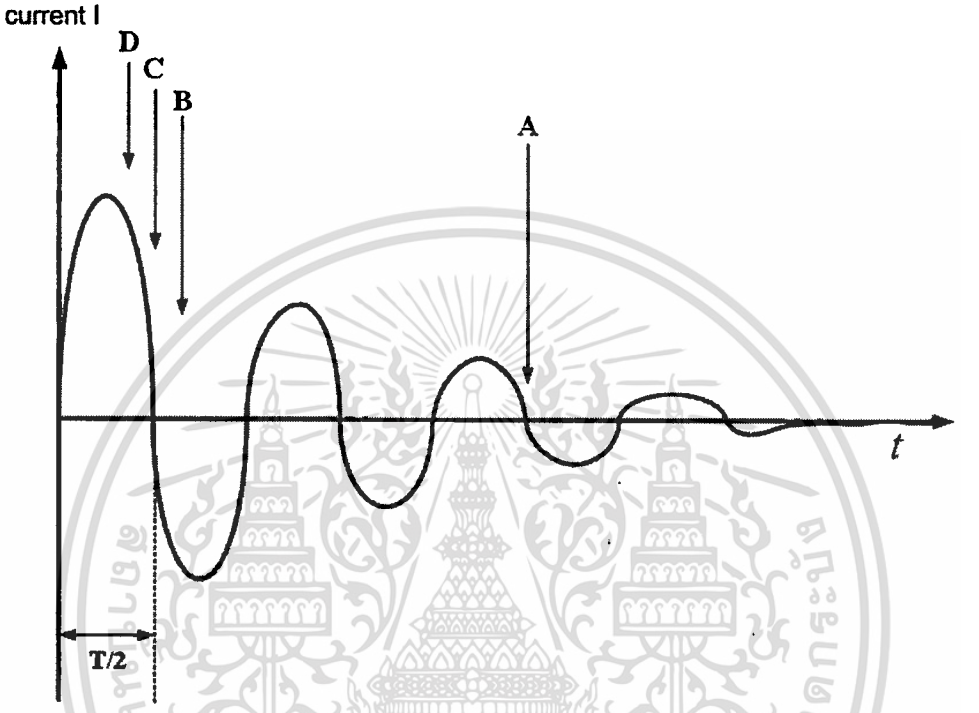
<u>กรณี A</u> $[f_s << f_d]$ หมายถึง ความถี่สวิตชิ่ง (f_s) น้อยกว่าความถี่การแกว่ง (f_d) ค่อนข้างมาก

<u>กรณี B</u> $[f_s < f_d]$ หมายถึง ความถี่สวิตชิ่ง (f_s) น้อยกว่าความถี่การแกว่ง (f_d)

<u>กรณี C</u> $[f_s = f_d]$ หมายถึง ความถี่สวิตชิ่ง (f_s) เท่ากับความถี่การแกว่ง (f_d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี D</u> $[f_s > f_d]$ หมายถึง ความถี่สวิตชิ่ง (f_s) มากกว่าความถี่การแกว่ง (f_d) เพราะถ้าสับการแกว่งที่จุด A จะเห็นว่าคาบเวลาของการสวิตช์น้อยกว่าคาบเวลาของการแกว่ง $\left(f = \frac{1}{T}\right)$



รูปที่ 4.18 กรณีการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่ง

<u>**กรณี A**</u> $[f_s << f_d]$

-<u>กรณี F1</u> ในการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ภาคก่อนนี้สอดคล้องกัน

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- ประกอบไปด้วย $R_2 = 10\Omega$, $L_2 = 40\,\mu$H, $C_2 = 10n$F

<u>การวิเคราะห์</u>

จากสมการที่ 4.50 $i_{C2}(t) = I_0 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t)$

โดยที่ $I_0 = E_0\omega_2 C_2 = 4.73$ A

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2} = 125\times10^3$$

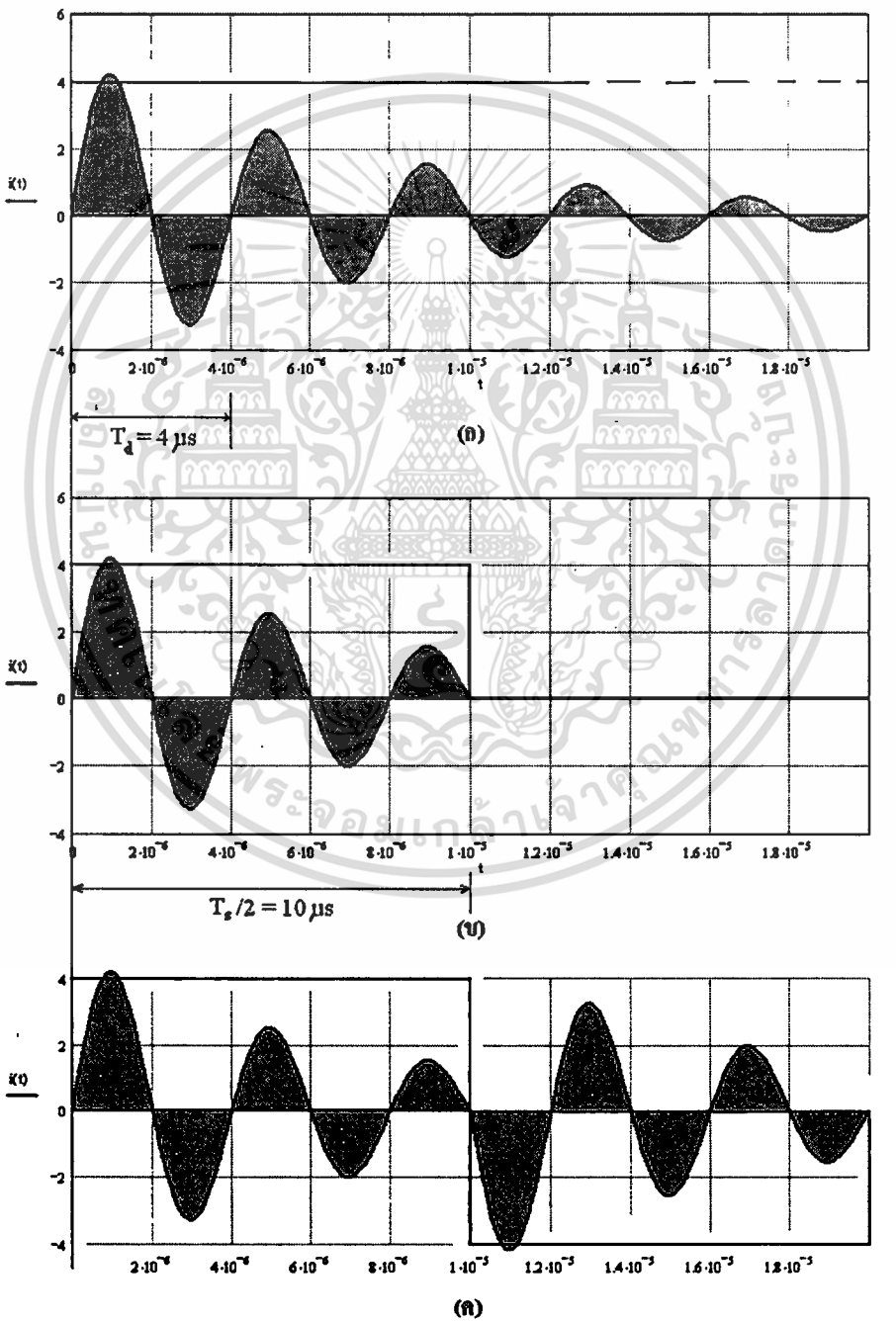
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_2 = \left|\sqrt{\alpha_2{}^2 - \omega_0{}^2}\right| = 1.576\times10^6 \qquad \text{เรเดียน/วินาที}$$

$$\therefore f_d \approx 250 \text{ kHz} \quad \text{และ} \quad \underline{T_d \approx 4\mu \text{ s}}$$

$$\therefore f_s = 50 \quad \text{kHz} \quad \text{และ} \quad \underline{T_s \approx 20\mu \text{ s}}$$

เขียนกราฟการแกว่งจากข้อมูลที่ได้ด้วยโปรแกรมแมทแคด



รูปที่ 4.19 สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี A$[f_s << f_d]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี B</u> $[f_s < f_d]$

-<u>กรณี C1.1</u> ในการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ภาคก่อนนี้สอดคล้องกัน

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- ประกอบไปด้วย $R_2 = 10\Omega$, $L_2 = 40\,\mu$H, $C_2 = 0.15\mu$F

<u>การวิเคราะห์</u>

จากสมการที่ 4.50 $$i_{C2}(t) = I_0 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t)$$

โดยที่ $$I_0 = E_0\omega_2 C_2 = 17.5 \text{ A}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2} = 125\times10^3$$

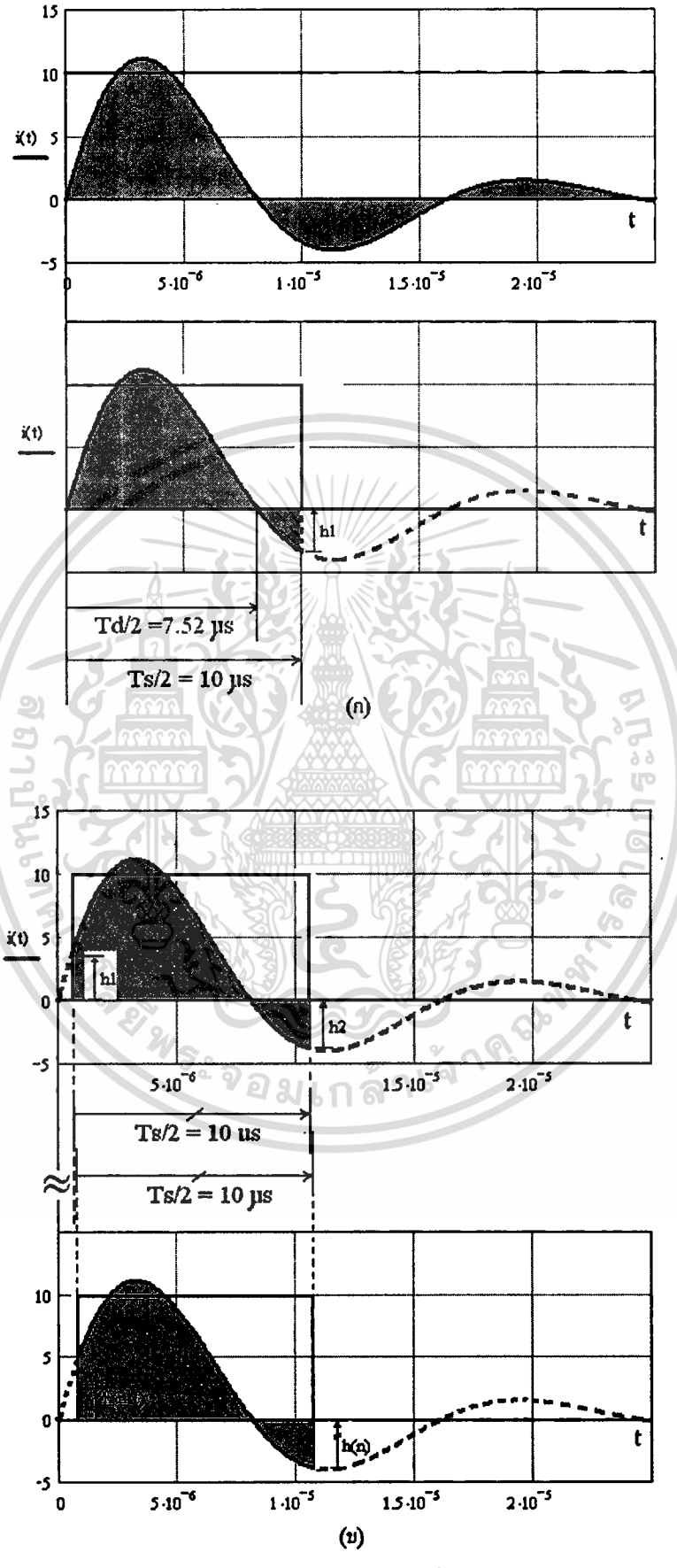
$$\omega_2 = \left|\sqrt{\alpha_2^{\,2} - \omega_0^{\,2}}\right| = 389\times10^3 \quad \text{เรเดียน/วินาที}$$

$$\therefore f_d \approx 65 \text{ kHz} \quad \text{และ} \quad \underline{T_d \approx 15.4\mu\text{s}}$$

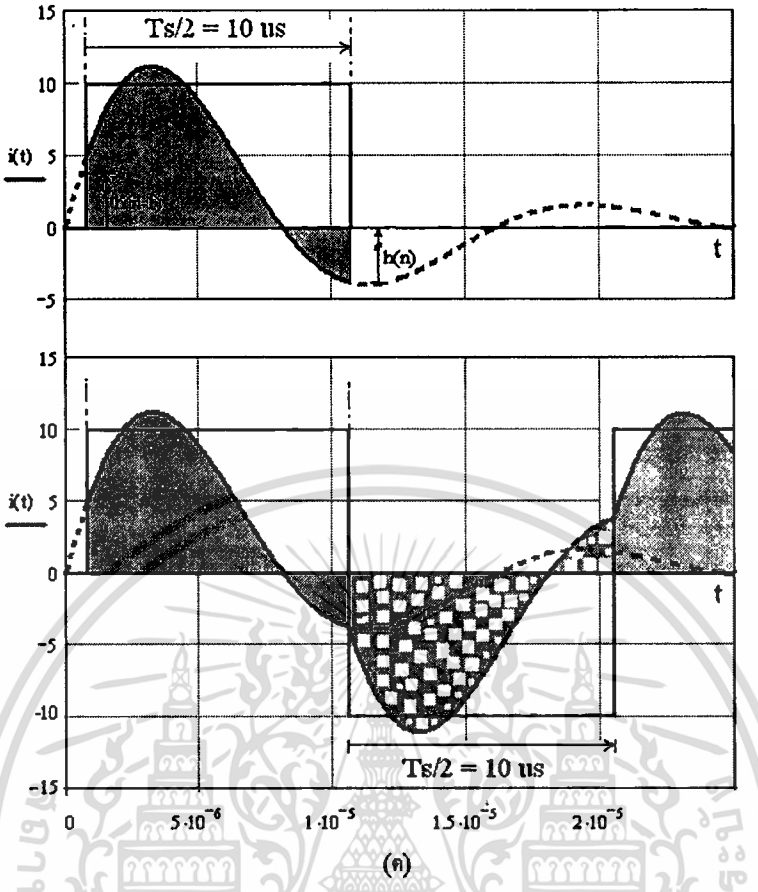
$$\therefore f_s = 50 \text{ kHz} \quad \text{และ} \quad \underline{T_s \approx 20\mu\text{s}}$$

เขียนกราฟการแกว่งจากข้อมูลที่ได้ด้วยโปรแกรมแมทแคด ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี B $[f_s < f_d]$

<u>กรณี C</u> $[f_s = f_d]$

-<u>กรณี C1.2</u> ในการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ภาคก่อนนี้สอดคล้องกัน

จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- **แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม** 300 V **มีความถี่** $f_s = 50$ kHz
- **ประกอบไปด้วย** $R_2 = 10\Omega$, $L_2 = 40\,\mu$H, $C_2 = 0.22\mu$F

<u>การวิเคราะห์</u>

จากสมการที่ 4.50

$$i_{C2}(t) = I_0 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t)$$

โดยที่

$$I_0 = E_0\omega_2 C_2 = 20.7 \text{ A}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2} = 125\times10^3$$

$$\omega_2 = \left|\sqrt{\alpha_2{}^2 - \omega_0{}^2}\right| = 313\times10^3 \quad \textbf{เรเดียน/วินาที}$$

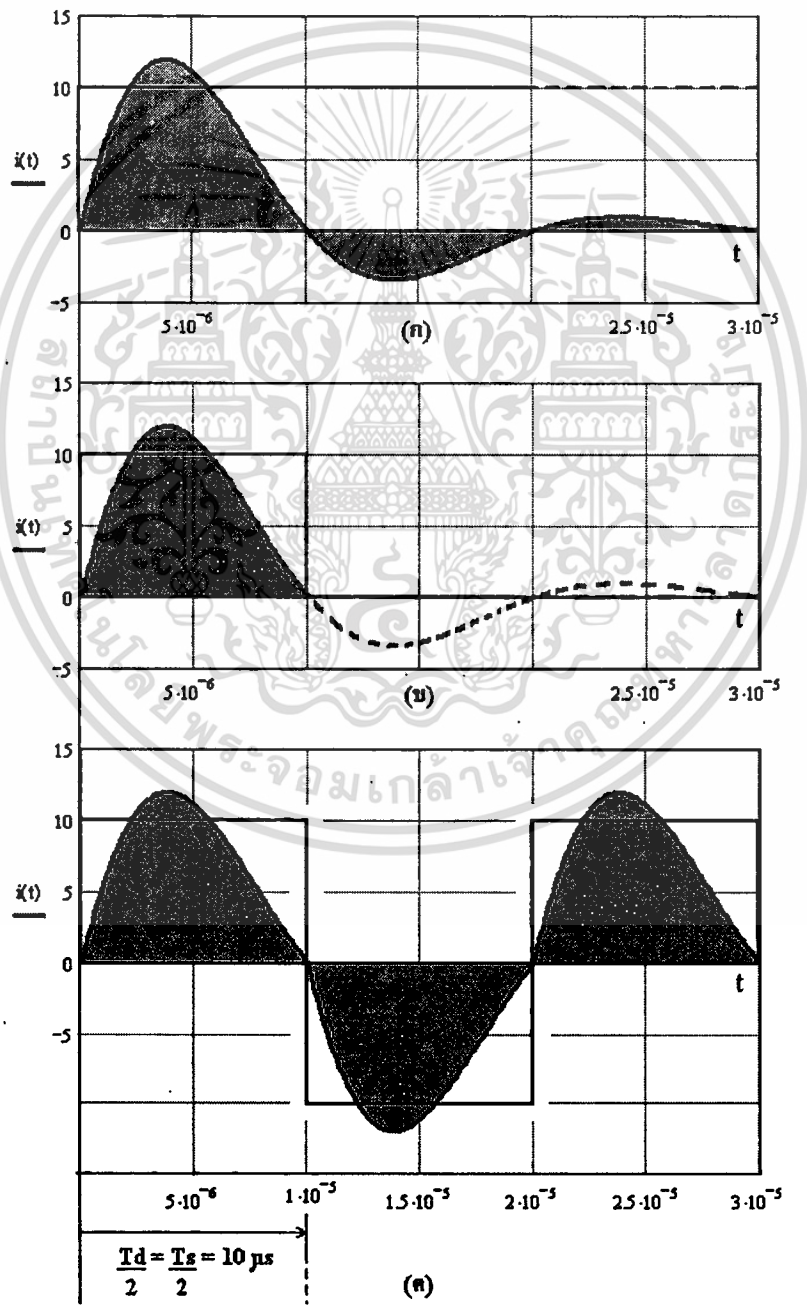
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$[\, f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = 53.7 \text{ kHz และ } T_r = 18.6\mu\text{s} \,]$ $\therefore f_d = 50 \text{ kHz}$ และ $\underline{T_d = 20\mu\text{s}}$

$\therefore f_s = 50 \text{ kHz}$ และ $\underline{T_s \approx 20\mu\text{s}}$

เขียนกราฟการแกว่งจากข้อมูลที่ได้ด้วยโปรแกรมแมทแคด ดังแสดงในรูปที่ 4.21

<u>หมายเหตุ</u> ความถี่การแกว่ง (f_d) ไม่ใช่ตัวเดียวกับความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) แต่มักจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในการประมาณที่ไม่ต้องการรายละเอียดมากนักมักเช่นการทำนายจำนวนยอดของการแกว่งในบทที่ 3 หรือการดูผลทางด้านการรบกวนทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้าในบทที่ 5



รูปที่ 4.21 สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี C$[f_s = f_d]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี D</u> $[f_s > f_d]$

-<u>กรณี C2 และ F2</u> ในการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ภาคก่อนนี้ สอดคล้องกันแต่ในที่นี้ยกเพียงเงื่อนไขของ<u>*กรณี C2*</u> วิเคราะห์ด้วยวิธีการสับการแกว่งเท่านั้นเพราะกรณี F2 ก็ทำได้ในลักษณะเดียวกัน จากรูปที่ 4.1 กำหนดให้

- แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม 300 V มีความถี่ $f_s = 50$ kHz
- ประกอบไปด้วย $R_2 = 10\Omega$, $L_2 = 40\ \mu$H, $C = 0.253\mu$F

<u>การวิเคราะห์</u>

จากสมการที่ (4.50) $i_{C2}(t) = I_0 e^{-\alpha_2 t}\sin(\omega_2 t)$

โดยที่ $I_0 = E_0\omega_2 C_2 = 21.9$ A

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2} = 125\times10^3$$

$$\omega_2 = \left|\sqrt{\alpha_2{}^2 - \omega_0{}^2}\right| = 288.4\times10^3 \quad \text{เรเดียน/วินาที}$$

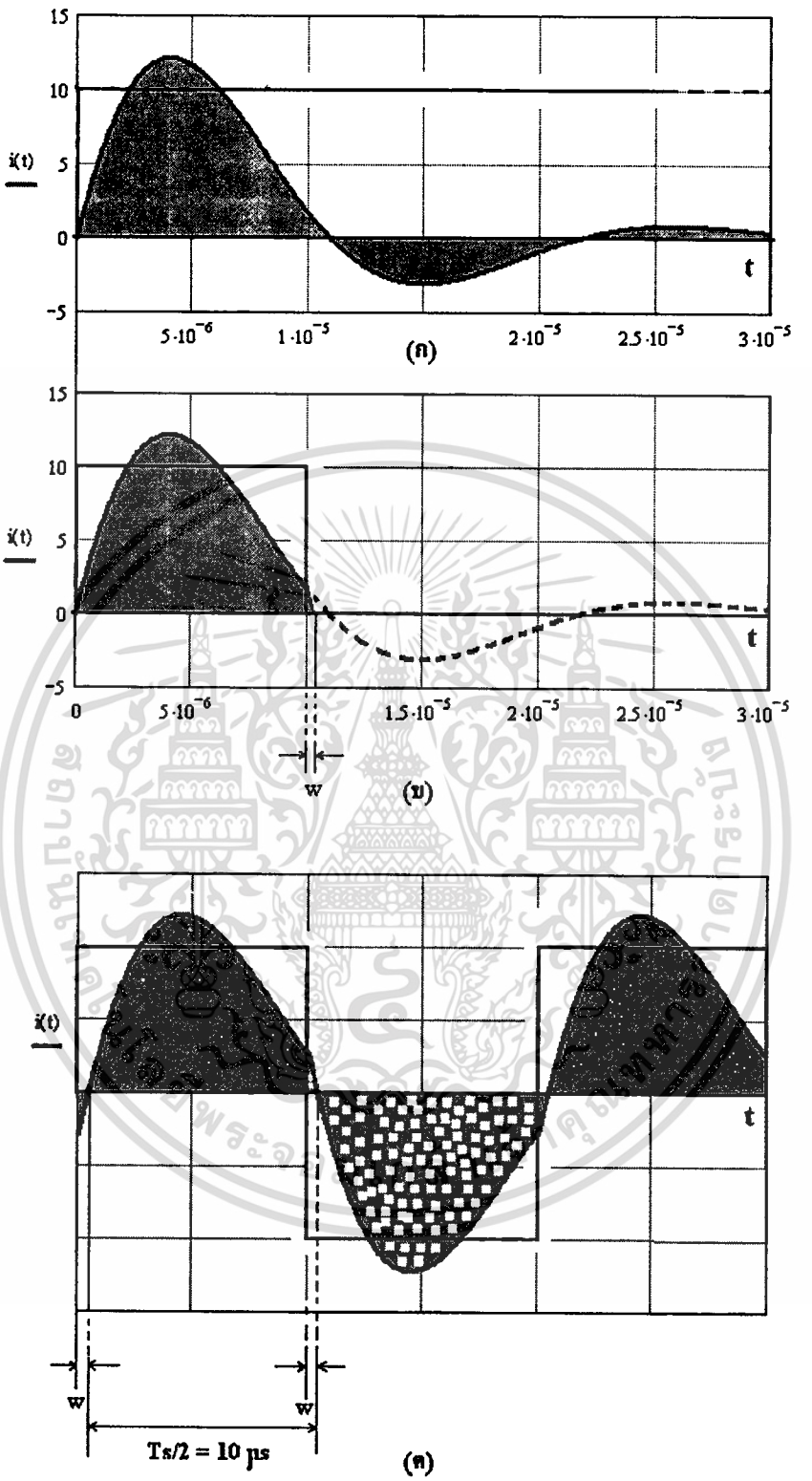
$[f_r = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} = 50$ kHz และ $T_r = 20\mu$s$]$ $\therefore f_d = 46$ kHz และ <u>$T_d = 22\mu$s</u>

$\therefore f_s = 50$ kHz และ <u>$T_s \approx 20\mu$s</u>

เขียนกราฟการแกว่งจากข้อมูลที่ได้ด้วยโปรแกรมแมทแคด

<u>ข้อสังเกต</u> ถึงแม้ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) จะเท่ากับความถี่สวิตชิ่ง (f_s) ก็ตามแต่ความถี่ของการแกว่ง (f_d) มีค่าต่างออกไป เมื่อใช้การสับการแกว่งวิเคราะห์ก็จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสกับแรงดันไม่ได้พอดีเฟสกันดังรูปที่ 4.22 (แม่นยำเช่นเดียวกับกรณี C2 ที่วิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 สัญญาณกระแสจากการวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่งกรณี C$[f_s > f_d]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การจำลองและการทดลอง

เพื่อความชัดเจน และถือเป็นการยืนยันการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมที่มีแหล่งจ่ายแรงดันแบบสี่เหลี่ยม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบการสับการแกว่ง ในส่วนนี้จึงได้มีการจำลองการทำงานวงจรด้วยโปรแกรมออแคดพีสไปค์แสดงลักษณะของสัญญาณกระแสในกรณีต่างๆ ประกอบกับผลการทดลองจากวงจรจริง

4.4.1 การจำลอง

การจำลองแบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 กรณี (ตามรูปที่ 3) คือกรณี F1, C1.1, C1.2, C2, C3 และ F2 โดยในแต่ละกรณีมีการแสดงผลของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมรวมเทียบกับกระแสจากปรากฏการณ์ชั่วขณะ

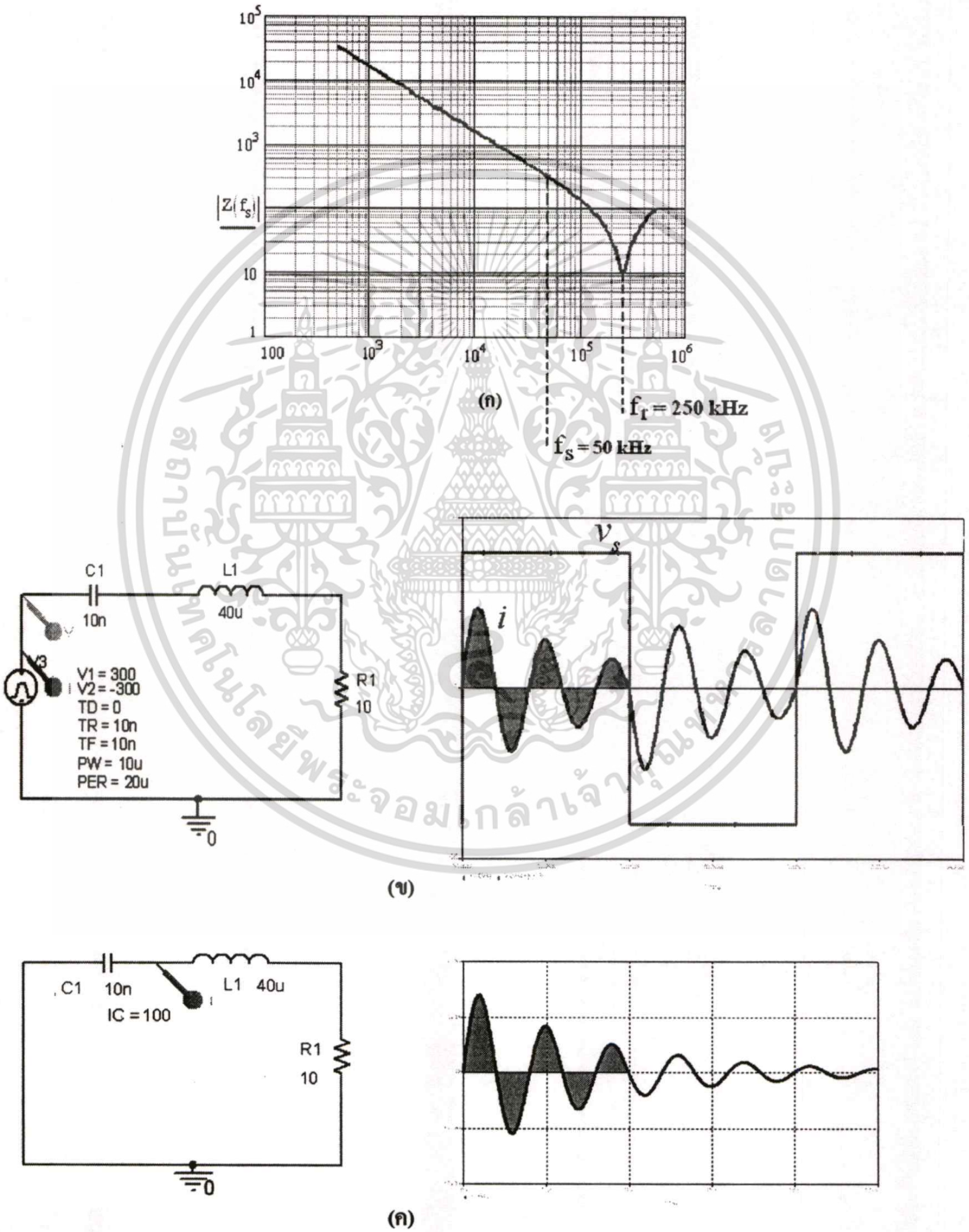
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี F1</u> $[f_s << f_r]$

-แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีความถี่ $f_s = 50$ kHz

-วงจร *RLC* มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 250\,\text{kHz}$

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu\text{H}$, $C = 10n\text{F}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

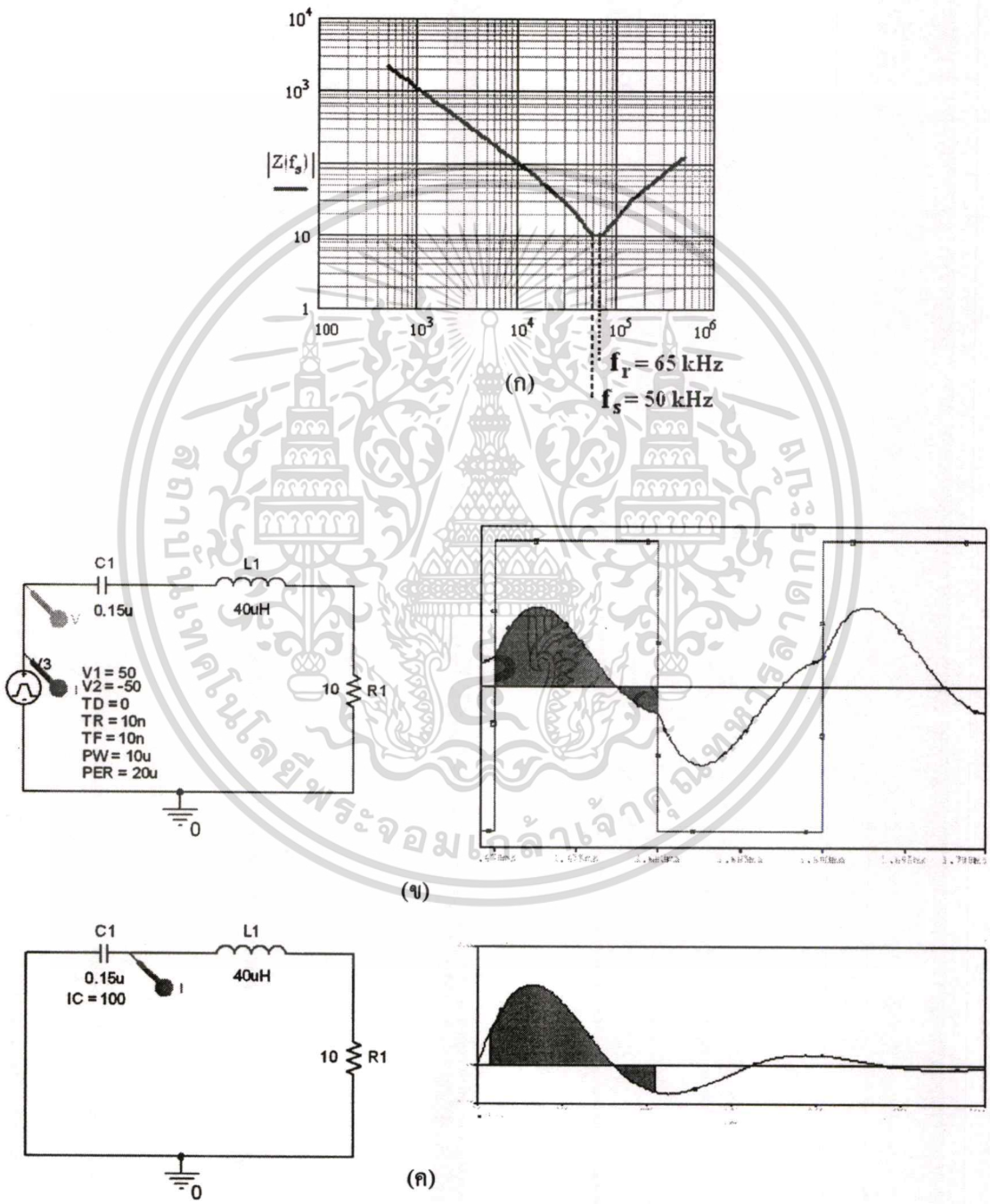
รูปที่ 4.23 ผลการจำลองกรณี F1 $[f_s << f_r]$

<u>กรณี C1.1</u> $[f_s < f_r : i \text{ lead } v]$

-แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีความถี่ $f_s = 50$ kHz

-จงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 65\,\text{kHz}$

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega, \quad L = 40\,\mu\text{H}, \quad C = 0.15\mu\text{F}$



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองกรณี C1.1 $[f_s < f_r : i \text{ lead } v]$

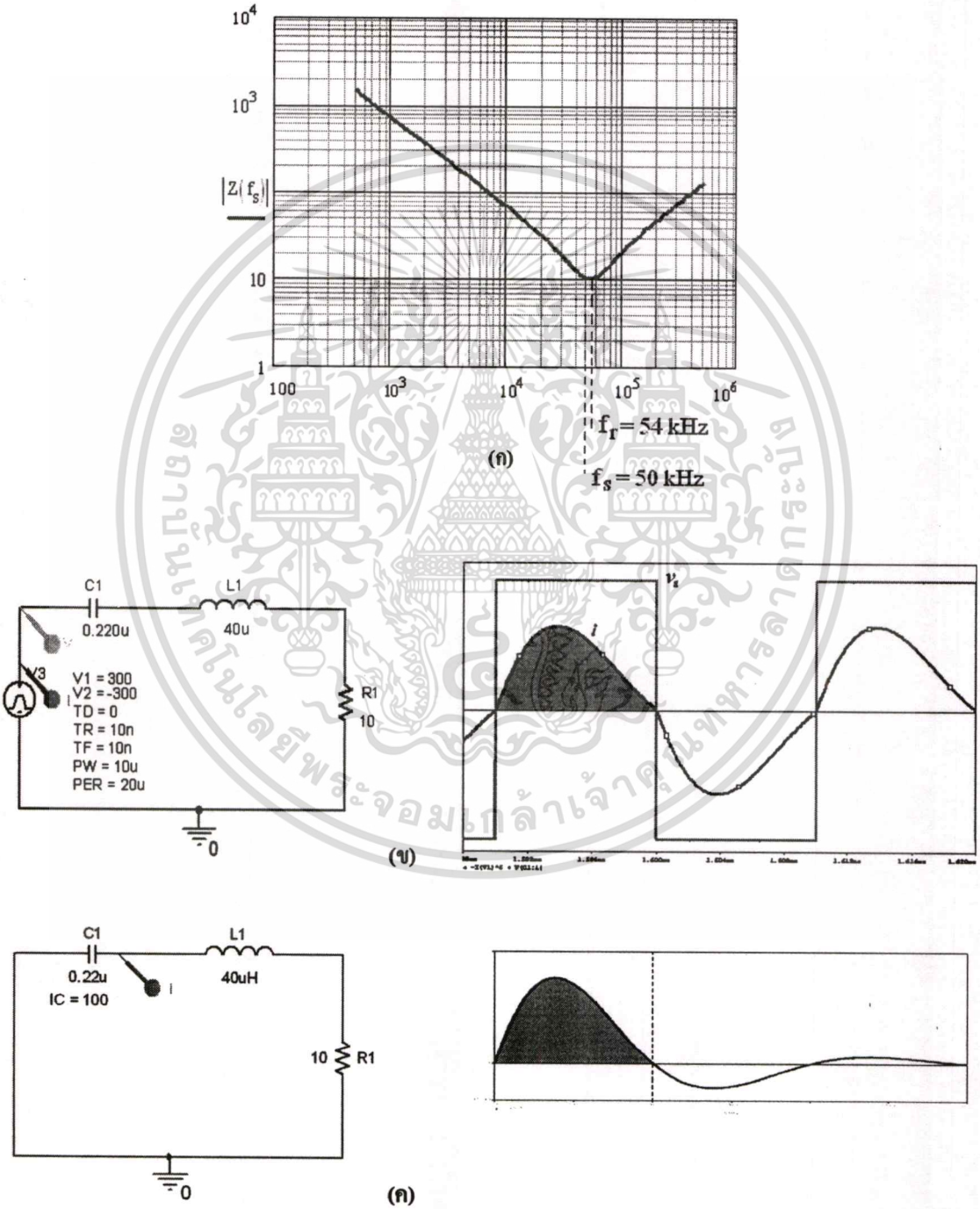
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี C1.2</u> $[f_s < f_r : i \text{ inphase } v]$

-แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีความถี่ $f_s = 50$ kHz

-จงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 54\,\text{kHz}$

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega, \quad L = 40\,\mu\text{H}, \quad C = 0.22\mu\text{F}$



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองกรณี C1.2 $[f_s < f_r : i \text{ inphase } v]$

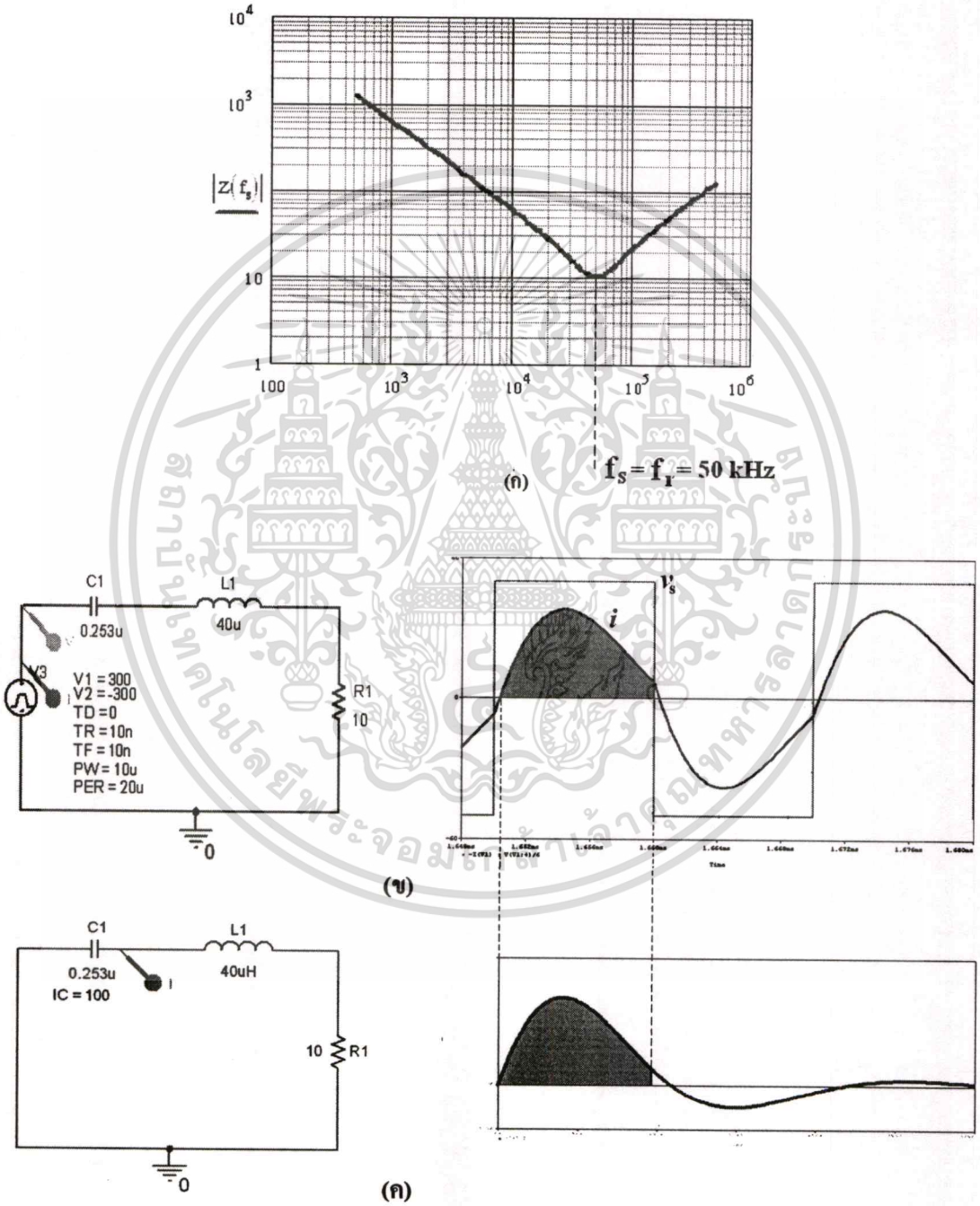
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี C2</u> $[f_s = f_r : i \text{ lag } v]$

-แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีความถี่ $f_s = 50$ kHz

-จงจร *RLC* มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 50\,\text{kHz}$

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega, \quad L = 40\,\mu\text{H}, \quad C = 0.253\mu\text{F}$



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองกรณี C2 $[f_s = f_r : i \text{ lag } v]$

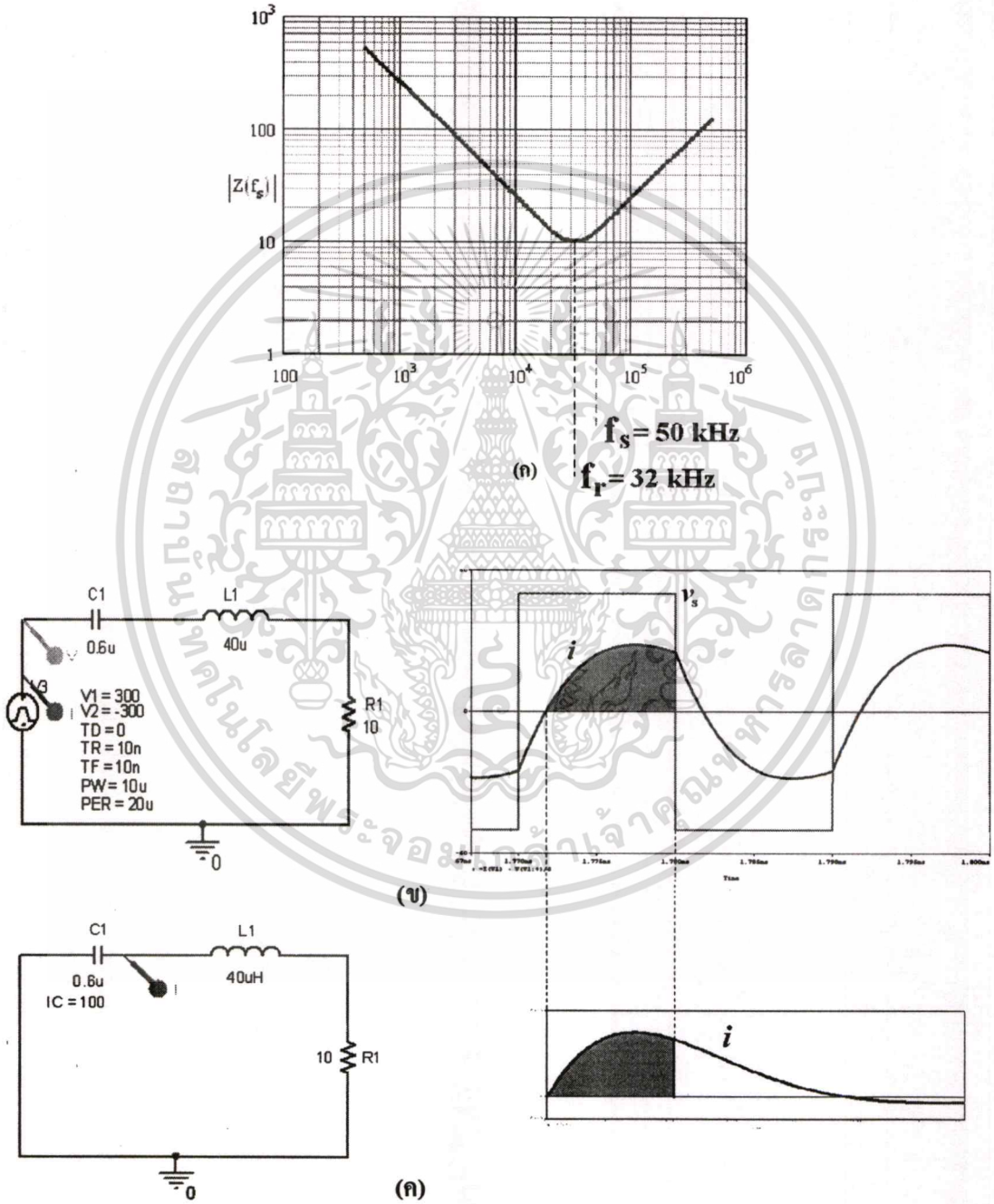
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี C3</u> $[f_s > f_r : i \text{ lag } v]$

-แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีความถี่ $f_s = 50$ kHz

-จงจร *RLC* มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 32$ kHz

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega$, $L = 40\,\mu$H, $C = 0.6\mu$F



รูปที่ 4.27 ผลการจำลองกรณี C2 $[f_s > f_r : i \text{ lag } v]$

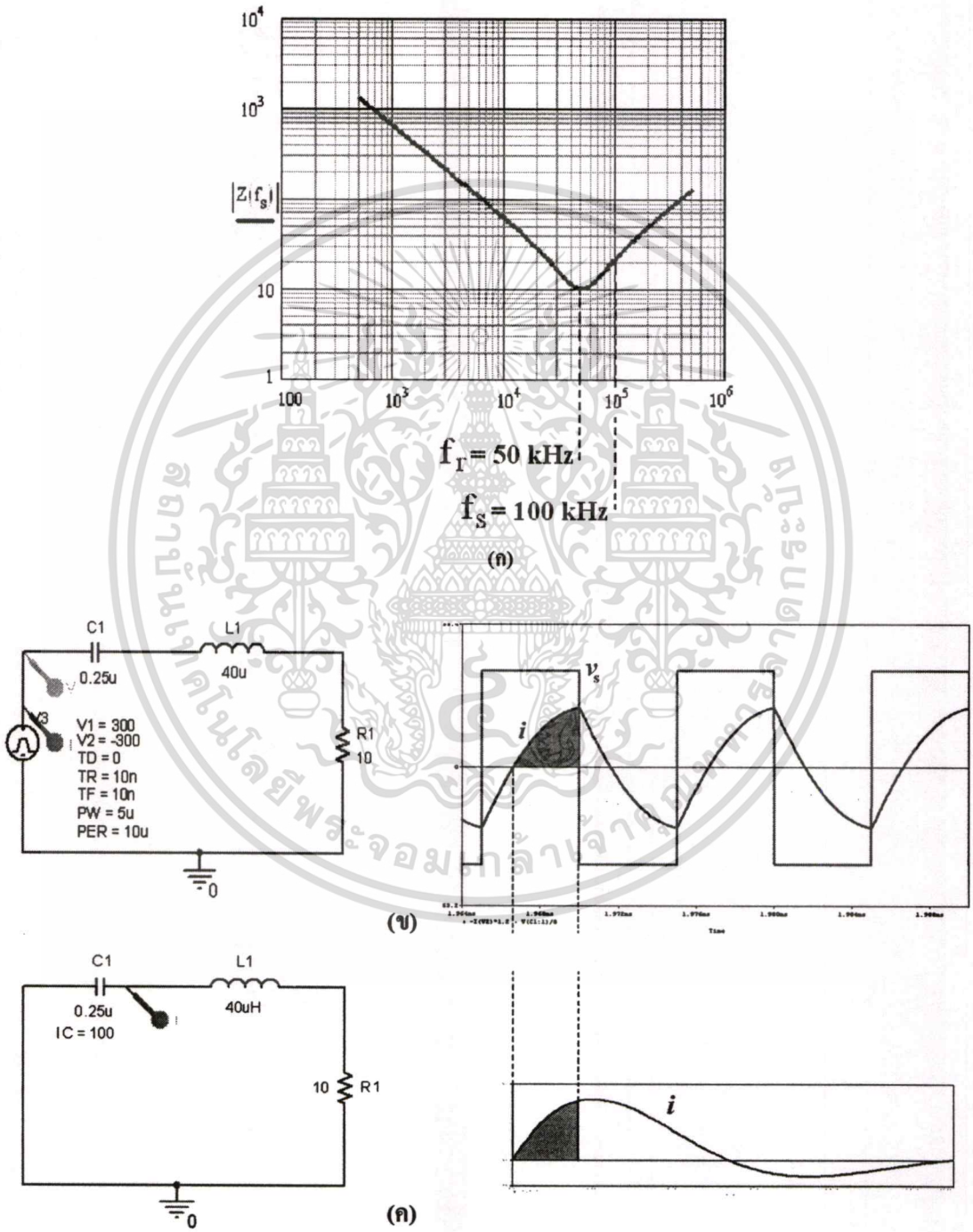
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>กรณี F2</u> $[f_s >> f_r : i \text{ lag } v]$

-แรงดันแหล่งจ่ายเป็นแบบสี่เหลี่ยม มีความถี่ $f_s = 100$ kHz

-วงจร RLC มีความถี่เรโซแนนซ์ $f_r = 50$ kHz

ประกอบไปด้วย $R = 10\Omega, \quad L = 40\,\mu\text{H}, \quad C = 0.25\mu\text{F}$



รูปที่ 4.28 ผลการจำลองกรณี F2 $[f_s >> f_r : i \text{ lag } v]$

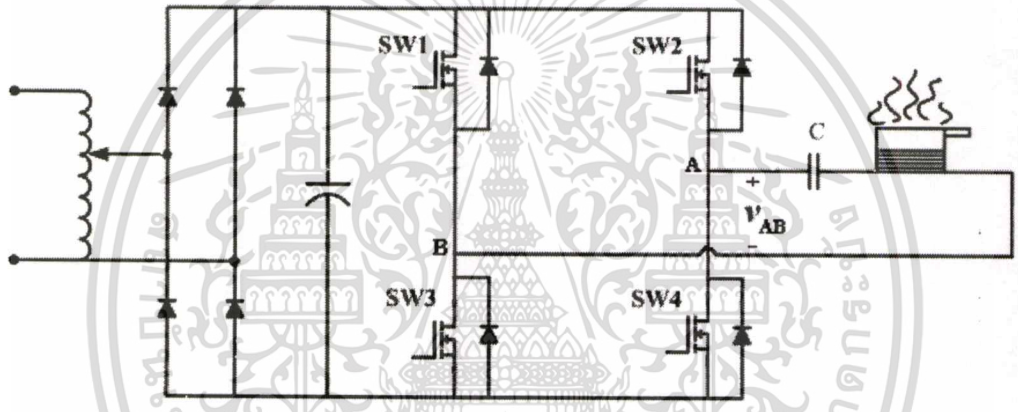
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลอง

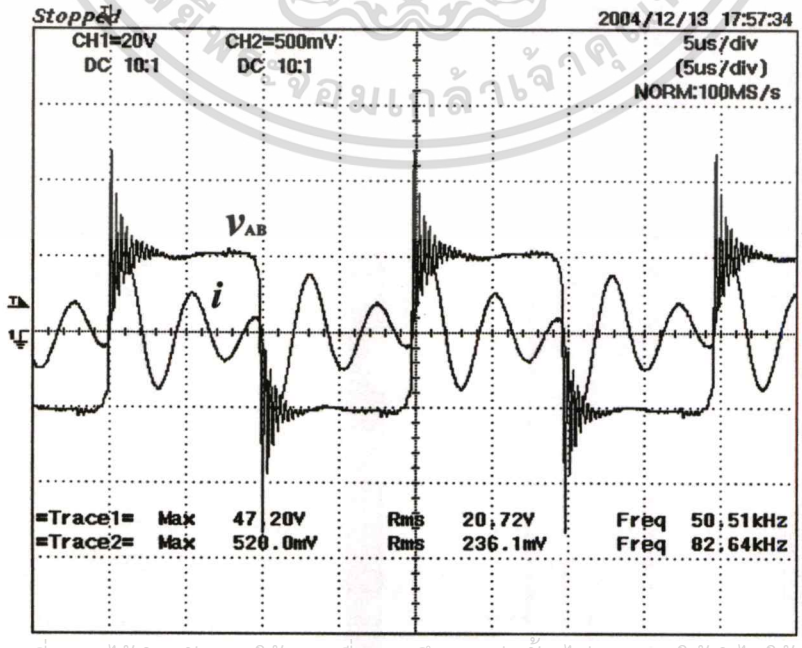
ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบที่ใช้ทดลอง มีวงจรฟูลบริดจ์เวอร์เตอร์เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลด มีวงจรแทนระบบดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดยจะมีการนำเสนอรูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (v_{AB}) และกระแสโหลดในกรณีต่างๆ เหมือนกับกรณีในการวิเคราะห์ด้วยหลักการสับการแกว่งในหัวข้อที่ 4.3.3 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแส ด้วยการสับการแกว่งทุกกรณีและเพิ่มกรณี E $[f_s >> f_d]$ อีกหนึ่งตัวอย่างดังนี้คือ

กรณี A $[f_s << f_d]$ กรณี C $[f_s = f_d]$

กรณี B $[f_s < f_d]$ กรณี D $[f_s > f_d]$ E $[f_s >> f_d]$

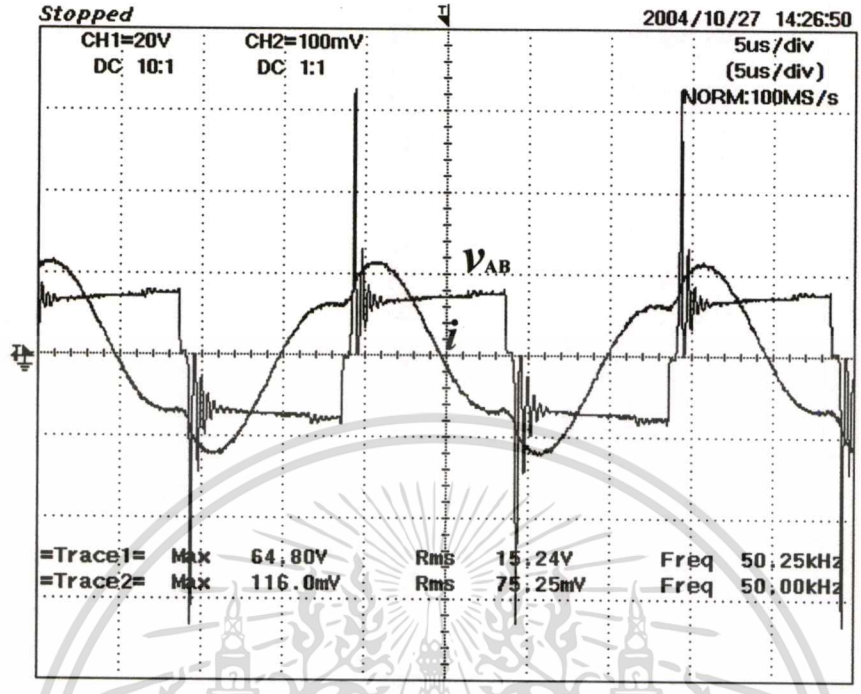


รูปที่ 4.29 วงจรแทนระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

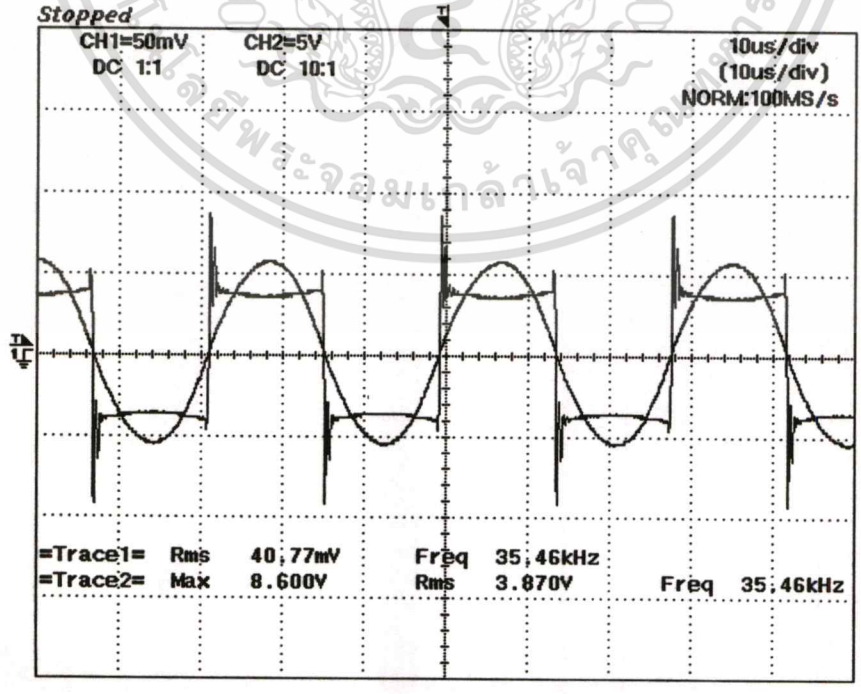


รูปที่ 4.30 กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s << f_d]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

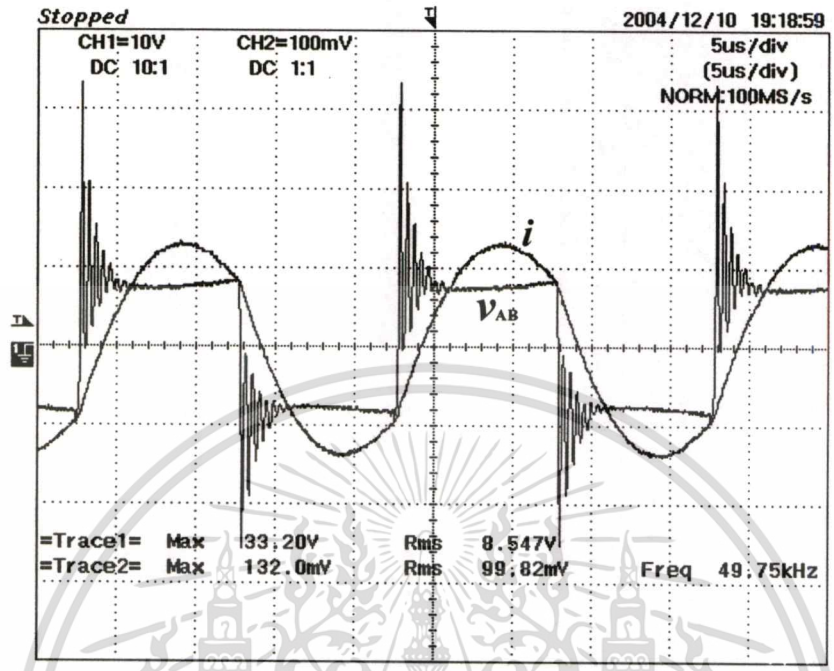


รูปที่ 4.31 กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s < f_d]$

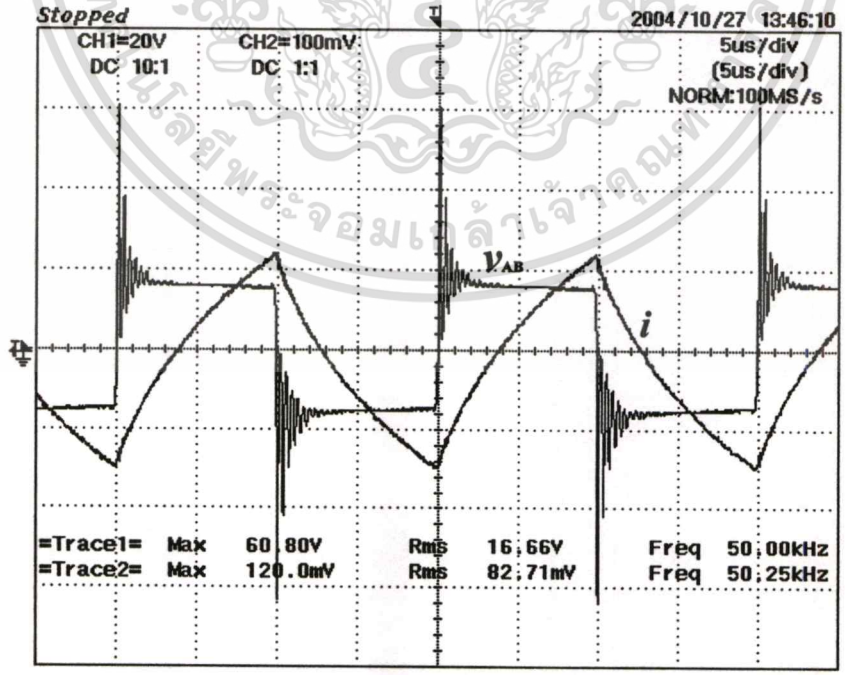


รูปที่ 4.32 กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s = f_d]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s > f_d]$



รูปที่ 4.34 กระแสและแรงดันกรณีที่ $[f_s >> f_d]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองในรูปที่ 4.30-4.34 เป็นการยืนยันหลักการสับการแกว่งที่เสนอไว้ก่อนหน้านี้ ว่ามีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสทั้งสะดวก ง่ายไม่ซับซ้อนยุ่งยาก ถูกต้องแม่นยำ ใช้ได้ดีทั้งการวิเคราะห์ในทางอนุโลมและปฏิโลม ซึ่งเป็นข้อดีที่การวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ไม่มี ดังเช่นตัวอย่างการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

<u>แบบอนุโลม</u> : ถ้าผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.30 ถามว่า "จะรู้ได้อย่างไรว่า f_s สัมพันธ์กับ f_d อย่างไร?"

การวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ → ไม่แน่ว่าจะทำได้

การวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่ง → ทำได้โดยง่าย สะดวกรวดเร็ว และสร้างความเข้าใจ ดังมีวิธีดังนี้

✧ เริ่มด้วยการนึกถึงภาพการแกว่ง (รูปที่ 4.18) เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการทดลองก็จะเข้าใจได้ทันทีว่า การแกว่งนั้นถูกสับเมื่อมีการแกว่งไปแล้วประมาณ 3 ยอด นั่นก็หมายถึง การแกว่งเกิดได้ประมาณ 2 คาบครึ่ง สวิตช์จึงได้มีการเปลี่ยนสถานะ เพื่อความกระจ่างชัดสามารถเขียนแบบบัญญัติไตรยางค์ง่ายๆ ได้ดังนี้

$$T_S \approx 2\left(\frac{1}{2}\right)T_d \quad \text{หรือ} \quad T_S \approx 5T_d \quad \Rightarrow \quad f_s \approx \frac{f_d}{5} \Rightarrow [f_s << f_d]$$

สรุปได้ทันทีว่าผลการทดลองดังรูปที่ 4.30 นั้น *"ความถี่สวิตชิ่งน้อยกว่าความถี่การแกว่งค่อนข้างมาก"*

<u>แบบปฏิโลม</u> : ถ้าถามย้อนกลับกับแบบอนุโลมว่า "ถ้า f_s น้อยกว่า f_d ประมาณ $f_s = \frac{f_d}{5}$ กระแสจะมีลักษณะอย่างไร?"

การวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ → ไม่สามารถทำได้ หรือ ต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมจึงจะทำได้แต่ก็ยังยุ่งยากมากอยู่ดี

การวิเคราะห์ด้วยการสับการแกว่ง → ทำได้โดยง่าย สะดวกรวดเร็ว และสร้างความเข้าใจ ดังมีวิธีดังนี้

✧ เริ่มด้วยการนึกถึงภาพการแกว่ง (รูปที่ 4.18) โดยมีคาบเวลาเท่ากับ T_d จากนั้นทำการสับการแกว่งนี้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามคำถามที่ตั้งไว้คือ $T_S \approx 5T_d$ จะเห็นได้ทันทีว่า *"การแกว่งเกิดขึ้นได้ประมาณ 3 ยอดแล้วสวิตช์ก็จะเปลี่ยนสถานะ"* (Duty cycle= 50%)

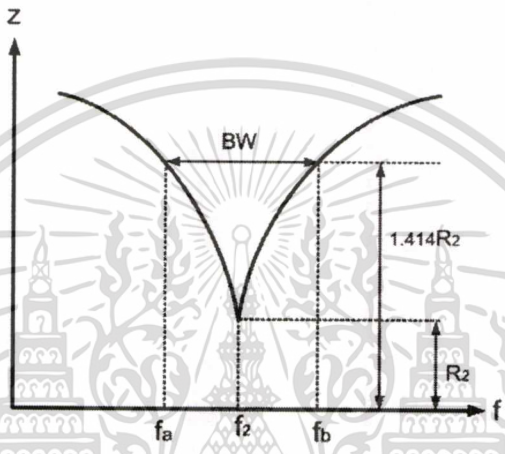
จากตัวอย่างการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าหลักการสับการแกว่งสามารถวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณกระแสได้จริงและเป็นประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะเป็นวิธีการที่สร้างความเข้าใจโดยภาพรวมได้เป็นอย่างดีระหว่างกรณีความสัมพันธ์ของความถี่สวิตชิ่งกับความถี่ของการแกว่งถึงผลที่จะเกิดขึ้นต่อลักษณะของสัญญาณกระแส เหมาะทั้งผู้สนใจทั่วไปและผู้เริ่มศึกษาใหม่ในเรื่องนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5. การวิเคราะห์อิทธิพลของ S ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแส

ตัว S คือค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ (sharpness of resonant point) หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่าค่าตัวประกอบคุณภาพ (quality factor)

นิยามของ S ในวงจร RLC แบบอนุกรม (รูปที่ 4.1) เป็นที่ทราบกันดีดังสมการที่ (4.52) และนิยามของ S ในกราฟคุณลักษณะเฉพาะ ความถี่-อิมพีแดนซ์ สามารถหาได้ดังรูปที่ 4.53 และสมการที่ (4.54)



รูปที่ 4.35 กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์

$$S_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{\omega L_2}{R_2} \tag{4.52}$$

$$BW = f_b - f_a \tag{4.53}$$

$$S_2 = \frac{f_2}{BW} \tag{4.54}$$

จากรากของสมการโพลิโนเมียลอันดับสองในรูปทั่วไปดังสมการที่ (4) สามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี

$$\lambda = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{4.55}$$

1. กรณี $b^2 - 4ac > 0$ [over damped oscillation]
2. กรณี $b^2 - 4ac = 0$ [critical damped oscillation]
3. กรณี $b^2 - 4ac < 0$ [under damped oscillation]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 ค่าตัวต้านทานวิกฤติ (R_C)

ค่า R_C คือค่าที่ทำให้เกิดกรณี critical damped oscillation สำหรับวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม (รูปที่ 4.1) มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$a=1, \qquad b=R_2, \qquad c=\frac{1}{L_2C_2}$$

$$\left(\frac{R_C}{L_2}\right)^2-4(1)\left(\frac{1}{L_2C_2}\right)=0$$

$$R_C{}^2=\frac{4L_2}{C_2}$$

$$\therefore \quad R_C=2\sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \tag{4.56}$$

มีความหมายว่า ถ้า $R_2 < R_C$ มีการแกว่งเกิดขึ้น

$R_2 = R_C$ จะพอดีเกิดการแกว่ง

$R_2 > R_C$ จะไม่เกิดการแกว่งขึ้น

4.5.2 อัตราการหน่วง (Damped ratio: ξ)

Damped ratio (ξ) เป็นการกำหนดค่า R_2 ในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมเทียบกับค่า R_C ซึ่งมีนิยามตามสมการที่ (4.57)

$$\xi=\frac{R_2}{R_C} \tag{4.57}$$

จากสมการที่(4.57)

$$D^2+\left(\frac{R_2}{L_2}\right)D+\frac{1}{L_2C_2}=0 \tag{4.58}$$

กำหนดให้

$$\frac{R_2}{L_2}=2\xi\omega_0 \tag{4.59}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi = \frac{R_2}{2\omega_0 L_2} \tag{4.60}$$

โดยที่ ω_0 คือ ความถี่เชิงมุมที่จุดเรโซแนนซ์

แทนค่า S จากสมการที่ (4.52) ในสมการที่ (4.60) จะได้ว่า

$$\xi = \frac{1}{2S} \tag{4.61}$$

จัดรูปสมการอนุพันธ์อันดับสองให้อยู่ในเทอมของตัว S ได้ดังสมการที่ (4.63)

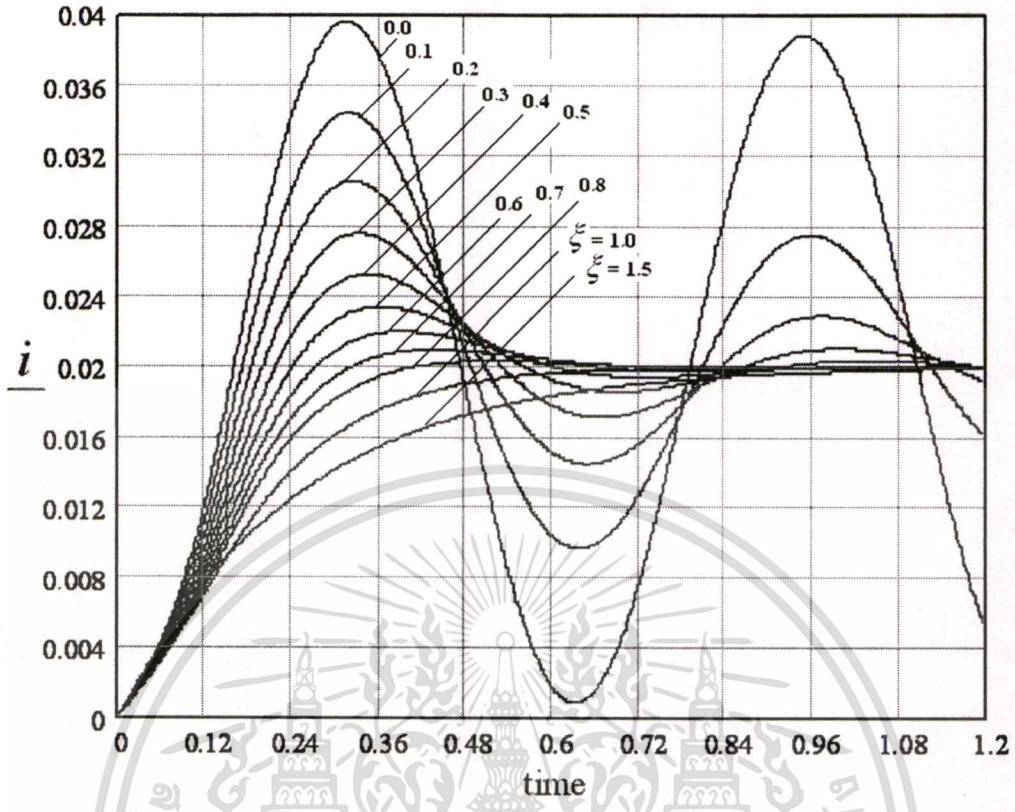
$$D^2 + (2\xi\omega_0)D + \frac{1}{L_2 C_2} = 0 \tag{4.62}$$

$$D^2 + \left(\frac{\omega_0}{S}\right)D + \frac{1}{L_2 C_2} = 0 \tag{4.63}$$

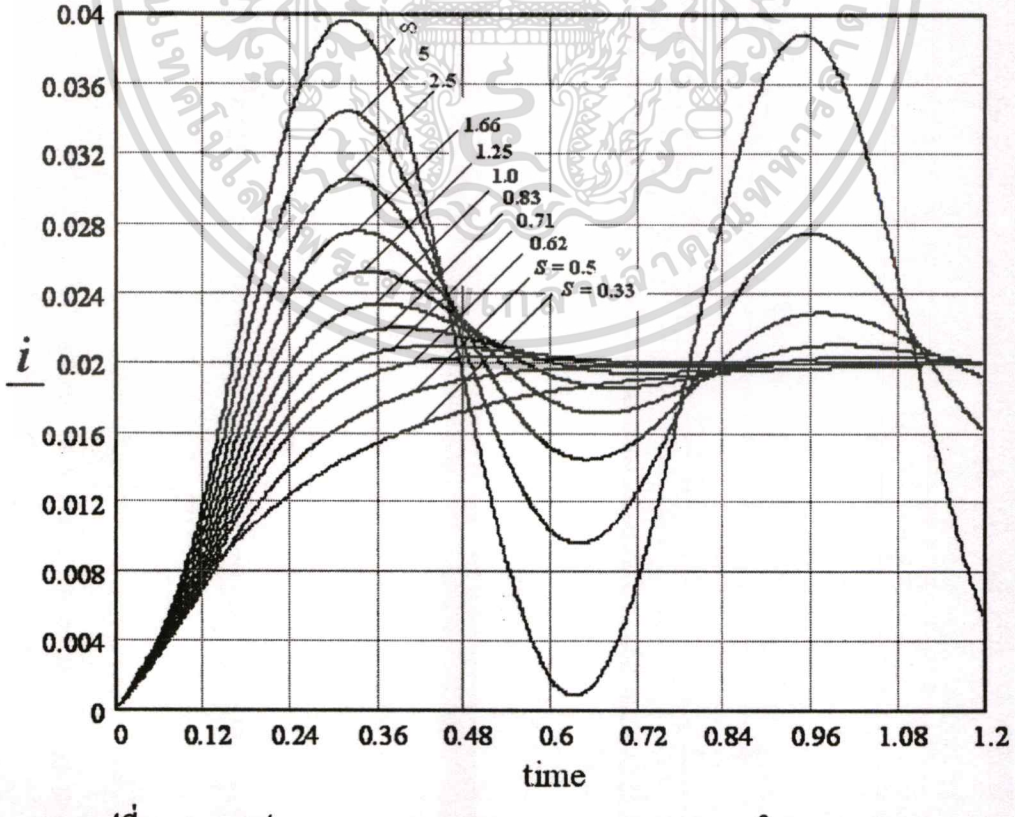
4.5.3 เขียนกราฟการแกว่งในเทอมของ S

โดยทั่วไปมีการเขียนกราฟรูปคลื่นการแกว่งของวงจร RLC ที่ค่า ξ ต่างๆกัน แต่มีค่า ω_0 เท่ากันและเป็นวงจรที่มีค่าสภาวะเริ่มต้นเป็นศูนย์ รูปคลื่นที่สำเร็จนี้เรียกว่า second-order normalized response curve อยู่แล้ว [5] ดังรูปที่ 4.36 ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจัดสมการจากในพจน์ของ ξ มาให้อยู่ในรูปของตัว S ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์อิทธิพลของตัว S ที่มีต่อลักษณะสัญญาณกระแสและก็สามารถนำสมการดังกล่าว (สมการที่(4.63)) มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ (4.37)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟ Second-order normalized response curve ในเทอมของ ξ



รูปที่ 4.37 กราฟ Second-order normalized response curve ในเทอมของ S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

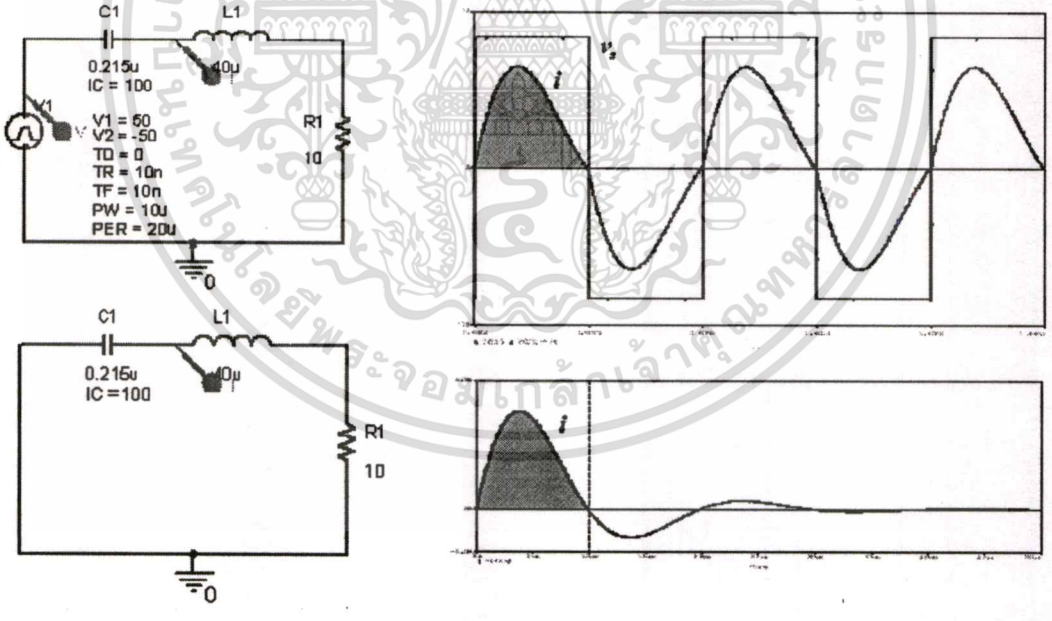
4.5.4 วิเคราะห์อิทธิพลของค่า S ที่มีต่อลักษณะของสัญญาณกระแส ด้วยหลักการสับการแกว่ง

จากกราฟการแกว่งในรูปที่ (4.37) จะเห็นว่า S ในแต่ละเส้นมีค่าต่างกันในขณะที่คาบเวลาของการแกว่งมีค่าเท่าๆกัน อาศัยหลักการสับการแกว่งที่ได้เสนอในภาคก่อนหน้านี้ยิ่งทำให้เห็นชัดโดยเฉพาะถ้าคิดในกรณีเดียวกันทั้งหมดคือกรณีที่สับการแกว่งแบบ $f_s = f_d$ ซึ่งยอดแรกจะโดยสับพอดี สัญญาณกระแสกับแรงดันจะพอดีเฟสกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างการวิเคราะห์

กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร RLC เรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมมีค่าดังนี้ $R = 10\Omega$, $L = 40\mu\text{H}$, $C = 0.215\mu\text{F}$ เมื่อจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ได้ผลของกระแสและแรงดันดังรูปที่ (4.38) ซึ่งกระแสและแรงดันแม้จะพอดีเฟสกันแต่กระแสก็ไม่ได้มีลักษณะเป็นไซน์สวยงาม (Pure sine) เมื่อพิจารณาหาค่า S ของวงจรได้ดังสมการที่ (4.64)

$$S = \frac{2\omega L}{R} = 1.26 \tag{4.64}$$

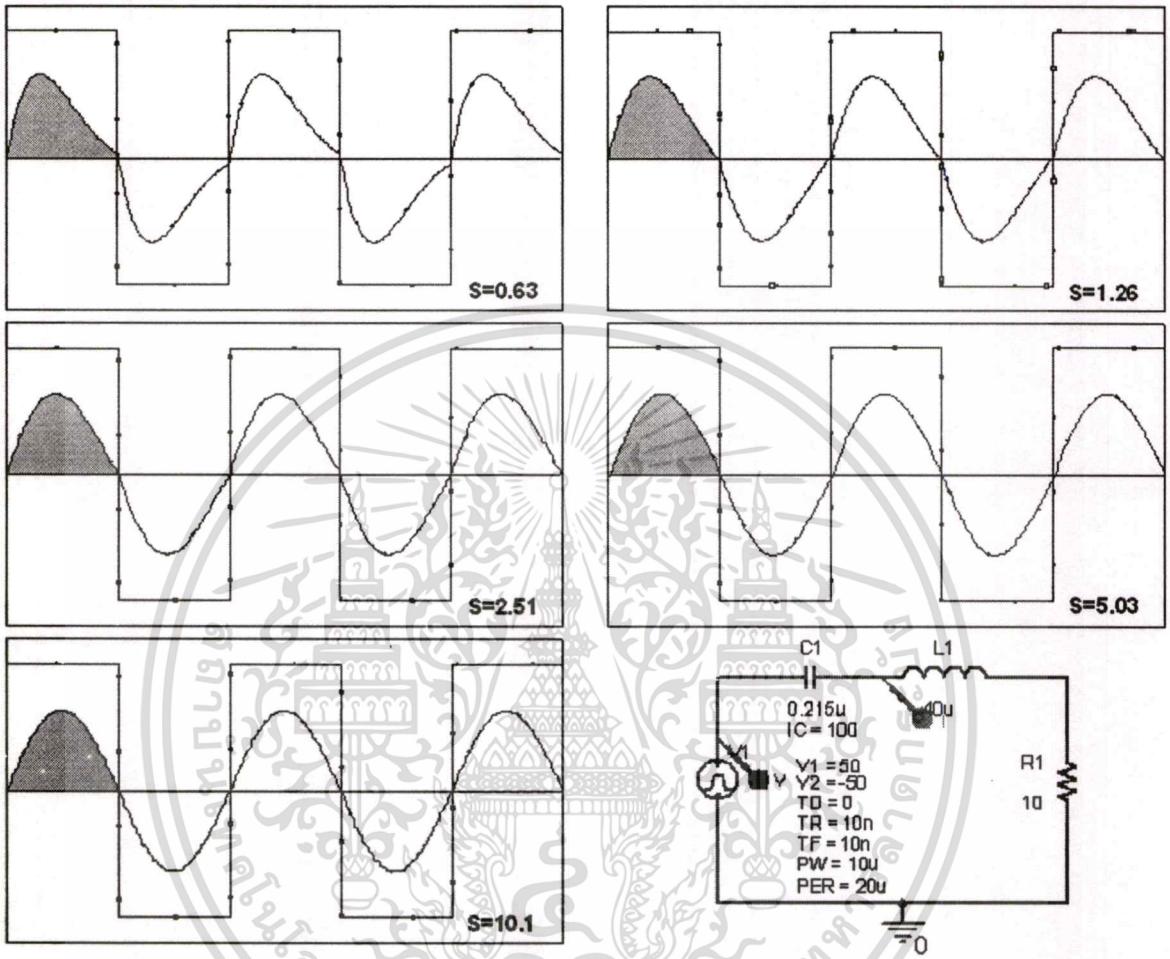


รูปที่ 4.38 การจำลองและลักษณะของสัญญาณกระแส แรงดันกรณีที่ $S = 1.26$

เมื่อจำลองในทำนองเดียวกัน โดยให้อยู่ในกรณีที่กระแสและแรงดันพอดีเฟสกันเท่านั้นแต่ค่า S ของวงจรมีค่าเปลี่ยนไปดังนี้ 0.63, 1.26, 2.51, 5.03 และ 10.1 ได้ผลเทียบกันดังรูปที่ (4.39) ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแสแตกต่างกัน โดยกระแสจะมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์เรื่อยๆ เมื่อค่า S มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกราฟ Second-order normalized response curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเทอมของ S (รูปที่ (4.37)) และสอดคล้องกับคำกล่าวที่ว่า *"ต้อง $S \geq 5$ จึงถือว่ามีค่าสูงพอที่จะทำให้กระแสเป็นไซน์สวยงาม"* [6]



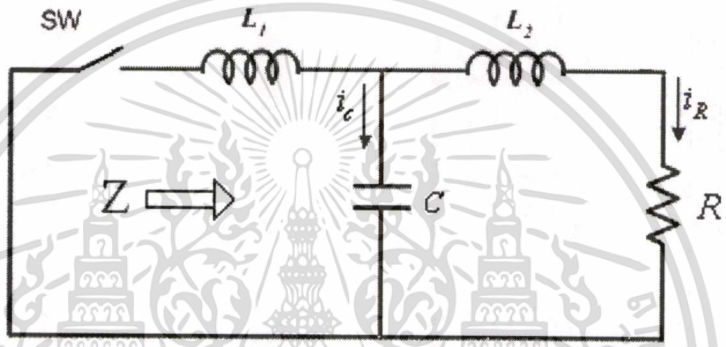
รูปที่ 4.39 สัญญาณกระแสและแรงดันในแต่ละค่า S ของวงจร RLC แบบอนุกรม

จากผลการจำลองกรณีที่เปลี่ยนค่า S จากน้อยไปมากดังรูปที่ 4.39 และการจัดรูปสมการทางคณิตศาสตร์จนได้ความสัมพันธ์ของการแกว่งในเทอมของตัว S และเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.37 แล้วก็ตาม หากไม่อาศัยหลักการสับการแกว่งช่วยอธิบายว่ากรณีที่กระแสกับแรงดันพอดีเฟสกันนั้นคือการสับการกราฟการแกว่งของยอดแรกในรูปที่ 4.37 ก็จะไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่า "ค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ มีอิทธิพลต่อลักษณะของสัญญาณกระแสอย่างไร ?" และ "ต้อง $S \geq 5$ จึงถือว่ามีค่าสูงพอที่จะทำให้กระแสเป็นไซน์สวยงาม"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบแอลซีแอล โดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์

วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำสองตัว ตัวเก็บประจุหนึ่งตัวและตัวต้านทานอีกหนึ่งตัวต่อกันมีลักษณะดังรูปที่ (4.40) สาเหตุที่เรียกว่าวงจรอันดับสามก็เนื่องมาจาก มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุรวมทั้งหมด 3 ส่วน (ตัวเหนี่ยวนำรวม 2 ส่วนและตัวเก็บประจุอีก 1 ส่วน) ซึ่งถ้าเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะของวงจรก็จะได้เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสาม



รูปที่ 4.40 วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL

4.6.1 ประเด็นในการวิเคราะห์

ประเด็นอันเป็นข้อดีโดดเด่นของวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ก็คือ การที่ทำให้ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำไม่ต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่ง (matching transformer) หรือเรียกโดยย่อว่า "***ไร้หม้อแปลง***" (transformerless) [15-16]

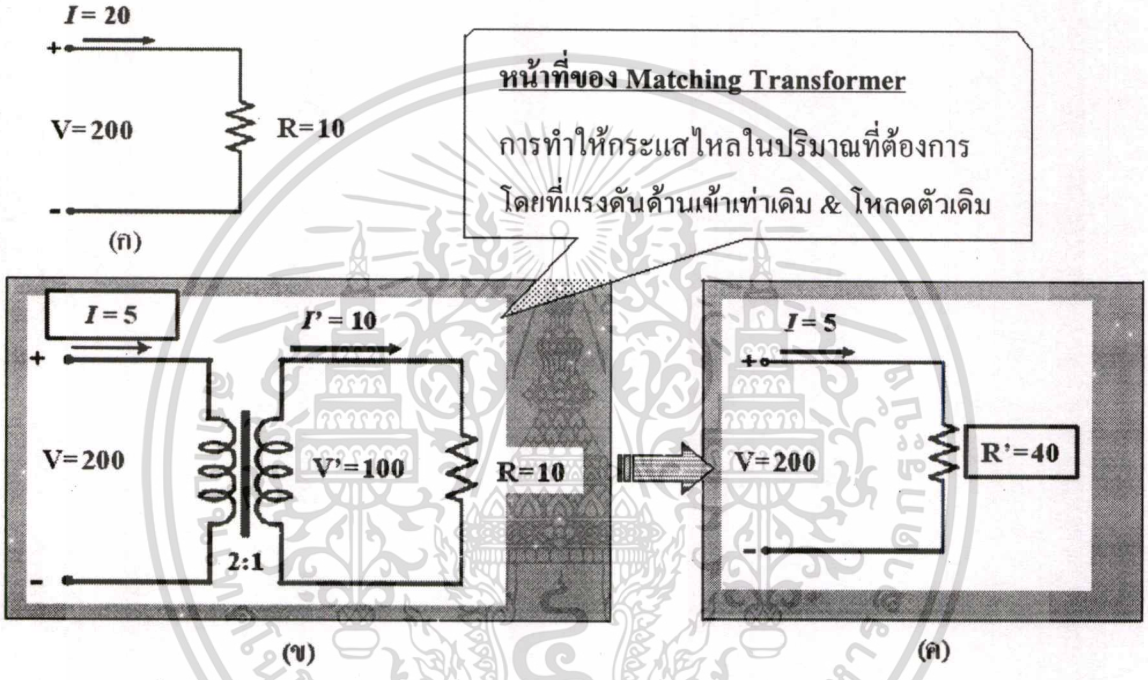
สาเหตุที่ระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำจำเป็นต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่งก็เพราะโหลดซึ่งเป็นชนิดเหนี่ยวนำซึ่งมีลักษณะเป็นการขดลวดตัวนำนั้นมีค่าความต้านทานน้อยมาก เมื่อต่อเข้ากับแหล่งจ่ายจะทำให้กระแสไหลในปริมาณสูง ไม่ได้สัดส่วนสอดคล้องกับพิกัดของอุปกรณ์และความต้องการ ดังนั้นโดยระบบการให้ความร้อนโดยทั่วไป จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าช่วยในการปรับให้ได้สัดส่วนการไหลของกระแสกับแรงดันที่ป้อนให้มีค่าตามที่ต้องการ และอุปกรณ์ต่างๆสามารถทนได้ แต่เนื่องจากหม้อแปลงมีข้อเสียบางประการที่ควรปรับปรุง คือ มีน้ำหนักมาก ต้องใช้พื้นที่ในการวางทำให้ระบบระบบมีขนาดใหญ่ไม่กระทัดรัด

4.6.2 หน้าที่ของหม้อแปลงแมทชิ่งในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า โหลดแบบเหนี่ยวมีค่าความต้านทานต่ำมากต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่ง ช่วยในการทำให้กระแสไหลได้ในปริมาณที่ต้องการ โดยที่แรงดันด้านเข้าเท่าเดิมจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวเดิม และนี่เองคือหน้าที่หลักอันสำคัญประการหนึ่งของหม้อแปลงแมทชิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.41(ก) จะเห็นว่าแรงดันด้านเข้ามีขนาด 100 V โหลดเป็นตัวต้านทานขนาด 10 Ω ทำให้กระแสไหลในวงจรสูงถึง 20 A ถ้าอุปกรณ์ไม่อาจทนได้ก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้ด้วยการใช้หม้อแปลงแมทชิ่งดังรูป 4.41(ข) ซึ่งมีอัตราส่วนกระแส (I_1 / I_2: กระแสปฐมภูมิต่อกระแสทุติยภูมิ) เป็นหนึ่งต่อสอง ทำให้โหลดถูกมองเปลี่ยนไปจากเดิมเป็น 40 Ω ดังรูปที่ 4.41(ค) ทำให้กระแสทางด้านเข้าปฐมภูมิของหม้อแปลง (มีขนาดลดลงเป็น 5 A ภายใต้แรงดันที่เท่าเดิม และเป็นโหลดตัวเดิม บรรลุหน้าที่ของหม้อแปลงแมทชิ่งประการหนึ่ง



รูปที่ 4.41 หน้าที่ของหม้อแปลงแมทชิ่งในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

4.6.3 วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL แทนหม้อแปลงแมทชิ่งได้อย่างไร

การจะตอบว่าวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL แทนหม้อแปลงแมทชิ่งได้อย่างไรนั้น ต้องอาศัยการเขียนกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ช่วยในการวิเคราะห์ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากรูปที่ (4.40) มองอิมพีแดนซ์ของวงจรสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.64)

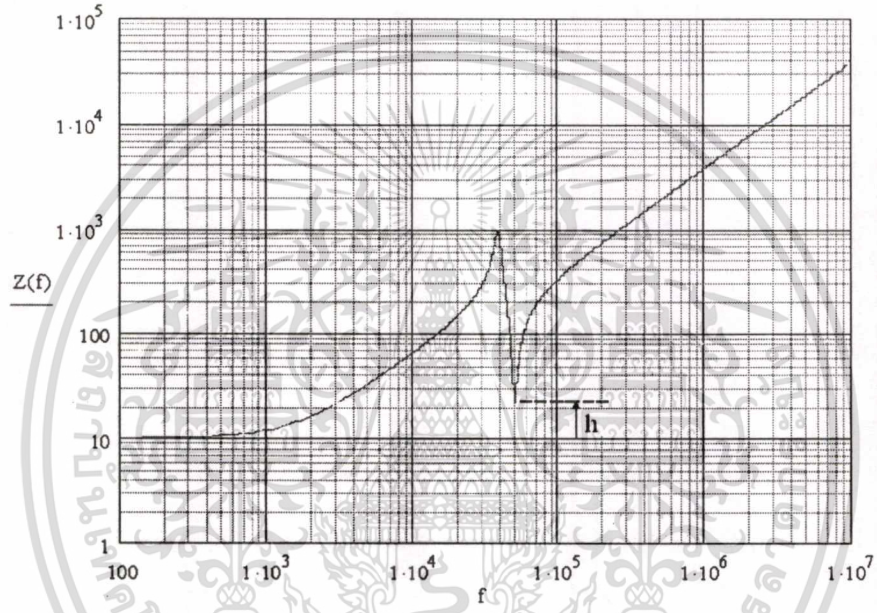
$$Z = j\omega L_1 + \left(\frac{R + j\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C + j\omega RC} \right) \tag{4.64}$$

กระจายสมการที่ (4.64) ให้อยู่ในเทอมความถี่ ดังสมการที่ (4.65)

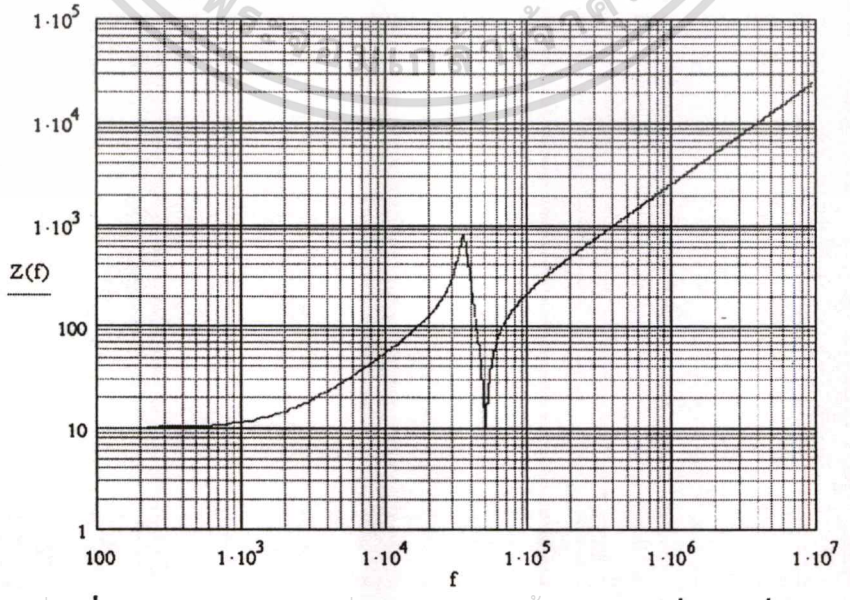
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \frac{\left(j\omega L_1 - j\omega^3 L_1 L_2 C - \omega^2 L_1 CR\right) + \left(R + j\omega L_2\right)}{1 - \omega^2 L_2 C + j\omega RC} \tag{4.65}$$

จากสมการที (4.65) เมื่อนำไปเขียนการฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ สามารถแบ่งให้สอดคล้องกับการทำงานของหม้อแปลงแมทชิ่งได้ 3 แบบ คือ แบบที่ 1 แบบลดระดับแรงดัน (step down) แบบที่ 2 แบบหนึ่งต่อหนึ่ง และแบบที่ 3 แบบยกระดับแรงดัน (step up) ดังแสดงในรูปที่ 4.43-4.45

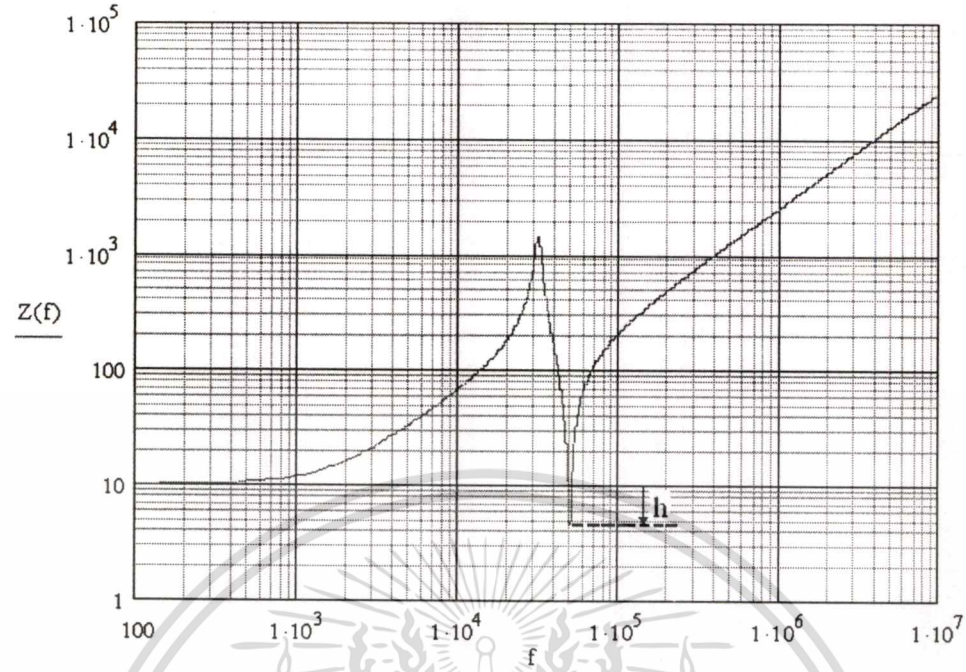


รูปที่ 4.43 กราฟ f-z ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL แบบลดระดับแรงดัน



รูปที่ 4.44 กราฟ f-z ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL แบบหนึ่งต่อหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 กราฟ f-z ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL แบบเพิ่มระดับแรงดัน

ข้อสังเกต ในการแบ่งจำพวกของกราฟที่ 4.43-4.45 นั้นต้องพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมหรือจุดเรโซแนนซ์ ณ ยอดด้านต่ำของกราฟ f-z [1] หากเป็นจุดเรโซแนนซ์ ณ ยอดด้านสูงจะเป็นจะเป็นความถี่เรโซแนนซ์ชนิดขนาน ยกตัวอย่างดังเช่นในรูปที่ 4.43 ค่าอิมพีแดนซ์ ณ ความถี่เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมนั้นมีค่าสูงขึ้นไปจากค่า 10 Ω เป็นขนาด h Ω มีความหมายดังต่อไปนี้ คือ สมมุติว่าเดิมมีโหลดตัวต้านทานขนาด 10 Ω เมื่อนำวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ไปต่อเข้ากับโหลดดังกล่าวจะได้กราฟ f-z ดังรูปที่4.43 ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรม โหลดตัวเดิมจะถูกมองว่ามีค่าอิมพีแดนซ์สูงขึ้นไปจากเป็น 10+h Ω ทำให้กระแสไหลได้น้อยลง นั่นแสดงว่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทานตัวนั้นมีค่าต่ำลงจากเดิมด้วย เป็นลักษณะที่สอดคล้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ “ลดระดับแรงดัน”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 การวิเคราะห์กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ LCL ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

ก. การวิเคราะห์หาความถี่ ณ จุดเรโซแนนซ์ต่ำที่สุด

เมื่อนำสมการของอิมพีแดนซ์จากสมการที่ (4.65) ไปเขียนกราฟจะได้ลักษณะดังรูปที่ 4.43 ถ้าค่า L_1 มากกว่า L_2 พิจารณาหาจุดเรโซแนนซ์ (จุดล่าง) และแทนค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ศูนย์ในสมการที่ (4.65) จะได้ดังสมการที่ (4.66) และเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพให้เท่ากับศูนย์จะได้ดังสมการ (4.67)

$$0 \approx \left(j\omega L_1 - j\omega^3 L_1 L_2 C - \omega^2 L_1 CR\right) + \left(R + j\omega L_2\right) \tag{4.66}$$

$$0 = j\omega L_1 - j\omega^3 L_1 L_2 C + j\omega L_2 \tag{4.67}$$

$$0 = j\omega\left(L_1 + L_2 + \omega^2 L_1 L_2 C\right) \tag{4.68}$$

$$\omega^2 L_1 L_2 C = L_1 + L_2 \tag{4.69}$$

$$\omega^2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \tag{4.70}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \tag{4.71}$$

จะได้ความถี่เรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมดังสมการที่ (4.72)

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \tag{4.72}$$

ข. ขั้นตอนการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูป (Real) + [Imaginary]j

จากสมการที่ (4.65) $$Z = \frac{j\omega L_1 - j\omega^3 L_1 L_2 C - \omega^2 L_1 CR + j\omega L_2 + R}{\left(1 - \omega^2 L_2 C\right) + j\omega RC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปใหม่เป็น

$$Z=\frac{\left(j\omega L_1-j\omega^3 L_1L_2C+j\omega L_2\right)-\left(\omega^2 L_1RC+R\right)}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)+j\omega RC} \tag{4.73}$$

จากสมการที่ (4.65) แบ่งเป็นสองส่วนคือ A+B

ส่วนที่ A พิจรณาเฉพาะพจน์ต่อไปนี้ก่อน

$$A=\frac{-\omega^2 L_1RC+R}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)+j\omega RC} \tag{4.74}$$

ส่วนที่ B พิจรณาเฉพาะพจน์ต่อไปนี้

$$B=\frac{\left(j\omega L_1-j\omega^3 L_1L_2C+j\omega L_2\right)}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)+j\omega RC} \tag{4.75}$$

<u>ส่วนที่ A</u>

$$A=\frac{-\omega^2 L_1RC+R}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)+j\omega RC} \tag{4.76}$$

คูณด้วยคอนจูเกต

$$A=\frac{\left(-\omega^2 L_1RC+R\right)\left(1-\omega^2 L_2C-j\omega RC\right)}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)^2+\left(\omega RC\right)^2} \tag{4.77}$$

กระจายสมการจะได้

$$A=\frac{\left[\omega^4 L_1L_2RC^2-\omega^2 RC\left(L_1+L_2\right)+R\right]}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)^2+\left(\omega RC\right)^2}+j\frac{\left[\omega^3 L_1C^2R^2-\omega CR^2\right]}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)^2+\left(\omega RC\right)^2} \tag{4.78}$$

จากสมการที่ (4.78)

$$\mathrm{Re}[A]\Rightarrow\frac{R+\left[\omega^4 L_1L_2RC^2-\omega^2 RC\left(L_1+L_2\right)\right]}{\left(1-\omega^2 L_2C\right)^2+\left(\omega RC\right)^2}$$ เป็นส่วนจริง (real part) ในส่วนที่ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathrm{Im}[A] = j\frac{\left[\omega^3 L_1 C^2 R^2 - \omega C R^2\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2}$$ เป็นส่วนจินตภาพ (imaginary part) ในส่วนที่ A

<u>ส่วนที่ B</u>

$$B = \frac{\left(j\omega L_1 - j\omega^3 L_1 L_2 C + j\omega L_2\right)}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right) + j\omega RC} \tag{4.79}$$

คูณด้วยคอนจูเกต $$B = \frac{\left(j\omega L_1 - j\omega^3 L_1 L_2 C + j\omega L_2\right)\left(1-\omega^2 L_2 C - j\omega RC\right)}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right) + j\omega RC} \tag{4.79ก}$$

กระจายสมการจะได้

$$B = \frac{\left[j\omega L_1 - j\left(2\omega^3 L_1 L_2 C\right) + j\omega L_2 + j\left(\omega^5 L_1 L_2^2 C^2\right) - j\omega^3 L_2^2 C\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} + \frac{\left[\omega^2 C L_1 R + \omega^4 C^2 L_1 L_2 R + \omega^2 C L_2 R\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} \tag{4.80}$$

นำค่าในส่วนจริง (real part) กับส่วนจินตภาพ (imaginary part) ของทั้งส่วนที่ A และส่วนที่ B มารวมกัน

$$Z = A + B \tag{4.81}$$

$$Z = \frac{R + \left[\omega^4 L_1 L_2 R C^2 - \omega^2 RC\left(L_1 + L_2\right)\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} + j\frac{\left[\omega^3 L_1 C^2 R^2 - \omega C R^2\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} +$$
$$\frac{\left[\omega^2 C L_1 R + \omega^4 C^2 L_1 L_2 R + \omega^2 C L_2 R\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} + \frac{\left[j\omega L_1 - j\left(2\omega^3 L_1 L_2 C\right) + j\omega L_2 + j\left(\omega^5 L_1 L_2^2 C^2\right) - j\omega^3 L_2^2 C\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} \tag{4.82}$$

$$Z = \frac{R}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} + j\frac{\left[\left(\omega L_1 - 2\omega^3 L_1 L_2 C + \omega^5 L_1 L_2^2 C^2\right) + \omega^3 L_1 C^2 R^2 + \omega L_2 - \omega^3 L_2^2 C - \omega R^2 C\right]}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + \left(\omega RC\right)^2} \tag{4.83}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ประกอบไปด้วยส่วนจริงและจินตภาพดังต่อไปนี้

$$Z = R_{eq} + jX_{eq} \tag{4.84}$$

$$R_{eq} = \frac{R}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + (\omega RC)^2} \tag{4.85}$$

$$X_{eq} = \omega L_1 + \frac{\omega L_2 - \omega^3 L_2{}^2 C - \omega R^2 C}{\left(1-\omega^2 L_2 C\right)^2 + (\omega RC)^2} \tag{4.86}$$

จากการจัดรูปสมการอิมพีแดนซ์ของวงจร LCL ในรูปที่ 4.40 ทำให้สามารถทราบค่าอิมพีแดนซ์แยกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพในเทอมของความถี่ได้ ซึ่งหมายความว่าถ้าทราบค่าคงที่ของ R L C และความถี่ที่ทำงานก็จะสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์สมมูลทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้ โดยเฉพาะที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งจะคงมีเฉพาะส่วนจริงหรือค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ถึงแม้จะสามารถหาค่าความต้านทานสมมูลที่จุดเรโซแนนซ์และทำให้ทราบได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น ลดลงหรือเท่าเดิมจากวิธีการทางคณิตศาสตร์ข้างต้นก็ตาม หรืออาจใช้วิธีทฤษฎีส่วนเพิ่มพิเศษของมิดเดิ้ลบรูก (Middlebrook's Extra Element Theorem) [7] ก็ได้ แต่ทั้งสองล้วนเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนยุ่งยาก มีการแก้สมการและการประมาณค่าหลายขั้นตอน ไม่ช่วยเสริมสร้างความเข้าใจโดยภาพรวม แต่ถ้าหากใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ดังที่เขียนแสดงในรูปที่ 4.43-4.45 ประกอบกับหลักการสับการแกว่งที่ได้เสนอไว้ข้างต้นจะทำให้สามารถเข้าใจเหตุผลที่มาที่ไปและยังสามารถอธิบายถึงลักษณะของสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นได้ด้วย ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.6.5 การวิเคราะห์วงจร LCL ด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และหลักการสับการแกว่ง

จากหลักการความสัมพันธ์ของการแกว่ง ถ้าพิจารณากราฟกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์แล้วพบว่าค่า $S > 0.5$ ย่อมเกิดการแกว่งขึ้นอย่างแน่นอนและความถี่ของการแกว่งก็จะค่อนข้างใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์มากแต่ไม่ใช่ตัวเดียวกัน แม้บ้างครั้งในส่วนของการทำนายอาจอนุโลมได้ตามจุดประสงค์ของการวิเคราะห์และลักษณะของวงจรก็ตาม จากรูปที่ 4.43-4.45 จะเห็นว่าแต่ละรูปมีจุดเรโซแนนซ์สองจุดคือจุดเรโซแนนซ์ด้านบนกับจุดเรโซแนนซ์ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จุดเรโซแนนซ์ชนิดขนานกับจุดเรโซแนนซ์ชนิดอนุกรมตามลำดับ ดังมีรายละเอียดในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตอนต้น)

ในการออกแบบเลือกความถี่ในการทำงานจะเลือกที่ *จุดเรโซแนนซ์ด้านล่าง* ทั้งนี้เพราะแหล่งจ่ายแรงดันเป็นชนิดควบคุมด้วยแรงดัน (voltage control voltage source)

ในเมื่อจุดเรโซแนนซ์ด้านล่างเป็นจุดที่ใช้ในการออกแบบย่อมถือเป็นกุญแจสำคัญในการวิเคราะห์ดังมีรายละเอียดการวิเคราะห์ในแต่ละรูปดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.43 ที่ถูกจำแนกให้เป็นประเภทลดระดับแรงดันเพราะว่าที่จุดเรโซแนนซ์ด้านล่างค่าอิมพีแดนซ์มีค่าสูงขึ้นจากเดิมเป็น 10+h Ω ทำให้กระแสไหลผ่านโหลดน้อยลง (เทียบกับ 10 Ω) ซึ่งสอดคล้องกับหม้อแปลงแมทชิ่งชนิดลดระดับแรงดัน

รูปที่ 4.44 ที่ถูกจำแนกให้เป็นประเภทหนึ่งต่อหนึ่งเพราะว่าที่จุดเรโซแนนซ์ด้านล่างค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเท่าเดิมคือ 10 Ω ทำให้กระแสไหลผ่านโหลดเท่าเดิม ซึ่งสอดคล้องกับหม้อแปลงแมทชิ่งชนิดหนึ่งต่อหนึ่ง

รูปที่ 4.45 ที่ถูกจำแนกให้เป็นประเภทยกระดับแรงดันเพราะว่าที่จุดเรโซแนนซ์ด้านล่างค่าอิมพีแดนซ์มีต่ำลงจากเดิมเป็น 10-h Ω ทำให้กระแสไหลผ่านโหลดมากขึ้น (เทียบกับ 10 Ω) ซึ่งสอดคล้องกับหม้อแปลงแมทชิ่งชนิดยกระดับแรงดัน

จะเห็นว่าการใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ช่วย ทำให้การวิเคราะห์ง่ายสะดวกและชัดเจนขึ้น ต่างจากการวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว และข้อสังเกตสำคัญอย่างหนึ่งที่สังเกตได้จากการเขียนกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ ที่ทำให้สามารถจำแนกลักษณะของกราฟออกเป็นสามจำพวกดังที่กล่าวไว้แล้วได้ นั่นก็คือความสัมพันธ์ระหว่าง L_1 กับ L_2

โดยถ้า $L_1 > L_2$ จะเป็นวงจรประเภท *ลดระดับแรงดัน* แสดงในรูปที่ 4.43

$L_1 = L_2$ จะเป็นวงจรประเภท *หนึ่งต่อหนึ่ง* แสดงในรูปที่ 4.44

$L_1 < L_2$ จะเป็นวงจรประเภท *ลดระดับแรงดัน* แสดงในรูปที่ 4.45

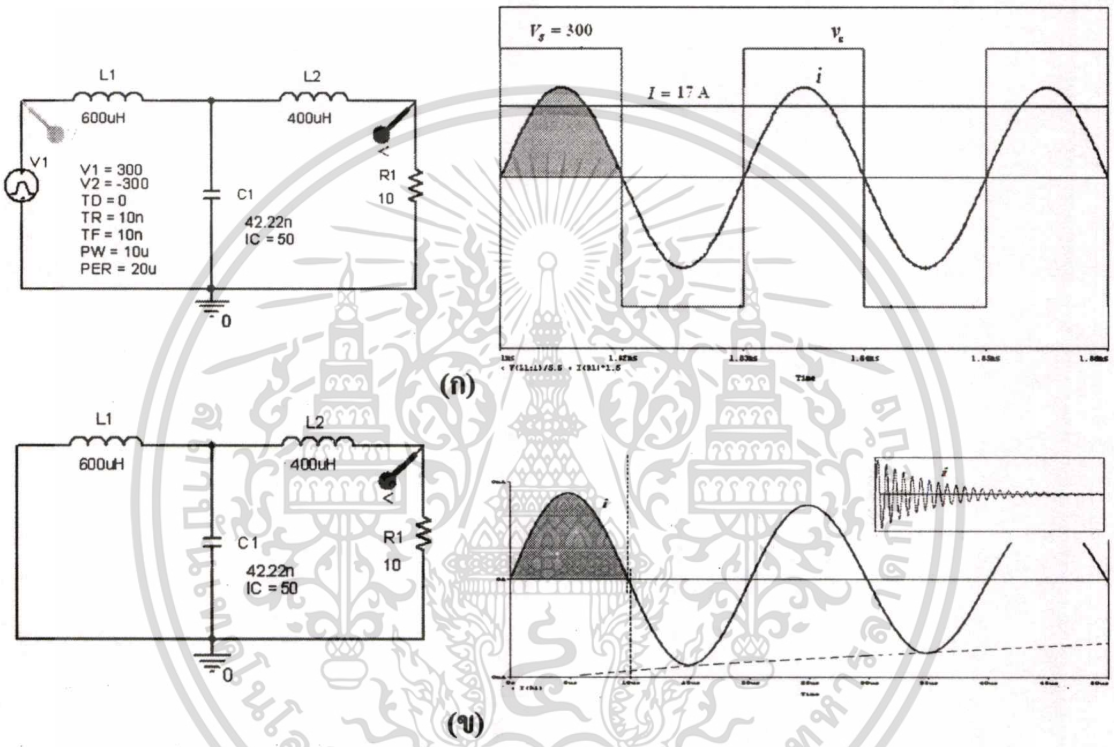
<u>ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจร LCL ด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และหลักการสับการแกว่ง</u>

สมมุติค่าต่างๆของวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ในรูปที่ 4.40 มีค่าดังต่อไปนี้ $R = 10\,\Omega$, $L_1 = 600\,\mu\text{H}$, $L_2 = 400\,\mu\text{H}$, $C = 42.22\,n\text{F}$ ถ้าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน 300 V แบบสี่เหลี่ยม (ทั้งบวกทั้งลบ) ทำการเขียนกราฟคุณลักษณะเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่-อิมพีแดนซ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.43 และทำการจำลองได้ผลดังรูปที่ 4.46 เมื่อแทนค่าต่างๆ ในสมการที่ (4.72) จะได้ความถี่เรโซแนนซ์ด้านล่างที่ต้องการจะออกแบบดังสมการที่ (4.86)

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} = 50\,\text{kHz} \tag{4.86}$$



รูปที่ 4.46 ผลการจำลองวงจร LCL แบบลดระดับแรงดัน

จากรูปที่ 4.46(ก) จะเห็นว่ากระแสกับแรงดันพอดีเฟสกัน โดยสัญญาณแรงดันแหล่งจ่าย (v_s) มีสัญญาณเป็นแบบสี่เหลี่ยมขนาด 300 V แต่เมื่อทำการวัดสัญญาณแรงดันที่คร่อมโหลด R จะได้สัญญาณแรงดันเป็นไซน์มีขนาด 170 V_{rms} ลดลงจากเดิมทำให้กระแสไหลผ่านโหลดมีขนาด 17 A แทนที่จะเป็น 30 A (ถ้าไม่ใส่วงจร LCL) พฤติกรรมทั้งหมดเกิดขึ้นได้โดยที่ไม่ต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่ง ซึ่งนี่ก็คือที่มาของคำว่า "ไร้หม้อแปลง" (transformerless) อันเป็นข้อดีของวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL นั่นเอง

จากรูปที่ 4.46(ข) แสดงการแกว่งของวงจรที่เกิดคร่อมโหลด R เป็นปรากฏการณ์ชั่วขณะที่มีความถี่การแกว่งประมาณ 50 kHz รูปเล็กขวามือด้านบนของรูปที่ 4.46(ข) เป็นการแกว่งที่เมื่อขยายแล้วจะได้ดังรูปใหญ่ที่ 4.46(ข) ด้านขวา ใช้หลักการสับการแกว่ง ยอดแรกของการแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอดคล้องกับสัญญาณกระแสที่วัดได้ในรูป 4.46(ก) นั่นก็แสดงได้ว่าหลักการสับการแกว่งก็ยังใช้ได้ดีกับการวิเคราะห์ในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ด้วย

4.7 สรุป

จากการวิเคราะห์ การจำลอง และการทดลองทั้งหมดในบทนี้สามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆได้ดังนี้

1. สามารถนำหลักการความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งกับกราฟความถี่-อิมพีแดนซ์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม จนเสนอเป็นหลักการสับการแกว่งได้ (วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีรายละเอียดในบทที่ 3)

2. การใช้วิธีที่อนุกรมฟูริเยร์ในการวิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมเป็นวิธีที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อนหลายขั้นตอนและไม่สามารถช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับความถี่ทำงาน ที่มีต่อลักษณะของสัญญาณกระแสได้ อีกทั้งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางด้านคณิตศาสตร์ช่วยจึงจะสามารถทำได้โดยไม่ผิดพลาดโดยเฉพาะขั้นตอนการรวมกันของสัญญาณกระแสในโดเมนเวลาของแต่ละความถี่

3. การใช้หลักการสับการแกว่งที่เสนอในบทนี้วิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม (เทียบกับวิธีของอนุกรมฟูริเยร์) ถือได้ว่าเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อนยุ่งยาก มีขั้นตอนน้อยและสามารถช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับความถี่ทำงานที่มีต่อลักษณะของสัญญาณกระแสได้เป็นอย่างดี อีกทั้งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ถึงแม้จะไม่มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย ก็ยังสามารถทำการวิเคราะห์ได้ในระดับที่สร้างความเข้าใจและถูกต้อง

4. นอกจากหลักการสับการแกว่งที่เสนอในบทนี้จะวิเคราะห์หาลักษณะสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมได้เป็นอย่างดีเท่านั้น ยังสามารถนำไปใช้อธิบายเรื่องอิทธิพลของค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ (S) ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแสได้อย่างชัดเจนด้วย

5. หลักการสับการแกว่งยังสามารถใช้วิเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ในประเด็นที่ว่า "ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่งในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL สำหรับระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ"

ทุกประเด็นการวิเคราะห์ในบทนี้ จะอยู่บนพื้นฐานข้อมูลที่ได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
เทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ

5.1 บทนำ

หลังจากได้วิเคราะห์เรื่องการแกว่งของสัญญาณแรงดันไปแล้วในบทที่ 3 ทำให้ทราบว่า การแกว่งจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ ค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ (S) มีค่ามากกว่า 0.5 บทที่นี้จึงเป็นการกล่าวถึงการจัดการกับการแกว่งโดยการพยายามทำให้ค่า S มีค่าต่ำกว่า 0.5 ด้วยเทคนิคที่นำเสนอชื่อว่า "เทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ หรือ R-C series technique" ซึ่งเป็นการประยุกต์มาจากหลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ (resonant at all frequency) โดยมีการยืนยันทั้งจากการจำลองและการทดลองจริง อีกทั้งยังมีการวัดผลการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (conducted EMI) ประกอบการยืนยันด้วย

5.2 หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่

จากรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วยกิ่ง 2 กิ่ง กิ่งแรกเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอีกกิ่งหนึ่งเป็นตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ หากพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ตามทิศลูกศร ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{Z}=\left(\frac{R_L}{R_L^2+X_L^2}+\frac{R_C}{R_C^2+X_C^2}\right)+j\left(\frac{X_C}{R_C^2+X_C^2}-\frac{X_L}{R_L^2+X_L^2}\right) \tag{5.1}$$

จากสมการที่ (5.1) พิจารณาให้ส่วนที่เป็นจินตภาพมีค่าเท่ากับศูนย์ ได้ดังสมการที่ (5.2)

$$\frac{X_C}{R_C^2+X_C^2}-\frac{X_L}{R_L^2+X_L^2}=0 \tag{5.2}$$

ทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของความถี่เชิงมุมได้ดังสมการที่ (5.3)

$$\omega=\frac{1}{(LC)^2}\sqrt{\frac{R_L^2-L/C}{R_C^2-L/C}} \tag{5.3}$$

จากสมการที่ (5.4) พิจารณาในรากที่สองของสมการให้ทั้งเศษและส่วนมีค่าเท่ากับศูนย์

$$R_L^2-L/C=0 \tag{5.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

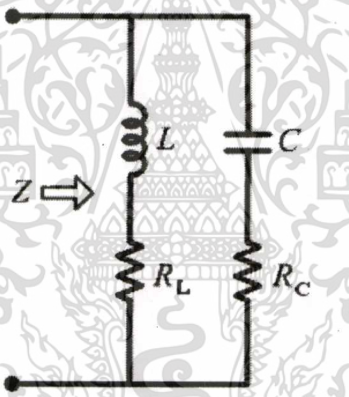
$$R_C^2 - L/C = 0 \tag{5.5}$$

จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) จัดรูปใหม่จะได้เงื่อนไขที่เรียกว่าเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ ได้ดังสมการที่ (5.6) [6]

$$R_L = R_C = \sqrt{L/C} \tag{5.6}$$

ที่สภาวะเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ หมายถึง การที่อิมพีแดนซ์มีค่าคงที่เพียงค่าเดียว ไม่ว่าความถี่จะเปลี่ยนไปมีค่าเท่าใดก็ตาม หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นสภาวะเสมือนตัวต้านทานเท่านั้น และค่าอิมพีแดนซ์ก็จะมีขนาดเท่ากับค่าความต้านทาน R_L และ R_C ดังสมการที่ (5.7) นั่นเอง

$$|Z| = R_L = R_C \tag{5.7}$$



รูปที่ 5.1 หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่

5.3 เสนอเทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ

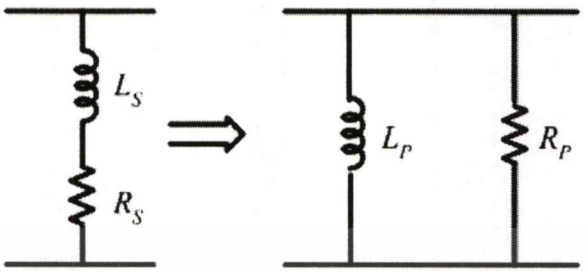
5.3.1 หลักการแปลงผัน อนุกรม-ขนาน (series- parallel conversions) [17]

บ่อยครั้งที่การวิเคราะห์วงจรทำได้สะดวกด้วยการแปลงผัน RL อนุกรมไปเป็นรูปขนานกันดังรูปที่ 5.2 กำหนดให้ค่า R_S, L_S และความถี่เชิงมุมในการใช้งาน ω ให้จะสามารถคำนวณหาค่า R_P และ L_P ของวงจรขนานได้ดังสมการที่ (5.8) และ (5.9)

$$R_P = R_S\left[1+\left(\frac{\omega L_S}{R_S}\right)^2\right] \tag{5.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

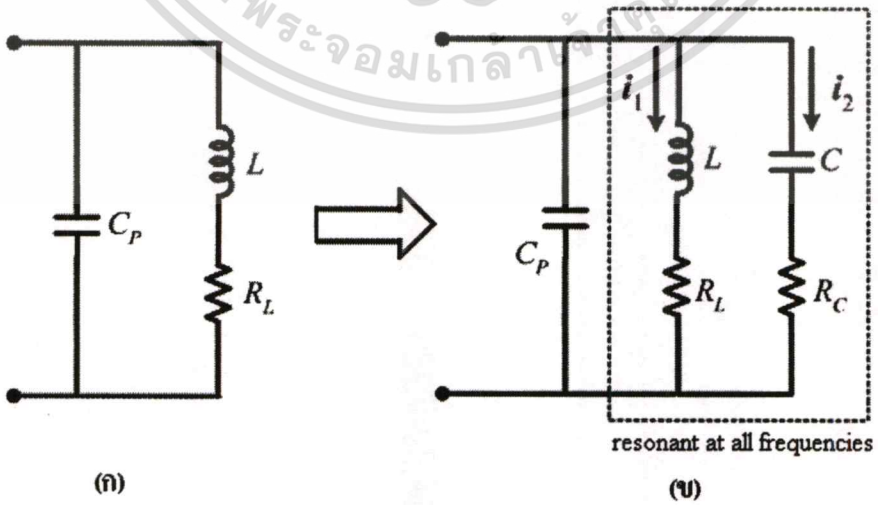
$$L_P = L_S\left[1+\left(\frac{R_S}{\omega L_S}\right)^2\right] \tag{5.9}$$



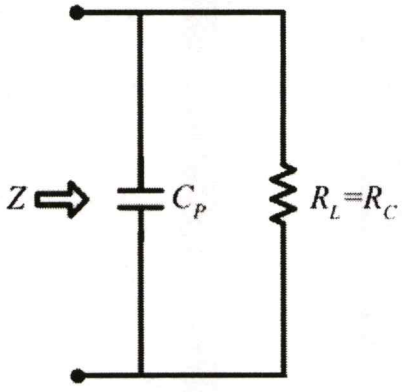
รูปที่ 5.2 การแปลงผัน อนุกรม-ขนาน

5.3.2 ประยุกต์หลักการแปลงผัน อนุกรม-ขนานกับวงจรสมมูลโหลดชนิดเหนี่ยวนำ

จากวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งถือว่าเป็นต้นเหตุของการแกว่งที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 สามารถใช้หลักการหลักการแปลงผัน อนุกรม-ขนานเปลี่ยนให้เป็นวงจรในลักษณะดังรูปที่ 5.3(ก) ได้ และเมื่อประยุกต์หลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ต่อเข้าไปแบบขนานดังรูปที่ 5.3(ข) ผลที่ได้จะสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 5.3(ค) ซึ่งเป็นวงจรสมมูลที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ไม่สามารถทำให้เกิดการแกว่งได้อย่างแน่นอน เหตุผลที่เชื่อมโยงให้เกิดความเข้าใจอย่างชัดเจน ต้องอาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลแต่ละแบบประกอบกับค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์นั้นๆ ดังมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5.1



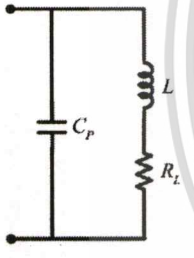
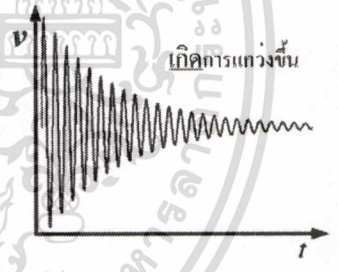
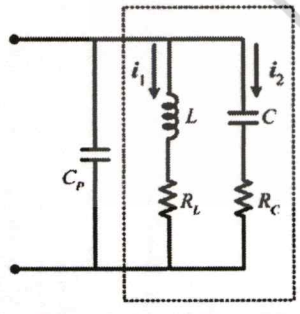
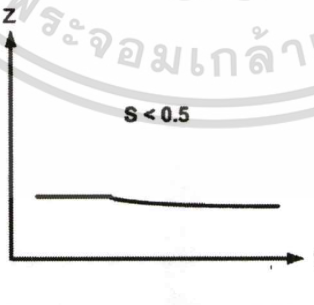
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 5.3 การแปลงผัน อนุกรม-ขนาน

ตารางที่ 5.1 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างวงจรสมมูล กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ และการแกว่ง

วงจรสมมูล	f-z characteristic	การแกว่ง
		
		

จากตารางที่ 5.1 วงจรด้านบนเป็นวงจรสมมูลของโหลดชนิดเหนี่ยวนำที่เสนอไว้ในบทที่ 3 จะเห็นว่ามีกราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ที่มีความคมของกราฟสูง $(S > 0.5)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการแกว่งดังรูปบนด้านขวา แต่เมื่อมีการต่อกิ่งของตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุขนานเข้าไปกับวงจรสมมูลดังรูปล่างซ้าย ประยุกต์กับหลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ ทำให้ค่าความคมของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 0.5 เป็นผลให้การแกว่งไม่เกิดขึ้น ซึ่ง

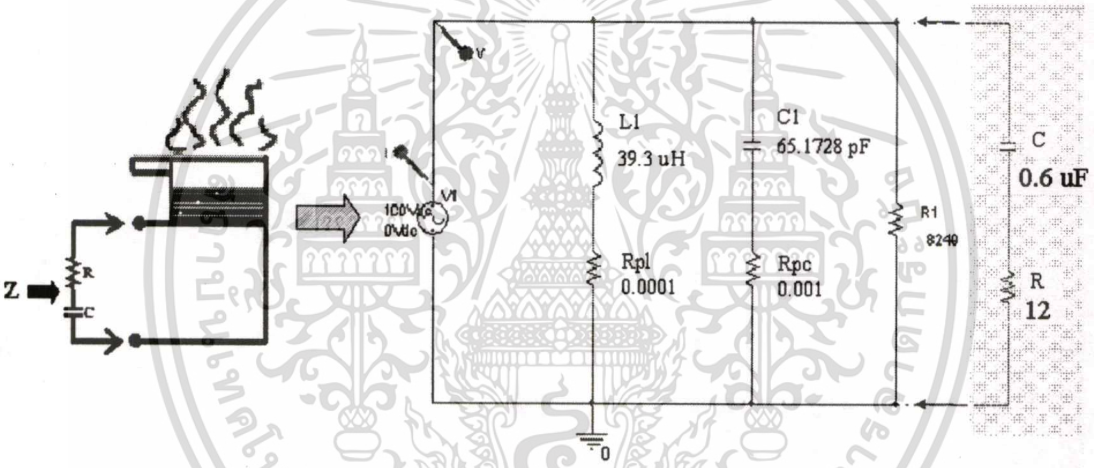
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ในลักษณะนี้ เรียกว่า เทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ และจะได้มีการยืนยันเทคนิคที่เสนอนี้ด้วยการจำลองและการทดลองในส่วนต่อไป

5.4 การจำลองและการทดลอง

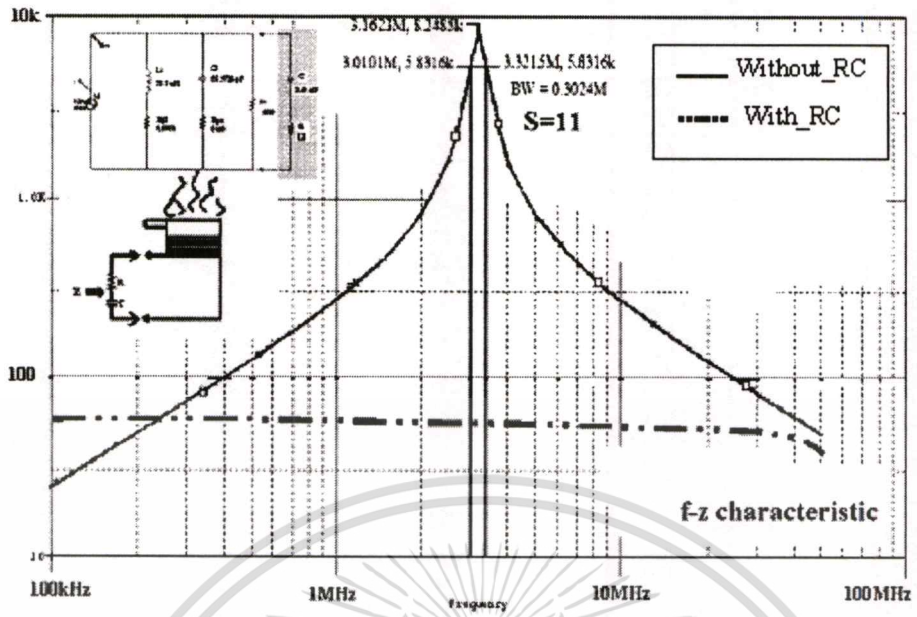
5.4.1 การจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5.4 แสดงวงจรสมมูลของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำโดยได้มาจากการวัดด้วยเครื่อง Impedance Analyzer ที่เพิ่มค่า R_{pl}, R_{pc} และการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่โหลด โดยทำการจำลองหากราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ และสัญญาณการแกว่งของแรงดันชั่วขณะทั้งกรณีที่ไม่ขนานชุดอนุกรม R-C และกรณีที่ขนานชุดอนุกรม R-C ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ

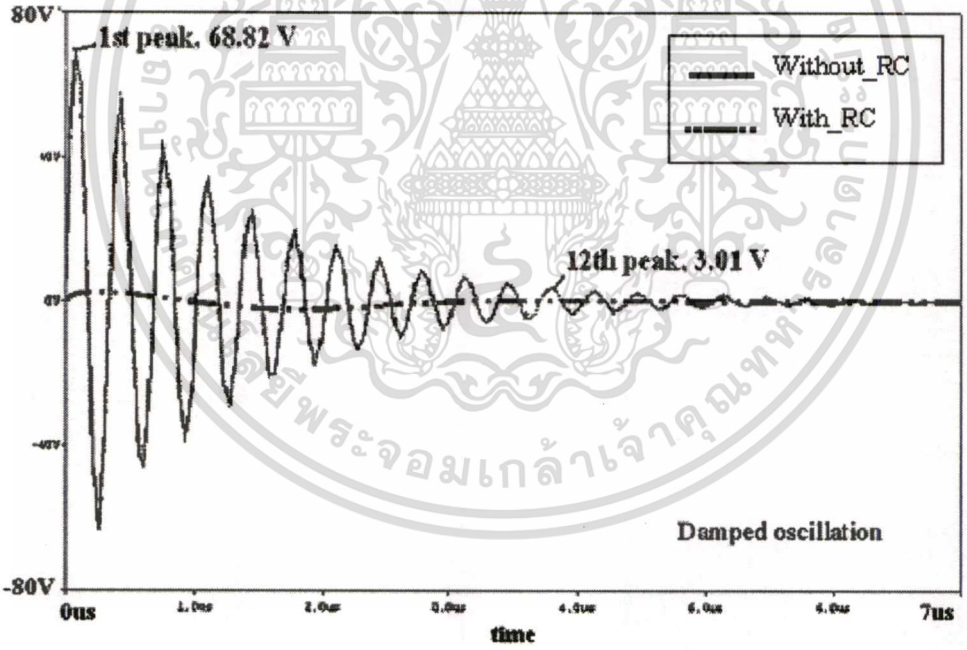


รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำและเทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์



รูปที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้าจากการจำลองทั้งกรณีไม่มีวงจร RC และกรณีมีวงจร RC

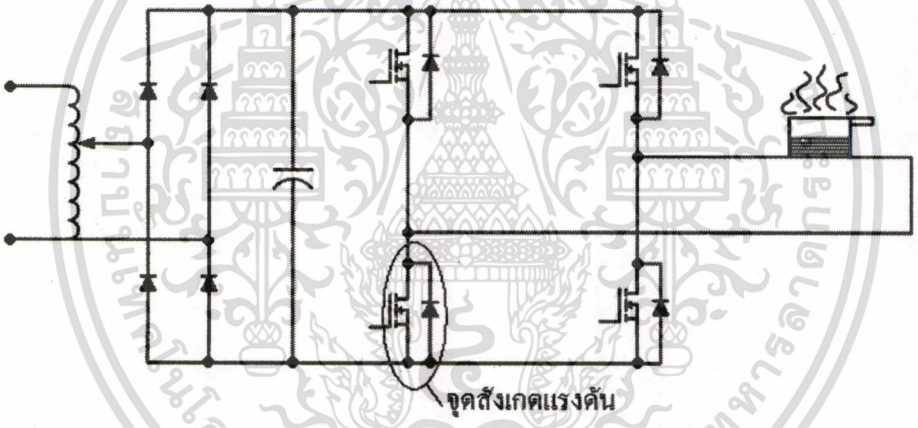
จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่ากราฟคุณลักษณะเฉพาะของวงจรสมมูลของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ (กรณี Without_RC) นั้นมีค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์เท่ากับ 11 ซึ่งมากกว่า 0.5 จึงเป็นผลให้เกิดการแกว่งของแรงดันขึ้น ดังรูปที่ 5.6 และเมื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.5 (กรณี With_RC) สังเกตได้ว่ากราฟคุณลักษณะเฉพาะเดิมของหม้อฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

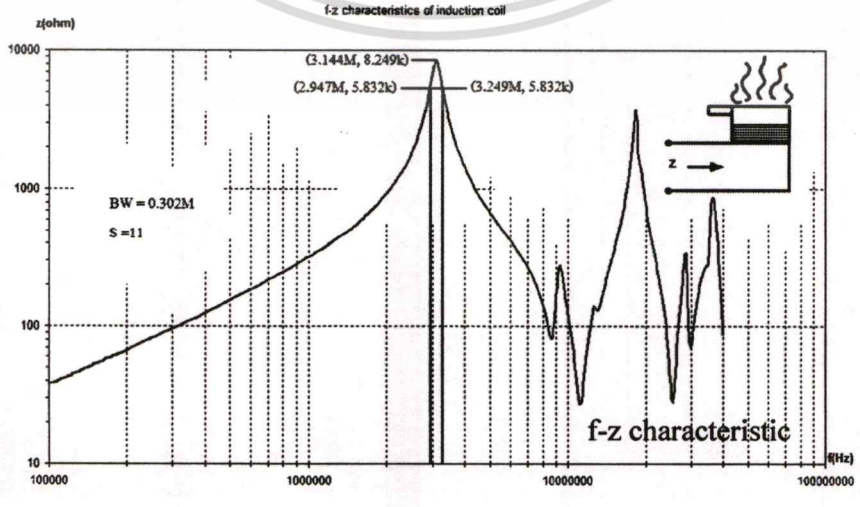
เปลี่ยนไปซึ่งค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์มีค่าน้อยกว่า 0.5 จึงเป็นผลให้ไม่เกิดการแกว่งของแรงดันขึ้น ดังแทนด้วยเส้นประในรูปที่ 5.6 (กรณี With_RC) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น

5.4.2 การทดลองจริง

วงจรที่ใช้ทดลองเป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 มีโหลดเป็นหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ ซึ่งนำไปวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 เมื่อวิเคราะห์โดยอาศัยนิยามค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์จะได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.2(ก) ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณหาค่าอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อใช้ทำนายลักษณะการแกว่งของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.2(ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวัด v_{ds} จริงที่จุดสังเกต (รูปที่ 5.7) ดังแสดงในรูปที่ 5.9 กล่าวคือมีจำนวนยอดการแกว่งเป็น 12 ยอดและความถี่ของการแกว่งเท่ากับ 3.125 MHz



รูปที่ 5.7 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.8 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

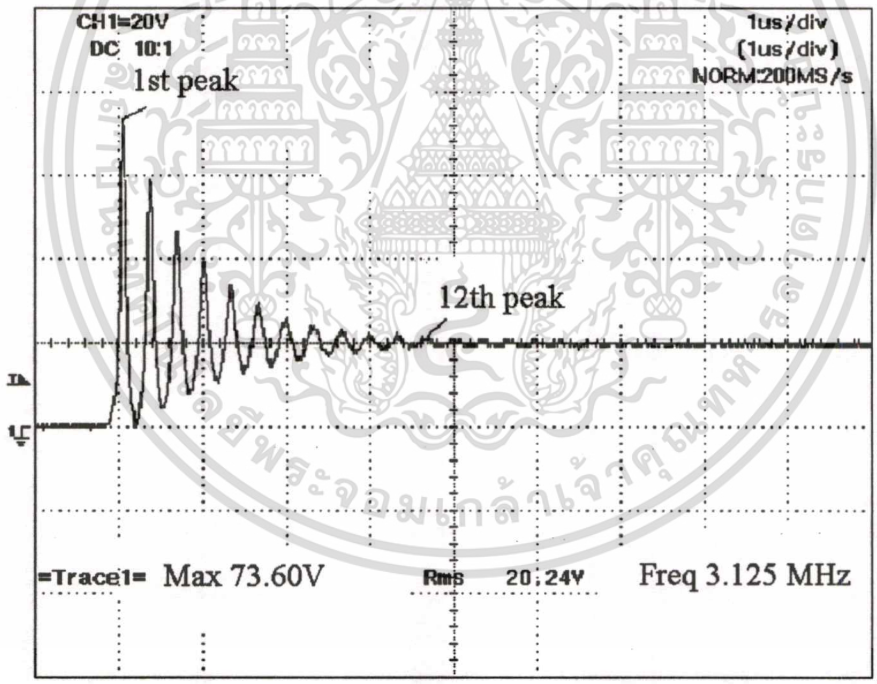
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และจากการคำนวณเพิ่มเติม

ข้อมูลจาก f-z ch.	
f_1	3.144 MHZ
BW_1	0.302 MHz
$S_1=f_1/BW_1$	11
R_1	8.249 kΩ
$X_1=R_1/S_1$	750 Ω

(ก)

ข้อมูลจากคำนวณเพิ่มเติม	
f_1	3.144 MHZ
$E_1=I_0X_1e^{(-\pi/4S_1)}$	47 V
$n=S_1+1$	11+1=12
$t_0=S_1/f_1$	3.4987 Ω
$E_n=E_1/23$	2 V

(ข)



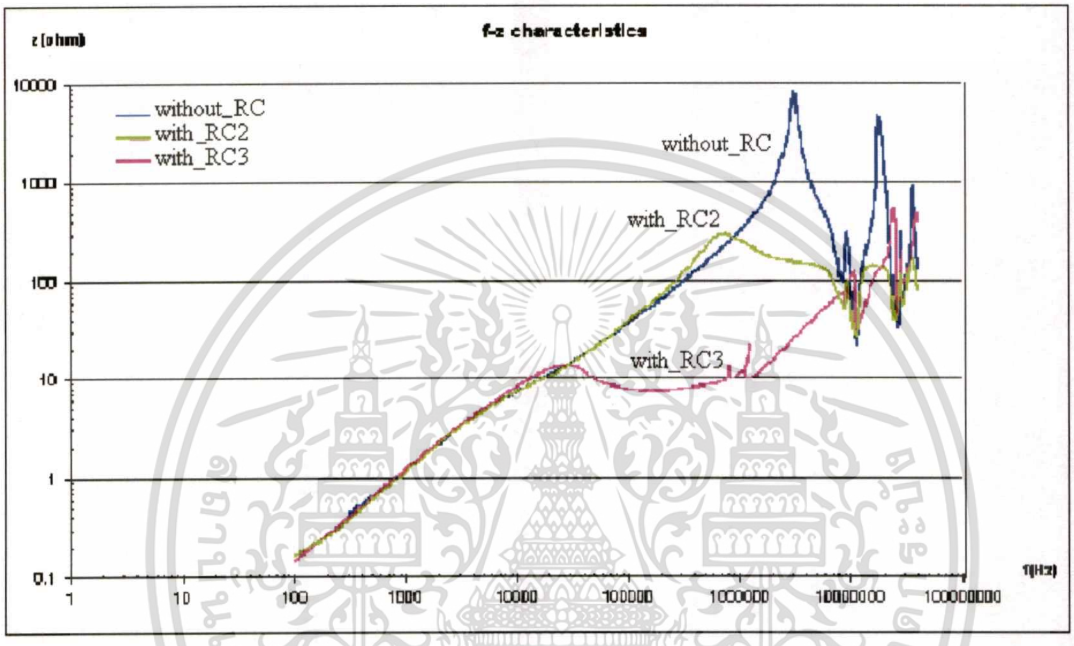
รูปที่ 5.9 ผลการวัด v_{ds} ที่จุดสังเกต

ใช้หลักการเทคนิคของประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำตามค่าแสดงในตารางที่ 5.3 แล้วทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละกรณี ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่า R-C ในแต่ละกรณี

Case	R (Ω)	C (F)
With_RC2	300	$470*10^{-12}$
With_RC3	7.5	$600*10^{-9}$



รูปที่ 5.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบกัน 3 กรณี

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าการประยุกต์ใส่ชุดอนุกรม R-C ด้วยค่าที่เหมาะสมสามารถลดค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ได้สอดคล้องกับหลักการของเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ข้างต้น โดยข้อมูลที่ได้จากกราฟนี้สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่ามีสอดคล้องกัน ดังเช่น ในกรณี Without_RC ค่า S เป็น 11 ทำให้การแกว่งเกิด 12 ยอด เมื่อใช้เทคนิคอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุดังในกรณี With_RC2 ทำให้ค่า S ลดลงเหลือประมาณ 6 ซึ่งทำให้การแกว่งเกิดลดลงเหลือ 7 ยอดจากเดิม และในกรณี With_RC3 ที่ทำให้ค่า S น้อยกว่า 0.5 การแกว่งจึงไม่เกิดขึ้น

<u>ข้อสังเกตเพิ่มเติม</u> จากผลการทดลองในรูปที่ 5.11(ค-ง) กรณี With_RC3 มีชุดการแกว่งใหม่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งวงกลมในรูปที่ 5.11(ง) สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นอิทธิพลจากยอดที่สองของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ สังเกตได้จากมีคาบการแกว่งประมาณ $1\,\mu s$ หรือมีความถี่ของการแกว่งที่ 1MHz ซึ่งตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของยอดที่สองของกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-

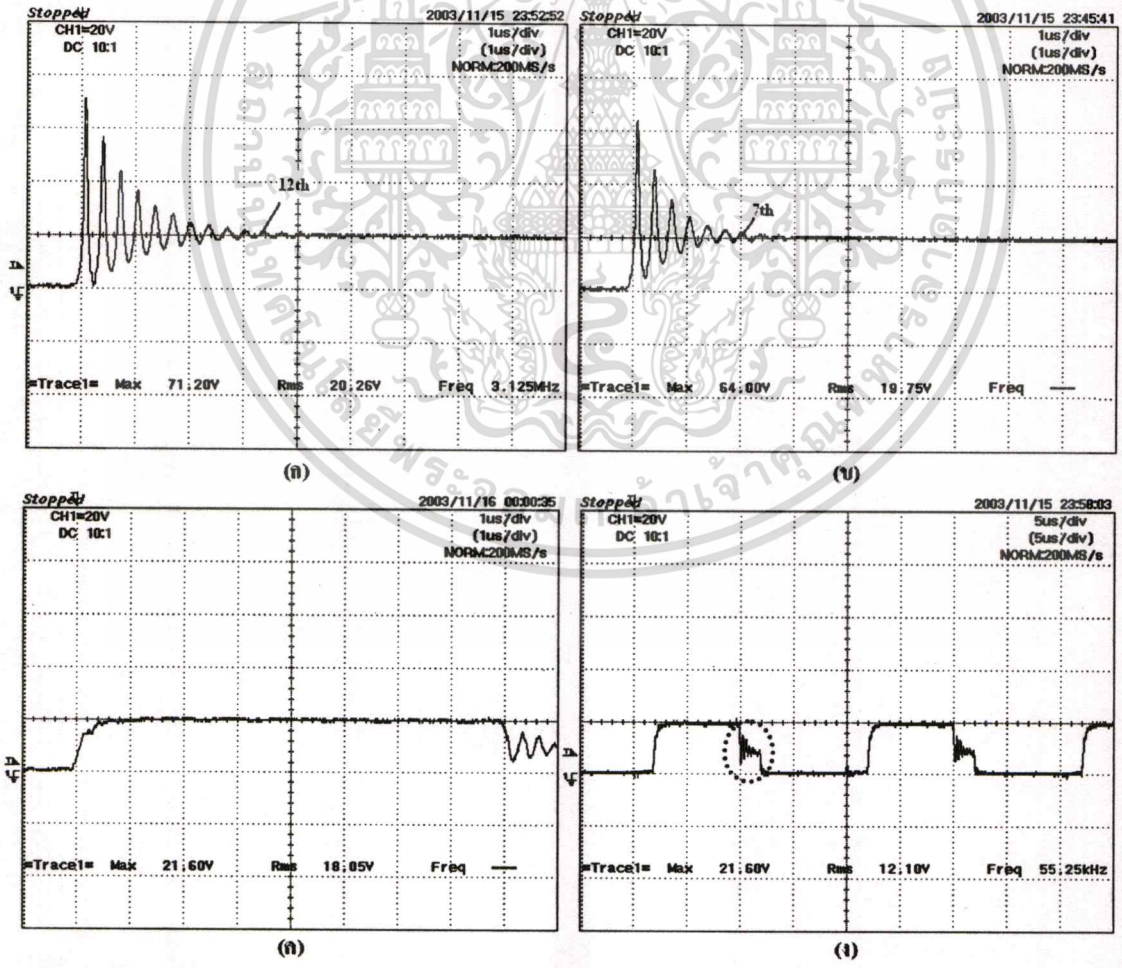
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ในรูปที่ 5.10 กรณี With_RC3 พอดี ซึ่งในประเด็นอิทธิพลจากยอดอื่นมีความน่าสนใจและควรมีการศึกษา พัฒนาการวิเคราะห์ต่อไป

เมื่อทดลองให้ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ทำงาน ในแต่ละกรณีและวัดแรงดัน ณ จุดสังเกตดังแสดงในรูปที่ 7 และมีการต่ออุปกรณ์Line Impedance Stabilization Network (LISN) เพิ่มเติมในภาคหน้าสุดก่อนชุดควบคุมแรงดันเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ได้ผลดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ

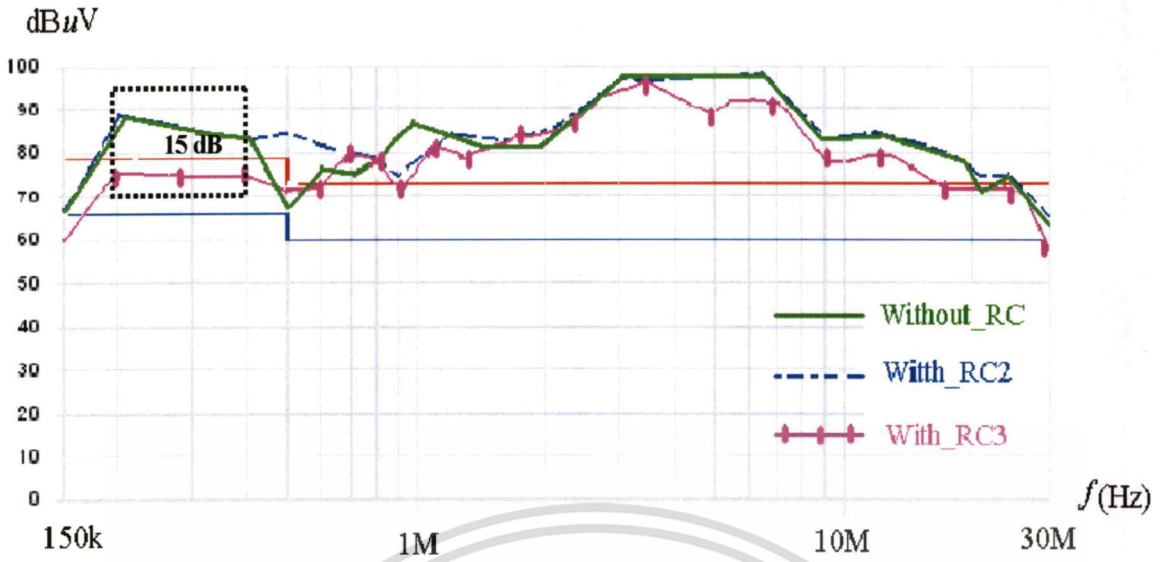
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ในรูปที่ 5.10

กรณี	f_r	BW	S	จำนวนยอดการแกว่ง
Without_RC	3.144 MHz	0.302 MHz	11	12
With_RC2	750 kHz	120 kHz	6.25	7
With_RC3	20 kHz	10 kHz	0.2	-



รูปที่ 5.11 แรงดัน V_{ds} ที่จุดสังเกต (ก) $v_{ds\,s}$ ในกรณี Without_RC (ข) $v_{ds\,s}$ ในกรณี With_RC2 (ค) $v_{ds\,s}$ ในกรณี With_RC3 (ง) ภาพรวมกรณี With_RC3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำสามารถกำจัดการแกว่งของสัญญาณแรงดันได้ และสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้เช่น กรณี With_RC3 สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ประมาณ 15 dB ในช่วงความถี่ระหว่าง 200-500 kHz (เทียบกับกรณี Without_RC)

ข้อเสนอแนะ การประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C มีข้อดีในการลดการเกิดการแกว่ง ทำให้ลดผลสัญญาณรบกวนด้านความถี่สูงได้ แต่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบการเหนี่ยวนำความร้อนลดลง โดยได้แสดงการคำนวณประสิทธิภาพไว้ในภาคผนวก ค.

5.5 วิเคราะห์และสรุปผล

อาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และนิยามค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์สามารถทำนายการแกว่งของสัญญาณแรงดันที่คร่อมสวิตซ์ในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้และเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำสามารถกำจัดการแกว่งของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และผลจากการวัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุป

จากการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์การแกว่งของสัญญาณไฟฟ้า ด้วยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ สำหรับระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สามารถให้ข้อมูล เสนอหลักการวิเคราะห์แบบใหม่ และข้อสรุปที่น่าสนใจได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. การใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของโหลดชนิดเหนี่ยวนำ สามารถอธิบายกลไกการเกิดการแกว่งของสัญญาณแรงดัน ในระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่มีวงจรฟูลบริดจ์เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดได้เป็นอย่างดี
2. การใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ สามารถทำนายลักษณะของการแกว่งโดยเฉพาะความถี่ และจำนวนยอดของการแกว่งได้อย่างแม่นยำ
3. การประยุกต์ใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และการแกว่ง สามารถเสนอวิธีการวิเคราะห์ในการหาลักษณะของสัญญาณกระแส ในวงจรแรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมที่เรียกว่า หลักการสับการแกว่งได้
4. วิธีการสับการแกว่งสามารถใช้วิเคราะห์หาลักษณะของสัญญาณกระแสในวงจรเรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรม เมื่อเทียบกับวิธีที่ใช้อนุกรมฟูริเยร์ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียระหว่างการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์และหลักการสับการแกว่ง

แบบอนุกรมฟูริเยร์	แบบการสับการแกว่ง
1. ถูกต้อง แม่นยำสูง แต่ต้องหาอย่างละเอียดเท่านั้น	1. ถูกต้อง แม่นยำสูง หาได้ทั้งอย่างละเอียดและคร่าวๆ
2. มีความยุ่งยาก ซับซ้อน หลายขั้นตอน	2. วิเคราะห์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ขั้นตอนน้อย
3. ไม่แสดงพฤติกรรมเชิงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับความถี่ทำงานที่มีผลต่อลักษณะของสัญญาณกระแส	3. สามารถช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมเชิงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับความถี่ทำงานที่มีผลต่อลักษณะของสัญญาณกระแส
4. อธิบายอิทธิพลของ S ที่ทีต่อรูปสัญญาณกระแสไม่ได้	4. อธิบายอิทธิพลของ S ที่ทีต่อรูปสัญญาณกระแสได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สามารถใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ร่วมกับหลักการสับการแกว่งอธิบายถึงอิทธิพลของค่าความคม ณ จุดแรโซแนนซ์ (S) ที่มีต่อลักษณะความเป็นไซน์ของสัญญาณกระแสได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเงื่อนไขที่ว่า "S ต้องมากกว่า 5 จึงจะทำให้สัญญาณกระแสมีลักษณะใกล้ความเป็นไซน์มากที่สุด"
6. สามารถใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และการสับการแกว่ง อธิบายวงจรแรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL ในประเด็นที่ว่า "ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงแมทชิ่งในวงจรแรโซแนนซ์อันดับสามแบบ LCL สำหรับระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ" ทั้งแบบยกระดับแรงดัน แบบลดระดับแรงดัน และแบบอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง ได้อย่างชัดเจน
7. ใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ ร่วมกับหลักการแรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ สามารถเสนอวิธีการลดการแกว่งแบบเทคนิคตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุได้
8. เทคนิคตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุ เมื่อต่อขนานเข้าไปกับโหลดชนิดเหนี่ยวนำ จะสามารถลดการแกว่งและสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้จริง แต่มีผลทำให้ประสิทธิภาพลดลง

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

1. การทำนายการแกว่งในบทที่ 3 นอกจากใช้กับวงจรแรโซแนนซ์แบบขนานแล้ว ยังสามารถประยุกต์ได้กับวงจร RLC แรโซแนนซ์แบบอนุกรมด้วย
2. การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของกระแสโดยใช้หลักการสับการแกว่ง ที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 นอกจากใช้วิเคราะห์ในวงจรแรโซแนนซ์อันดับสองแบบอนุกรมแล้ว ยังน่าจะนำไปใช้วิเคราะห์หาลักษณะของแรงดันในวงจรแรโซแนนซ์แบบขนานได้ด้วย
3. การจัดรูปแบบตัวแปรในบทที่ 4 เรื่องของอิทธิของค่า S ที่มีต่อลักษณะสัญญาณของกระแส จากในเทอมของอัตราหน่วง (ξ) ให้อยู่ในเทอมของ S นั่นยังน่าจะนำไปใช้ในวงจรแรโซแนนซ์อันดับสองแบบขนานด้วยได้
4. เทคนิคตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่ใช้จัดการกับการแกว่งในบทที่ 5 นั้น ถึงแม้ว่าจะสามารถลดการแกว่งได้จริง แต่เกิดการสูญเสียในกิ่งของตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุกว่าครึ่งของกำลังไฟฟ้าที่จ่าย ปัญหาการสูญเสียที่ตัวต้านทานนี้น่าจะนำไปใช้ประโยชน์ในการให้ความร้อนอีกชั้นหนึ่งได้ เรียกว่าเปลี่ยนการสูญเสียให้เป็นประโยชน์ เช่น ตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุนั้น นำไปต้มน้ำแบบขดลวดความร้อนทั่วไป เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Nitta S., Motoh A., Yamakoshi N., and Shimayama T. "Generation Mechanism of R.F.Noises on Power Lines." Environmental and Space Electromagnetic., ed., H. Kikuchi, Springer-Verlag, Tokyo, 1991. pp. 392-409.

[2] สิทธิโชค สินรัตน์. "ผลของวงจรสนับเบอร์ที่มีต่อมอสเฟตกำลังด้าน EMI." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545

[3] โธมัส ธรรมาธิษฐาน. "การประยุกต์ใช้วงจรซีรีส์เรโซแนนซ์ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ทำงานที่ซีโร-โวลท์เตจสวิตชิ่ง ซึ่งควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการเลื่อนเฟสเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายให้ความร้อนโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าความถี่สูง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545

[4] Gerhard L. Fisher and Hans-Christian Doht. "An Inverter System for Inductive Tube Welding Utilizing Resonance Transformation." IEEE 1994, pp.833-840.

[5] โตศักดิ์ ทัศนานุตริยะ. 2542. **ทฤษฎีและการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Circuits).** เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[6] Umesh Sinha. 2002. **Network Analysis and Synthesis.** New Delhi : Satya Prakashan.

[7] Sibylle Dieckerhoff., Michael J. Ryan., Rik W. De Doncker. "Design of an IGBT-based LCL-Resonant Inverter for High Frequency Induction Heating." IEEE 1999, pp.2039-2045.

[8] บุญศักดิ์ ใจจงกิจ. 2522. **อนุกรมไฟฟ้า 5 ไฟฟ้าเบื้องต้น.** กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตพระนครเหนือ.

[9] วีระเชษฐ์ ขันเงิน, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. 2547. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี. เจ. พริ้นติ้ง.**

[10] ชุติพนธ์ อู่ยายโสม. "ผลของวงจรสนับเบอร์ที่มีต่อมอสเฟตกำลังด้าน EMI." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] จักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ และวีระเชษฐ์ ขันเงิน. "การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้ากับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์" เอกสารวิชาการทางวิชาการไฟฟ้าครั้งที่ 27. เล่ม1, 2547. หน้า 541-544.

[12] Arthittang J., Tarateeraseth V. and Khan-ngern W., Nitta S., "The Relationship among Damped Oscillation, f-z characteristics and Conducted EMI of an Induction Cooking." EMC'04 Sendai., vol. 2, June 2004. pp. 865-868.

[13] Ralph Morrison, 1995. **Solving interference problems in electronics**, 1st edition, John Wiley & Sons. Ins.

[14] สุรพล ลิ้มสีมารัตน์. 2546. **คณิตศาสตร์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ (การวิเคราะห์ทรานเซียนต์).** กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

[15] E. J. Dede., E. Maset., J. M. Espi and A. Ferreres., "Transformerless Resonant Inverters for Induction Heating Applications." IEEE. 1996., pp.212-214.

[16] สมชาย จิตะพันธ์กุล, ผู้แปล. 2540. **ทฤษฎีและตัวอย่างโจทย์ วงจรไฟฟ้า.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : แมคกรอ-ฮิล อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพร์สม อิงค์.

[17] William, H. et al. 1986. **Engineering Circuit Analysis.** 4th Ed. Singapore : McGraw-Hill.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility

June 1-4, 2004
Sendai International Center
Sendai, Japan



Sponsored by

The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Communications Society (IEICE-CS)

Cosponsored by

Intelligent Cosmos Academic Foundation, Sendai

In cooperation with

The Institute of Electrical Engineers of Japan, Technical Committee on EMC

IEEE EMC Society (IEEE EMC-S)

IEEE Sendai Section

IEEE EMC-S Japan and Sendai Chapters

URSI

CISPR, IEC/TC77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Relationship among Damped Oscillation, f-z characteristics and Conducted EMI of an Induction Cooking

J. Arthitthang*, V. Tarateeraseth* W. Khan-ngern* and S. Nitta**
*ReCCIT and Faculty of Electrical Engineering. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Bangkok, Thailand. 10520. E-mail: kwerachet@hotmail.com
**Salesian Polytechnic, 2-35-11 Igusa Suginami, Tokyo, 167-0021, Japan, E-mail: nitta@cc.tuat.ac.jp

Abstract: This paper describes the relationship among damped oscillation, frequency-impedance characteristics (f-z characteristics) and conducted EMI occurring in induction cooking. The R-L-C equivalent circuit of induction pot is proposed. The relationship among ring, f-z characteristic and conducted EMI are verified by experiment. Finally, the reduction technique for damped oscillation is proposed using R-C series technique.
Keyword: Induction cooking, EMC and EMI

1. Introduction

Melting, welding, cooking and other applications of induction heating, all of them use the same concept by applying the high frequency current through the winding coil around the metal. The induction process between winding coil and metal produces the eddy current. The heat at the metal is generated by the eddy current. However, the induction process is also produce high frequency noise which directly affect to EMI problem.

It is well known that damped oscillation or ringing is directly effect to differential mode noise which dominant at frequency range less than 2 MHz [2]. The ringing current can equivalent by series and parallel resonance circuit which compose of resistor, capacitor and inductor [1]. These equivalent circuits are defined by f-z characteristics of induction pot of induction cooking. The transient phenomena of equivalent circuits are used to predict the ringing and conducted EMI. In this paper, the series R-C circuit is proposed to reducing the ringing and EMI problem of induction heating application.

2. Generation of Damped Oscillation

2.1 Series resonance circuit

Series resonance circuit shows in Fig. 1. The capacitor C_2 is charged to voltage E_0. When switch SW is turned on, transient phenomena occurs in the circuit. Derivations of mathematics in frequency domain of S parameters are as shown in eqns. (1))-(2)

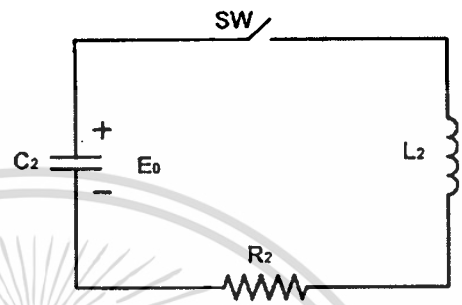


Fig. 1 The series resonance R-L-C circuit

$$S = -\frac{R_2}{2L_2} \pm \sqrt{\left(\frac{R_2}{2L_2}\right)^2 - \frac{1}{L_2C_2}} \quad (1)$$

or

$$S = -\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - \omega_0^2} \quad (2)$$

Where

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2L_2} \text{ and } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2C_2}} \quad (3)$$

The damped oscillation will be occurred if:

$$\alpha_2 < \omega_0 \quad (4)$$

Therefore, the angular frequency of damped oscillation is shown in equation (5).

$$\omega_2 = \omega_{ringing} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_2^2} \quad (5)$$

Because In equation (5), α_2 is very small therefore it can be neglected. The frequency of damped oscillation becomes:

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2C_2}} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The ringing current flowing through the circuit is shown in eqn. (7)

$$i_2 = -\frac{E_0}{\omega_2 L_2} e^{-\alpha_2 t} \sin(\omega_2 t) \qquad (7)$$

At the resonance point, the reactance X_2 can be defined.

$$X_2 = \omega_2 L_2 = \frac{1}{\omega_2 C} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \qquad (8)$$

Sharpness of resonance is defined as

$$S_2 = \frac{X_2}{R_2} \qquad (9)$$

If S_2, f_2 and X_2 parameters can be determined, damped oscillation waveform can be produced even if the values of R_2, L_2 and C_2 are quite complicate to find.

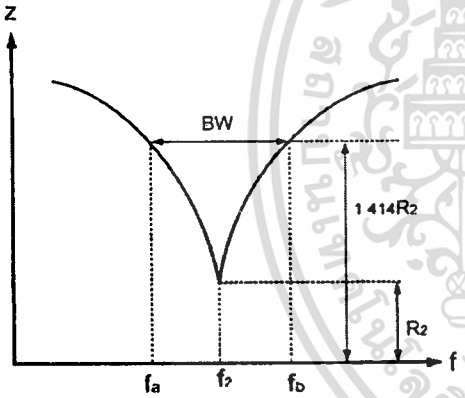


Fig.2 The f-z characteristic of series resonance R-L-C circuit

The value of R_2 and f_2 can be carried out from f-z characteristic of series resonance circuit shown in Fig. 2 and S_2 and X_2 can be calculated as shown in eqns. (10), (11) and (12), respectively.

$$BW = f_b - f_a \qquad (10)$$

$$S_2 = \frac{f_2}{BW} \qquad (11)$$

$$X_2 = R_2 S_2 \qquad (12)$$

From these three parameters of S_2, f_2 and X_2, the damped oscillation waveform can be plotted as shown in Fig. 3.

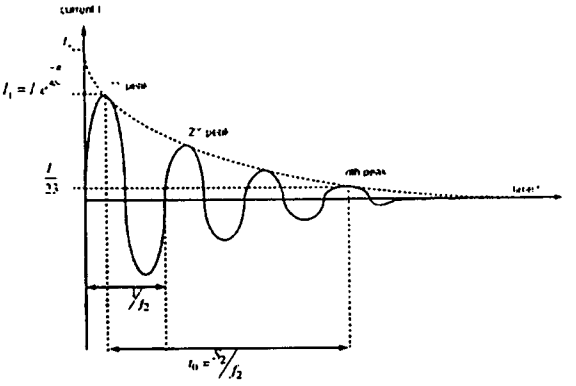


Fig. 3 The ringing current of series resonant R-L-C circuit

2.2 Parallel resonance circuit

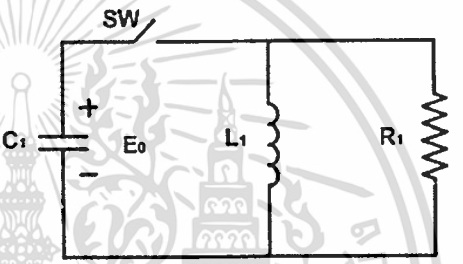


Fig. 4 The parallel resonance R-L-C circuit

In the same concept with series resonance circuit, the damped oscillation will be occurring if

$$\alpha_1 < \omega_0 \qquad (13)$$

Where

$$\alpha_1 = \frac{1}{2R_1 C_1} \qquad (14)$$

The angular frequency of damped oscillation also becomes

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \qquad (15)$$

In parallel resonance circuit, S_1 is defined as shown in equation (16).

$$S_1 = \frac{R_1}{X_1} \qquad (16)$$

The f-z characteristic of parallel resonance of R-L-C are plotted as shown in Fig. 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

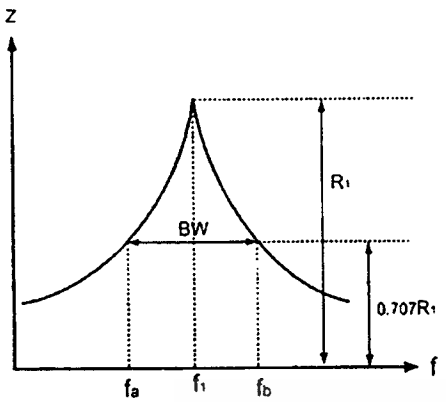


Fig. 5 The f-z characteristic of parallel resonance R-L-C circuit

2.3 The principle of R-C series technique applying to Induction pot

The equivalent circuit of induction pot is R seried with L that shows in Fig.6 (a). The proposed R-C series technique is paralleled with the induction pot as shown in Fig. 6 (b)

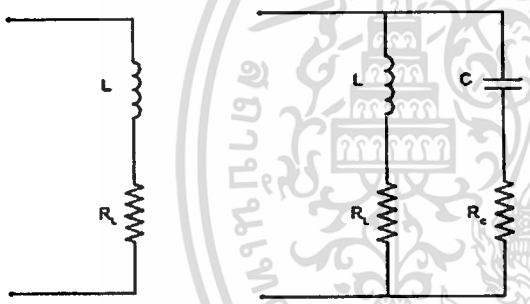


Fig. 6 The equivalent circuit
(a) The equivalent circuit of induction pot
(b) The equivalent circuit of R-C series technique applying to Induction pot

The resonance frequency of equivalent circuit shown fig. 6 (b) can be calculated as

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{R_L^2 - L/C}{R_C^2 - L/C}} \qquad (17)$$

From eqn. (17), the resonance can occur at all frequency if eqn. (19) is met.

$$R_L^2 = R_C^2 = \frac{L}{C} \qquad (18)$$

$$R_L = R_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (19)$$

3. The relationship among f-z characteristic, damped oscillation and conducted EMI

3.1 Without R-C series technique

The relationship among f-z characteristic, damped oscillation and conducted EMI are verified by the experiment.

Fig. 7 shows the full-bridge inverter circuit of induction cooking that use in the experiment. Fig. 8 shows the f-z characteristic of inductor pot. The first parallel resonance appearing at frequency is equal to 3.144 MHz. It exactly equals to the ringing frequency in case of without R-C as shown in Fig. 9 (a).

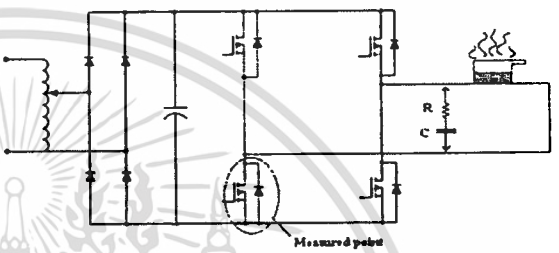


Fig. 7 Full-bridge inverter circuit of induction cooking

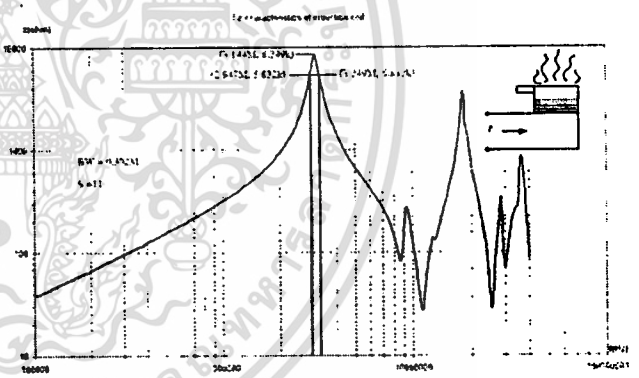


Fig. 8 The f-z characteristic of induction pot

3.2 With R-C series technique

The R-C series technique is proposed to reduce the ringing of induction cooking. The experiment in case of insertion the R-C series technique is divided in three cases as shown in Table 1.

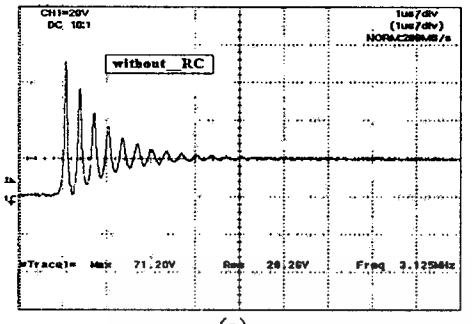
Table 1: The value of R-C series technique

Case	R (Ω)	C (F)
With_RC1	1k	$100*10^{-12}$
With_RC2	300	$470*10^{-12}$
With_RC3	7.5	$600*10^{-9}$

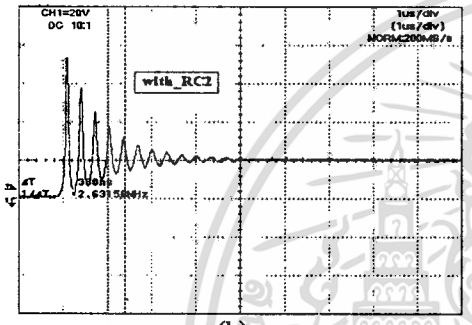
Figs. 9 (b) – (d) show the ringing frequency in case of insertion the R-C series technique parallel with the induction pot. The f-z characteristic comparison between without and with R-C series technique is shown in Fig. 10. The ringing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

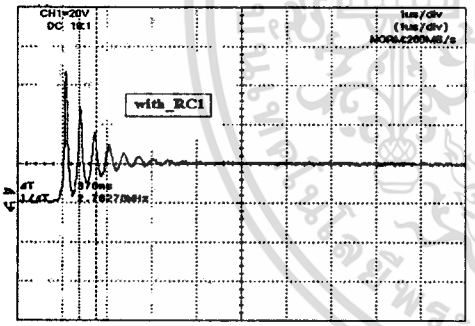
frequencies of Fig. 9 (b) – (d) are also exactly similar with f-z characteristic of Fig. 10. The EMI comparison between without and with R-C series technique is shown in Fig. 11.



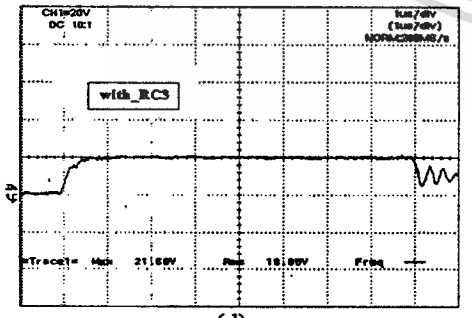
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. The damped oscillation at measured point
- (a) without R-C series technique
- (b) $R = 1k\Omega$, $C = 100$ pF
- (c) $R = 300\Omega$, $C = 470$ pF
- (d) $R = 7.5\ \Omega$, $C = 0.6\ \mu F$

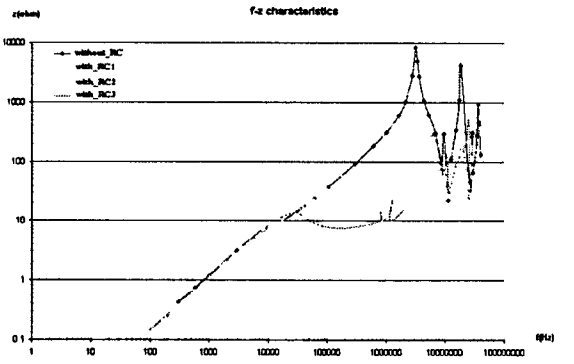


Fig. 10 The f-z characteristics comparison among 4 cases

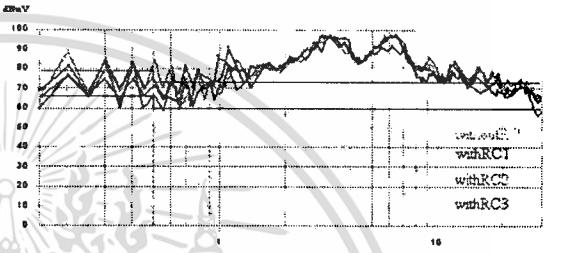


Fig. 11 The EMI comparison among 4 cases

The experimental results show the effect of ringing via conducted EMI. The proposed R-C series technique parallel to the induction pot can decrease the ringing and also the conducted EMI.

In case of without R-C series technique it can generate peak impedance as shown in Fig. 10 and also affect to EMI increasing as shown in Fig. 11. The concept of ringing reduction is to reduce the peak impedance of f-z characteristic, and then can reduce EMI. It can be confirmed by the relation between Fig. 10 and 11.

4. Conclusion

The f-z characteristic of induction pot can be used to predict the ringing frequency at main switch of induction cooking circuit. In the experimental results show the proportional relation between ringing and conducted EMI. The proposed R-C series technique parallel to induction pot also can decrease the ringing at main switch which affect to decrease the conducted EMI. The suitable parameter of proposed R-C series technique is verified by mathematic. However, this parameter is quite difficult to define in the practical.

5. References.

[1] Nitta, S., Motoh, A., Yamakoshi, N., and Shimayama, T.,"Generation Mechanism of R.F. Noises on Power Lines," Environmental and Space Electromagnetics, ed., H. Kikuchi, pp.392-409, Springer-Verlag, Tokyo, 1991.

[2] John C. Fluke, "Controlling conducted emissions by design", New York, Van Nostrand Reinhold, 1991

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27

27th Electrical Engineering Conference

Volume I

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำในการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งของสัญญาณไฟฟ้ากับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์

The analysis of conducted EMI emission on induction heating using damped oscillation and f-z characteristic

จักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง, วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ และวีระเชษฐ์ ขันเงิน

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 ม. 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพ 10520

โทร. 02-7373000 ต่อ 3322 E-mail: zhakkrit@hotmail.com, vuttiponnet@yahoo.com, kkveerac@kmitl.ac.th Website: www.kmitl.ac.th/emc

บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง การแกว่งของสัญญาณไฟฟ้า (Damped oscillation) กับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ (f-z characteristics) โดยอาศัยค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ (S; Sharpness of resonance) ของวงจรสมมูล R-L-C ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นหลักการ ทฤษฎี ส่วนที่เป็นผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และผลที่ได้จากการทดลองจริง นอกจากนี้ยังนำเสนอการลดการแกว่งดังกล่าวด้วยเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปในวงจร

คำสำคัญ : เรโซแนนซ์, ค่าตัวประกอบคุณภาพ

Abstract

This research is aimed to describe the damped oscillation occurred in induction pot using the relationship between the resonance point and sharpness of resonance (S) on frequency-impedance characteristics. The R-L-C parameters are applied and implemented using the simulation and the experiment. Finally, the reduction technique for damped oscillation is proposed using R-C series technique.

Keywords: resonant, quality factor

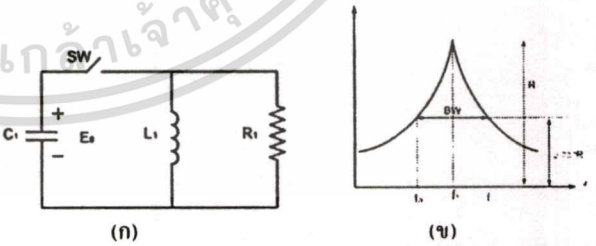
1. คำนำ

ในการศึกษาเรื่องการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ (induction heating) ไม่ว่าจะเป็นการหลอมโลหะ การหล่อโลหะ การหุงต้มด้วยการเหนี่ยวนำ หรือวิธีประยุกต์การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนวิธีอื่นๆ ล้วนอาศัยหลักการเดียวกันคือ การทำให้กระแสไฟฟ้าความถี่สูงไหลผ่านขดลวด ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูงตัดผ่านโลหะและเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นตามหลักการของกระแสวน (eddy current) ซึ่งในการศึกษาเรื่องนี้ มักประสบกับปัญหาที่เหมือนกันอย่างหนึ่งนั่นคือ ปัญหาเรื่องการแกว่งของสัญญาณทางไฟฟ้า (damped oscillation) อันเนื่องมาจาก ผลของตัวเก็บประจุแฝงในขดลวดเหนี่ยวนำ ที่มิอาจหลีกเลี่ยงได้

บทความนี้ ในส่วนแรกจึงได้นำเสนอกลไกการเกิดการแกว่งหรือปรากฏการณ์ชั่วขณะ (transient phenomena) ในวงจรขนานเรโซแนนซ์ โดยอธิบายความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ที่จัดค่าต่างๆ ให้อยู่ในรูปของตัวแปร *f, X, S* (frequency, reactance, sharpness of resonance) กับการวิเคราะห์กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ (frequency-impedance characteristic) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ที่สามารถนำมาเขียนกราฟการแกว่งได้ ในส่วนที่สองเป็นการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยการการจำลอง (simulation) ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และการทดลองจริง เพื่อประกอบทฤษฎีข้างต้น ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์และสรุปผล

2. ทฤษฎี

2.1 วงจรขนานเรโซแนนซ์



รูปที่ 1 (ก) วงจรขนานเรโซแนนซ์ (ข) กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ของวงจรขนานเรโซแนนซ์

รูปที่ 1 (ก) แสดงวงจรขนานเรโซแนนซ์ประกอบไปด้วย R_1, L_1 และ C_1 โดย C_1 ถูกอัดประจุจนมีความต่างศักย์เริ่มต้นเป็น E_0 โวลต์ เมื่อสวิตช์ SW เริ่มทำงานปรากฏการณ์ชั่วขณะจะเกิดขึ้นเมื่อมีเงื่อนไขดังอสมการ (1)

$$\alpha_1 < \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \qquad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $$\alpha_1 = \frac{1}{2R_1C_1} \quad (2)$$

และมีค่าความถี่เชิงมุม ω_1' ของการแกว่ง (ω_1' : angular frequency of damped oscillation) ดังแสดงในสมการ (3)

$$\omega_1' = \sqrt{\left|\alpha_1^2 - \frac{1}{L_1C_1}\right|} \quad (3)$$

แต่ในการวิเคราะห์การแกว่งในกรณีนี้ ซึ่งเป็นผลมาจากขดลวดเหนี่ยวนำถือได้ว่าค่าของ α_1^2 มีผลต่อค่า ω_1' ในสมการ (3) น้อยมากจนสามารถละได้ ดังนั้นค่าความถี่เชิงมุม ω_1' ของการแกว่งจะใกล้เคียงกับค่า ω_1 ดังแสดงในอสมการ (4) ดังนี้

$$\omega_1 \approx \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} \quad (4)$$

จากวิธีการทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าแรงดัน $v_{c_1}(t)$ ในวงจรได้ ดังแสดงในสมการ (5)

$$v_{c_1}(t) = E_0 e^{-\alpha_1 t}\cos(\omega_1 t) \quad (5)$$

อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการแกว่งกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และนิยามค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (6)

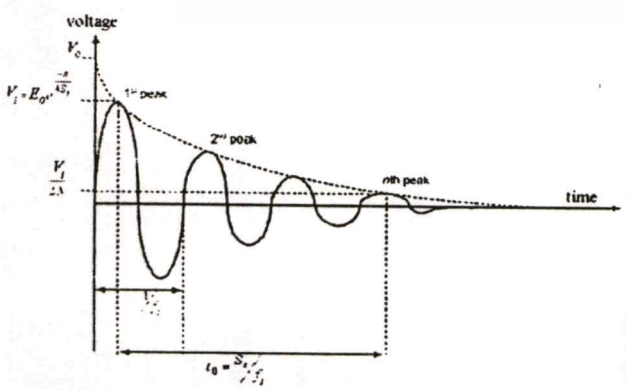
$$S_1 = \frac{R_1}{X_1} = \frac{f_1}{BW} \quad (6)$$

การแกว่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อเงื่อนไขเป็นไปตามอสมการ (7) [1-2]

$$S_1 > \frac{1}{2} \quad (7)$$

การแกว่งและจำนวนยอดการแกว่ง (n) สามารถทำนายได้ ตามอสมการ (8) และแสดงได้ดังรูปที่ 2

$$n \approx S_1 + 1 \quad (8)$$



รูปที่ 2 กราฟการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าในรูปของ f_1, S_1 และ X_1

2.2 เทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C

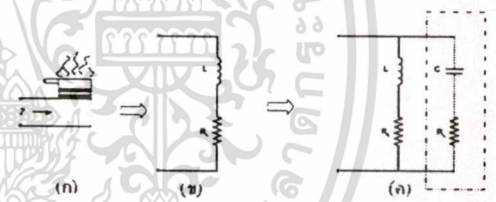
จากอสมการเงื่อนไขการเกิดการแกว่ง (1) และ (7) วงจรขนานเรโซแนนซ์จะเกิดการแกว่งก็ต่อเมื่อค่า S มากกว่า 1/2 ดังนั้นถ้าไม่ต้องการให้เกิดการแกว่งขึ้น ต้องทำให้ S ของวงจรนั้นมีค่าน้อยกว่า 1/2 ให้ได้ ซึ่งในบทความนี้เสนอเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปในวงจร

หลักการของเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ถ้าหม้อหุงต้มเหนี่ยวนำมีวงจรสมมูลเป็น R อนุกรมกับ L ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) เมื่อนำเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ต่อเข้าไปดังรูปที่ 3 (ค) จะมีความถี่เรโซแนนซ์ f_r ดังสมการ (9)

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{R_L^2 - L/C}{R_C^2 - L/C}} \quad (9)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (9) จะมีค่าเป็นศูนย์ส่วนศูนย์ก็ต่อเมื่อ มีเงื่อนไขดังสมการ (10) ซึ่งเป็นกรณีที่สามารถทำให้เกิดเรโซแนนซ์ทุกความถี่ได้ [3]

$$R_L^2 = R_C^2 = \frac{L}{C} \quad (10)$$

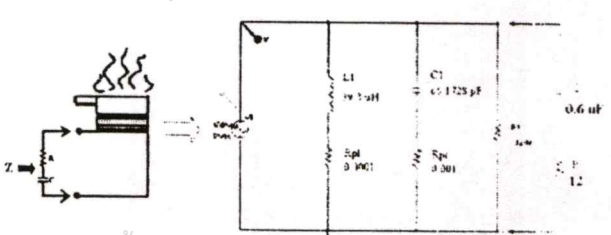


รูปที่ 3 (ก) หม้อความร้อนเหนี่ยวนำ (ข) วงจรอนุกรม RL (ค) เทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C

3. การทดลอง

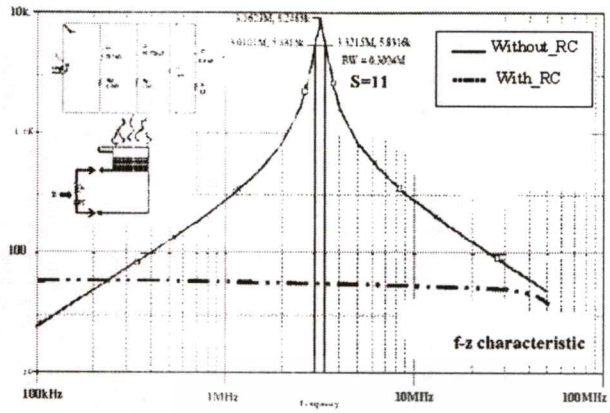
3.1 การจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

รูปที่ 4 แสดงวงจรสมมูลของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำโดยได้มาจากการวัดด้วยเครื่อง Impedance Analyzer ที่เพิ่มค่า R_p, R_s และการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อ โดยทำการจำลองหากราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ และสัญญาณการแกว่งของแรงดันชั่วขณะทั้งกรณีที่ไม่ขนานชุดอนุกรม R-C และกรณีที่ขนานชุดอนุกรม R-C ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ

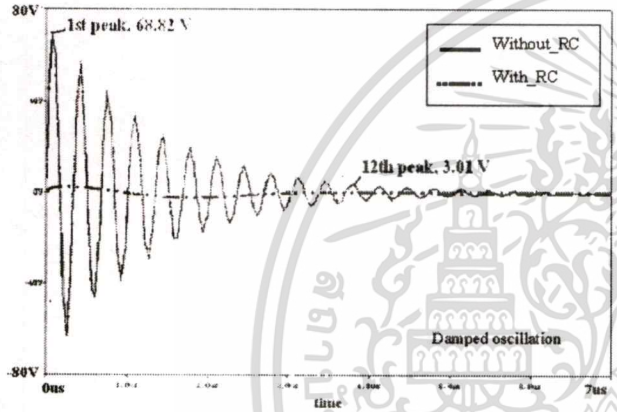


รูปที่ 4 วงจรสมมูลของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์



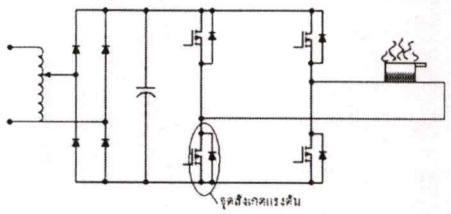
รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าจากการจำลองทั้งกรณี Without_RC และกรณี With_RC

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่ากราฟคุณลักษณะเฉพาะของวงจรสมมูลของหม้อ (กรณี Without_RC) นั้นมีค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์เท่ากับ 11 ซึ่งมากกว่า 1/2 จึงเป็นผลให้เกิดการแกว่งของแรงดันขึ้น ดังรูปที่ 6 และเมื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5 (กรณี With_RC) สังเกตได้ว่ากราฟคุณลักษณะเฉพาะเดิมของหม้อเปลี่ยนไปซึ่งค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์มีค่าน้อยกว่า 1/2 จึงเป็นผลให้ไม่เกิดการแกว่งของแรงดันขึ้นดังแทนด้วยเส้นประในรูปที่ 6 (กรณี With_RC) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น

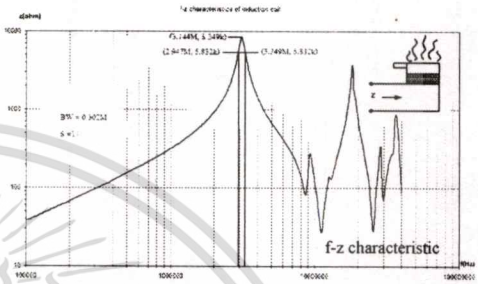
3.2 การทดลองด้วยอุปกรณ์และวงจรจริง

วงจรที่ใช้ทดลองเป็นวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 7 มีโหลดเป็นหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ ซึ่งนำไปวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อวิเคราะห์โดยอาศัยนิยามค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์จะได้ข้อมูลดังตาราง 1 (ก) ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณหาค่าอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อใช้ทำนายลักษณะการแกว่งของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นได้ ดังแสดงในตาราง 1 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวัด V_{ds} จริงที่จุดสังเกต (รูปที่ 7) ดังแสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 7 วงจรฟู



ลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 8 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำ

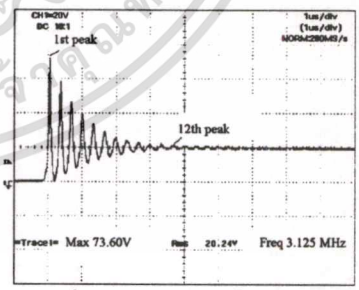
ข้อมูลจาก f-z ch	
f_1	3.144 MHz
BW_3	0.302 MHz
$S_1 = \frac{f_1}{BW_3}$	11
R_1	8.249 kΩ
$X_1 = \frac{R_1}{S_1}$	750 Ω

(ก)

ข้อมูลจากการคำนวณ	
f_1	3.144 MHz
$E_1 = I_0 X_1 e^{\frac{-\pi}{2S_1}}$	47 V
$n = S_1 + 1$	11+1=12
$\tau_0 = \frac{S_1}{f_1}$	3.4987 μs
$E_n = \frac{E_1}{2^{S_1}}$	2 V

(ข)

ตารางที่ 1 (ก) ตารางข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟคุณลักษณะความถี่-อิมพีแดนซ์ของรูปที่ 8 (ข) ตารางข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ



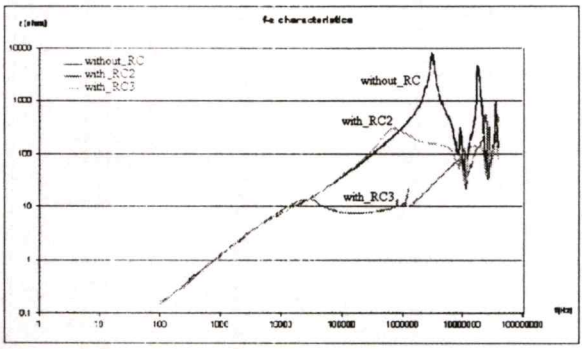
รูปที่ 9 ผลการวัด Vds ที่จุดสังเกต

ใช้หลักการเทคนิคของประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อ-ความร้อนเหนี่ยวนำตามค่าแสดงในตารางที่ 2 แล้วทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละกรณี ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10

Case	R (Ω)	C (F)
With_RC2	300	$470*10^{-12}$
With_RC3	7.5	$600*10^{-9}$

ตารางที่ 2 ค่า R-C ในแต่ละกรณี

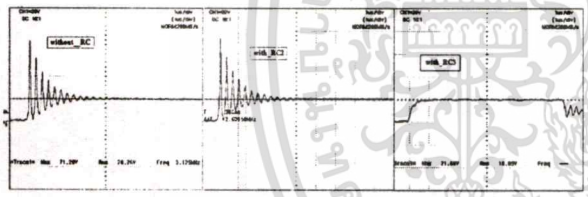
เอกสารนี้ใช้ในเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่ –อิมพีแดนซ์ของหม้อความร้อนเหนี่ยวนำเปรียบเทียบกัน 3 กรณี

จากรูปที่ 10 จะเห็นว่าการประยุกต์ใส่ชุดอนุกรม R-C ด้วยค่าที่เหมาะสมสามารถลดค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ข้างต้น

เมื่อทดลองให้ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ทำงาน ในแต่ละกรณีและวัดแรงดัน ณ จุดสังเกตดังแสดงในรูปที่ 7 และมีการต่ออุปกรณ์ Line Impedance Stabilization Network (LISN) เพิ่มเติมในภาคหน้าสุดก่อนชุดควบคุมแรงดันเพื่อวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ได้ผลดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ตามลำดับ

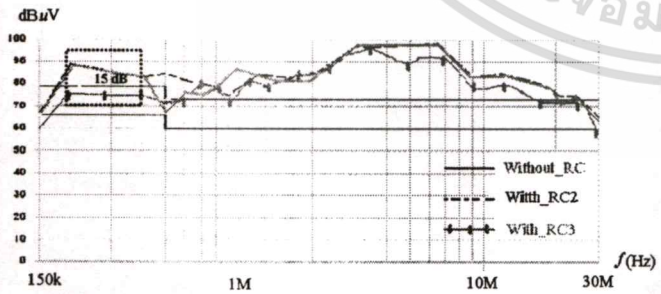


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 11 แรงดัน V_{ds} ที่จุดสังเกต

(ก) V_{ds} ในกรณี Without_RC (ข) V_{ds} ในกรณี With_RC2

(ค) V_{ds} ในกรณี With_RC3



รูปที่12 ผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำทั้ง 3 กรณี

จากรูปที่ 11 และรูปที่ 12 จะเห็นว่าเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำสามารถกำจัดการแกว่งของสัญญาณแรงดันได้ และสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้เช่น กรณี With_RC3 สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ประมาณ 15 dB ในช่วงความถี่ระหว่าง 200-500 kHz (เทียบกับกรณี Without_RC)

ข้อเสนอแนะ การประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C มีข้อดีในการลดการเกิดการแกว่ง ทำให้ลดผลสัญญาณรบกวนด้านความถี่สูงได้ แต่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบการเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไป

4. สรุป

อาศัยกราฟคุณลักษณะเฉพาะความถี่-อิมพีแดนซ์และนิยามค่าความคม ณ จุดเรโซแนนซ์สามารถทำนายการแกว่งของสัญญาณแรงดันที่คร่อมสวิตช์ในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้และเทคนิคการประยุกต์ใส่ค่าอนุกรม R-C ขนานเข้าไปที่หม้อความร้อนเหนี่ยวนำสามารถกำจัดการแกว่งของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และผลจากการวัดจริง

เอกสารอ้างอิง

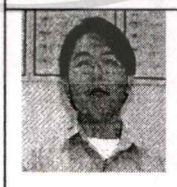
[1] Nitta, S., Motoh, A., Yamakoshi, N., and Shimayama, T.,"Generation Mechanism of R.F.Noises on Power Lines," Environmental and Space Electromagnetics, ed., H. Kikuchi, pp. 392-409, Springer-Verlag, Tokyo, 1991.

[2] J. Arthittang, V. Tarateeraseth, W. Khan-ngern, S. Nitta., "The Relationship among Damped Oscillation, f-z characteristics and Conducted EMI of an Induction Cooking," EMC'04 Sendai., vol. 2, pp. 865-868, 2004.

[3] Umesh Sinha, Network Analysis and Synthesis, Satya Prakashan, New Delhi, 2002, p635-677.



จักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์ จบการศึกษา วศ.บ (ไฟฟ้า), วศ.ม. (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นวิศวกรที่ปรึกษาด้านความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



วีระเชษฐ์ ขันเงิน จบการศึกษา วศ.บ (ไฟฟ้า), วศ.ม. (ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, Ph.D.(Electrical Engineering) จาก Imperial College, University of London, UK. ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างโปรแกรม MathCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Typical Method ; Fourier Transformation

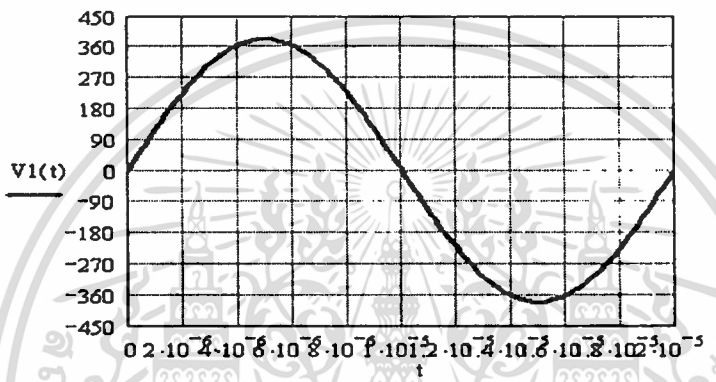
V(n)=V1+V3+V5+V7+....

$f := 50000$ $\quad Vdc := 300$

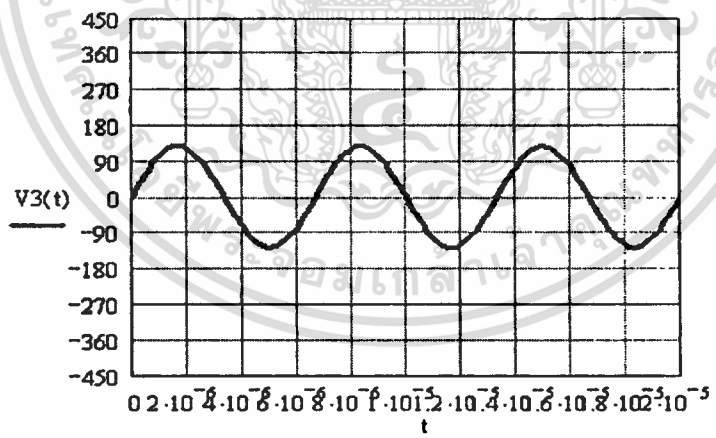
$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$ $\quad A := \frac{4}{\pi} \cdot Vdc$

$t := 0, \frac{20 \cdot 10^{-6}}{100} .. 50 \cdot 10^{-6}$

$V1(t) := (A) \cdot \sin(\omega \cdot t)$

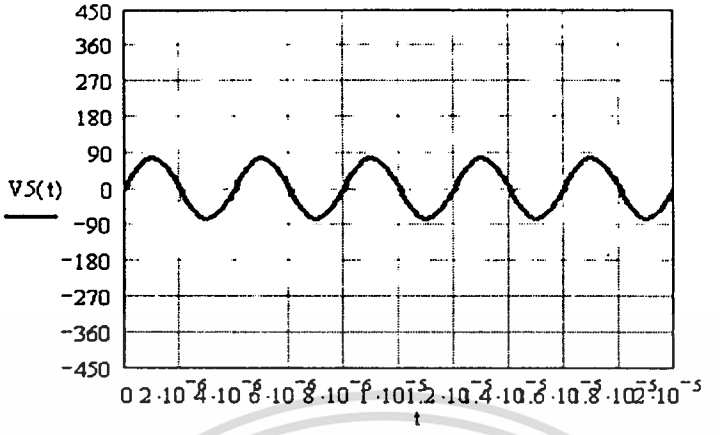


$V3(t) := \left(\frac{A}{3}\right) \cdot \sin(3\omega \cdot t)$

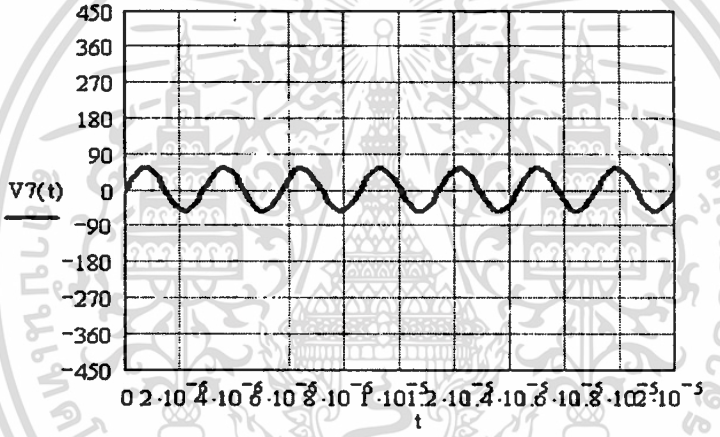


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

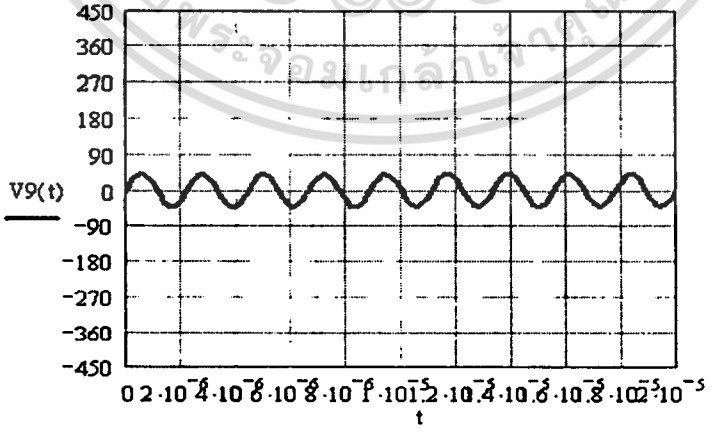
$$V5(t) := \left(\frac{A}{5}\right) \cdot \sin(5\omega \cdot t)$$



$$V7(t) := \left(\frac{A}{7}\right) \cdot \sin(7\omega \cdot t)$$



$$V9(t) := \left(\frac{A}{9}\right) \cdot \sin(9\omega \cdot t)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R := 10 \qquad L := 40 \cdot 10^{-6} \qquad C := 1$

Given

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

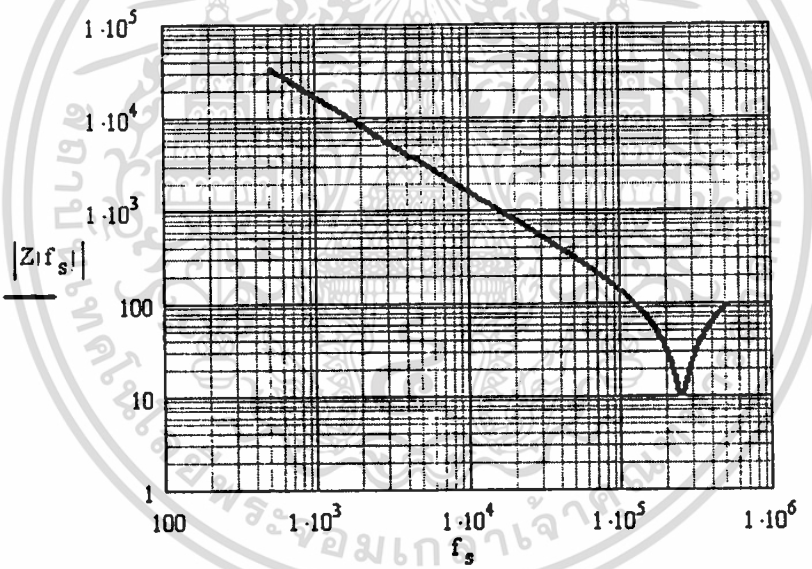
$$\text{Find}(C) = 253.303 \times 10^{-9}$$

$$C := 10 \times 10^{-9}$$

$$Z(f_s) := R + j \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C} \right)$$

$$f_s := 0, \frac{500000}{1000} .. 500000 \qquad f_r := \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$$

$$f_r = 251.646 \times 10^{3}$$



$f := 50000 \qquad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$

$$Z(n) := R + j \cdot \left(n \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{n \cdot \omega \cdot C} \right)$$

$Z(1) = 10 - 305.744i \qquad \text{xy2pol}(10, 305.744) = \begin{pmatrix} 305.907 \\ 1.538 \end{pmatrix}$

$Z(3) = 10 - 68.404i \qquad \text{xy2pol}(10, 68.404) = \begin{pmatrix} 69.131 \\ 1.426 \end{pmatrix}$

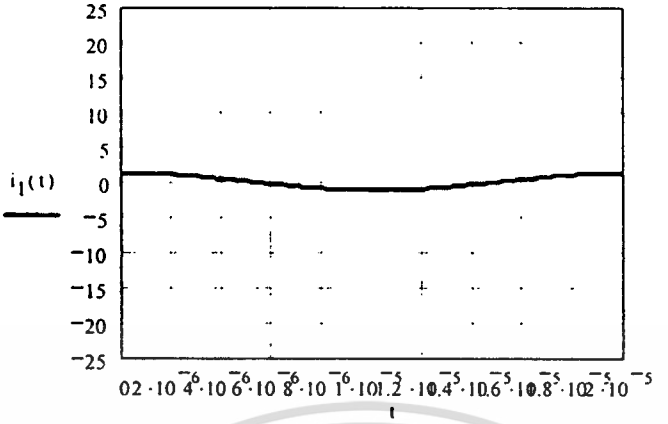
$Z(5) = 10 - 0.83i \qquad \text{xy2pol}(10, 0.83) = \begin{pmatrix} 10.034 \\ 0.083 \end{pmatrix}$

$Z(7) = 10 + 42.492i \qquad \text{xy2pol}(10, 42.492) = \begin{pmatrix} 43.653 \\ 1.34 \end{pmatrix}$

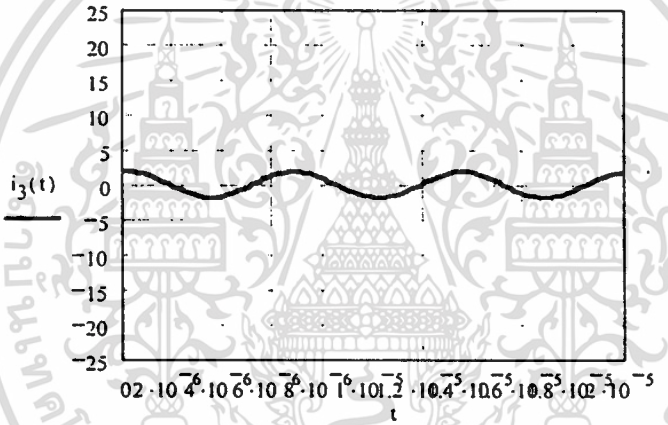
$Z(9) = 10 + 77.73i \qquad \text{xy2pol}(10, 77.73) = \begin{pmatrix} 78.371 \\ 1.443 \end{pmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

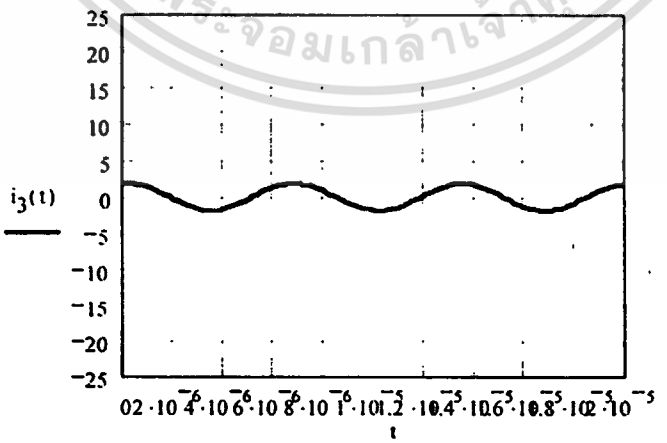
$$i_1(t) := \frac{(A)\cdot\sin(\omega\cdot t + 1.538)}{|Z(1)|}$$



$$i_3(t) := \frac{\left(\frac{A}{3}\right)\cdot\sin(3\omega\cdot t + 1.426)}{|Z(3)|}$$

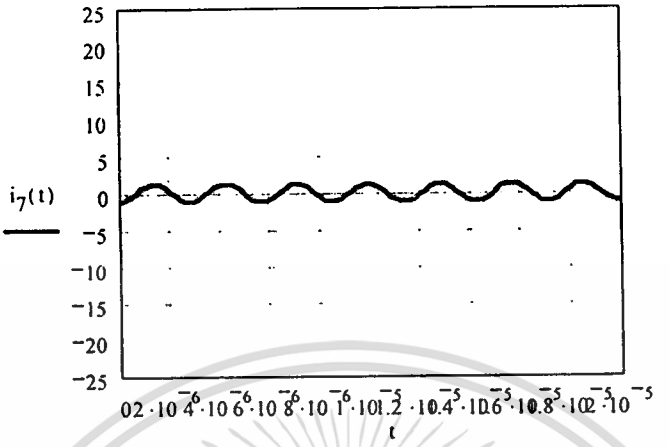


$$i_3(t) := \frac{\left(\frac{A}{3}\right)\cdot\sin(3\omega\cdot t + 1.426)}{|Z(3)|}$$

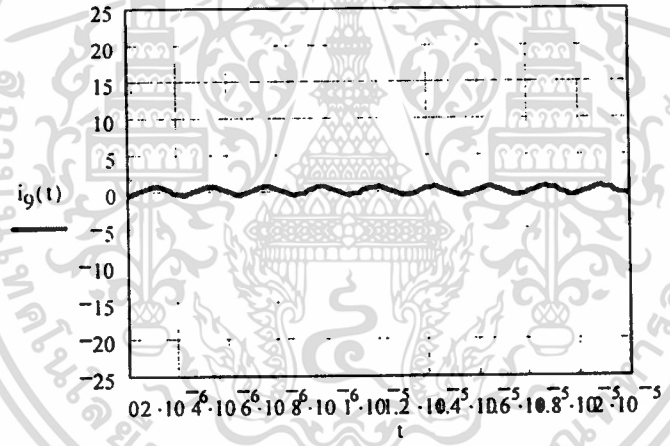


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

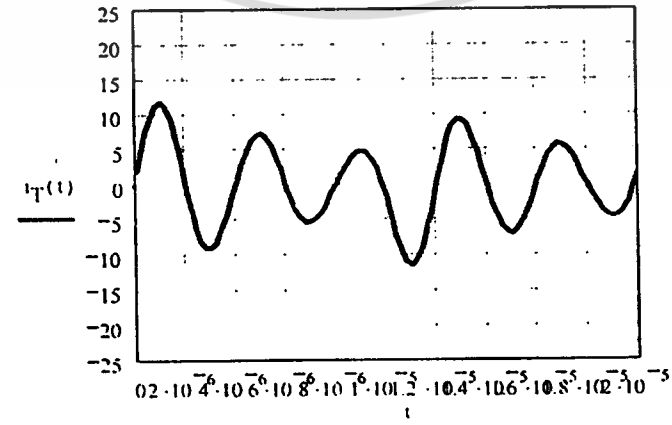
$$i_7(t) := \frac{\left(\frac{A}{7}\right)\cdot \sin(7\omega\cdot t - 1.34)}{|Z(7)|}$$



$$i_9(t) := \frac{\left(\frac{A}{9}\right)\cdot \sin(9\omega\cdot t - 1.443)}{|Z(9)|}$$



$$i_T(t) := i_1(t) + i_3(t) + i_5(t) + i_7(t) + i_9(t)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

; Damped ratio

; How to plot damped oscillation that effected by damped ratio ?

$C := 63.3 \cdot 10^{-9}$ $L := 160 \cdot 10^{-6}$ $R := 10$

$R_c := 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ $R_c = 101$ $\omega_n := 10$

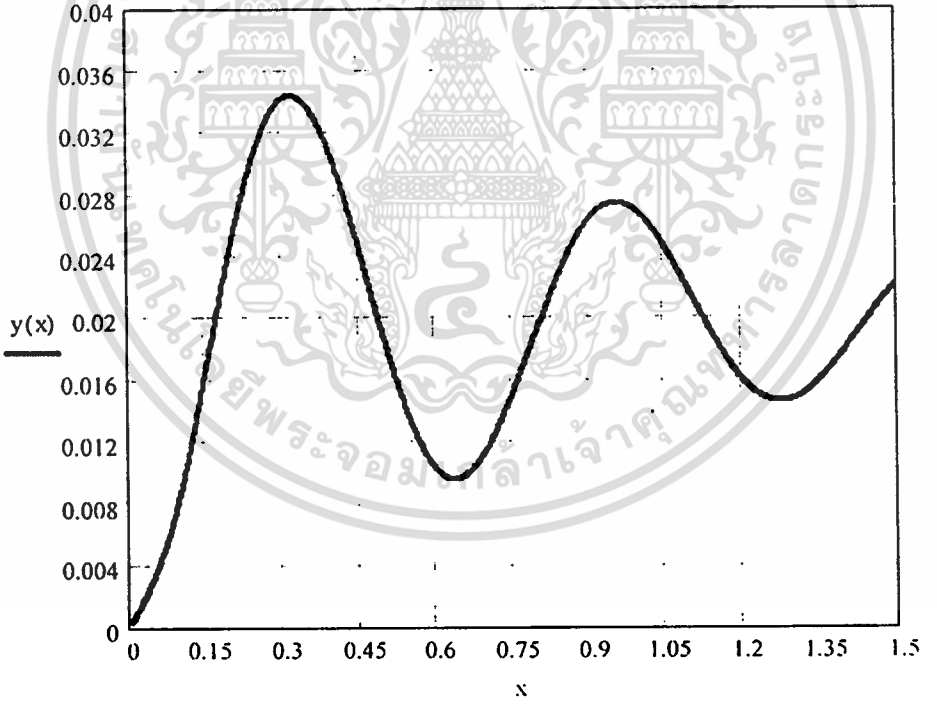
$\zeta := 0.1$

Given

$y''(x) + 2 \cdot \zeta \omega_n \cdot y'(x) + \omega_n^{2} \cdot y(x) = 2$

$y(0) = 0$ $y'(0) = 0$

$y := \text{odesolve}(x, 10)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

How to find C in second order resonant condition ?

[redacted] $f_o := 50000$ $C := 0.5 \cdot 10^{-6}$

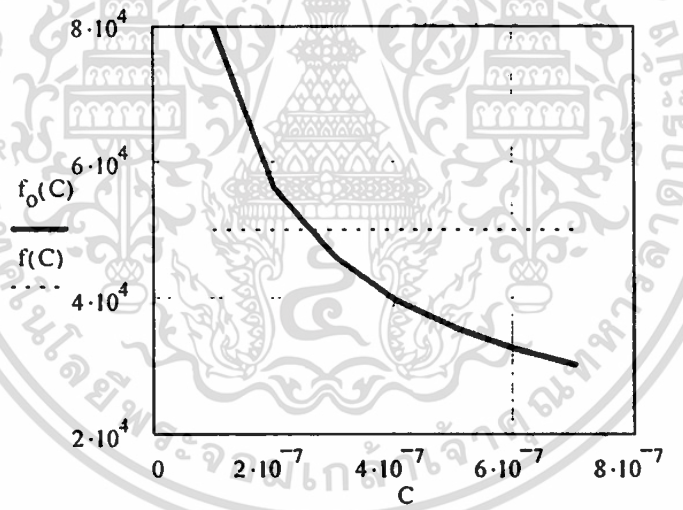
Given

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

$\text{Find}(C) = 253.303 \times 10^{-9}$

$$f_o(C) := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \qquad f(C) := 50 \cdot 1000$$

$C := 0.1 \cdot 10^{-6}, 0.2 \cdot 10^{-6} .. 0.7 \cdot 10^{-6}$



[redacted] [redacted] $R := 10$

$$S := \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad S = 39.738$$

$$S := \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{R} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}} \qquad S = 39.738$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

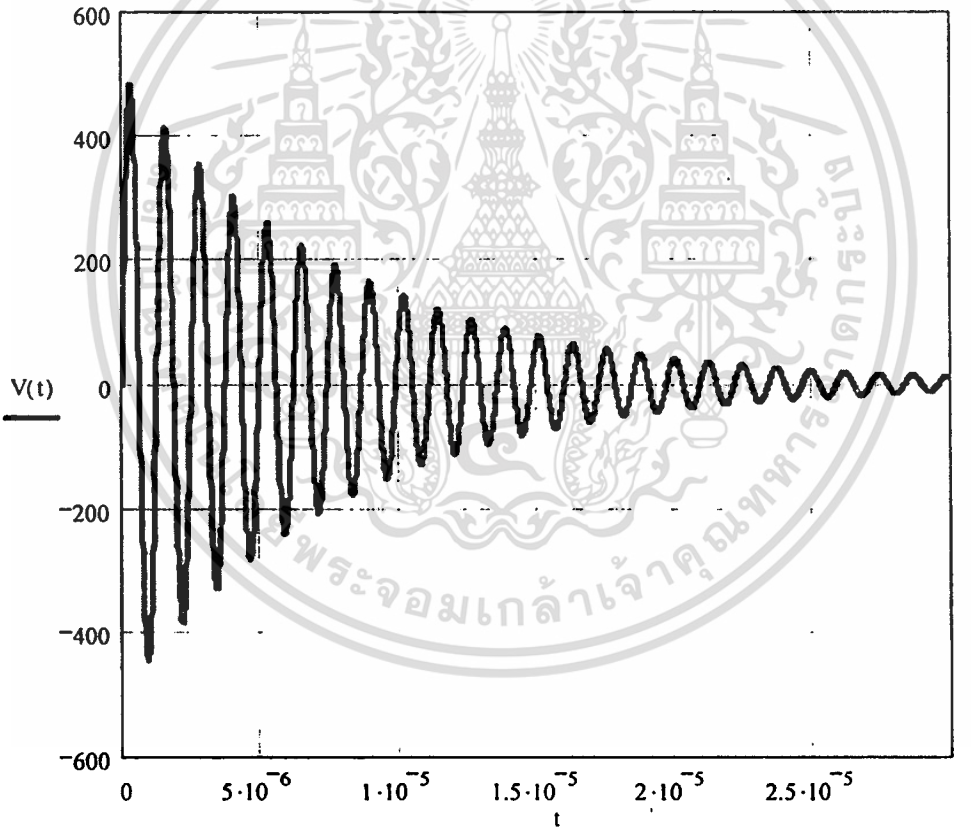
How to plot damped oscillation ?

$R := 10$ $C := 68 \cdot 10^{-12}$ $f := 5000$ $L := 40 \cdot 10^{-6}$

$\alpha := \frac{R}{2 \cdot L}$ $E_0 := 500$ $\omega := \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ $\omega = 1.917 \times 10^{7}$

$t := 0, \frac{100 \cdot 10^{-6}}{10000} .. 100 \cdot 10^{-6}$

$V(t) := E_0 \cdot e^{(-\alpha \cdot t)} \cdot \sin\left(0.51 \cdot 10^{7} \cdot t\right)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

How to plot f-z characteristic of LCL circuit ?

$L_1 := 400 \cdot 10^{-6}$ $L_2 := 400 \cdot 10^{-6}$

$C := 50.66 \times 10^{-9}$

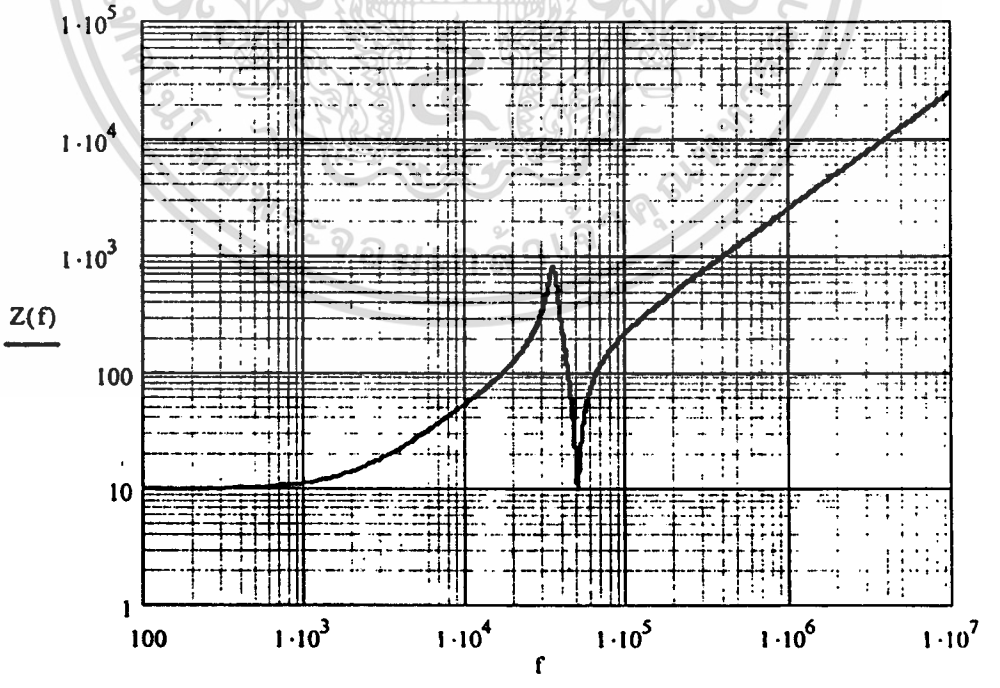
$R := 10$

$R_{eq} := R \cdot \left(\frac{L_1}{L_2} \right)$ $R_{eq} = 10$

$f_{01} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C \cdot L_1 \cdot L_2}}$ $f_{01} = 50 \times 10^3$ $f_{02} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L_2}}$ $f_{02} = 35 \times 10^3$

$$Z(f) := \left| \frac{\left[j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot L_1 - j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^3 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot C - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_1 \cdot R \cdot C + R + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot L_2 \right]}{\left[1 - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L_2 \cdot C \right] + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot R \cdot C} \right|$$

$f := 100, 200 .. 10 \cdot 10^6$

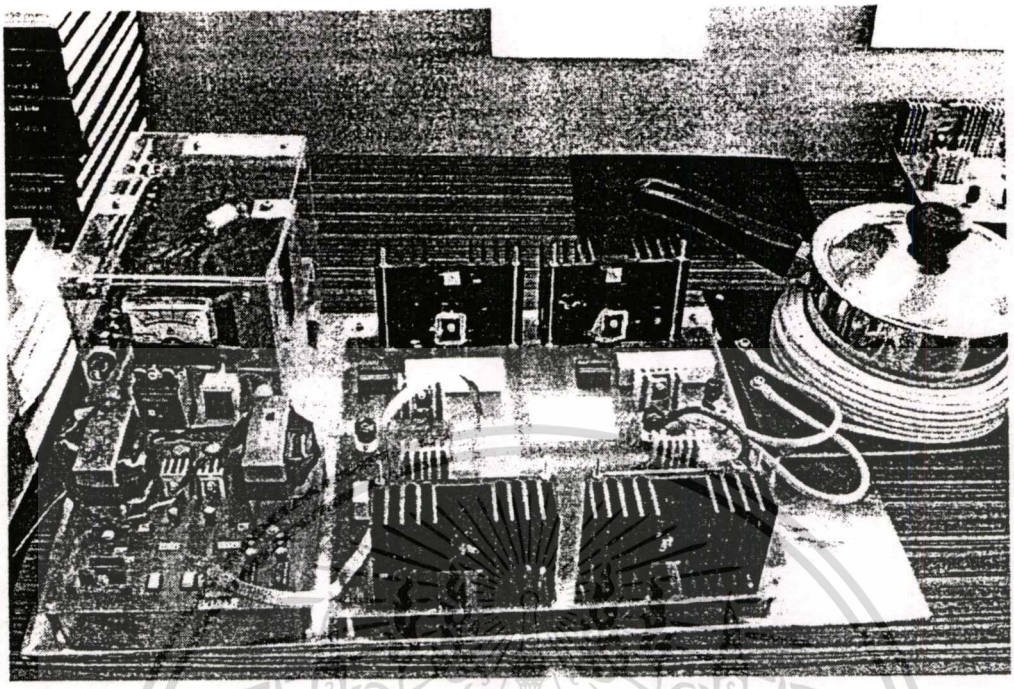


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

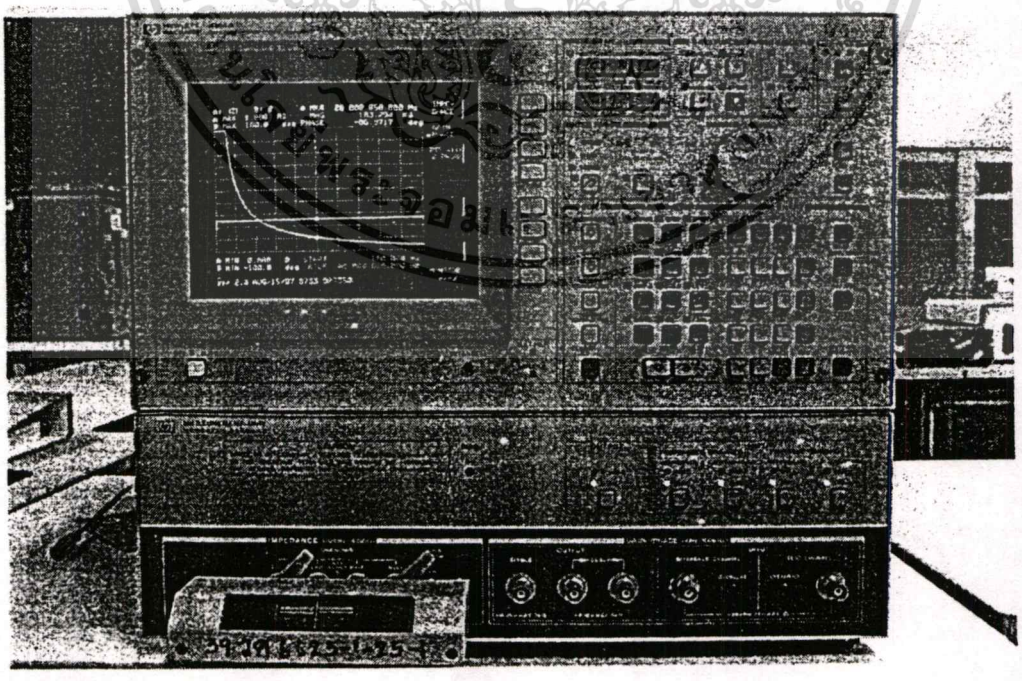
ภาคผนวก ค.

ภาพอุปกรณ์ วงจร และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

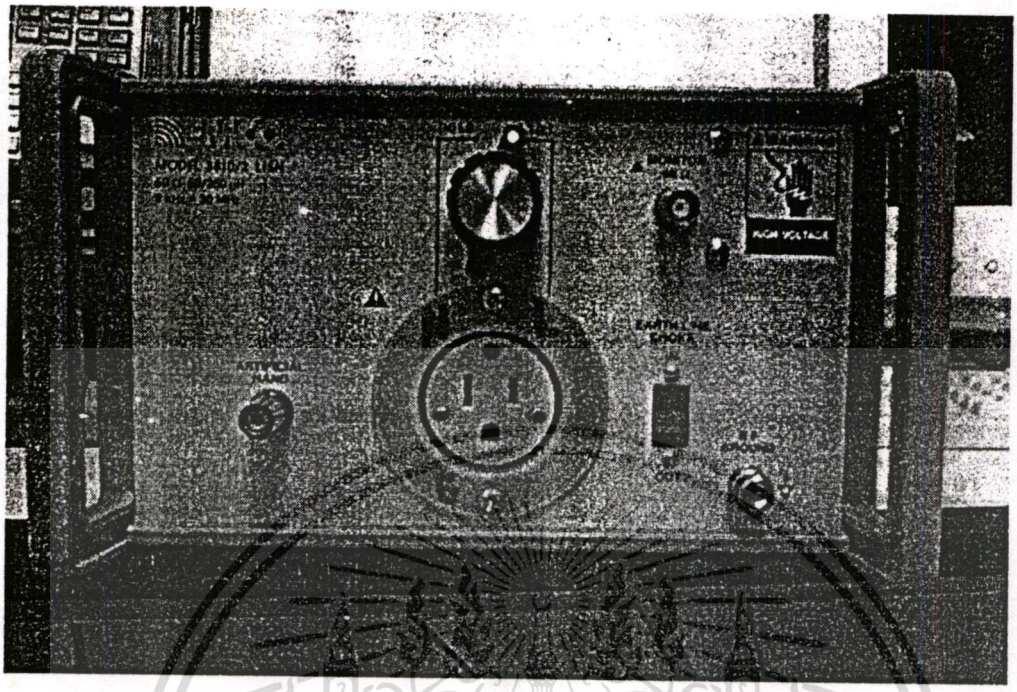


รูปที่ ค.1 วงจรโดยรวมทั้งระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต้นแบบ

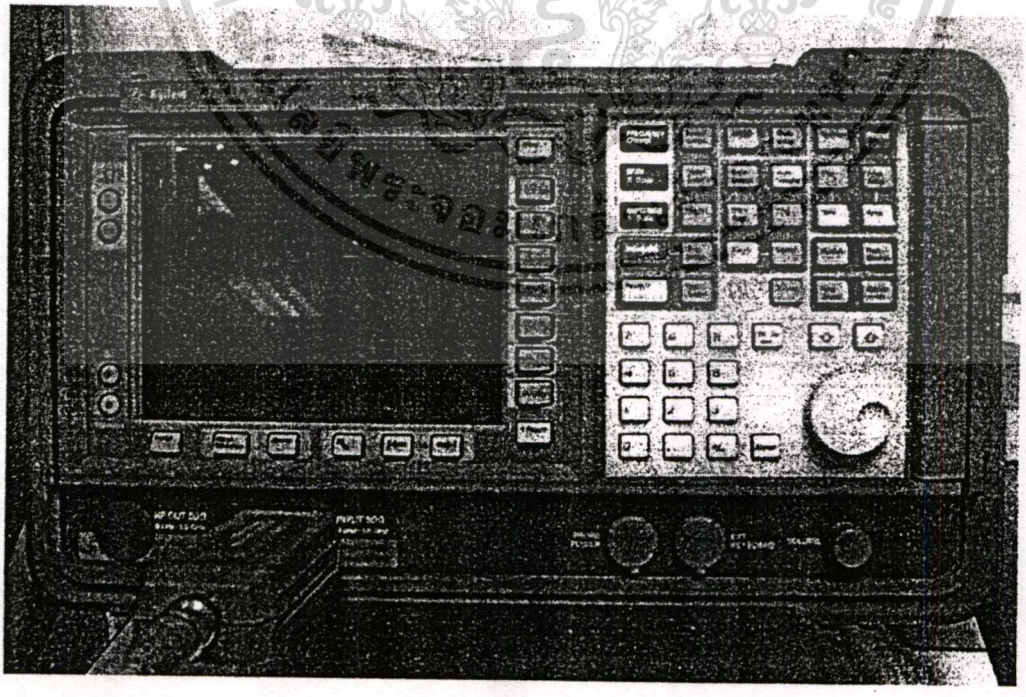


รูปที่ ค.2 เครื่อง impedance/gain phase analyzer รุ่น 4194A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 โครงข่ายสร้างเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Line Impedance Stabilizing Network; LISN)



รูปที่ ค.4 เครื่อง EMC analyzer รุ่น E17401A

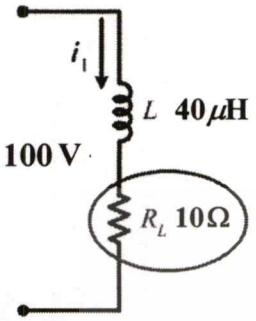
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

การคำนวณหาประสิทธิภาพของหลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาประสิทธิภาพของหลักการเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่



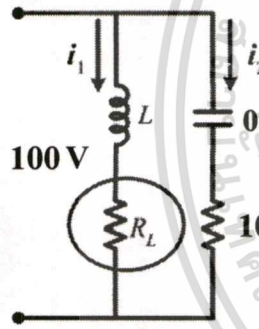
$$V = 100\angle 0° \qquad Z_{RL} = 16\angle 51.5° \qquad \Big\} \; I_1 = \frac{100\angle 0°}{16\angle 51.5°} = 6.2\angle -51.5°$$

$$S = VI^* = 620\angle 51.5° = 390 + 490j$$

at load : R_L

$$\eta = \frac{390}{390} \times 100 = 100\%$$

รูปที่ ง.1 ประสิทธิภาพกรณียังไม่ต่อชุดอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ



$$V = 100\angle 0° \qquad Z_{RC} = 12.8\angle -38.5° \qquad \Big\} \; I_2 = \frac{100\angle 0°}{12.8\angle -38.5°} = 7.8\angle 52°$$

$$I_T = I_1 + I_2 = \frac{V}{R} = 10\text{A}$$

at load : R_L

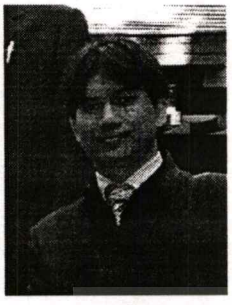
$$\eta = \frac{390}{100 \times 10} \times 100 = 39\%$$

รูปที่ ง.2 ประสิทธิภาพกรณีต่อชุดอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุภายใต้เงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่

<u>ข้อสังเกต</u> เมื่อต่อชุดอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุขนานเข้าไปจากรูปที่ ง.1 เป็นรูปที่ ง.2 โดยค่าคงที่ต่างๆมีค่าตรงตามเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์ทุกย่านความถี่ จะเห็นว่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าลดลงเพราะกระแสมีการแบ่งไหลเป็นสองทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายจักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง เกิดเมื่อวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมที่โรงเรียนบ้านนางรองยุทธกาจราษฎร์วิทยาคาร ในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนนางรอง และระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้