

การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลองสภาวะชั่วคราว



นายไชยวัฒน์ อภินวิทย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

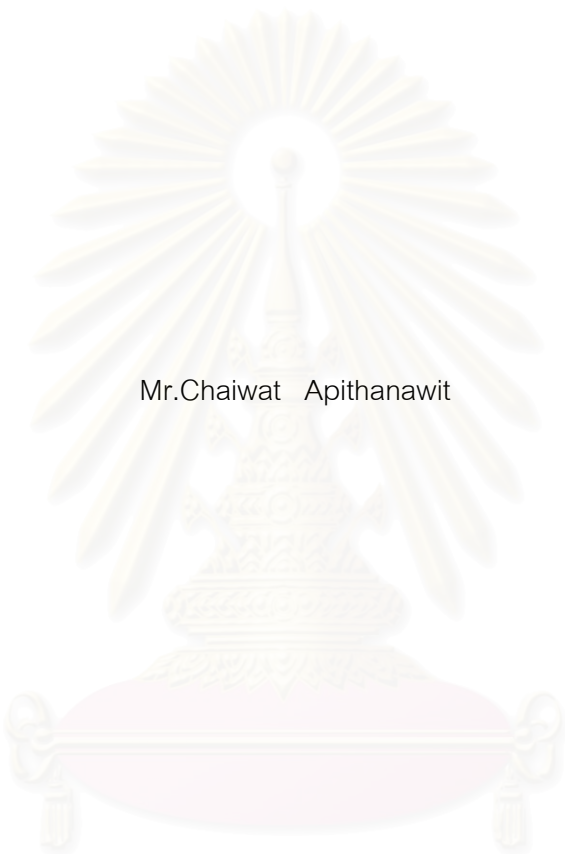
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2757-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARATIVE STUDY OF TRANSFORMER MODELS FOR TRANSIENT SIMULATION



Mr.Chaiwat Apithanawit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic year 2006

ISBN 974-14-2757-3

Copyright of Chulalongkorn University

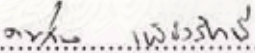
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลอง สถานะชั่วคราว
โดย	นายไชยวัฒน์ อภิธนวิทย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

---

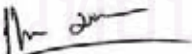
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดีเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.แนนบุญ หุนเจริญ)

สถาบันส่งเสริมบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


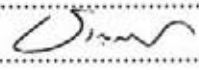
ไชยวัฒน์ อภินวิทย์ : การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลองสถานะชั่วคราว. (A COMPARATIVE STUDY OF TRANSFORMER MODELS FOR TRANSIENT SIMULATION). อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล  
164 หน้า. ISBN 974-14-2757-3.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลองสถานะชั่วคราวอันเนื่องมาจากเสิร์จฟ้าผ่า ซึ่งแบบจำลองหม้อแปลงที่ศึกษามี 3 แบบ คือ แบบจำลองที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ, แบบจำลองซึ่งรวมผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ และแบบจำลองจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์ โดยมีการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของแบบจำลองหม้อแปลงแต่ละแบบ

สำหรับหม้อแปลงที่ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองเป็นหม้อแปลง 1 เฟส ที่มีความแตกต่างกันจำนวน 3 ตัว โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP คำนวณหาแรงดันที่ส่งผ่านมาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเมื่อได้รับแรงดันเสิร์จทางด้านปฐมภูมิจากแบบจำลองต่างๆ แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัด พบว่าผลจากการจำลองมีความแตกต่างจากผลการวัดจึงมีการนำเสนอวิธีการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงยิ่งขึ้น



## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....ลายมือชื่อนิสิต.....   
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....   
ปีการศึกษา ..... 2549 .....

4670675821 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : TRANSFORMER MODEL / PI MODEL / TRANSIENT / VECTOR FITTING /  
EMTP

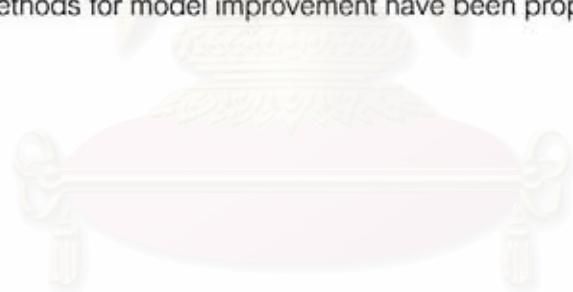
CHAIWAT APITHANAWIT : A COMPARATIVE STUDY OF TRANSFORMER  
MODELS FOR TRANSIENT SIMULATION.

THESIS ADVISOR : CHANNARONG BALMONGKOL, Dr.Sc.Techn.

164 pp. ISBN 974-14-2757-3.

This thesis compares transformer models for simulation of lightning surge transients. Three transformer models have been studied, i.e. the model including the coupling capacitors, the model including the several frequency dependent elements, and the model including the elements synthesized by using vector fitting process.

Three single phase transformers of different types are modeled. ATP/EMTP program is implemented to simulate the secondary voltages transferring from the surges on primary sides of the transformers. As the simulation and measurement results are different, the methods for model improvement have been proposed.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....*Chaiwat A.*  
Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....*Chany*  
Academic year .....2006.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก  
อ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย และแก้ไข  
ข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์  
ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ และอาจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ ที่ช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์และ  
ยังให้ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์กับวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณถาวร เอื้อดี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการสอนวิธีการใช้เครื่องมือวัดใน  
ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ตลอดจนการช่วยตรวจวัดภาคสนาม และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์  
ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่อยู่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ศูนย์  
เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง และท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่ให้ความ  
อนุเคราะห์ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ทำงานอยู่ศูนย์สั่งการระบบไฟฟ้า การไฟฟ้า  
นครหลวง แผนกสั่งการระบบไฟฟ้า 1 และ 2 ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการแลกเปลี่ยนแนวในการ  
ทำงานเพื่อให้ข้าพเจ้าได้มีเวลาศึกษาต่อ และยังสามารถปฏิบัติงานควบคู่ไปด้วย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบคุณพระคุณบิดา, มารดา, ญาติผู้ใหญ่ และพระอาจารย์ที่วัด  
อโศการาม ที่เป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิต รวมทั้งให้การอบรมสั่งสอนความรู้ทั้งทางโลกและ  
ทางธรรม ตลอดจนมอบกำลังใจให้ข้าพเจ้า จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด จึง  
ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2. ทฤษฎีและหลักการแบบจำลองหม้อแปลง.....	4
2.1 บทนำทั่วไป.....	4
2.1.1 แกนเหล็ก .....	5
2.1.2 ขดลวด .....	6
2.1.2.1 การพันขดลวด.....	7
2.1.2.2 การจัดวางขดลวด.....	8
2.1.3 ฉนวน .....	9
2.1.3.1 การฉนวนหลัก.....	9
2.1.3.1 การฉนวนรอง.....	10
2.2 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมของตัวเก็บประจุ.....	10
2.2.1 วงจรสมมูลหม้อแปลง.....	10
2.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ.....	12
2.2.3 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ .....	13
2.2.4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ .....	15

2.3	แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ .....	16
2.3.1	วงจรสมมูลของหม้อแปลง .....	16
2.3.2	ปรากฏการณ์ตามผิว .....	17
2.3.2.1	การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรฟอสเตอร์ของขดลวดปฐมภูมิ .....	18
2.3.2.2	การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรฟอสเตอร์ของขดลวดทุติยภูมิ .....	19
2.3.3	เรโซแนนซ์ทวิคูณ .....	19
2.3.3.1	การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ทวิคูณของขดลวดปฐมภูมิ .....	20
2.3.3.2	การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ทวิคูณของขดลวดทุติยภูมิ .....	20
2.3.4	ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่อระหว่างขั้วของหม้อแปลง .....	21
2.4	แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพีตติง ทางเวคเตอร์ .....	21
2.4.1	วงจรสมมูลของหม้อแปลง .....	21
2.4.2	การวัดตัวแปรแอดมิตแตนซ์จากแบบจำลองพาย .....	22
2.4.3	วิธีการประมาณฟังก์ชันตรรกยะจากแอดมิตแตนซ์ขององค์ประกอบพาสซีส .....	23
2.4.4	การคำนวณค่าองค์ประกอบแบบพาสซีสจากฟังก์ชันตรรกยะ .....	24
3.	การสร้างแบบจำลองหม้อแปลง .....	28
3.1	หม้อแปลงที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง .....	28
3.2	การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ .....	29
3.2.1	การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ .....	29
3.2.2	การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ .....	32
3.2.3	การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิ .....	34
3.2.4	การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ .....	36
3.2.5	การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ของขดลวดทุติยภูมิ .....	38
3.2.6	แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุสำหรับ โปรแกรม ATP/EMTP .....	40
3.3	การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ .....	41



3.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรถ่วงน้ำหนักสำหรับปรากฏการณ์ตามผิว.....	41
3.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรถ่วงน้ำหนักที่ผิว.....	42
3.3.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรถ่วงน้ำหนักที่ผิวของขดลวด ด้านปฐมภูมิ.....	43
3.3.2.2 การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของขดลวด ด้านปฐมภูมิ.....	46
3.3.2.3 การเปรียบเทียบค่าแอดมิตแตนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิ.....	46
3.3.2.4 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรถ่วงน้ำหนักที่ผิวของขดลวด ด้านทุติยภูมิ.....	46
3.3.2.5 การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของขดลวด ด้านทุติยภูมิ.....	46
3.3.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ.....	53
3.3.4 แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับ โปรแกรม ATP/EMTP.....	53
3.4 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการ พิตติงทางเวกเตอร์.....	54
3.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์ $Y_m$ , $Y_{s1}$ และ $Y_{s2}$ สำหรับแบบจำลองพาย.....	54
3.4.2 การพิตติงทางเวกเตอร์ของข้อมูลแอดมิตแตนซ์จากการวัด.....	57
3.4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ $Y_m$ .....	58
3.4.2.2 ค่าพารามิเตอร์ $Y_{s1}$ .....	59
3.4.2.3 ค่าพารามิเตอร์ $Y_{s2}$ .....	60
3.4.3 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้ จากการสังเคราะห์ด้วยองค์ประกอบแบบพาสซีส.....	65
3.4.3.1 การเปรียบเทียบค่า $Y_m$ ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยองค์ประกอบแบบพาสซีส.....	67
3.4.3.2 การเปรียบเทียบค่า $Y_{s1}$ ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยองค์ประกอบแบบพาสซีส.....	68
3.4.3.3 การเปรียบเทียบค่า $Y_{s2}$ ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยองค์ประกอบแบบพาสซีส.....	69

3.4.4 วงจรสมมูลแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดย กระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์สำหรับโปรแกรม ATP/EMTP ..	70
4. การวัดผลตอบสนองของหม้อแปลง ..	72
4.1 การศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงด้วยแรงดันสวิตชิงเสิร์จ.....	72
4.2 การศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนค่าขนาด .....	74
4.3 การศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่น ....	79
5. การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการจำลอง .....	83
5.1 แบบจำลองของแรงดันอิมพัลส์ .....	83
5.2 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากการวัดและการจำลอง.....	83
5.3 การศึกษาผลแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงต่อการเปลี่ยนค่ายอด แรงดันอิมพัลส์ .....	88
5.3.1 ผลการเปลี่ยนค่ายอดสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบ ร่วมตัวเก็บประจุ.....	88
5.3.2 ผลการเปลี่ยนค่ายอดสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบ เชิงความถี่ต่างๆ .....	88
5.3.3 ผลการเปลี่ยนค่ายอดสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์.....	88
5.4 การศึกษาผลแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงต่อการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่น แรงดันอิมพัลส์ .....	99
5.4.1 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบ ร่วมตัวเก็บประจุ.....	100
5.4.2 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผล องค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ .....	103
5.4.3 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์.....	106
6. การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลง.....	109
6.1 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ.....	109
6.1.1 การต่อค่าความต้านทานที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้าในแบบจำลอง หม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ.....	110

บทที่	หน้า
6.1.2 การต่อหม้อแปลงอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้าในแบบจำลอง หม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ.....	113
6.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์ ร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุง.....	114
6.3 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ.....	117
6.4 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลขององค์ประกอบ เชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุง.....	118
6.5 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการ การพิตติ้งทางเวคเตอร์.....	122
6.6 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบ โดยกระบวนการพิตติ้งทางเวคเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุง.....	123
6.7 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จซึ่งมีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์สำหรับ แบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุง.....	127
6.7.1 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์ ร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุง.....	128
6.7.2 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลขององค์ประกอบ เชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุง.....	130
6.7.3 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติ้งทางเวคเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุง.....	133
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	136
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	139
รายการอ้างอิง.....	143
ภาคผนวก.....	144
ภาคผนวก ก.....	145
ภาคผนวก ข.....	150
ภาคผนวก ค.....	156
ภาคผนวก ง.....	162
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	164

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางการแทนผลตอบสนองเชิงความถี่ในย่านต่างๆ ของขดลวดหม้อแปลง .....	16
3.1 ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง A, B และ C มีหน่วยเป็น pF .....	29
3.2 ค่าความจุไฟฟ้า $C_{12}$ ที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง.....	31
3.3 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิมิมีหน่วยเป็น $\Omega$ .....	32
3.4 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ $C_1$ ของหม้อแปลง A, B และ C.....	32
3.5 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิมิมีหน่วยเป็น $\Omega$ .....	36
3.6 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ $C_2$ ของหม้อแปลง A, B และ C.....	38
3.7 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ .....	40
3.8 ค่าพารามิเตอร์ $R_0$ , $R_1$ และ $L_1$ ของวงจรฟอสเตอร์สำหรับหม้อแปลง A.....	41
3.9 ค่าพารามิเตอร์ $R_0$ , $R_1$ และ $L_1$ ของวงจรฟอสเตอร์สำหรับหม้อแปลง B.....	42
3.10 ค่าพารามิเตอร์ $R_0$ , $R_1$ และ $L_1$ ของวงจรฟอสเตอร์สำหรับหม้อแปลง C.....	42
3.11 แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ขั้วขดลวดปฐมภูมิมิมีหน่วยเป็น $\mathcal{U}$ .....	43
3.12 ค่าพารามิเตอร์ $R_i$ , $L_i$ และ $C_i$ ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง A.....	45
3.13 ค่าพารามิเตอร์ $R_i$ , $L_i$ และ $C_i$ ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง B .....	46
3.14 ค่าพารามิเตอร์ $R_i$ , $L_i$ และ $C_i$ ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง C.....	46
3.15 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง .....	46
3.16 แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ขั้วขดลวดทุติยภูมิมิมีหน่วยเป็น $\mathcal{U}$ .....	48
3.17 ค่าพารามิเตอร์ $R_i$ , $L_i$ และ $C_i$ ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A .....	50
3.18 ค่าพารามิเตอร์ $R_i$ , $L_i$ และ $C_i$ ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A .....	50
3.19 ค่าพารามิเตอร์ $R_i$ , $L_i$ และ $C_i$ ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A.....	50
3.20 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง .....	50
3.21 ค่าพารามิเตอร์ $Y_m$ ของหม้อแปลง A, B และ C.....	54
3.22 ค่าพารามิเตอร์ $Y_{s1}$ ของหม้อแปลง A, B และ C .....	55
3.23 ค่าพารามิเตอร์ $Y_{s2}$ ของหม้อแปลง A, B และ C .....	56
3.24 ค่าองค์ประกอบแบบพาสซีฟจากฟังก์ชันตรรกยะของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) .....	61

ตารางที่	หน้า
3.25 ค่าองค์ประกอบแบบพาสซีสจากฟังก์ชันตรรกยะของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) .....	62
3.26 ค่าองค์ประกอบแบบพาสซีสจากฟังก์ชันตรรกยะของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) .....	64
5.1 การเปรียบเทียบความถูกต้องแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง .....	99
6.1 ค่าความต้านทาน R' ที่ต่อขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ .....	112
6.2 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ สำหรับ แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์รวมตัวเก็บประจุ .....	113
6.3 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากการจำลองกับค่าจากการวัดจริงสำหรับ แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์รวมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุง .....	117
6.4 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ .....	118
6.5 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัดจริงสำหรับ แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุง .....	122
6.6 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ สำหรับ แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตตั้ง ทางเวกเตอร์ .....	123
6.7 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัดจริงสำหรับแบบจำลอง หม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวกเตอร์ .....	127
7.1 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากแบบจำลองหม้อแปลงกับค่าจากการวัด .....	137
7.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุงกับ ค่าจากการวัด .....	138

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 หม้อแปลงซึ่งอาศัยการเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็กผ่านทางแกนเหล็ก .....	5
2.2 การจัดวางแกนเหล็ก .....	6
2.3 การวางขดลวดให้มีแกนเป็นจุดศูนย์กลางร่วม .....	7
2.4 การพันขดลวด .....	7
2.5 การจัดวางขดลวด .....	8
2.6 การจัดวางขดลวดแบบจวน .....	9
2.7 การแทนองค์ประกอบทางกายภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง .....	10
2.8 วงจรสมมูลหม้อแปลงที่รวมผลขององค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ .....	11
2.9 วงจรสมมูลหม้อแปลงที่ตัดองค์ประกอบ $R_{core}$ และ $L_m$ .....	11
2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงแบบพาย .....	12
2.11 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุในรูปแบบจำลองพาย .....	12
2.12 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ .....	13
2.13 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ .....	13
2.14 วงจรสมมูลสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ .....	14
2.15 วงจรสมมูลสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ .....	15
2.16 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ .....	15
2.17 วงจรสมมูลสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ .....	16
2.18 แบบจำลองหม้อแปลงที่รวมผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ .....	17
2.19 วงจรฟอสเตอร์อันดับที่ 1 .....	17
2.20 การวัดอิมพีแดนซ์ $Z_x$ ของขดลวดด้านปฐมภูมิ .....	18
2.21 ตัวอย่างอิมพีแดนซ์ $Z_x$ ของขดลวดด้านปฐมภูมิ .....	18
2.22 วงจรสมมูลใช้แทนผลเรโซแนนซ์ที่วิคูณ .....	19
2.23 แบบจำลองพายโดยองค์ประกอบแทนด้วยค่าแอดมิตแตนซ์ .....	21
2.24 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์ $Y_{11}$ .....	22
2.25 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์ $Y_{22}$ .....	22
2.26 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์ $Y_{12}$ .....	23

ภาพประกอบที่

2.27 แขนงองค์ประกอบแบบพาสซีส ..... 24

3.1 หม้อแปลงที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง..... 28

3.2 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าตามความถี่ของหม้อแปลง A ..... 30

3.3 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าตามความถี่ของหม้อแปลง B ..... 31

3.4 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าตามความถี่ของหม้อแปลง C ..... 31

3.5 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง A..... 33

3.6 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง B..... 33

3.7 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง C ..... 34

3.8 อิมพีแดนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ..... 35

3.9 อิมพีแดนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ..... 35

3.10 อิมพีแดนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ ..... 35

3.11 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง A..... 37

3.12 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง B..... 37

3.13 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง C ..... 38

3.14 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ..... 39

3.15 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ..... 39

3.16 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ ..... 39

3.17 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุสำหรับโปรแกรม ATP/EMTP ..... 40

3.18 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง A ..... 44

3.19 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง B ..... 45

3.20 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง C ..... 45

3.21 แอดมิตแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ .. 47

3.22 แอดมิตแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ .. 47

3.23 แอดมิตแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ .. 47

3.24 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง A..... 49

3.25 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง B..... 49

3.26 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง C ..... 50

3.27 แอดมิตแตนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ... 52

## ภาพประกอบที่

3.28 แอดมิตแตนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ...	52
3.29 แอดมิตแตนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ ..	52
3.30 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง A.....	53
3.31 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง B.....	53
3.32 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง C .....	53
3.33 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง A .....	58
3.34 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง B .....	58
3.35 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง C .....	58
3.36 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง A .....	59
3.37 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง B .....	59
3.38 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง C .....	59
3.39 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง A .....	60
3.40 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง B.....	60
3.41 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง C .....	61
3.42 วงจร RLCG จากการสังเคราะห์แอดมิตแตนซ์ด้วยกระบวนการพีดีทีทางเวกเตอร์.....	65
3.43 การตั้งค่าการคำนวณแอดมิตแตนซ์ของวงจร RLCG .....	66
3.44 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง A .....	67
3.45 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง B.....	67
3.46 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง C.....	67
3.47 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง A .....	68
3.48 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง B.....	68
3.49 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง C.....	68
3.50 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง A .....	69
3.51 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง B .....	69
3.52 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง C.....	69
3.53 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง A.....	70
3.54 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง B.....	70
3.55 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง C .....	71



## ภาพประกอบที่

4.1	อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาผลของสวิตชิงเสิร์จที่มีต่อหม้อแปลงจากการสับสวิตช์ตัดตอน.....	72
4.2	วงจรสมมูลเพื่อศึกษาผลของสวิตชิงเสิร์จ .....	72
4.3	รูปคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งก่อนสวิตช์ตัดตอนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (บน) และรูปคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ล่าง).....	73
4.4	รูปขยายคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งก่อนสวิตช์ตัดตอนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (บน) และรูปขยายคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ล่าง) .....	73
4.5	การต่ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาผลแรงดันอิมพัลส์.....	74
4.6	วงจรสมมูลเพื่อศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อหม้อแปลง .....	74
4.7	ผลการวัดแรงดันอิมพัลส์ขนาดด้านปฐมภูมิ (ซ้ายมือ) และแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิ (ขวามือ) ของหม้อแปลง A.....	76
4.8	ผลการวัดแรงดันอิมพัลส์ขนาดด้านปฐมภูมิ (ซ้ายมือ) และแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิ (ขวามือ) ของหม้อแปลง B.....	77
4.9	ผลการวัดแรงดันอิมพัลส์ขนาดด้านปฐมภูมิ (ซ้ายมือ) และแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิ (ขวามือ) ของหม้อแปลง C.....	78
4.10	การต่ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาผลแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่น.....	79
4.11	วงจรสมมูลเพื่อศึกษาผลแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่น .....	79
4.12	การเปรียบเทียบผลการวัดแรงดันอิมพัลส์ (ซ้ายมือ) และแรงดันเสิร์จ (ขวามือ) ที่มีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	80
5.1	วงจรสมมูลของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างโดยอุปกรณ์ TACS.....	82
5.2	การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัดกับผลการจำลองของหม้อแปลง A .....	83
5.3	การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัดกับผลการจำลองของหม้อแปลง B .....	84
5.4	การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัดกับผลการจำลองของหม้อแปลง C .....	85
5.5	แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด(ซ้ายมือ)และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุสำหรับหม้อแปลง A .....	87
5.6	แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด(ซ้ายมือ)และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุสำหรับหม้อแปลง B .....	88



ภาพประกอบที่

5.20 แรงแดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์สำหรับหม้อแปลง A ..... 106

5.21 แรงแดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์สำหรับหม้อแปลง B..... 107

5.22 แรงแดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์สำหรับหม้อแปลง C..... 108

6.1 องค์ประกอบที่มีนัยสำคัญต่อการส่งถ่ายแรงแดันอิมพัลส์สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ ..... 109

6.2 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุโดยการต่อเพิ่มค่าความต้านทานขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ..... 110

6.3 แรงแดันเสิร์จของแบบจำลองที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุก่อน (ซ้ายมือ) และหลังเพิ่มค่าความต้านทาน  $R'$  ขนาด  $9k\Omega$  (ขวามือ) สำหรับหม้อแปลง A เมื่อป้อนแรงแดันอิมพัลส์ 10kV..... 110

6.4 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A ก่อนการต่อค่าความต้านทาน  $R'$  เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ ..... 111

6.5 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A หลังการต่อค่าความต้านทาน  $R'$  เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ ..... 112

6.6 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มค่าความต้านทานและหม้อแปลงในอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ..... 113

6.7 แรงแดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A..... 114

6.8 แรงแดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง B..... 115

6.9 แรงแดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง C ..... 116

ภาพประกอบที่	
6.10 องค์ประกอบที่มีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์สำหรับแบบจำลองหม้อแปลง ซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ.....	117
6.11 แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่ม หม้อแปลงในอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ .....	118
6.12 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลง ซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A .....	119
6.13 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลง ซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง B .....	120
6.14 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองแบบจำลองหม้อแปลง ซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง C.....	121
6.15 องค์ประกอบที่มีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์ของแบบจำลองหม้อแปลงจากการ สังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ .....	122
6.16 แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทาง เวกเตอร์ที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มหม้อแปลงในอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ .....	123
6.17 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลอง หม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A .....	124
6.18 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลอง หม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง B .....	125
6.19 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลอง หม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง C .....	126
6.20 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาน้ำคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง A.....	128
6.21 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาน้ำคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง B.....	128
6.22 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาน้ำคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง C.....	129

ภาพประกอบที่

6.23 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่  
ต่าง ๆ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง A ..... 130

6.24 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่  
ต่าง ๆ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง B ..... 131

6.25 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่  
ต่าง ๆ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง C ..... 131

6.26 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบ  
โดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์  
สำหรับหม้อแปลง A ..... 133

6.27 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบ  
โดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์  
สำหรับหม้อแปลง B ..... 133

6.28 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบ  
โดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์  
สำหรับหม้อแปลง C ..... 134

7.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงสำหรับการจำลองสภาวะชั่วคราว ..... 139

7.2 แอดมิตแตนซ์ของค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ  
ของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่าง ๆ สำหรับหม้อแปลง B .. 140

7.3 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่  
ต่าง ๆ สำหรับหม้อแปลง B ซึ่งองค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ  
แทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  1.41nF ..... 141

7.4 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่  
ต่าง ๆ สำหรับหม้อแปลง B ซึ่งองค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ  
แทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  1.41nF อนุกรมกับค่าต้านทาน 3000  $\Omega$  ..... 141

ข.1 องค์ประกอบแบบพาสซีฟที่ได้จากการสังเคราะห์ฟังก์ชันเวกเตอร์พิตติง ..... 153

ข.2 เหาพหุจากฟังก์ชันการสังเคราะห์องค์ประกอบแบบพาสซีฟ ..... 155

ค.1 วงจรอนุกรม RL สำหรับการสังเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลจำนวนจริง ..... 156

ค.2 วงจรอนุกรม RLC ..... 156

ค.3 วงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนแบบที่ 1 ..... 159

ภาพประกอบที่	น หน้า
ค.4 วงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนแบบที่ 2.....	160
ง.1 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่วัดได้จากดิฟเฟอเรนเชียลโวลเทจโคป .....	162
ง.2 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ผ่านการจำกัดสัญญาณรบกวน.....	163



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำทั่วไป

แรงดันเกินสภาวะชั่วคราวหรือแรงดันเสิร์จ เป็นแรงดันที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น โดยสามารถแบ่งตามต้นเหตุที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็นแรงดันเกินที่เกิดจากปัจจัยภายนอกระบบส่งจ่าย เช่น เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เรียกว่า เสิร์จฟ้าผ่า (Lightning surge) ส่วนประเภทที่สองเป็นแรงดันเกินที่เกิดจากปัจจัยภายในระบบส่งจ่าย เช่น เกิดจากการทำงานของสวิตช์ตัดต่อวงจร เรียกว่า เสิร์จสวิตช์ (Switching surge) [1] ซึ่งผลกระทบแรงดันเกินสภาวะชั่วคราวดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อฉนวนไฟฟ้าแรงสูงของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมทั้งคุณภาพของระบบไฟฟ้า จากการพัฒนาเทคโนโลยีทางดิจิทัลคอมพิวเตอร์ มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากจนเข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทำให้การศึกษาผลของแรงดันเกินสามารถศึกษาผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจำลองปรากฏการณ์ในสภาวะชั่วคราวที่เรียกว่า Electromagnetic Transients Program (EMTP) จากการพัฒนาของ Hermann W.Dommel [2] โดยโปรแกรมดังกล่าวจะจำลองระบบไฟฟ้าที่ต้องการศึกษาจากการต่อของแบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ จากสมการทางคณิตศาสตร์ จากนั้นโปรแกรมจะวิเคราะห์ปริมาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไม่ว่าจะเป็นที่จุดต่อร่วมของอุปกรณ์ หรือที่ตัวอุปกรณ์แต่ละชนิดในระบบไฟฟ้ากำลัง

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างระบบผลิต, ระบบส่ง และระบบจำหน่าย เพื่อประโยชน์ในการส่งถ่ายพลังงานไฟฟ้าจากระดับแรงดันหนึ่งไปสู่อีกระดับแรงดันหนึ่ง รวมทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปริมาณทางไฟฟ้า โดยการติดตั้งทั้งในที่ร่วม และกลางแจ้ง ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งประเภทใดก็ตามหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องเผชิญกับแรงดันเกินสภาวะชั่วคราว ดังนั้นมีความจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของแรงดันเกินที่มีต่อหม้อแปลงด้วยโปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP)

### 1.2 ที่มาของปัญหา

แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการจำลองสภาวะชั่วคราวด้วยโปรแกรม EMTP ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอการวิจัยอยู่ 2 แนวทางด้วยกันคือ ประเภทแรกแบบจำลองขดลวดภายในหม้อแปลง (Internal transformer winding model) เป็นแบบจำลองที่ใช้เพื่อพิจารณาผลของแรงดันเสิร์จที่มีต่อองค์ประกอบภายในของหม้อแปลงเช่น ขดลวด และแกนเหล็ก เพื่อใช้ในขั้นตอน

การออกแบบฉนวนภายในหม้อแปลง ส่วนแบบจำลองประเภทที่สอง คือ แบบจำลองแบบขั้ว (Terminal model) เป็นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลง แต่จะคำนึงถึงผลการส่งถ่ายแรงดันเสิร์จจากขั้วทางด้านปฐมภูมิไปยังขั้วทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาในส่วนแบบจำลองแบบขั้ว และเนื่องจากแบบจำลองหม้อแปลงแบบขั้วตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการเสนอหลายรูปแบบ ซึ่งแบบจำลองเหล่านั้นยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบในส่วนของคุณภาพและความง่ายในการสร้างแบบจำลอง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าว

### 1.3 ของเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองหม้อแปลงที่มีใช้ในอดีตจนถึงปัจจุบัน
2. ศึกษาทฤษฎีขององค์ประกอบที่ขึ้นกับความถี่รวมทั้งวิธีการวัดค่าองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. เปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ โดยศึกษาผ่านโปรแกรม EMTP
4. ทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลความถูกต้องของปรากฏการณ์ที่ได้จากการจำลองกับผลการวัดจริง

### 1.4 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1. รวบรวมและสำรวจบทความวิจัย หรือเอกสารทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้กับโปรแกรม EMTP เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงและแนวทางในการศึกษาวิจัย
2. จำแนกประเภทของแบบจำลองหม้อแปลงที่สนใจตามข้อ 1 เพื่อสร้างแบบจำลองหม้อแปลง
3. วิเคราะห์ผลของการจำลองแรงดันเกินสภาวะชั่วคราวของแบบจำลองหม้อแปลงตามข้อ 2 โดยใช้โปรแกรม EMTP และเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงในด้านขนาด และลักษณะรูปคลื่นของแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ
4. ประเมินผล และเปรียบเทียบความถูกต้อง และความยากง่ายในการสร้างแบบจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงแบบต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษา
5. สรุปผลการวิจัย และจัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์



### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงแบบต่างๆ ที่มีความยากง่ายในส่วนของวิธีการสร้าง และศึกษาผลความถูกต้องของแบบจำลองหม้อแปลง เพื่อนำไปใช้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากปรากฏการณ์สภาวะชั่วคราวที่ส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า
2. มีทักษะ และความเข้าใจในการใช้โปรแกรม Electromagnetic Transients Program (EMTP) เพื่อจำลองผลสภาวะชั่วคราวมากขึ้น
3. ได้ความรู้ และประสบการณ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์สภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่นๆ ซึ่งต่อรวมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการของแบบจำลองหม้อแปลง

#### 2.1 บทนำทั่วไป

การเชื่อมโยงทางวงจรไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ

1. การเชื่อมโยงทางการนำ (conductive coupling) หมายถึง การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าจากลูปหนึ่งไปมีผลต่อวงจรไฟฟ้าอีกลูปหนึ่งผ่านวัสดุที่เป็นตัวนำโดยมีการกระแสวิกฤตไหลผ่าน
2. การเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก (magnetic coupling) หมายถึง การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าจากลูปหนึ่งไปมีผลต่อวงจรไฟฟ้าอีกลูปหนึ่ง ซึ่งไม่ผ่านวัสดุที่เป็นตัวนำหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการแยกกราวด์ของวงจรไฟฟ้าทั้งสอง แต่การเชื่อมต่อของวงจรไฟฟ้าจะผ่านทางสนามแม่เหล็ก ด้วยวัสดุที่เป็นตัวกลางเช่น วัสดุแม่เหล็ก (magnetic materials) หรือ อากาศ

สำหรับคุณสมบัติทางแม่เหล็กสำหรับวัสดุต่างๆ จะขึ้นกับปัจจัยที่เรียกว่า ความซึมซาบทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility,  $\chi_m$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่ไม่มีหน่วย โดยสามารถแบ่งชนิดของวัสดุแม่เหล็กได้ดังนี้

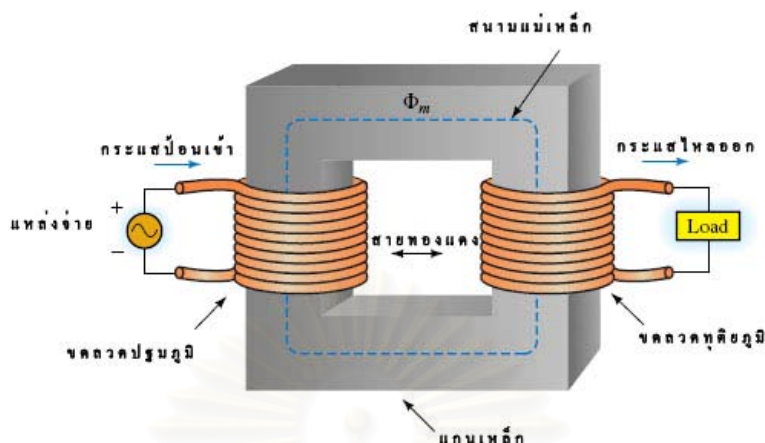
- วัสดุไม่ใช่แม่เหล็ก (nonmagnetic materials) เป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นศูนย์ เช่น ไม้, แก้ว, พลาสติก และอากาศ

- วัสดุไดอะแมกเนติก (diamagnetic materials) เป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นค่าคงที่ติดลบเล็กน้อยประมาณ  $-10^{-6}$  เช่น ทองแดง, เงิน, ตะกั่ว, สังกะสี และแคลเซียม

- วัสดุพาราแมกเนติก (paramagnetic materials) เป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กอยู่ในช่วง  $10^{-6} - 10^{-2}$  เช่น อะลูมิเนียม, ไททาเนียม, แคลเซียม, แพดทินัม

- วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เป็นวัสดุที่มีสภาวะความเป็นแม่เหล็ก แม้ไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กจะมากกว่า  $10^{-2}$  เช่น เหล็ก, โคบอลต์ และนิกเกิล

หม้อแปลง (transformer) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้หลักการเชื่อมต่อทางสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่ถ่ายเทจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยอาศัยตัวกลางที่ใช้เป็นแกนของขดลวด ตามรูปที่ 2.1



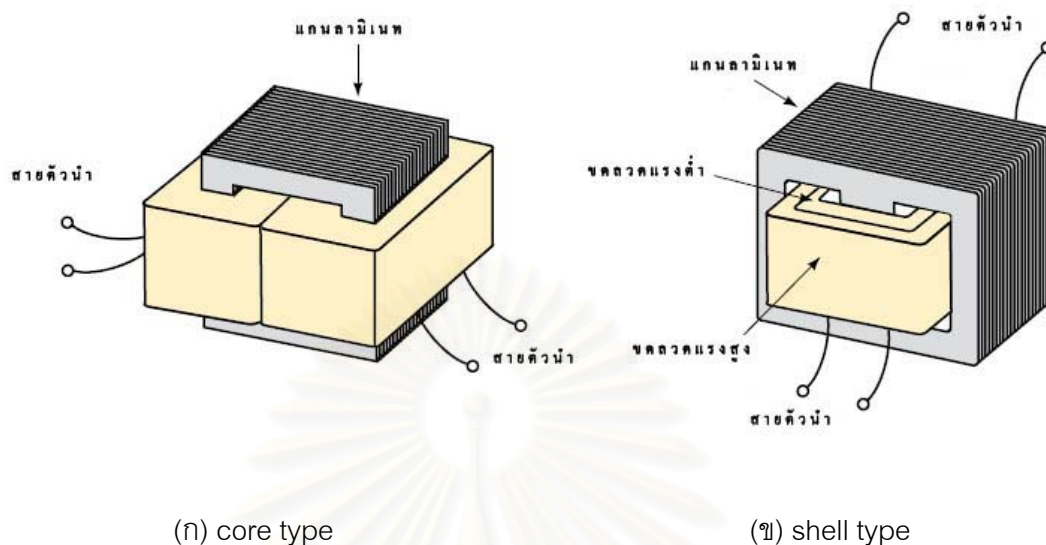
รูปที่ 2.1 หม้อแปลงซึ่งอาศัยการเชื่อมโยงทางสนามแม่เหล็กผ่านทางแกนเหล็ก

สำหรับประโยชน์ของหม้อแปลง เช่น เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างระบบผลิต, ระบบส่ง และระบบจำหน่าย ซึ่งมีระดับของแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน, เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้าเพื่อลดขนาดปริมาณทางไฟฟ้า ก่อนเข้ามาตราวัดต่างๆ นอกจากนั้นยังใช้เป็นอุปกรณ์แยกกราวด์วงจรไฟฟ้า รวมถึงเป็นอุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์

### 2.1.1 แกนเหล็ก

แกนเป็นวัสดุที่ใช้เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยหม้อแปลงจะมีคุณสมบัติความเป็นแบบเชิงเส้นก็ต่อเมื่อวัสดุที่ใช้เป็นแกนมีความซึมซาบทางแม่เหล็กเป็นศูนย์ อาทิเช่น อากาศ, พลาสติก, เบคไลท์, และไม้ สำหรับแกนของหม้อแปลงโดยทั่วไปจะใช้วัสดุที่มีส่วนผสมของเหล็ก ซึ่งนิยมเรียกว่า แกนเหล็ก (iron core) นอกจากนั้นยังมีหม้อแปลงที่ใช้แกนพลาสติกในการพันขดลวดและอาศัยอากาศเป็นตัวเชื่อมโยงทางแม่เหล็ก เช่น โรคอปัสทีคอยล์เพื่อประโยชน์ในการวัดกระแสซึ่งไหลผ่านตัวอุปกรณ์ที่มีค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ เนื่องจากอากาศจะไม่เกิดการอิ่มตัว และมีความเป็นเชิงเส้นในทุกย่านความถี่ เมื่อพิจารณาแกนเหล็กของหม้อแปลงยังสามารถแบ่งตามลักษณะการออกแบบการจัดวางแกนเหล็กได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. แกนเหล็กแบบ “core type (ขดลวดล้อมแกน)” โครงสร้างตามรูปที่ 2.2 (ก)
2. แกนเหล็กแบบ “shell type (แกนล้อมขดลวด)” โครงสร้างของแกนชนิดนี้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กกระจายอยู่รอบนอกขดลวดหม้อแปลงดังรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งเหมาะกับหม้อแปลงที่มีอัตราพิกัดกระแสสูง



(ก) core type

(ข) shell type

รูปที่ 2.2 การจัดวางแกนเหล็ก

สำหรับการจัดวางแกนเหล็กทั้งสองชนิดดังกล่าว โดยทางเทคนิคไม่สามารถบอกได้ว่าชนิดใดดีกว่ากัน ซึ่งความเหมาะสมขึ้นกับความถนัดของผู้ผลิต โดยจะคำนึงถึงพิคัดกำลังไฟฟ้า, การกระจายอุณหภูมิ, การสิ้นสະเทือน, ระดับเสียงรบกวน และราคา

### 2.1.2 ขดลวด

นิยามขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

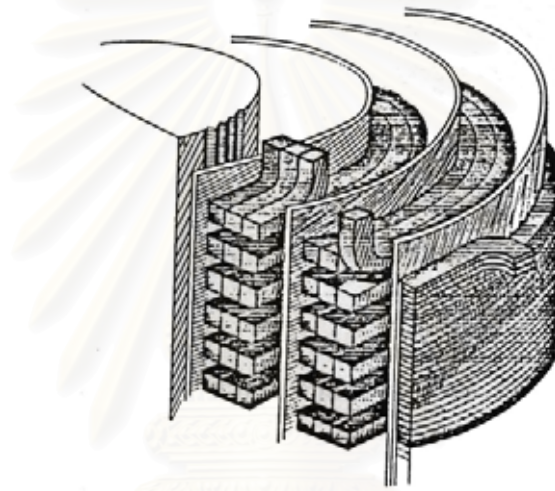
1. ขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) คือ ขดลวดที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่าย
2. ขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) คือ ขดลวดที่เชื่อมกับต่อโหลด

ขดลวดนอกจากจะเป็นตัวเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าในรูปของแหล่งจ่าย และรูปของโหลดแล้วคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขดลวดหม้อแปลง ได้แก่ จำนวนรอบของขดลวดซึ่งเป็นปัจจัยต่อการส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิไปยังขดลวดทุติยภูมิ ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดจะบ่งบอกถึงความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า และการสูญเสียที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานของขดลวด ในการออกแบบโครงสร้างของการพันและการจัดวางขดลวด ผู้ผลิตต้องคำนึงถึงความทนทานทางไฟฟ้า อันเนื่องมาจากแรงดันเกินในสภาวะชั่วคราว และความทนทานทางกล ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลัดวงจร และอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากการจ่ายโหลด นอกเหนือจากนั้นแล้ว วิธีการพันและจัดวางขดลวดยังมีผลต่อการกระจายตัวของความจุไฟฟ้าแฝง ซึ่งต้องพิจารณาสำหรับการพิจารณาแรงดันเสิร์จที่เกิดในสภาวะชั่วคราว

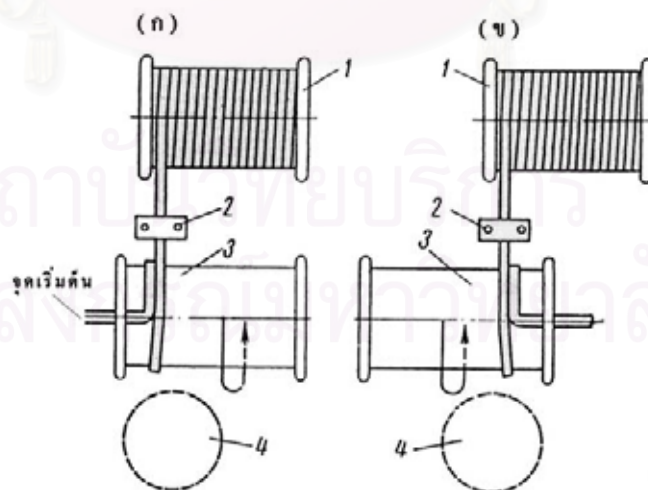
### 2.1.2.1 การพันขดลวด

การพันขดลวดจะพันรอบแกนที่เป็นจุดศูนย์กลางร่วมตามรูปที่ 2.3 โดยทิศทางในการเริ่มพันเป็นตัวกำหนดกลุ่มเวกเตอร์ (vector group) ของหม้อแปลง ซึ่งทิศทางการพันยังแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การพันชนิดก้าวหน้า (progression) จะมีทิศการพันทวนเข็มนาฬิกา จากจุดเริ่มต้น พิจารณาตามรูปที่ 2.4 (ก)
2. การพันชนิดถอยกลับ (retrogression) จะมีทิศการพันตามเข็มนาฬิกา จากจุดเริ่มต้น พิจารณาตามรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.3 การวางขดลวดให้มีแกนเป็นจุดศูนย์กลางร่วม



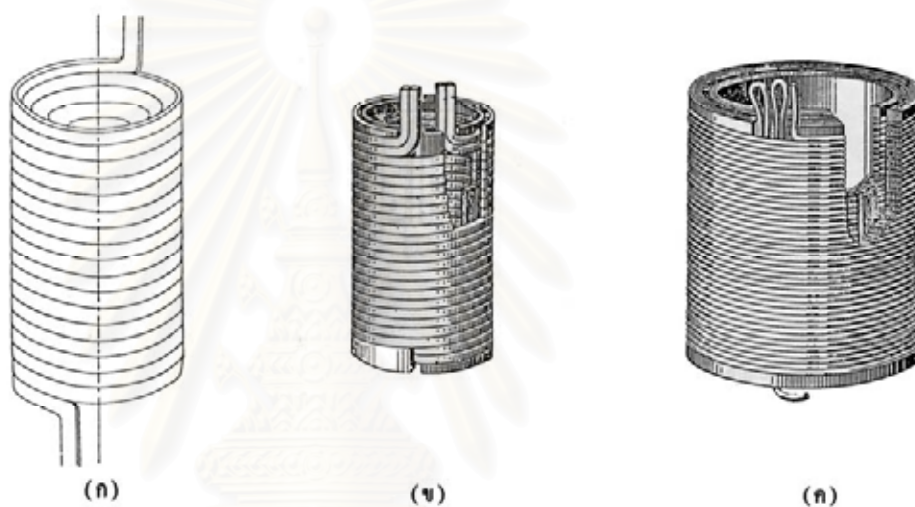
(ก) การพันชนิดก้าวหน้า      (ข) การพันชนิดถอยกลับ

รูปที่ 2.4 การพันขดลวด

### 2.1.2.2 การจัดวางขดลวด

การออกแบบการจัดวางของขดลวดจะคำนึงถึงขนาดพิกัดของหม้อแปลงซึ่งชนิดของการจัดวางขดลวดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. การจัดวางขดลวดแบบชั้น (layer winding) สามารถใช้ขดลวดที่มีหน้าตัดกลม หรือหน้าตัดเหลี่ยม ซึ่งการพันมีทั้งแบบชั้นเดียว, สองชั้น หรือหลายชั้นตามรูปที่ 2.5 ซึ่งการจัดวางขดลวดนี้เหมาะกับหม้อแปลงที่มีพิกัดแรงดัน และกระแสต่ำๆ



(ก) จัดวางขดลวดแบบชั้นเดียว

(ข) จัดวางขดลวดแบบสองชั้น

(ค) จัดวางขดลวดแบบหลายชั้น

(ง) การพันขดลวดซึ่งจัดวางแบบชั้น

รูปที่ 2.5 การจัดวางขดลวด

2. การจัดวางขดลวดแบบจาน (disc or pancake winding) เหมาะสำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่มีขนาดพิกัดสูง ซึ่งการจัดวางจะประกอบด้วยวงขดลวดจาน (disc coil) พันเป็นชุดๆ หลายชุด ต่ออนุกรมกัน หรือขนานกันก็ได้ โดยขดลวดที่ใช้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมตามแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งข้อดีของการจัดวางขดลวดแบบนี้คือ หม้อแปลงจะมีความแข็งแรงเชิงกลตามแนวแกนสูงกว่าการจัดวางขดลวดแบบชั้น แต่มีข้อเสียคือ การผลิตยากทำให้หม้อแปลงมีราคาสูง



รูปที่ 2.6 การจัดวางขดลวดแบบจาน

### 2.1.3 ฉนวน

ฉนวนหม้อแปลงมีหน้าที่ในการป้องกันการลัดวงจรจากศักดาทางไฟฟ้าเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุที่คั่นระหว่างองค์ประกอบที่มีศักดาไฟฟ้าสูงกับองค์ประกอบที่มีศักดาไฟฟ้าต่ำ เมื่อเกิดแรงดันเสิร์จซึ่งประกอบด้วยสเปกตรัมของสัญญาณความถี่สูงตกคร่อมฉนวน อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเนื่องจากฉนวนจะมีค่าต่ำเสมือนเป็นช่องทางการถ่ายโอนของสัญญาณความถี่สูง ดังนั้นในสภาวะชั่วคราวไม่สามารถที่จะตัดผลการเชื่อมโยงทางไฟฟ้าของสัญญาณความถี่สูงผ่านทางฉนวนหม้อแปลงได้

ฉนวนหม้อแปลงสามารถแบ่งตามจุดประสงค์ของการฉนวนได้เป็น 2 ประเภทคือ

#### 2.1.3.1 การฉนวนหลัก

การฉนวนหลักเป็นการป้องกันการเกิดลัดวงจรที่อาจเกิดขึ้นระหว่างขดลวดกับจุดต่อลงดิน, ระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กของหม้อแปลง หรือระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิในเฟสเดียวกัน ซึ่งฉนวนที่ใช้คือ กระดาษอัดแข็งทรงกระบอก (pressboard cylinders) ในขณะที่ส่วนปลายของขดลวด จะใช้แหวนรองแอก (yoke washer)

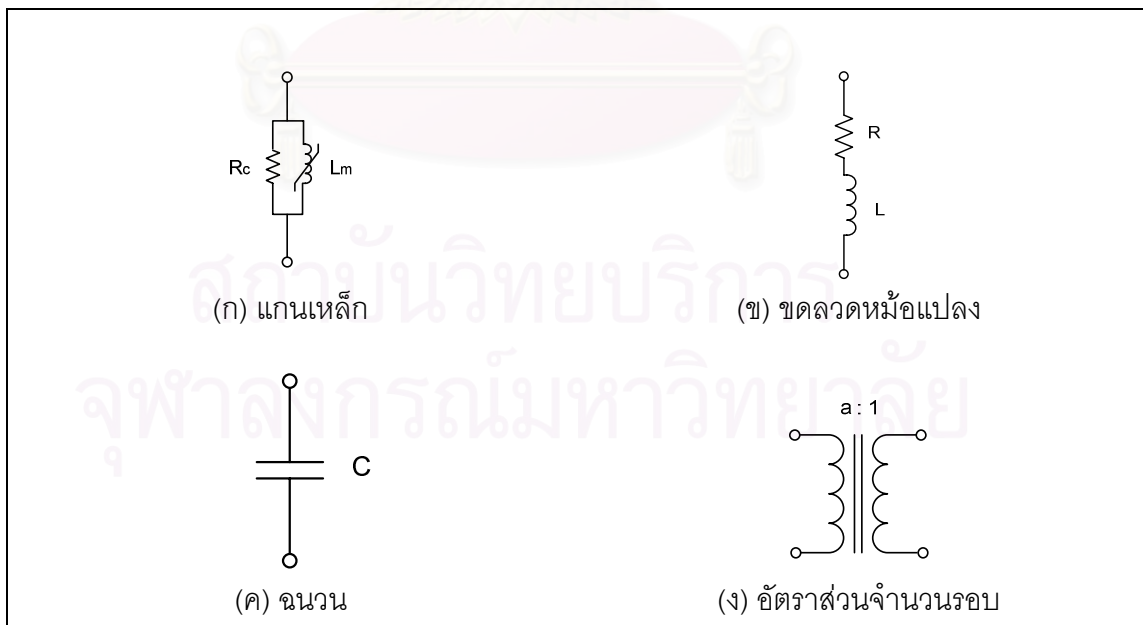
### 2.1.3.2 การฉนวนรอง

การฉนวนรองเป็นการป้องกันการลัดวงจรที่อาจเกิดระหว่างองค์ประกอบภายในขดลวดเดียวกัน กล่าวคือ ป้องกันการลัดวงจรระหว่างขด หรือการลัดวงจรระหว่างชั้น สำหรับวัสดุที่ใช้ในการฉนวนโดยทั่วไปจะเป็นกระดาษพันรอบตัวนำ ซึ่งเคลือบด้วยน้ำยาฉนวนอาบมัน (varnish) โดยความหนาของกระดาษกำหนดจากแรงดันที่ความถี่ใช้งาน และการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ นอกจากกระดาษแล้วระหว่างชั้นของขดลวดยังมีท่อน้ำมันหม้อแปลงทำหน้าที่ทั้งเป็นฉนวน และอุปกรณ์ระบายความร้อน

## 2.2 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ

### 2.2.1 วงจรสมมูลหม้อแปลง

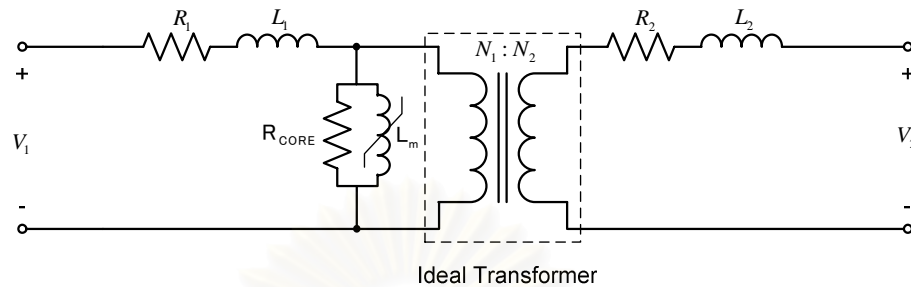
โครงสร้างทางกายภาพที่มีผลต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้าของหม้อแปลงในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ ค่าองค์ประกอบกำลังสูญเสียในแกนเหล็กสามารถแทนด้วยค่าความต้านทาน, องค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์คัลล์องขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแทนด้วยตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้น, กำลังสูญเสียในขดลวด และการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถแทนด้วยความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ, ฉนวนสามารถแทนด้วยตัวเก็บประจุแผ่ และอัตราส่วนจำนวนรอบสามารถแทนด้วยหม้อแปลงในอุดมคติ



รูปที่ 2.7 การแทนองค์ประกอบทางกายภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลง



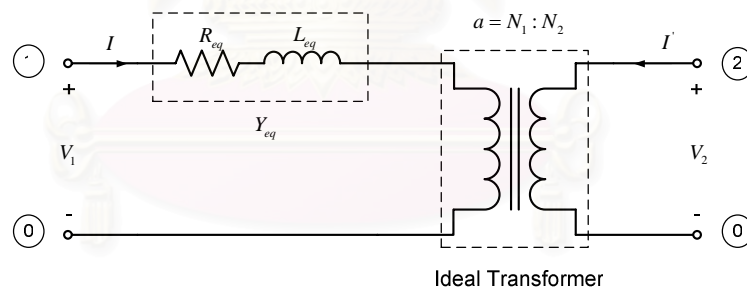
เมื่อนำองค์ประกอบทั้งหมดตามรูปที่ 2.7 ยกเว้นตัวเก็บประจุแฝงเนื่องจากจนวน มาสร้างแบบจำลองหม้อแปลงแบบ 1 เฟส ได้ตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลหม้อแปลงที่รวมผลองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆ

โดยตัวห้อย 1 และ 2 แทนขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิตามลำดับ

ซึ่งจากการศึกษาของ Woivre และคณะ [3] พบว่าหม้อแปลงจะมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นที่ความถี่สูง ทำให้สามารถตัดองค์ประกอบของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก  $R_{core}$  และองค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างฟลักซ์คัลล์องขดลวดด้านปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ  $L_m$  ที่ได้ตั้งนั้นแบบจำลองหม้อแปลงที่ยังไม่รวมผลของตัวเก็บประจุแฝงจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



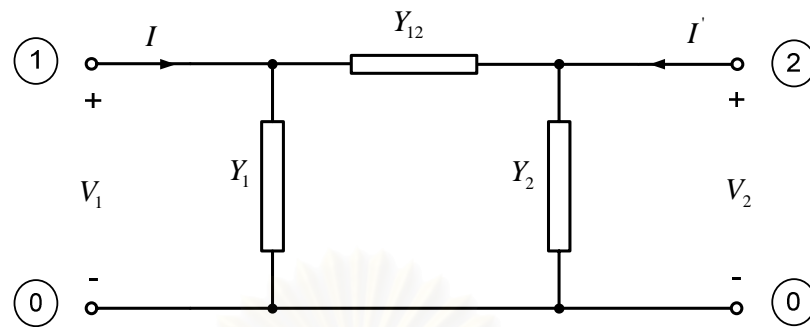
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลหม้อแปลงที่ตัดองค์ประกอบ  $R_{core}$  และ  $L_m$

ค่าความต้านทาน  $R_{eq}$  และความเหนี่ยวนำ  $L_{eq}$  ตามรูปที่ 2.9 แทนกำลังสูญเสียของขดลวด และการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กตามลำดับ โดยอ้างทางด้านปฐมภูมิ ในขณะที่  $a$  แทนอัตราส่วนจำนวนรอบขดลวดปฐมภูมิ  $N_1$  ต่อจำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ  $N_2$  พิจารณารูปที่ 2.9 กำหนดให้โหนด 0 เป็นโหนดอ้างอิง สามารถเขียนสมการตามกฎของโอห์มที่โหนด 1 ได้ดังนี้

$$I = Y_{eq}(V_1 - aV_2) \tag{2.1a}$$

$$I' = a^2 Y_{eq} \left( \frac{-V_1}{a} + V_2 \right) \tag{2.1b}$$

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลตามรูปที่ 2.9 เป็นวงจรสมมูลแบบพายได้ตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลหม้อแปลงแบบพาย

เขียนสมการโหนดจากรูปที่ 2.10 ได้ดังนี้

$$I = V_1 Y_1 + (V_1 - V_2) Y_{12} \quad (2.2a)$$

$$I' = V_2 Y_2 + (V_2 - V_1) Y_{12} \quad (2.2b)$$

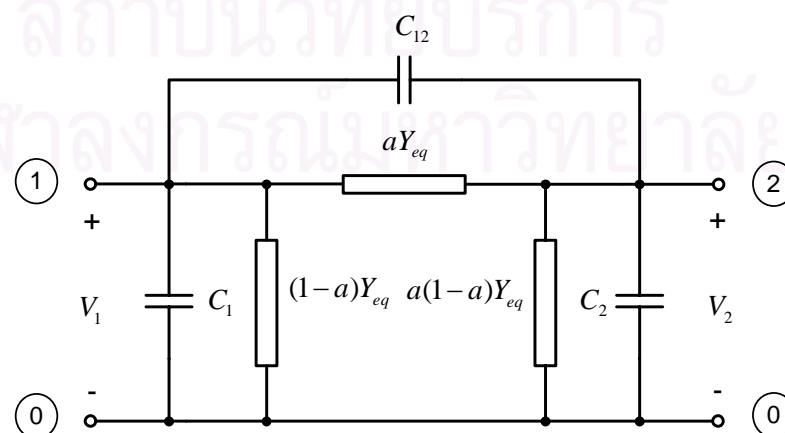
เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.1) และ (2.2) ได้ความสัมพันธ์

$$Y_{12} = a Y_{eq} \quad (2.3a)$$

$$Y_1 = (1 - a) Y_{eq} \quad (2.3b)$$

$$Y_2 = a(1 - a) Y_{eq} \quad (2.3c)$$

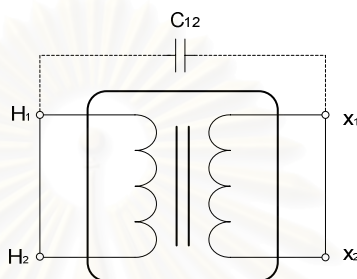
ดังนั้นเมื่อรวมตัวเก็บประจุแฝงเนื่องจากผลของฉนวนเข้ากับแบบจำลองพายตามรูปที่ 2.10 สามารถเขียนวงจรตามรูปที่ 2.11 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบรวมตัวเก็บประจุในรูปแบบจำลองพาย

## 2.2.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

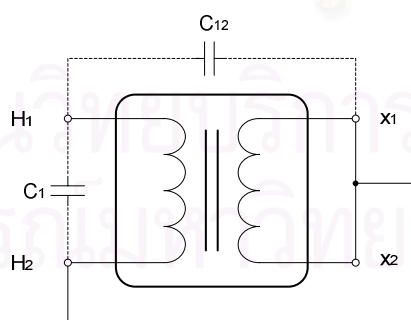
แบบจำลองหม้อแปลง 1 เฟสที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุตามรูปที่ 2.11 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ  $C_{12}$  สามารถวัดโดยลัดวงจรที่ขั้วทั้งสองทางด้านปฐมภูมิ และลัดวงจรที่ขั้วทั้งสองทางด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.12 จากนั้นใช้ LCR มิเตอร์ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น HP4284A ในการวัดค่า  $C_{12}$



รูปที่ 2.12 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

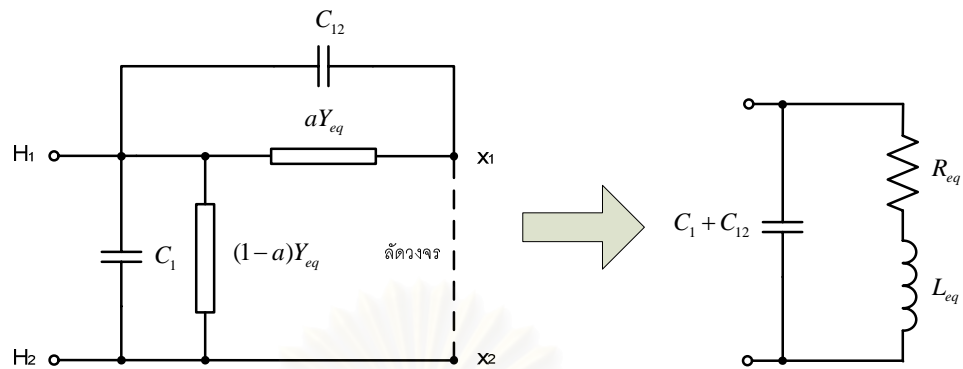
## 2.2.3 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ  $C_1$  ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจะต้องวัดค่าความจุไฟฟ้าจากการลัดวงจรที่ขั้วทั้งสองทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง จากนั้นลัดวงจรที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของขดลวดปฐมภูมิตามรูปที่ 2.13 โดยค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในที่นี้คือ  $C_1 + C_{12}$



รูปที่ 2.13 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ

จากรูปที่ 2.13 เมื่อเขียนในรูปวงจรมุมูลของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สามารถเขียนรูปวงจรมุมูลได้ตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลแรงแซนเนสแบบขนานตามรูปที่ 2.14 ทางด้านซ้ายมือ โดยสามารถวัดในรูปของอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ด้วยการใช้ LCR มิเตอร์จับสัญญาณที่ขั้ว  $H_1$  และ  $H_2$  เพื่อพิจารณาค่าความถี่ที่มีนัยสำคัญของการเกิดแรงแซนเนสตลอดช่วงความถี่ที่ได้จากการวัด โดยค่าความถี่ที่มีนัยสำคัญดังกล่าวสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y(j\omega) = j\omega(C_1 + C_{12}) + \frac{1}{R_{eq} + j\omega L_{eq}} \quad (2.4)$$

ที่ความถี่ของการเกิดแรงแซนเนส  $\text{Im}[Y(j\omega)] = 0$  ดังนั้น

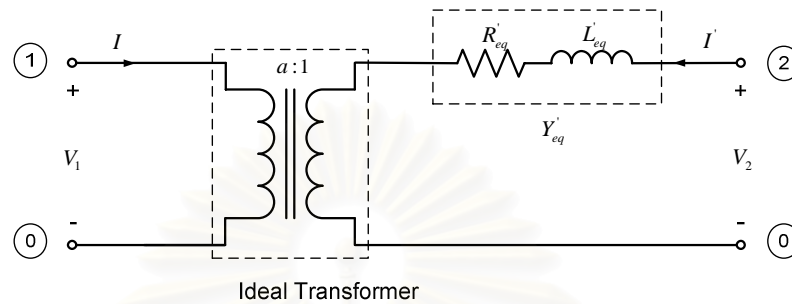
$$\begin{aligned} \text{Im} \left[ j\omega(C_1 + C_{12}) + \frac{R_{eq} - j\omega L_{eq}}{R_{eq} - j\omega L_{eq}} \cdot \frac{1}{R_{eq} + j\omega L_{eq}} \right] &= 0 \\ \text{Im} \left[ j\omega(C_1 + C_{12}) + \frac{R_{eq} - j\omega L_{eq}}{R_{eq}^2 + \omega^2 L_{eq}^2} \right] &= 0 \\ C_1 + C_{12} &= \frac{L_{eq}}{R_{eq}^2 + \omega^2 L_{eq}^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดย  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$  และ  $C_{12}$  เป็นตัวแปรที่ทราบค่าดังนั้น  $C_1$  จะเท่ากับ

$$C_1 = \frac{L_{eq}}{R_{eq}^2 + \omega^2 L_{eq}^2} - C_{12} \quad (2.6)$$

### 2.2.4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ  $C_2$  จะมีหลักการพิจารณาคล้ายกับกรณีของ  $C_1$  เพียงแต่พิจารณาแบบจำลองทางด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ

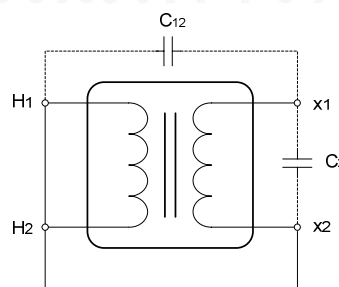
ค่าความต้านทาน  $R'_{eq}$  และความเหนี่ยวนำ  $L'_{eq}$  ตามรูปที่ 2.15 แทนกำลังสูญเสียของขดลวดที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิ โดยที่แอดมิตแตนซ์ในวงจรสมมูลหม้อแปลงแบบพายตามรูปที่ 2.10 มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y_{12} = Y'_{eq} / a \tag{2.7a}$$

$$Y_1 = \frac{(1-a)}{a^2} Y'_{eq} \tag{2.7b}$$

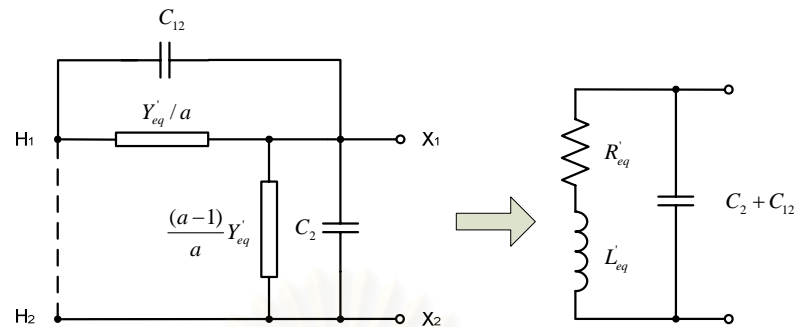
$$Y_2 = \frac{(a-1)}{a} Y'_{eq} \tag{2.7c}$$

สำหรับขั้นตอนในการหาค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ทำโดยลัดวงจรที่ขั้วทั้งสองทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเข้ากับขั้วใดขั้วหนึ่งของขดลวดทุติยภูมิตามรูปที่ 2.16 และวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้ LCR มิเตอร์จับสัญญาณที่ขั้ว  $X_1$  และ  $X_2$  ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในที่นี้คือ  $C_2 + C_{12}$



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ

จากรูปที่ 2.16 เขียนรูปวงจรสมมูลหม้อแปลงได้ตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ

ทำนองเดียวกับวิธีการวิเคราะห์ตามสมการ (2.4) ถึง (2.6) สามารถหาค่าของ  $C_2$  ได้ดังนี้

$$C_2 = \frac{L'_{eq}}{R'_{eq} + \omega^2 L'_{eq}} - C_{12} \quad (2.8)$$

## 2.3 แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ

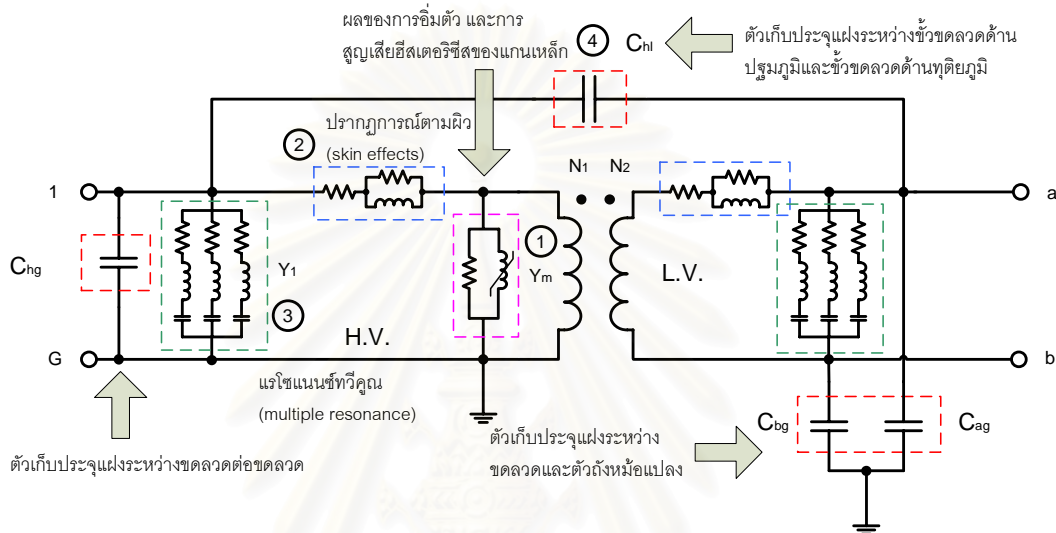
### 2.3.1 วงจรสมมูลหม้อแปลง

แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ เป็นแบบจำลองหม้อแปลงที่เสนอโดย Dr.Taku Noda และคณะ [4] ซึ่งจากการศึกษาผลตอบสนองเชิงความถี่ของขดลวดหม้อแปลง พบว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ในย่านความถี่ต่างๆ สามารถแทนด้วยอุปกรณ์หรือวงจรพื้นฐานทางไฟฟ้าที่ให้ผลตอบสนองต่อความถี่ในย่านนั้นๆ โดยมีข้อกำหนดดังนี้

ตารางที่ 2.1 การแทนผลตอบสนองเชิงความถี่ในย่านต่างๆ ของขดลวดหม้อแปลง

ย่านความถี่	พฤติกรรมการตอบสนอง	อุปกรณ์ หรือวงจรไฟฟ้า
ใช้งาน (50-60Hz)	การอิ่มตัว และการสูญเสียฮิสเตอรีซิส (saturation and hysteresis effects)	ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้น
ต่ำถึงปานกลาง (Hz-kHz)	ปรากฏการณ์ตามผิว (skin effects)	วงจรของฟอสเตอร์อันดับที่ 1
ปานกลาง (kHz-MHz)	เรโซแนนซ์ที่พหุคูณ (multiple resonance)	วงจรขนานของวงจรอนุกรม RLC
สูง (kHz-MHz)	การส่งผ่านสัญญาณความถี่สูง	ความจุไฟฟ้าแฝงที่ต่อระหว่างขั้วของหม้อแปลง

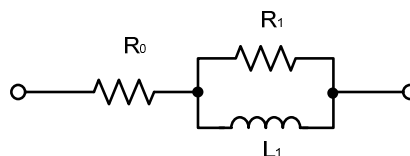
ข้อกำหนดในตารางที่ 2.1 สามารถสร้างเป็นแบบจำลองหม้อแปลงในกรณีแบบจำลองหม้อแปลง 1 เฟสได้ตามรูปที่ 2.18 และเนื่องจากแบบจำลองหม้อแปลงที่พิจารณาใช้สำหรับการจำลองสถานะชั่วคราวจึงสามารถตัดผลของการอิ่มตัว และการสูญเสียฮีสเทอรีซิสของแกนเหล็กออกไปได้



รูปที่ 2.18 แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ

### 2.3.2 ปราบกฎการณตามผิว

เมื่อป้อนแรงดันไฟตรงจะมีกระแสไหลกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ซึ่งอัตราส่วนของแรงดันต่อกระแส คือ ค่าความต้านทาน โดยค่าความต้านทานนี้เรียกว่า ความต้านทานไฟตรง ตามกฎของโอห์ม แต่เมื่อป้อนแรงดันไฟสลับผ่านตัวนำ การไหลของกระแสจะไหลได้ไม่เต็มพื้นที่หน้าตัด โดยจะไหลบริเวณผิวของตัวนำ และเมื่อป้อนแรงดันไฟสลับที่มีค่าความถี่สูงขึ้นการไหลของกระแสจะไหลห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวนำมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานของตัวนำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปราบกฎการณตามผิว (skin effect) สำหรับวงจรไฟฟ้าที่แทนผลของปราบกฎการณตามผิวนี้คือ วงจรฟอสเตอร์อันดับที่ 1 ตามรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 วงจรฟอสเตอร์อันดับที่ 1

เมื่อ

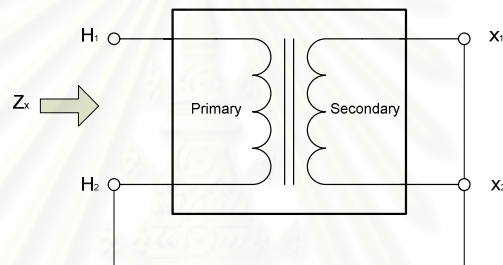
$R_o$  คือ ค่าความต้านทานไฟตรง ซึ่งสามารถวัดโดยโอห์มมิเตอร์

$R_1$  คือ ค่าความต้านทานในวงจรฟอสเตอร์คำนวณจากสมการ (2.9)

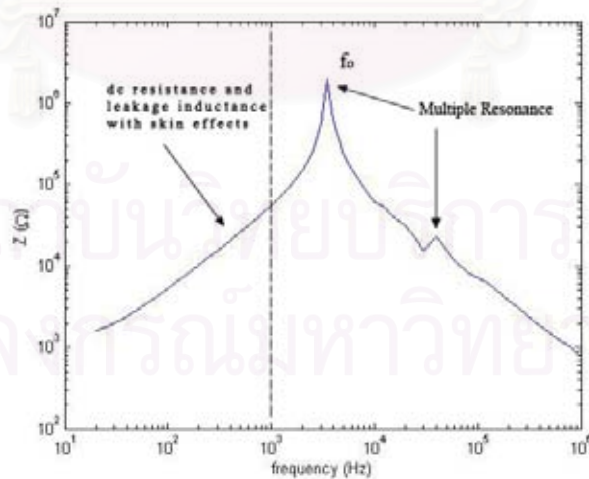
$L_1$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรฟอสเตอร์คำนวณจากสมการ (2.10)

### 2.3.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรฟอสเตอร์ของขดลวดปฐมภูมิ

ลัดวงจรขดลวดทางด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.20 จากนั้นวัดอิมพีแดนซ์ ( $Z_x = R_x + jX_x$ ) โดยใช้ LCR มิเตอร์วัดที่ค่าความถี่  $f_x$  ซึ่งต้องมีค่าความถี่ที่สูงเพียงพอต่อการเกิดปรากฏการณ์ตามผิว แต่จะต้องมีค่าต่ำกว่าค่าความถี่ของการเกิดเรโซแนนซ์ครั้งแรกโดยค่าที่แนะนำ คือ ความถี่ 1 kHz ตามรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 การวัดอิมพีแดนซ์  $Z_x$  ของขดลวดด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างอิมพีแดนซ์  $Z_x$  ของขดลวดด้านปฐมภูมิ



ค่า  $R_1$  และ  $L_1$  สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$R_1 = \frac{1}{\operatorname{Re}\left[1/\{(R_x - R_0) + jX_x\}\right]} \quad (2.9)$$

$$L_1 = -\frac{1}{2\pi f_x \operatorname{Im}\left[1/\{(R_x - R_0) + jX_x\}\right]} \quad (2.10)$$

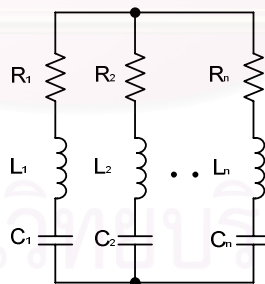
โดย  $Z_x = R_x + jX_x$  เป็นอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิจากการวัดตามรูปที่ 2.20

### 2.3.2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรฟอสเตอร์ของขดลวดทุติยภูมิ

ทำนองเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิ แต่ให้เปลี่ยนการวัด  $Z_x$  มาทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ในขณะที่ลัดวงจรขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

### 2.3.3 เรโซแนนซ์ทวีคูณ

ผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปของอิมพีแดนซ์ตามรูปที่ 2.21 พบว่าอิมพีแดนซ์สูงสุดเกิดที่ค่าความถี่ 2.5 kHz โดยเป็นความถี่ของการเกิดเรโซแนนซ์ครั้งที่หนึ่ง และที่ค่าความถี่ 40 kHz จะเป็นความถี่ของการเกิดเรโซแนนซ์ครั้งที่สอง ซึ่งลักษณะพฤติกรรมตอบสนองเชิงความถี่ของขดลวดหม้อแปลงนี้เรียกว่า เรโซแนนซ์ทวีคูณ (multiple resonance)



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลใช้แทนผลเรโซแนนซ์ทวีคูณ

วงจรสมมูลแทนผลเรโซแนนซ์ทวีคูณสามารถพิจารณาการทำงานได้เสมือนวงจรกรองแบบแพสซีฟ ซึ่งจุดความถี่ของการเกิดเรโซแนนซ์ในแต่ละช่วงสามารถแทนด้วยวงจรอนุกรม RLC และเมื่อผลตอบสนองเชิงความถี่เกิดการเรโซแนนซ์มากกว่าหนึ่งจุดผลตอบสนองเหล่านั้นสามารถแทนด้วยวงจรขนานของวงจรอนุกรม RLC ตามรูปที่ 2.22

### 2.3.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ทวิคูณของขดลวดปฐมภูมิ

การหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลเรโซแนนซ์ทวิคูณเพื่อความสะดวกในการคำนวณจะพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์ โดยวัดแอดมิตแตนซ์ของขดลวดดำนปฐมภูมิด้วย LCR มิเตอร์ซึ่งต่อวงจรตามรูปที่ 2.20

- $Y(j\omega)$  แทนฟังก์ชันผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์ซึ่งเกิดการเรโซแนนซ์ตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา
- $Y_i(j\omega)$  แทนฟังก์ชันผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์ซึ่งเกิดเรโซแนนซ์เฉพาะจุด ตัวห้อย  $i$  แทนด้วยจุดการเกิดเรโซแนนซ์

จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสามารถคำนวณค่า  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ทวิคูณจากผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$R_i = 1/Y_{\max,i}, \quad L_i = R_i Q_i / \omega_i, \quad C_i = 1/(\omega_i R_i Q_i) \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $f_i$  : ค่าความถี่เรโซแนนซ์  
 $Y_{\max,i}$  : ค่ายอดของแอดมิตแตนซ์ซึ่งเกิดที่ความถี่เรโซแนนซ์  
 $Q_i$  : ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ซึ่ง  
 $Q_i = f_i / |f_{i2} - f_{i1}|$  โดย  $f_{i1}, f_{i2}$  คือค่าความถี่ที่  $Y_{\max,i}$  มีค่า -3 dB

ดังนั้นฟังก์ชันผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์ซึ่งเกิดการเรโซแนนซ์ตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา

$$Y(j\omega) \cong \sum_{i=1}^n \{ R_i + j\omega L_i + 1/(j\omega C_i) \}^{-1} \quad (2.12)$$

### 2.3.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ทวิคูณของขดลวดทุติยภูมิ

ทำนองเดียวกันกับขดลวดปฐมภูมิ แต่ให้เปลี่ยนการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์มาทางด้านขดลวดทุติยภูมิ ในขณะที่ลัดวงจรขดลวดทางด้านปฐมภูมิ

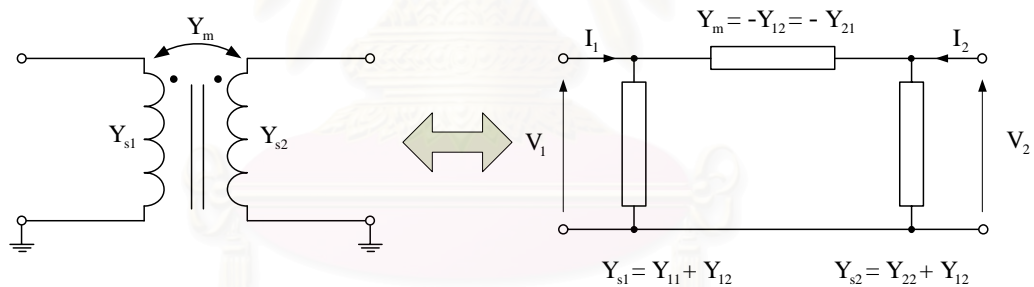
### 2.3.4 ความจุไฟฟ้าแฝงที่ต่อระหว่างขั้วของหม้อแปลง

การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมีหลักการพิจารณาทำนองเดียวกันกับในหัวข้อ 2.2.2 ในขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วของขดลวดปฐมภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วของขดลวดทุติยภูมิจะต้องพิจารณาในย่านความถี่ที่เลยช่วงของการเกิดเรโซแนนซ์ทวิคูณ เพื่อแทนผลตอบสนองเชิงความถี่ของขดลวดหม้อแปลงในย่านความถี่สูง

## 2.4 แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์

### 2.4.1 วงจรสมมูลหม้อแปลง

แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์เป็นแบบจำลองที่อาศัยหลักการจากทฤษฎีสองพอร์ต (Two Port) โดยการพิจารณาหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ และมีความเป็นเชิงเส้นในย่านความถี่สูง ซึ่งการจัดวางองค์ประกอบของแบบจำลองหม้อแปลงจะเป็นแบบพยายตามรูปที่ 2.23 โดยองค์ประกอบในแต่ละแขนงของแบบจำลองพยายแทนด้วยค่าแอดมิตแตนซ์



รูปที่ 2.23 แบบจำลองพยายโดยองค์ประกอบแทนด้วยค่าแอดมิตแตนซ์

แบบจำลองพยายสามารถเขียนเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยแอดมิตแตนซ์จุดขับ (driving-point admittances)  $Y_{11}$  และ  $Y_{22}$  มีความสัมพันธ์กับแอดมิตแตนซ์ของขดลวด และแอดมิตแตนซ์การเชื่อมโยงทางแม่เหล็กดังนี้

$$Y_{11} = Y_{s1} + Y_m \quad (2.14)$$

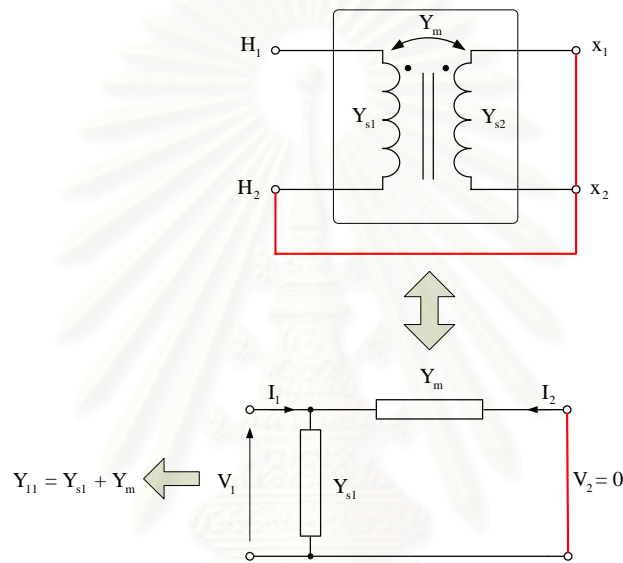
$$Y_{22} = Y_{s2} + Y_m \quad (2.15)$$

ในขณะที่แอดมิตแตนซ์ถ่ายโอน (transfer admittances)  $Y_{12}$  และ  $Y_{21}$  มีความสัมพันธ์กับแอดมิตแตนซ์การเชื่อมโยงทางแม่เหล็กดังนี้

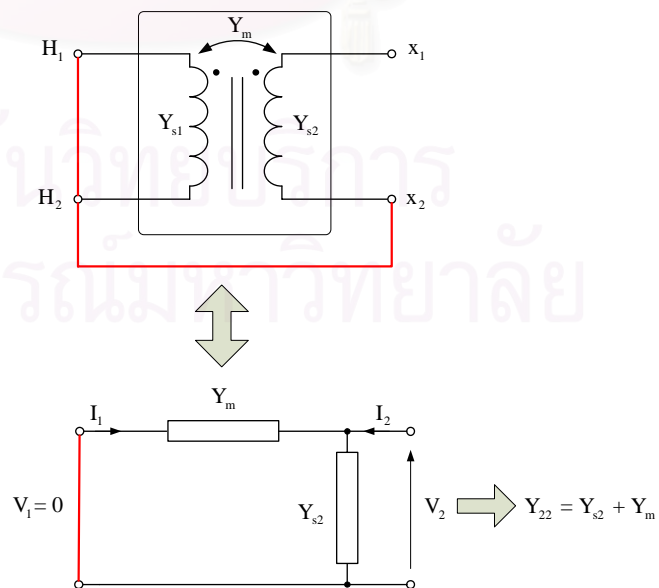
$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_m \tag{2.16}$$

สมการ (2.16) เป็นจริงทุกกรณีสำหรับอุปกรณ์แบบแพสซีฟ

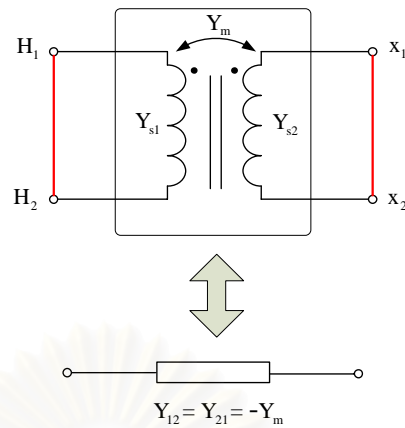
### 2.4.2 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์ของแบบจำลองพาย



รูปที่ 2.24 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{11}$



รูปที่ 2.25 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{22}$



รูปที่ 2.26 การวัดค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{12}$

จากรูปที่ 2.24 - 2.26 แสดงวิธีการวัดค่าแอดมิตแตนซ์ซึ่งเป็นสมาชิกในเมทริกซ์ตามสมการ 2.13 สำหรับค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{11}$ ,  $Y_{22}$  และ  $Y_{12}$  ที่ได้จากการวัดโดย LCR มิเตอร์จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนที่ค่าความถี่ต่างๆ ซึ่งสามารถคำนวณค่า  $Y_{s1}$ ,  $Y_{s2}$  และ  $Y_m$  โดย

$$Y_{s1} = Y_{11} - Y_m \quad (2.17)$$

$$Y_{s2} = Y_{22} - Y_m \quad (2.18)$$

$$Y_m = -Y_{12} = -Y_{21} \quad (2.19)$$

### 2.4.3 วิธีการประมาณฟังก์ชันตรรกยะจากแอดมิตแตนซ์ขององค์ประกอบแพสซีฟ

ค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{s1}$ ,  $Y_{s2}$  และ  $Y_m$  ในหัวข้อ 2.4.2 สามารถแทนด้วยฟังก์ชันตรรกยะ (rational function) จากการคำนวณตามวิธีระเบียบเชิงตัวเลขด้วยเทคนิคที่เรียกว่า การฟิตติงทางเวกเตอร์ (vector fitting) ซึ่งพัฒนาโดย Bjørn Gustavsen และ Semlyen Adam [5] ได้ดังนี้

$$Y_{fit}(s) \approx \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{s - a_i} + d + se \quad (2.20)$$

เมื่อ  $Y_{fit}(s)$  เป็นค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการประมาณด้วยการฟิตติงทางเวกเตอร์ จากค่าแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้

$s = j\omega$  เป็นค่าความถี่เชิงซ้อน

$d$  และ  $e$  เป็นค่าคงที่จำนวนจริง

$c_i$  และ  $a_i$  เป็นเรซิดิว (residues) และโพล (poles) ตามลำดับ ซึ่งเป็นได้ทั้ง

จำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน

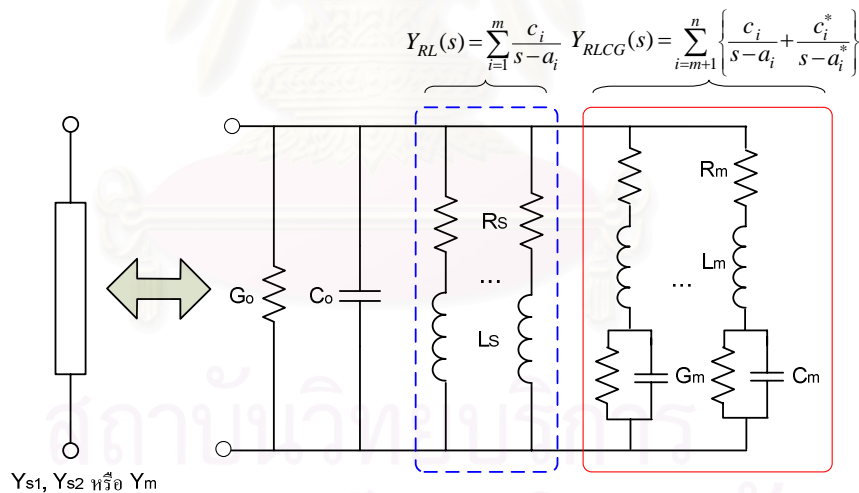
พิจารณาสมการ (2.20) พจน์  $\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{s-a_i}$  สามารถเขียนแยกให้อยู่ในรูปของเรขาคณิตจำนวนจริง (real residues) และโพลจำนวนจริง (real poles) แยกจากพจน์ที่เป็นคู่เรขาคณิตจำนวนสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate residue) และคู่โพลจำนวนสังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate poles) ได้ดังนี้

$$Y_{fit}(s) = \sum_{i=1}^m \frac{c_i}{s-a_i} + \sum_{i=m+1}^n \left[ \frac{c_i}{s-a_i} + \frac{c_i^*}{s-a_i^*} \right] + d + se \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) ค่าแอดมิตแตนซ์จากการประมาณในพจน์ต่างๆ สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นองค์ประกอบแบบแพสซีฟ (passive element branches) ซึ่งมีองค์ประกอบของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ได้ดังนี้

$$Y_{fit}(s) = Y_{RL}(s) + Y_{RLCG}(s) + G_0 + sC_0 \quad (2.22)$$

ผลที่ได้คือ วงจรสมมูลซึ่งเป็นวงจรแขนงของแบบจำลองพาดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แขนงองค์ประกอบแบบแพสซีฟ

#### 2.4.4 การคำนวณค่าองค์ประกอบแบบแพสซีฟจากฟังก์ชันตรรกยะ

การคำนวณองค์ประกอบของตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ จากแขนงองค์ประกอบแบบแพสซีฟตามรูปที่ 2.27 สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

กำหนดให้แอดมิตแตนซ์รวมของแขนงองค์ประกอบแบบแพสซีฟตามรูปที่ 2.27 เกิดจากผลรวมของแขนงแอดมิตแตนซ์ดังนี้

$$Y = Y_0 + \sum_{i=1}^m Y_{s_i} + \sum_{i=m+1}^n Y_{M_i} \quad (2.23)$$

จากการพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ในย่านความถี่สูงของค่าแอดมิตแตนซ์คือ

$$Y_0 = sC_0 + G_0 \quad (2.24)$$

แขนงค่าแอดมิตแตนซ์ซึ่งแทนผลตอบสนองในย่านความถี่ต่ำคือ

$$Y_{s_i} = \frac{1}{sL_{s_i} + R_{s_i}} \quad (2.25)$$

แขนงค่าแอดมิตแตนซ์ซึ่งทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ ในช่วงความถี่ย่านปานกลางคือ

$$Y_{M_i} = \frac{sC_{M_i} + G_{M_i}}{(sL_{M_i} + R_{M_i})(sC_{M_i} + G_{M_i}) + 1} \quad (2.26)$$

จากฟังก์ชันตรรกยะตามสมการ (2.21)

$$Y_{fit}(s) = \sum_{i=1}^m \frac{c_i}{s-a_i} + \sum_{i=m+1}^n \left[ \frac{c_i}{s-a_i} + \frac{c_i^*}{s-a_i^*} \right] + d + se$$

ทำการเปรียบเทียบพจน์ต่างๆ ของสมการ (2.24) กับสมการ (2.21) ได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Y_0 = sC_0 + G_0 \equiv se + d \quad (2.27a)$$

ดังนั้น

$$C_0 = e \text{ และ } G_0 = d \quad (2.27b)$$

การเปรียบเทียบพจน์ต่างๆ ของสมการ (2.25) กับสมการ (2.21) ได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Y_{s_i} = \frac{1}{sL_{s_i} + R_{s_i}} \equiv \frac{c_i}{s-a_i} \quad (2.28a)$$

ดังนั้น

$$L_{s_i} = \frac{1}{c_i} \quad (2.28b)$$

$$R_{s_i} = -\frac{a_i}{c_i} \quad (2.28c)$$

เมื่อ  $c_i, a_i \in$  จำนวนจริง

การหาค่าตัวแปร  $R, L, C$  และ  $G$  ของสมการที่ (2.26) ทำโดยกระจายพจน์ และดึงตัวแปรร่วม ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Y_{M_i} = \frac{s \frac{1}{L_{M_i}} + \frac{G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}}}{s^2 + s \left( \frac{G_{M_i}}{C_{M_i}} + \frac{R_{M_i}}{L_{M_i}} \right) + \left( \frac{1}{C_{M_i} L_{M_i}} + \frac{R_{M_i} G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}} \right)} \quad (2.29)$$

กำหนดให้

$$2\alpha = \frac{G_{M_i}}{C_{M_i}} + \frac{R_{M_i}}{L_{M_i}} \quad \text{และ} \quad \gamma^2 = \frac{1}{C_{M_i} L_{M_i}} + \frac{R_{M_i} G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}}$$

สมการ (2.29) เขียนใหม่ได้เป็น

$$Y_{M_i} = \frac{s \frac{1}{L_{M_i}} + \frac{G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}}}{s^2 + 2s\alpha + \gamma^2} \quad (2.30)$$

กำหนดให้

$$\gamma^2 - \alpha^2 = \omega^2 \quad (2.31)$$

ดังนั้น

$$Y_{M_i} = \frac{s \frac{1}{L_{M_i}} + \frac{G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}}}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} = \frac{s \frac{1}{L_{M_i}} + \frac{G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}}}{[s - (-\alpha - j\omega)] [s - (-\alpha + j\omega)]} \quad (2.32)$$

สมการ (2.32) แยกเศษส่วนย่อยได้ดังนี้

$$Y_{M_i} = \frac{b_R - jb_i}{[s - (-\alpha - j\omega)]} + \frac{b_R + jb_i}{[s - (-\alpha + j\omega)]} \quad (2.33)$$

เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กับสมการ (2.21) ได้ความสัมพันธ์

$$a_i = -\alpha - j\omega \quad \text{และ} \quad c_i = b_R - jb_i$$



เมื่อนำพจน์  $[s - (-\alpha - j\omega)] [s - (-\alpha + j\omega)]$  คูณสมการ (2.33) โดยแทน  $a_i = -\alpha - j\omega$  และ  $c_i = b_R - jb_i$  ได้

$$s \frac{1}{L_{M_i}} + \frac{G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}} \equiv c_i (s - a_i) + c_i^* (s - a_i^*)$$

ดังนั้น 
$$L_{M_i} = \frac{1}{c_i + c_i^*} \quad (2.34)$$

$$\frac{G_{M_i}}{C_{M_i}} = \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \quad (2.35)$$

เนื่องจาก

$$2\alpha = \frac{G_{M_i}}{C_{M_i}} + \frac{R_{M_i}}{L_{M_i}} = \text{Re}[a_i]$$

ดังนั้น

$$R_{M_i} = \left( 2\alpha - \frac{G_{M_i}}{C_{M_i}} \right) L_{M_i}$$

$$R_{M_i} = \left( 2\alpha - \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right) \frac{1}{c_i + c_i^*}$$

จากสมการ (2.31)

$$\gamma^2 = \omega^2 + \alpha^2 = \frac{1}{C_{M_i} L_{M_i}} + \frac{R_{M_i} G_{M_i}}{C_{M_i} L_{M_i}}$$

$$\frac{1}{C_{M_i} L_{M_i}} = \omega^2 + \alpha^2 - \left( 2\alpha - \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right) \left( \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right) \quad (2.36)$$

เมื่อแทน (2.34) ในสมการ (2.36) ได้

$$C_{M_i} = \frac{c_i + c_i^*}{\omega^2 + \alpha^2 - \left( 2\alpha - \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right) \left( \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right)} \quad (2.37)$$

จากนั้นแทน  $C_{M_i}$  ในสมการ (2.35) ได้

$$G_{M_i} = \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{\omega^2 + \alpha^2 - \left( 2\alpha - \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right) \left( \frac{-(c_i a_i + c_i^* a_i^*)}{c_i + c_i^*} \right)} \quad (2.38)$$

## บทที่ 3

### การสร้างแบบจำลองหม้อแปลง

#### 3.1 หม้อแปลงที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

หม้อแปลงที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นหม้อแปลง 1 เฟสในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โดยหม้อแปลงมีจำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.1 หม้อแปลงที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

(ก) หม้อแปลง A

(ข) หม้อแปลง B

(ค) หม้อแปลง C

### 3.2 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบรวมตัวเก็บประจุ

#### 3.2.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

ต่อวงจรหม้อแปลง A, B และ C ตามรูปที่ 2.12 จากนั้นวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิด้วย LCR มิเตอร์ได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.1

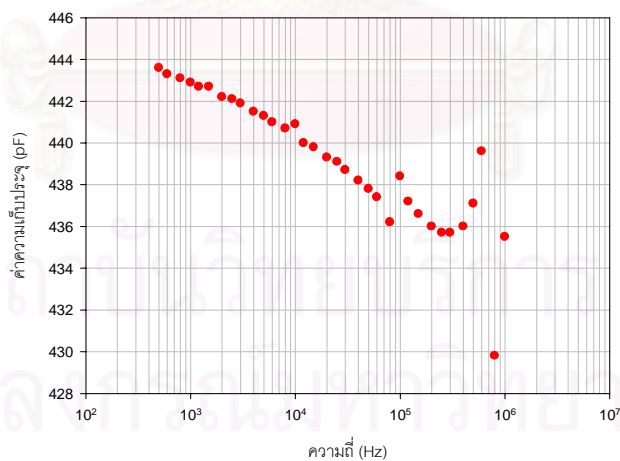
ตารางที่ 3.1 ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง A, B และ C มีหน่วยเป็น pF

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A	หม้อแปลง B	หม้อแปลง C
1	500	443.6	1610	120
2	600	443.3	1600	121
3	800	443.1	1570	120
4	1000	442.9	1560	122
5	1200	442.7	1548	125
6	1500	442.7	1535	133
7	2000	442.2	1510	160
8	2500	442.1	1508	233
9	3000	441.9	1500	8.52
10	4000	441.5	1490	65.6
11	5000	441.3	1483	76.7
12	6000	441.0	1478	81.5
13	8000	440.7	1474	86.1
14	10000	440.9	1474	88.1
15	12000	440.0	1479	90.3
16	15000	439.8	1435	91.3
17	20000	439.3	1418	92.7
18	25000	439.1	1425	94.9
19	30000	438.7	1428	98.2
20	40000	438.2	1422	65.3
21	50000	437.8	1414	87.4
22	60000	437.4	1405	90.1
23	80000	436.2	1414	87.6
24	100000	438.4	1405	106

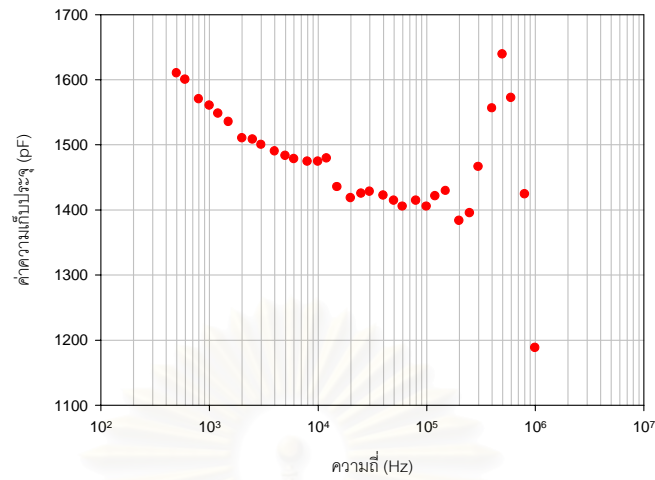
ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง A, B และ C มีหน่วยเป็น pF

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A	หม้อแปลง B	หม้อแปลง C
25	120000	437.2	1421	106
26	150000	436.6	1429	99
27	200000	436.0	1383	98.7
28	250000	435.7	1395	98
29	300000	435.7	1466	97.5
30	400000	436.0	1556	98.9
31	500000	437.1	1639	99.1
32	600000	439.6	1572	98.3
33	800000	429.8	1424	97.2
34	1000000	435.5	1188	98.6

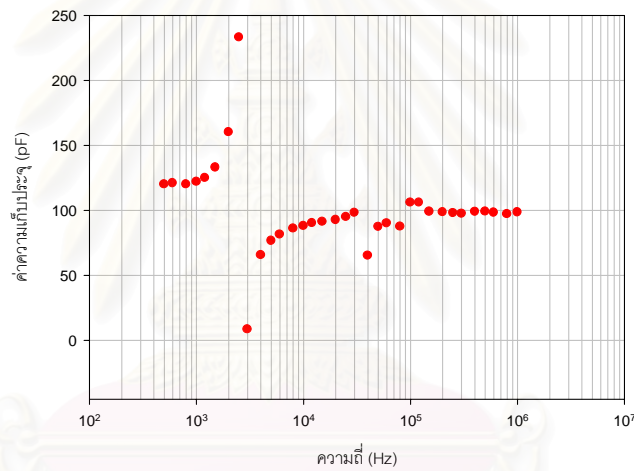
จากข้อมูลในตารางที่ 3.1 สามารถวาดกราฟระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิได้ผลตามรูปที่ 3.2 – 3.4



รูปที่ 3.2 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าตามความถี่ของหม้อแปลง A



รูปที่ 3.3 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าตามความถี่ของหม้อแปลง B



รูปที่ 3.4 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าตามความถี่ของหม้อแปลง C

จากข้อมูลในรูปที่ 3.2 – 3.4 ค่าความถี่ 100 kHz จะใช้ในการพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

หม้อแปลง	ค่าความจุไฟฟ้า
A	438.35 pF
B	1.41 nF
C	106 pF

### 3.2.2 การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ

ต่อวงจรหม้อแปลง A, B และ C ตามรูปที่ 2.12 จากนั้นวัดค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิด้วย LCR มิเตอร์ได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.3

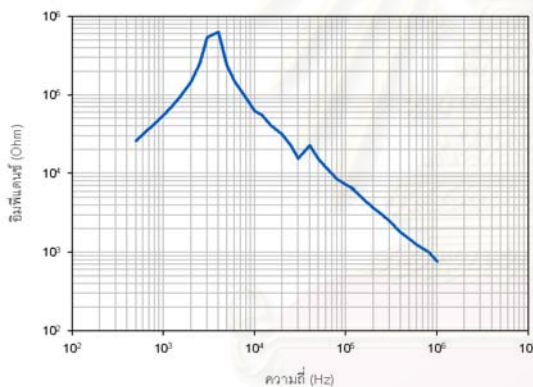
ตารางที่ 3.3 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิมีหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	26060	85.95	1867.3	84.125	199210	82.096
2	600	31486	86.2	2236	84.386	244400	83.96
3	800	42845	86.39	2974	84.57	345760	84.01
4	1000	55150	86.36	3720	84.57	473400	84.7
5	1200	68660	86.21	4478	84.51	644500	84.38
6	1500	92300	85.84	5650	84.39	1080000	83.5
7	2000	148200	84.68	7790	84.12	7500000	52.4
8	2500	252200	82.46	10286	83.68	900000	-42.9
9	3000	540000	76.9	13320	83.04	3200000	-59
10	4000	630000	-76.5	22530	80.49	820000	-90.51
11	5000	235840	-85.92	43170	73.73	515700	-90.99
12	6000	151200	-87.65	123600	41.41	385700	-91.41
13	8000	90980	-88.72	45200	-74.71	258610	-91.33
14	10000	61950	-87.07	22840	-81.97	243500	-81
15	12000	55940	-88.06	15730	-83.72	171690	-91.43
16	15000	41229	-88.64	11240	-83.75	130280	-91.56
17	20000	31480	-86.98	7990	-85.83	98590	-91.16
18	25000	22250	-87.04	5800	-85.67	74080	-91.25
19	30000	15390	-79.27	4640	-84.07	55650	-90.49
20	40000	22590	-79.5	3840	-77.79	68200	-89.14
21	50000	15140	-87.04	3140	-84.506	43100	-91.36
22	60000	11837	-87.27	2515	-85.42	34200	-88.48
23	80000	8452	-85.15	1860	-81.25	26250	-92.58
24	100000	7161	-78.66	1550	-83.97	18000	-101.25
25	120000	6450	-84.09	1257	-82.133	16210	-84.55
26	150000	4977	-85.95	1066	-81.84	12950	-88.179
27	200000	3687	-84.66	800	-83.485	3706	-87.94

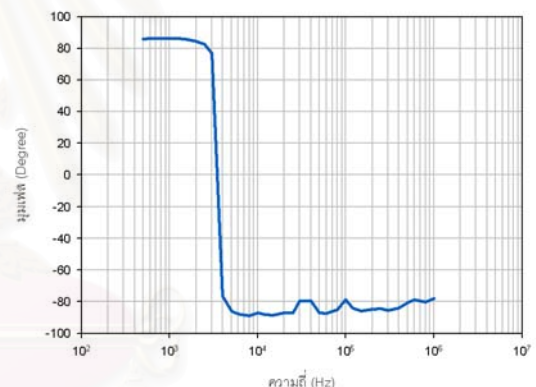
ตารางที่ 3.3 (ต่อ) อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ระหว่างช่วงความถี่ที่มีหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
28	250000	3033	-84.46	612.5	-84.4	7902	-86.526
29	300000	2511	-85.442	475.62	-80.48	6543	-88.168
30	400000	1810	-83.765	290.66	-79.08	4807	-86.939
31	500000	1491.8	-80.73	224.6	-40.5	3810	-85.32
32	600000	1254.8	-78.543	300	-34.09	3260	-82.521
33	800000	1010.7	-80.027	206.19	-58.23	2476	-82.265
34	1000000	771.24	-78.092	173.2	-17.94	1969	-79.448

จากตารางที่ 3.3 วาดกราฟขนาด และมุมเฟสอิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง A, B และ C ตามความถี่ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.5 - 3.7

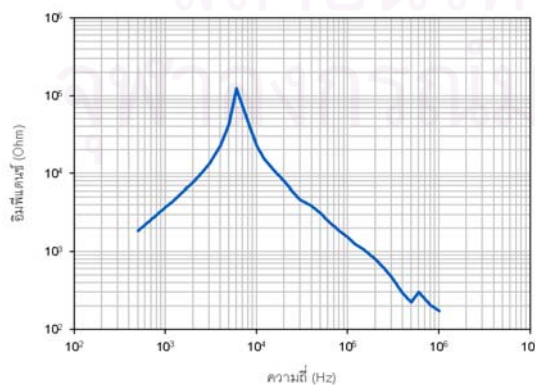


(ก) ขนาด

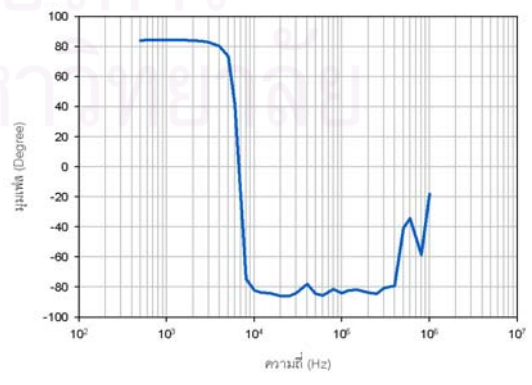


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.5 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง A

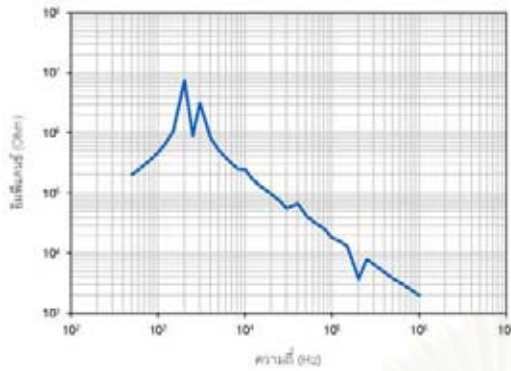


(ก) ขนาด

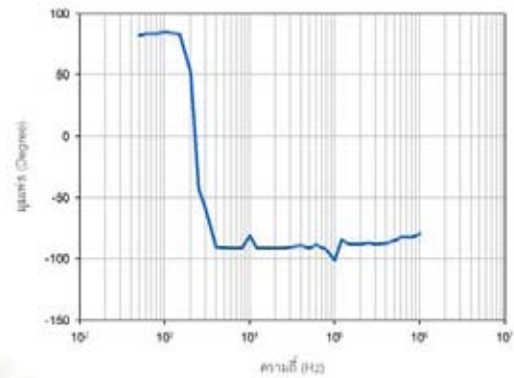


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.6 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง B



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.7 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง C

ตามวิธีการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  ที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ ในหัวข้อที่ 2.2.3 และข้อมูลตามตารางที่ 3.2 และ 3.3 สามารถสรุปผลการคำนวณได้ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ  $C_1$  ของหม้อแปลง A, B และ C

หม้อแปลง	$R_{eq}$	$L_{eq}$	$f_{resonance}$	$C_{12}$	$C_1 = \frac{L_{eq}}{R_{eq}^2 + \omega^2 L_{eq}^2} - C_{12}$
A	3490 $\Omega$	8.752 H	3.5 kHz	438.4 pF	-202.2 pF
B	115.27 $\Omega$	600 mH	6.32 kHz	1.405 nF	-348 pF
C	22.38 k $\Omega$	58.58 H	2 kHz	106 pF	2 pF

เมื่อ  $R_{eq}$  และ  $L_{eq}$  วัดโดยใช้ LCR มิเตอร์ในฐาน  $R_S - L_S$  ที่ความถี่ 50 Hz

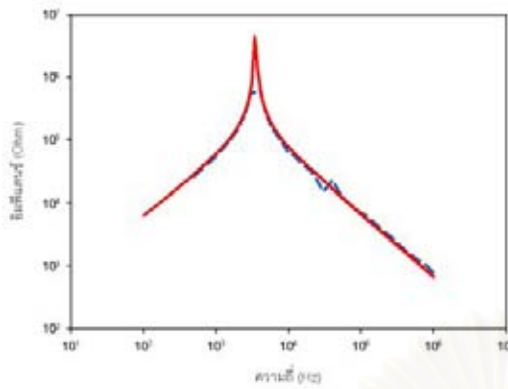
$f_{resonance}$  ค่าความถี่นัยสำคัญของการเกิดเรโซแนนซ์

$C_{12}$  ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

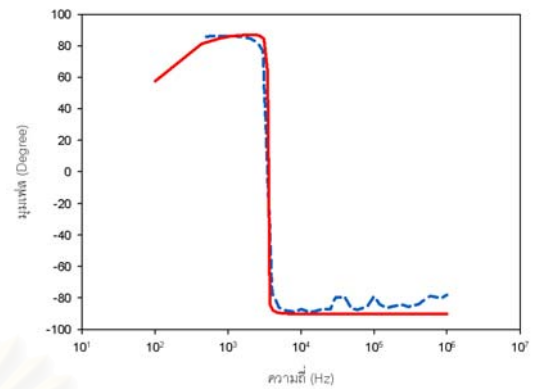
### 3.2.3 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิ

ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ  $C_1$  ที่ได้จากการคำนวณสามารถตรวจสอบความถูกต้องโดยคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่ต่างๆ ตามวงจรมุมูลในรูปที่ 2.14 จากนั้นนำผลที่ได้มาวาดกราฟเปรียบเทียบกับผลจากการวัด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.8 – 3.10



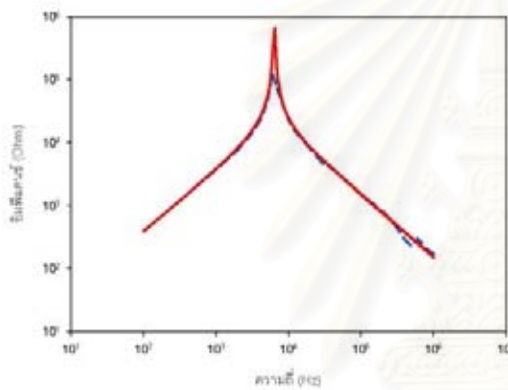


(ก) ขนาด

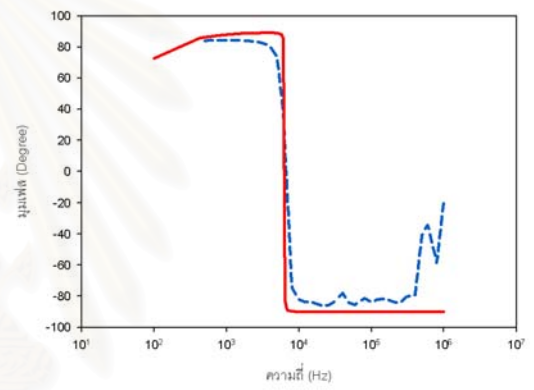


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.8 อิมพีแดนซ์ขดลวดป้อนมอดูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

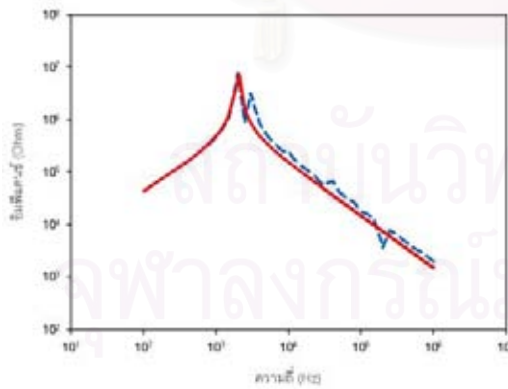


(ก) ขนาด

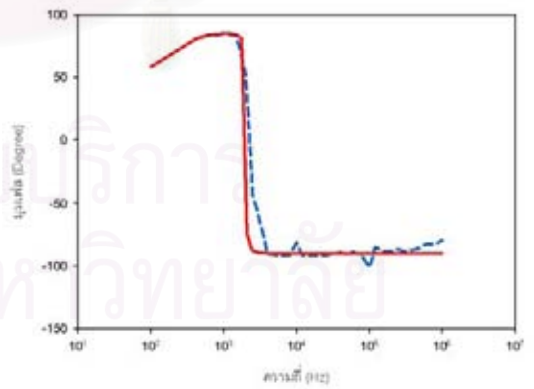


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.9 อิมพีแดนซ์ขดลวดป้อนมอดูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.10 อิมพีแดนซ์ขดลวดป้อนมอดูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

----- ค่าจากการวัด

————— ค่าจากการคำนวณ

### 3.2.4 การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ

36

ต่อวงจรหม้อแปลง A, B และ C ตามรูปที่ 2.16 จากนั้นวัดค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิด้วย LCR มิเตอร์ได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.5

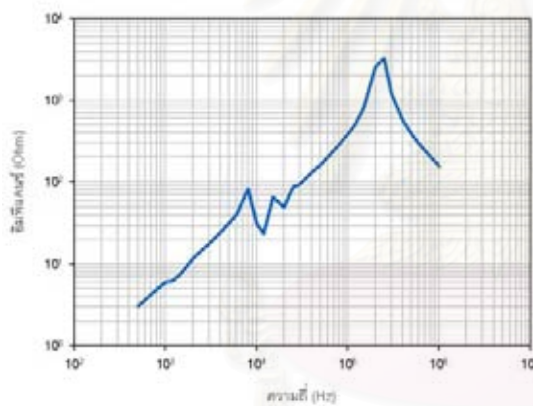
ตารางที่ 3.5 อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิมีหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	3.05	85.41	0.75	81.84	4.73	81.53
2	600	3.65	85.82	0.89	82.49	5.65	82.71
3	800	4.89	86.23	1.17	83.18	7.50	84.17
4	1000	6.04	86.39	1.45	83.57	9.34	85.02
5	1200	6.25	86.42	1.72	83.82	11.19	85.56
6	1500	7.81	86.45	2.13	84.09	13.97	86.09
7	2000	11.97	86.46	2.80	84.42	18.61	86.56
8	2500	14.95	86.45	3.46	84.67	23.30	86.76
9	3000	17.95	86.46	4.12	84.84	28.03	86.91
10	4000	24.44	86.47	5.44	84.98	37.84	86.95
11	5000	31.71	86.47	6.76	84.94	48.40	86.84
12	6000	40.72	86.37	8.08	84.79	60.48	86.54
13	8000	82.16	83.46	10.71	84.29	104.66	83.21
14	10000	31.32	-50.80	13.33	83.68	28.03	55.56
15	12000	23.60	62.19	15.95	83.11	80.53	85.55
16	15000	64.70	81.67	19.95	81.91	132.75	84.79
17	20000	50.17	76.57	26.91	79.40	111.11	82.03
18	25000	85.99	76.45	34.30	75.02	198.38	78.78
19	30000	93.10	80.78	40.65	66.58	202.05	82.75
20	40000	130.43	79.27	34.49	63.17	250.46	82.24
21	50000	161.75	81.03	43.91	78.29	331.57	81.83
22	60000	201.65	82.55	57.18	80.93	359.48	75.40
23	80000	286.15	82.59	79.41	78.18	567.01	81.70
24	100000	382.04	81.69	104.73	81.79	761.74	82.26
25	120000	505.73	82.26	139.39	79.09	986.80	77.65
26	150000	805.10	80.98	194.82	80.04	1888.00	71.30
27	200000	2587.00	69.52	453.57	76.94	6499.00	-8.82

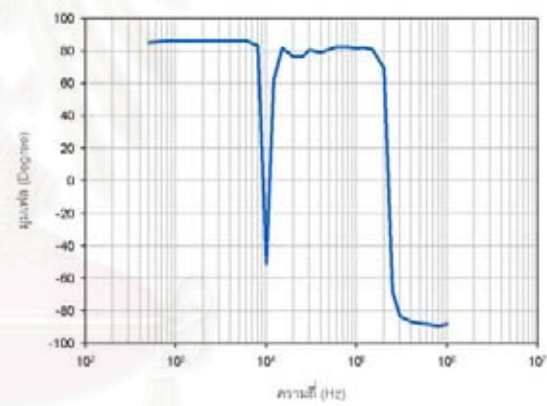
ตารางที่ 3.5 (ต่อ)อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ระหว่างช่วงความถี่วิทยุมีหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
28	250000	3265.00	-68.32	2542.00	-10.26	1824.80	-71.65
29	300000	1198.00	-83.13	519.51	-78.39	892.02	-76.79
30	400000	566.90	-86.71	196.15	-85.57	285.69	-63.13
31	500000	387.56	-87.55	124.93	-82.82	224.86	32.35
32	600000	295.31	-87.99	93.54	-84.11	741.54	49.80
33	800000	203.97	-89.23	58.09	-84.32	1394.00	-51.59
34	1000000	153.93	-88.19	38.83	-81.64	462.21	-61.89

จากตารางที่ 3.5 วาดกราฟขนาด และมุมเฟสอิมพีแดนซ์ของขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง A, B และ C ตามความถี่ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.11 – 3.13

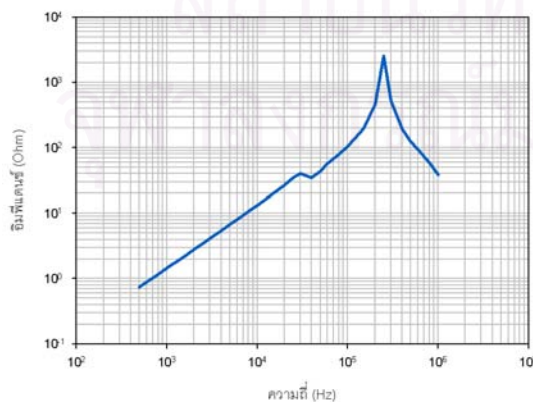


(ก) ขนาด

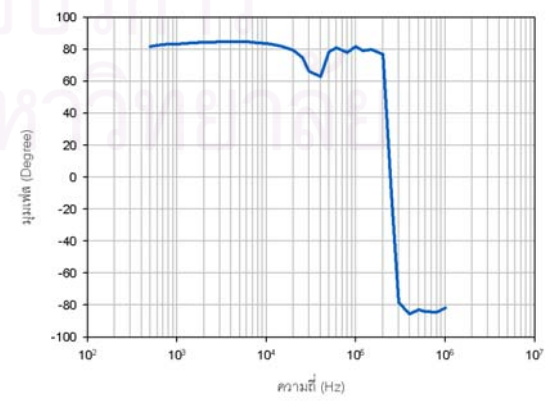


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.11 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง A

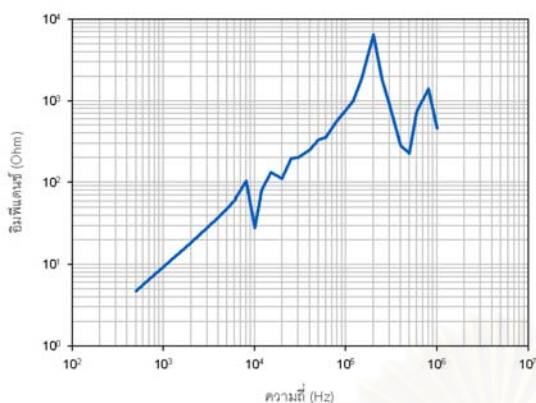


(ก) ขนาด

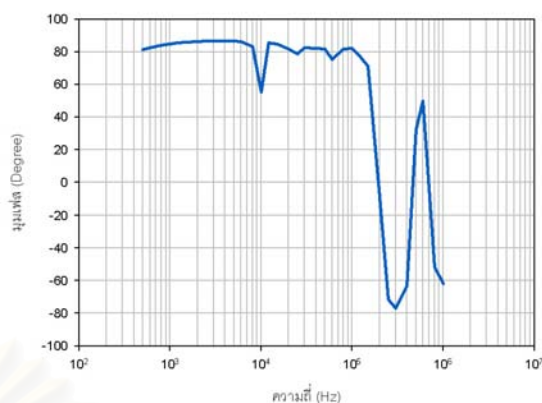


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.12 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง B



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.13 คุณสมบัติเชิงความถี่ของอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง C

ตามวิธีการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ  $C_2$  ในหัวข้อที่ 2.2.4 และข้อมูลตามตารางที่ 3.2 และ 3.5 สามารถสรุปผลการคำนวณได้ตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ  $C_2$  ของหม้อแปลง A, B และ C

หม้อแปลง	$R'_{eq}$	$L'_{eq}$	$f_{resonance}$	$C_{12}$	$C_2 = \frac{L'_{eq}}{R'_{eq}{}^2 + \omega^2 L'_{eq}{}^2} - C_{12}$
A	0.36 $\Omega$	0.96 mH	200 kHz	438.4 pF	221 pF
B	0.075 $\Omega$	250 uH	250 kHz	1.405 nF	216 pF
C	0.624 $\Omega$	1.55 mH	200 kHz	106 pF	304 pF

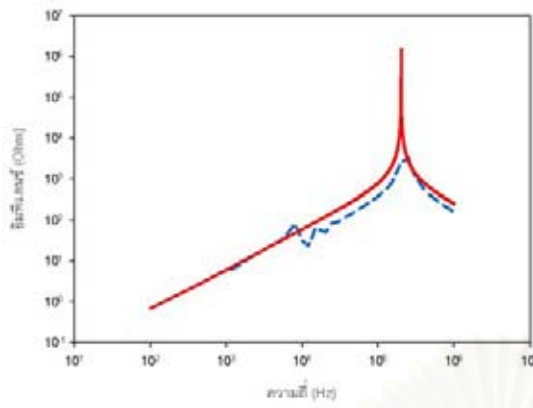
เมื่อ  $R'_{eq}$  และ  $L'_{eq}$  วัดโดยใช้ LCR มิเตอร์ในฐาน  $R_s - L_s$  ที่ความถี่ 50 Hz

$f_{resonance}$  เป็นค่าความถี่ที่สำคัญของการเกิดเรโซแนนซ์

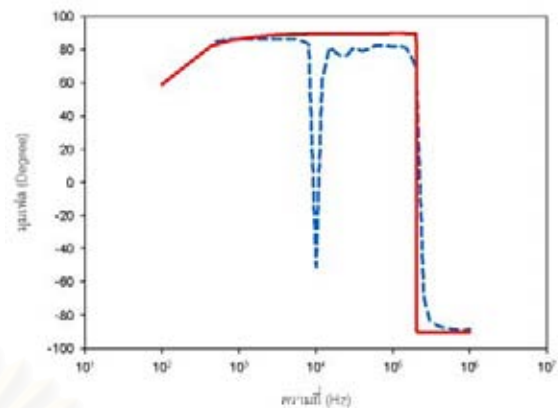
$C_{12}$  ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิตามตารางที่ 3.2

### 3.2.5 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการคำนวณของขดลวดทุติยภูมิ

ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ  $C_2$  ที่ได้จากการคำนวณ สามารถตรวจสอบความถูกต้องโดยคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่ต่างๆ ตามวงจรสมมูลในรูปที่ 2.17 จากนั้นนำผลที่ได้มาวาดกราฟเปรียบเทียบกับผลจากการวัด ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.14 – 3.16

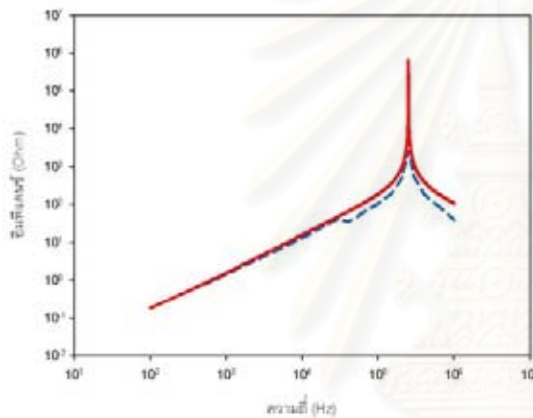


(ก) ขนาด

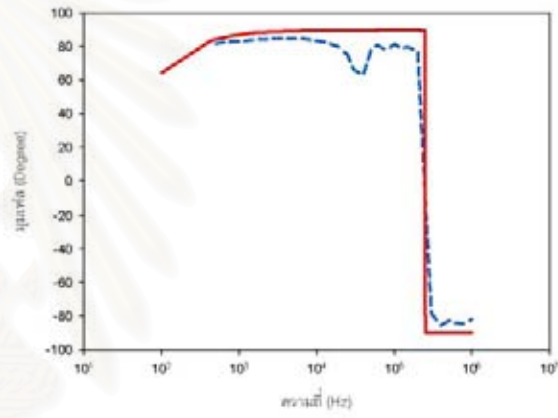


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.14 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

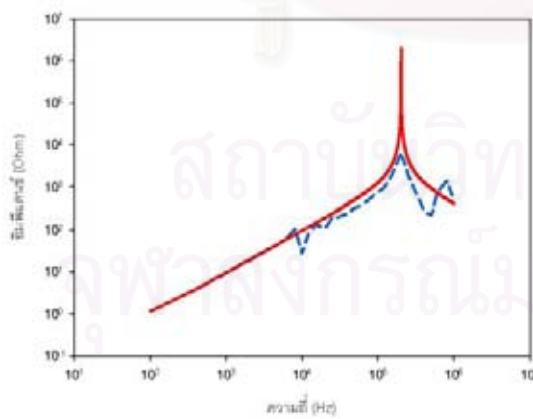


(ก) ขนาด

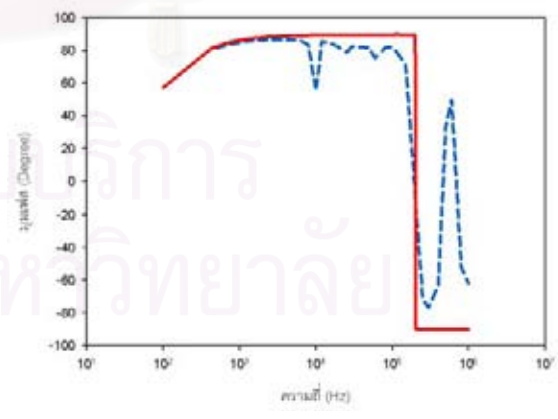


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

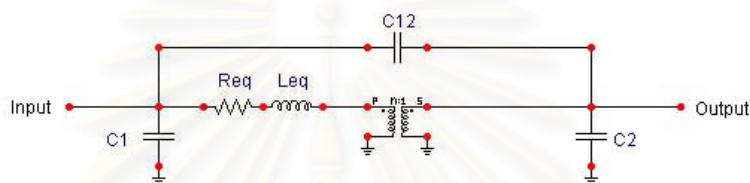
รูปที่ 3.16 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

----- ค่าจากการวัด

————— ค่าจากการคำนวณ

### 3.2.6 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุสำหรับโปรแกรม ATP/EMTP

จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ  $C_{12}$ , การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ  $C_1$  และการหาค่าตัวความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิ  $C_2$  ของหม้อแปลง A, B และ C ในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ ซึ่งเมื่อนำค่าความจุไฟฟ้าเหล่านี้มาต่อร่วมกับวงจรสมมูลหม้อแปลงสามารถสร้างเป็นแบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ได้ตามรูปที่ 3.17 โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในแบบจำลองของหม้อแปลง A, B และ C สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.17 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุสำหรับโปรแกรม ATP/EMTP

ตารางที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ

(ก) หม้อแปลง A

$R_{eq}$	$L_{eq}$	Turn ratio
3490 $\Omega$	8.752 H	20000/220
$C_1$	$C_2$	$C_{12}$
-202.2 pF	221 pF	438.4 pF

(ข) หม้อแปลง B

$R_{eq}$	$L_{eq}$	Turn ratio
115.27 $\Omega$	600 mH	24000/480
$C_1$	$C_2$	$C_{12}$
-348 pF	216 pF	1.405 nF

(ค) หม้อแปลง C

$R_{eq}$	$L_{eq}$	Turn ratio
22.38 k $\Omega$	58.58 H	22000/110
$C_1$	$C_2$	$C_{12}$
2 pF	304 pF	106 pF

### 3.3 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลของค้ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ

#### 3.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรฟอสเตอร์สำหรับปรากฏการณ์ตามผิว

พารามิเตอร์  $R_0$ ,  $R_1$  และ  $L_1$  ของวงจรฟอสเตอร์อันดับที่ 1 ตามหัวข้อที่ 2.3.2 เพื่อจำลองปรากฏการณ์ตามผิวของขดลวดหม้อแปลงสามารถแบ่งการพิจารณาเป็นในส่วนของขดลวดด้านปฐมภูมิ และขดลวดด้านทุติยภูมิ โดยการหาค่าพารามิเตอร์ขดลวดด้านปฐมภูมิต้องลัดวงจรขดลวดด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.20 จากนั้นวัดความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิโดยใช้โอห์มมิเตอร์ซึ่งค่าความต้านทานที่วัดได้คือ  $R_0$  และวัดอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิโดยใช้ LCR มิเตอร์ในฐาน  $R_s - L_s$  ที่ค่าความถี่ 1 kHz ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้คือ  $Z_x = R_x + jX_x$  โดย  $R_1$  และ  $L_1$  สามารถคำนวณจากค่า  $R_0$ ,  $R_x$  และ  $X_x$  โดยสมการ (2.9) และ (2.10) อย่างไรก็ตาม สำหรับการแทนผลของปรากฏการณ์ตามผิวด้วยวงจรฟอสเตอร์ของขดลวดด้านทุติยภูมิตามหัวข้อที่ 2.3.2.2 เมื่อนำวงจรฟอสเตอร์ของขดลวดด้านทุติยภูมิ รวมทั้งผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ มาวาดกราฟเปรียบเทียบกับผลแอดมิตแตนซ์จากการวัด พบว่าในช่วงความถี่เกิน 100 kHz ค่าแอดมิตแตนซ์จากการจำลองจะมีค่าสูงกว่าค่าจากการวัดจริง ส่งผลให้ไม่สามารถแทนผลของปรากฏการณ์ตามผิวด้วยวงจรฟอสเตอร์ทางด้านขดลวดทุติยภูมิได้ แต่จากการศึกษาตามงานวิจัยนี้พบว่าสามารถแทนผลของปรากฏการณ์ตามผิวของขดลวดทุติยภูมิด้วยวงจรความต้านทาน  $R'_{eq}$  อนุกรมกับความเหนี่ยวนำ  $L'_{eq}$  ซึ่งแทนการสูญเสียของขดลวดที่ได้จากการทดสอบลัดวงจรทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

ค่าพารามิเตอร์  $R_0$ ,  $R_1$  และ  $L_1$  จากการวัด และคำนวณวงจรฟอสเตอร์อันดับที่ 1 ของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และค่าพารามิเตอร์  $R'_{eq}$  และ  $L'_{eq}$  ของขดลวดทางด้านทุติยภูมิจากการวัดสำหรับหม้อแปลง A, B และ C สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.8 ดังนี้

ตารางที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์  $R_0$ ,  $R_1$  และ  $L_1$  ของวงจรฟอสเตอร์สำหรับหม้อแปลง A

(ก) ด้านปฐมภูมิ

$R_0$	=	490 [ $\Omega$ ]
$Z_{short}$	=	$R_x + jX_x$
( $f_x = 1kHz$ )	=	3501+ j 55039 [ $\Omega$ ]
$R_1 = 1$ [ $M\Omega$ ]		$L_1 = 8.786$ [H]

(ข) ด้านทุติยภูมิ

$R'_{eq}$	=	0.36 [ $\Omega$ ]
$L'_{eq}$	=	0.96 [mH]

ตารางที่ 3.9 ค่าพารามิเตอร์  $R_0$ ,  $R_1$  และ  $L_1$  ของวงจรฟอสเตอร์สำหรับหม้อแปลง B

(ก) ด้านปฐมภูมิ

$R_0$	=	47 [ $\Omega$ ]
$Z_{short}$	=	$R_x + jX_x$
( $f_x = 1kHz$ )	=	352 + j 3703.31 [ $\Omega$ ]
$R_1 = 45.27$ [ $k\Omega$ ]		$L_1 = 0.5934$ [H]

(ข) ด้านทุติยภูมิ

$R'_{eq}$	=	0.075 [ $\Omega$ ]
$L'_{eq}$	=	250 [ $\mu H$ ]

ตารางที่ 3.10 ค่าพารามิเตอร์  $R_0$ ,  $R_1$  และ  $L_1$  ของวงจรฟอสเตอร์สำหรับหม้อแปลง C

(ก) ด้านปฐมภูมิ

$R_0$	=	11.25 [ $k\Omega$ ]
$Z_{short}$	=	$R_x + jX_x$
( $f_x = 1kHz$ )	=	43728.24 + j 471376.07 [ $\Omega$ ]
$R_1 = 6.874$ [ $M\Omega$ ]		$L_1 = 75.378$ [H]

(ข) ด้านทุติยภูมิ

$R'_{eq}$	=	0.624 [ $\Omega$ ]
$L'_{eq}$	=	1.55 [mH]

### 3.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ที่วิคูณ

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของขดลวดหม้อแปลงที่ใช้แทนผลเรโซแนนซ์ที่วิคูณตามหัวข้อที่ 2.3.3 สามารถหาค่าพารามิเตอร์  $R_1$ ,  $L_1$  และ  $C_1$  ของวงจรอนุกรม RLC ที่แขนงใดๆ ในวงจรขนานตามรูปที่ 2.22 โดยแบ่งการพิจารณาเป็นในส่วนของขดลวดด้านปฐมภูมิ และขดลวดด้านทุติยภูมิ โดยเมื่อพิจารณาขดลวดด้านปฐมภูมิต้องลัดวงจรขดลวดด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.20 ในขณะที่พิจารณาขดลวดด้านทุติยภูมิจะต้องทำการลัดวงจรขดลวดด้านปฐมภูมิแทน สำหรับขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์สามารถกล่าวโดยสรุปดังนี้



1. วัดแอดมิตแตนซ์ในย่านความถี่ที่พิจารณาด้วย LCR มิเตอร์ ซึ่งย่านความถี่คือ 500 Hz ถึง 1MHz โดยแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้แทนด้วย  $Y(j\omega)$
2. แอดมิตแตนซ์  $Y(j\omega)$  จากข้อ 1 ผลตอบสนองซึ่งมีนัยสำคัญของการเกิดเรโซแนนซ์ แทนด้วย  $Y_i(j\omega)$  เมื่อตัวห้อย  $i$  แทนด้วยจุดการเกิดเรโซแนนซ์
3. แอดมิตแตนซ์  $Y_i(j\omega)$  จากข้อ 2 คำนวณค่า  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC จากสมการ (2.11)

3.3.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ที่วิญญ์ของขดลวดต้านปฐมภูมิ ต่อวงจรหม้อแปลง A, B และ C ตามรูปที่ 2.13 จากนั้นวัดแอดมิตแตนซ์ขดลวดต้านปฐมภูมิ  $Y(j\omega)$  ได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.11 ดังนี้

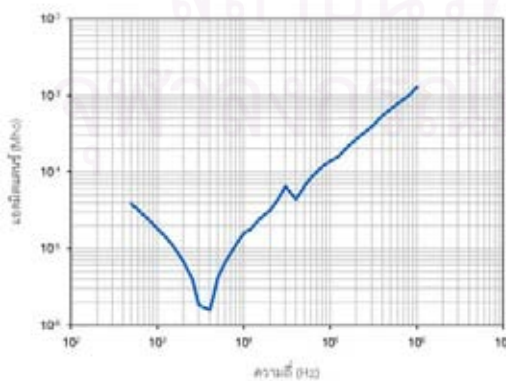
ตารางที่ 3.11 แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ขั้วขดลวดปฐมภูมิมิหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	3.84E-05	-85.95	5.36E-04	-84.13	5.02E-06	-82.10
2	600	3.18E-05	-86.20	4.47E-04	-84.39	4.09E-06	-83.96
3	800	2.33E-05	-86.39	3.36E-04	-84.57	2.89E-06	-84.01
4	1000	1.81E-05	-86.36	2.69E-04	-84.57	2.11E-06	-84.70
5	1200	1.46E-05	-86.21	2.23E-04	-84.51	1.55E-06	-84.38
6	1500	1.08E-05	-85.84	1.77E-04	-84.39	9.26E-07	-83.50
7	2000	6.75E-06	-84.68	1.28E-04	-84.12	1.33E-07	-52.40
8	2500	3.97E-06	-82.46	9.72E-05	-83.68	1.11E-06	42.90
9	3000	1.85E-06	-76.90	7.51E-05	-83.04	3.13E-07	59.00
10	4000	1.59E-06	76.50	4.44E-05	-80.49	1.22E-06	90.51
11	5000	4.24E-06	85.92	2.32E-05	-73.73	1.94E-06	90.99
12	6000	6.61E-06	87.65	8.09E-06	-41.41	2.59E-06	91.41
13	8000	1.10E-05	88.72	2.21E-05	74.71	3.87E-06	91.33
14	10000	1.61E-05	87.07	4.38E-05	81.97	4.11E-06	81.00
15	12000	1.79E-05	88.06	6.36E-05	83.72	5.82E-06	91.43
16	15000	2.43E-05	88.64	8.90E-05	83.75	7.68E-06	91.56
17	20000	3.18E-05	86.98	1.25E-04	85.83	1.01E-05	91.16
18	25000	4.49E-05	87.04	1.72E-04	85.67	1.35E-05	91.25
19	30000	6.50E-05	79.27	2.16E-04	84.07	1.80E-05	90.49

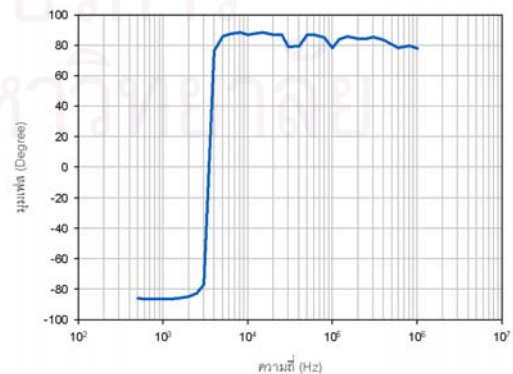
ตารางที่ 3.11 (ต่อ) แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ขั้วขดลวดปฐมภูมิมิมีหน่วยเป็น  $\bar{U}$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
20	40000	4.43E-05	79.50	2.60E-04	77.79	1.47E-05	89.14
21	50000	6.61E-05	87.04	3.18E-04	84.51	2.32E-05	91.36
22	60000	8.45E-05	87.27	3.98E-04	85.42	2.92E-05	88.48
23	80000	1.18E-04	85.15	5.38E-04	81.25	3.81E-05	92.58
24	100000	1.40E-04	78.66	6.45E-04	83.97	5.56E-05	101.25
25	120000	1.55E-04	84.09	7.96E-04	82.13	6.17E-05	84.55
26	150000	2.01E-04	85.95	9.38E-04	81.84	7.72E-05	88.18
27	200000	2.71E-04	84.66	1.25E-03	83.49	2.70E-04	87.94
28	250000	3.30E-04	84.46	1.63E-03	84.40	1.27E-04	86.53
29	300000	3.98E-04	85.44	2.10E-03	80.48	1.53E-04	88.17
30	400000	5.52E-04	83.77	3.44E-03	79.08	2.08E-04	86.94
31	500000	6.70E-04	80.73	4.45E-03	40.50	2.62E-04	85.32
32	600000	7.97E-04	78.54	3.33E-03	34.09	3.07E-04	82.52
33	800000	9.89E-04	80.03	4.85E-03	58.23	4.04E-04	82.27
34	1000000	1.30E-03	78.09	5.77E-03	17.94	5.08E-04	79.45

จากตารางที่ 3.11 วาดกราฟขนาด และมุมเฟสแอดมิตแตนซ์ของขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง A, B และ C ตามความถี่ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.18 – 3.20

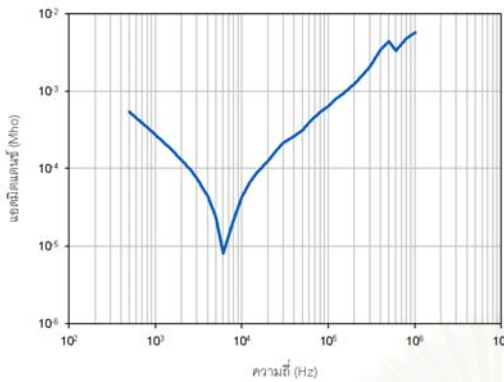


(ก) ขนาด

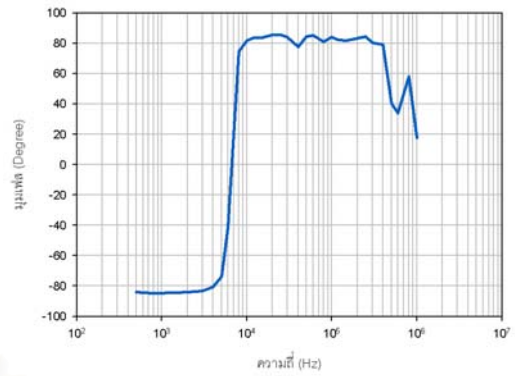


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.18 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง A

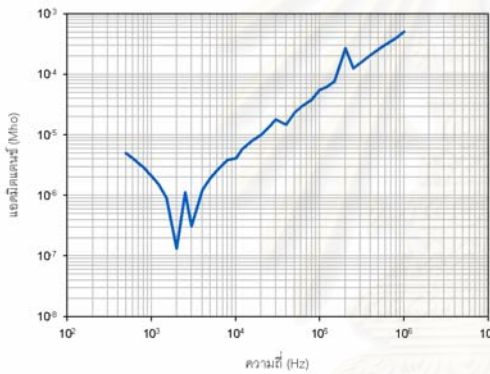


(ก) ขนาด

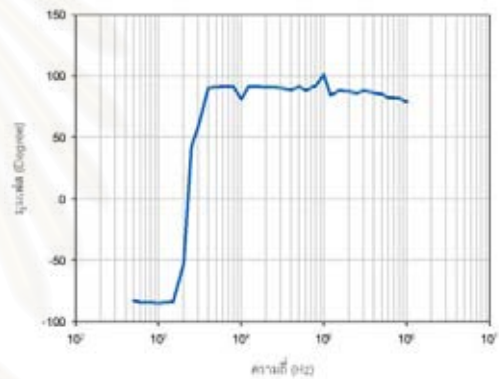


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.19 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง B



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.20 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง C

จากกราฟตามรูปที่ 3.18 – 3.20 เมื่อพิจารณาค่าแอดมิตแตนซ์ของ  
 ขดลวดด้านปฐมภูมิหม้อแปลง A, B และ C  $Y_i(j\omega)$  ที่มีนัยสำคัญต่อการเกิด  
 แรโซแนนซ์ สามารถคำนวณค่าองค์ประกอบในวงจรอนุกรม RLC ได้ตามตารางที่  
 3.12 ดังนี้

ตารางที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง A

$i$	$f_{oi}$ [kHz]	$Y_{max,i}$ [S]	$Q_i$	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L_i$ [H]	$C_i$ [F]
1	30	$6.50 \times 10^{-5}$	3	$1.54 \times 10^4$	0.204	$1.38 \times 10^{-10}$

ตารางที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง B

$i$	$f_{oi}$ [kHz]	$Y_{\max,i}$ [S]	$Q_i$	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L_i$ [mH]	$C_i$ [F]
1	500	$5 \times 10^{-3}$	2.5	333	0.265	$382 \times 10^{-12}$

ตารางที่ 3.14 ค่าพารามิเตอร์  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง C

$i$	$f_{oi}$ [kHz]	$Y_{\max,i}$ [S]	$Q_i$	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L_i$ [mH]	$C_i$ [pF]
1	2.5	$1.1 \times 10^{-6}$	10	$900 \times 10^3$	$573 \times 10^3$	7.07
2	200	$0.27 \times 10^{-3}$	20	4000	63.66	9.95

### 3.3.2.2 การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของขดลวดด้านปฐมภูมิ

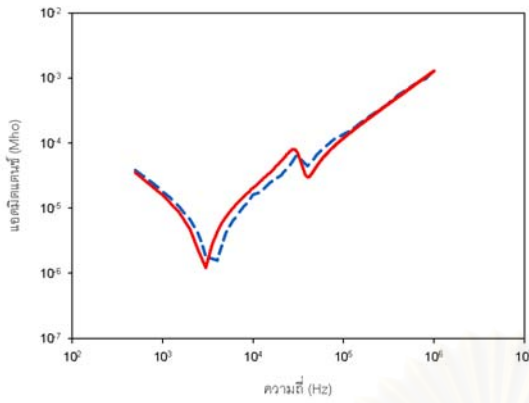
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ในช่วงที่เลยผลเรโซแนนซ์ที่วิคูณ สามารถแทนผลตอบสนองด้วยค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วขดลวดทางด้านปฐมภูมิ โดยนำค่าแอดมิตแตนซ์ที่ค่าความถี่ 1 MHz ในตารางที่ 3.11 จากนั้นคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้ความสัมพันธ์  $C = Y / (2 \times \pi \times 10^6)$  ได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 3.15 ดังนี้

ตารางที่ 3.15 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง

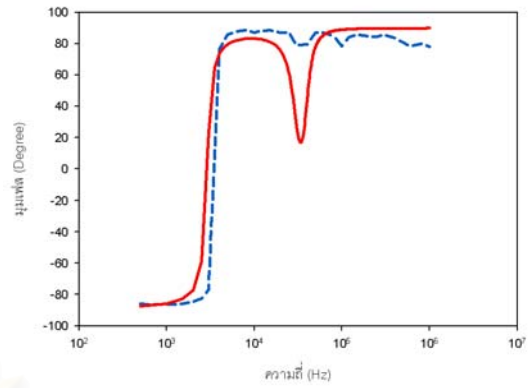
หม้อแปลง	ค่าความจุไฟฟ้า
A	206.9 pF
B	918.32 pF
C	80.85 pF

### 3.3.2.3 การเปรียบเทียบค่าแอดมิตแตนซ์ของขดลวดด้านปฐมภูมิ

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามหัวข้อที่ 3.3.2.1 ถึง 3.3.2.2 เมื่อนำค่าองค์ประกอบที่คำนวณได้มาสร้างเป็นฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ และนำไปเปรียบเทียบกับค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการวัดของขดลวดปฐมภูมิได้ดังรูปที่ 3.21 – 3.23

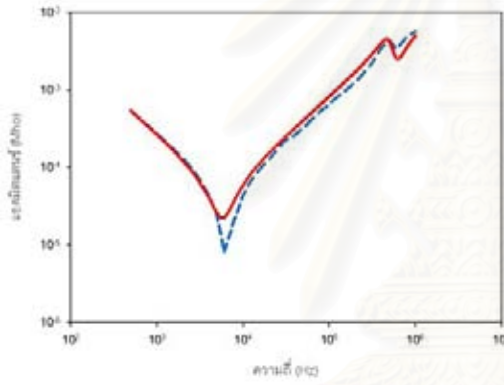


(ก) ขนาด

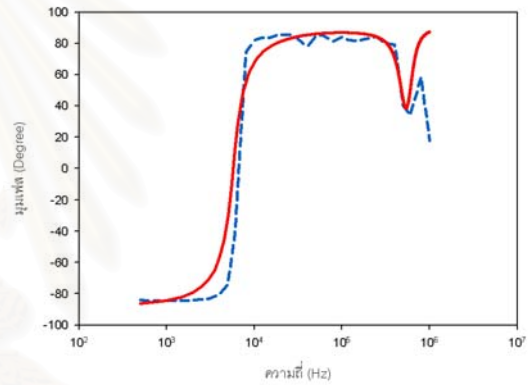


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.21 แอดมิตแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

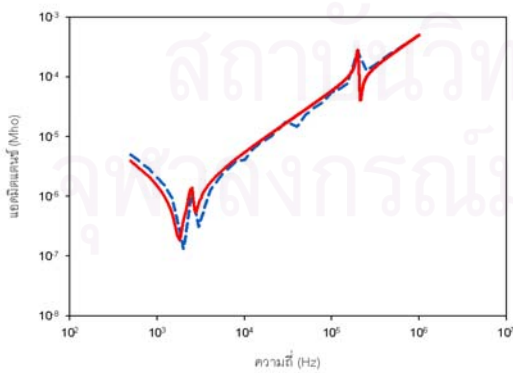


(ก) ขนาด

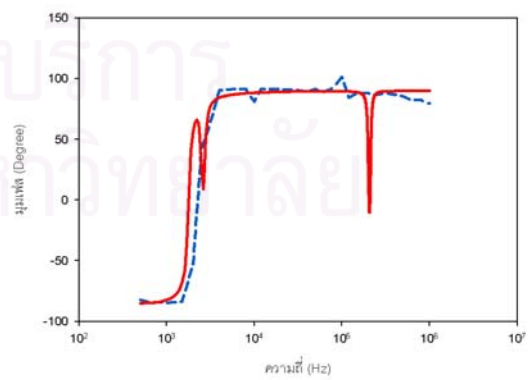


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.22 แอดมิตแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.23 แอดมิตแตนซ์ขดลวดปฐมภูมิหม้อแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

--- ค่าจากการวัด

— ค่าจากการคำนวณ

3.3.2.4 การหาค่าพารามิเตอร์วงจรรีโซแนนซ์ที่ควมของขดลวดด้านทุติยภูมิ  
ต่อวงจรม้อแปลง A, B และ C ตามรูปที่ 2.16 จากนั้นวัดแอดมิตแตนซ์  
ขดลวดด้านทุติยภูมิ  $Y(j\omega)$  ได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.16 ดังนี้

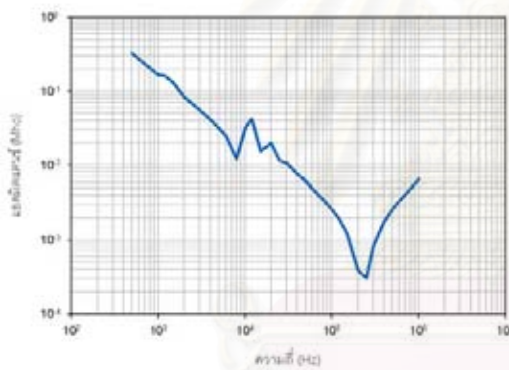
ตารางที่ 3.16 แอดมิตแตนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ขั้วขดลวดทุติยภูมิมีหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	3.28E-01	-85.41	1.33E+00	-81.84	2.11E-01	-81.53
2	600	2.74E-01	-85.82	1.12E+00	-82.49	1.77E-01	-82.71
3	800	2.04E-01	-86.23	8.55E-01	-83.18	1.33E-01	-84.17
4	1000	1.66E-01	-86.39	6.90E-01	-83.57	1.07E-01	-85.02
5	1200	1.60E-01	-86.42	5.81E-01	-83.82	8.94E-02	-85.56
6	1500	1.28E-01	-86.45	4.69E-01	-84.09	7.16E-02	-86.09
7	2000	8.35E-02	-86.46	3.57E-01	-84.42	5.37E-02	-86.56
8	2500	6.69E-02	-86.45	2.89E-01	-84.67	4.29E-02	-86.76
9	3000	5.57E-02	-86.46	2.43E-01	-84.84	3.57E-02	-86.91
10	4000	4.09E-02	-86.47	1.84E-01	-84.98	2.64E-02	-86.95
11	5000	3.15E-02	-86.47	1.48E-01	-84.94	2.07E-02	-86.84
12	6000	2.46E-02	-86.37	1.24E-01	-84.79	1.65E-02	-86.54
13	8000	1.22E-02	-83.46	9.34E-02	-84.29	9.55E-03	-83.21
14	10000	3.19E-02	50.80	7.50E-02	-83.68	3.57E-02	-55.56
15	12000	4.24E-02	-62.19	6.27E-02	-83.11	1.24E-02	-85.55
16	15000	1.55E-02	-81.67	5.01E-02	-81.91	7.53E-03	-84.79
17	20000	1.99E-02	-76.57	3.72E-02	-79.40	9.00E-03	-82.03
18	25000	1.16E-02	-76.45	2.92E-02	-75.02	5.04E-03	-78.78
19	30000	1.07E-02	-80.78	2.46E-02	-66.58	4.95E-03	-82.75
20	40000	7.67E-03	-79.27	2.90E-02	-63.17	3.99E-03	-82.24
21	50000	6.18E-03	-81.03	2.28E-02	-78.29	3.02E-03	-81.83
22	60000	4.96E-03	-82.55	1.75E-02	-80.93	2.78E-03	-75.40
23	80000	3.49E-03	-82.59	1.26E-02	-78.18	1.76E-03	-81.70
24	100000	2.62E-03	-81.69	9.55E-03	-81.79	1.31E-03	-82.26
25	120000	1.98E-03	-82.26	7.17E-03	-79.09	1.01E-03	-77.65
26	150000	1.24E-03	-80.98	5.13E-03	-80.04	5.30E-04	-71.30
27	200000	3.87E-04	-69.52	2.20E-03	-76.94	1.54E-04	8.82

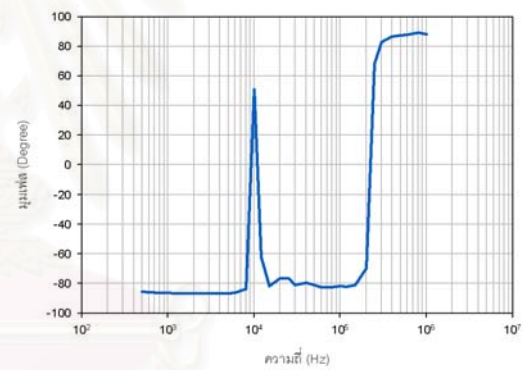
ตารางที่ 3.16 (ต่อ) แอดมิตแดนซ์ของหม้อแปลง A, B และ C ขั้วขดลวดทุติยภูมิมีหน่วยเป็น  $\Omega$

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
28	250000	3.06E-04	68.32	3.93E-04	10.26	5.48E-04	71.65
29	300000	8.35E-04	83.13	1.92E-03	78.39	1.12E-03	76.79
30	400000	1.76E-03	86.71	5.10E-03	85.57	3.50E-03	63.13
31	500000	2.58E-03	87.55	8.00E-03	82.82	4.45E-03	-32.35
32	600000	3.39E-03	87.99	1.07E-02	84.11	1.35E-03	-49.80
33	800000	4.90E-03	89.23	1.72E-02	84.32	7.17E-04	51.59
34	1000000	6.50E-03	88.19	2.58E-02	81.64	2.16E-03	61.89

จากตารางที่ 3.16 วาดกราฟขนาด และมุมเฟสแอดมิตแดนซ์ของขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง A, B และ C ตามความถี่ต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.24 – 3.26

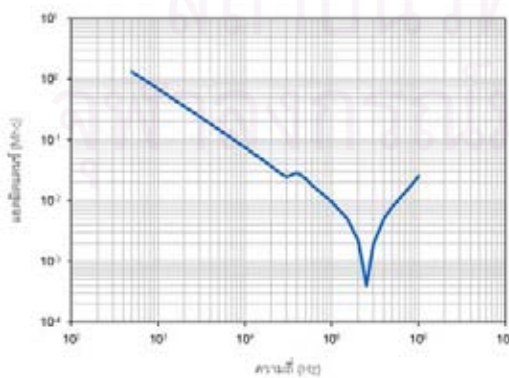


(ก) ขนาด

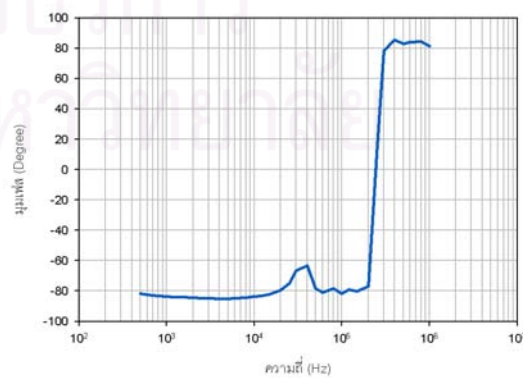


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.24 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง A

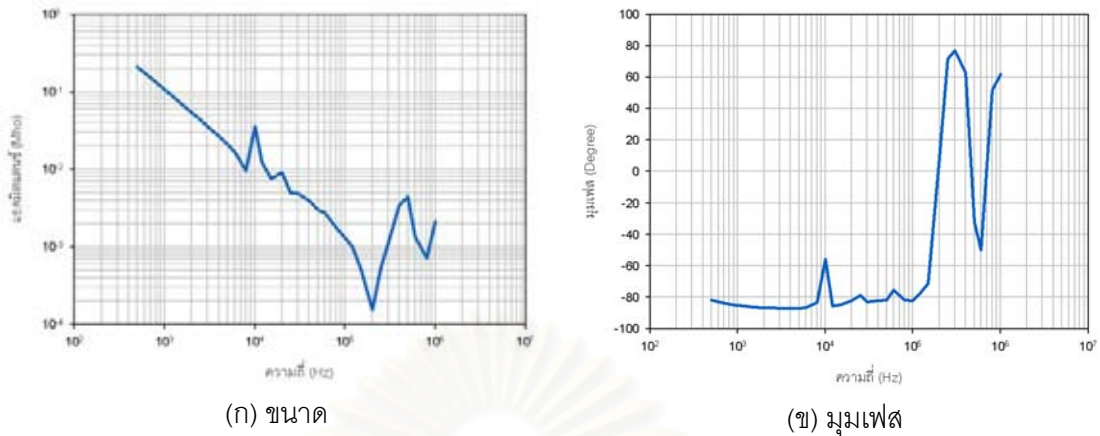


(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.25 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิหม้อแปลง B



รูปที่ 3.26 คุณสมบัติเชิงความถี่ของแอดมิตแตนซ์ขดลวดต้านทุติยภูมิหม้อแปลง C

จากกราฟตามรูปที่ 3.24 – 3.26 เมื่อพิจารณาค่าแอดมิตแตนซ์ของขดลวดต้านทุติยภูมิหม้อแปลง A, B และ C แอดมิตแตนซ์  $Y_i(j\omega)$  ที่มีนัยสำคัญต่อการเกิดแรงแช่ขนาน สามารถคำนวณค่าองค์ประกอบในวงจรอนุกรม RLC ได้ตามตารางที่ 3.17 – 3.19

ตารางที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A

$i$	$f_{oi}$ [kHz]	$Y_{\max,i}$ [S]	$Q_i$	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L_i$ [H]	$C_i$ [nF]
1	11	0.038	4.4	26.3	0.0016	125
2	18	0.0075	6	133	0.007	11.1

ตารางที่ 3.18 ค่าพารามิเตอร์  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง B

$i$	$f_{oi}$ [kHz]	$Y_{\max,i}$ [S]	$Q_i$	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L_i$ [mH]	$C_i$ [nF]
1	38	0.025	2	40	0.265	66.1

ตารางที่ 3.19 ค่าพารามิเตอร์  $R_i$ ,  $L_i$  และ  $C_i$  ของวงจรอนุกรม RLC ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง C

$i$	$f_{oi}$ [kHz]	$Y_{\max,i}$ [S]	$Q_i$	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L_i$ [mH]	$C_i$ [nF]
1	10	0.036	10	27.8	3.684	68.8
2	18	0.009	9	125	9.94	7.86
3	450	0.01	15	100	0.398	0.314



### 3.3.2.5 การหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของขดลวดด้านทุติยภูมิ

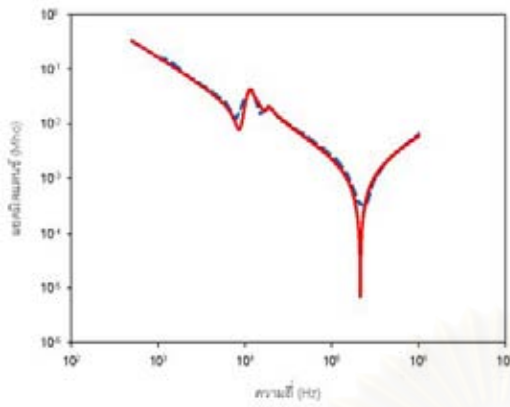
ทำนองเดียวกันกับการหาค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วขดลวดทางด้านปฐมภูมิซึ่งผลการคำนวณดังแสดงตามตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

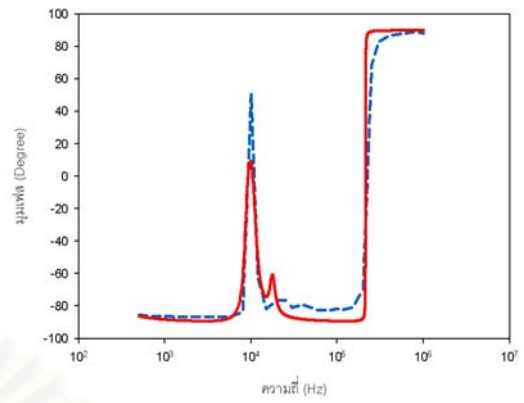
หม้อแปลง	ค่าความจุไฟฟ้า
A	1 nF
B	1.75 nF
C	0.2 nF

### 3.3.2.6 การเปรียบเทียบค่าแอดมิตแตนซ์ของขดลวดด้านทุติยภูมิ

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามหัวข้อที่ 3.3.2.4 ถึง 3.3.2.5 เมื่อนำค่าองค์ประกอบที่คำนวณได้มาสร้างเป็นฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ และนำไปเปรียบเทียบกับค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการวัดของขดลวดทุติยภูมิได้ตามแสดงในรูปที่ 3.27 – 3.29

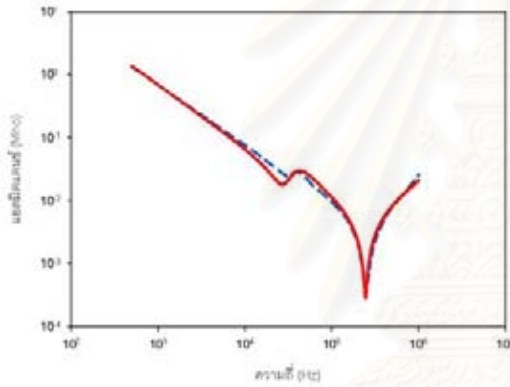


(ก) ขนาด

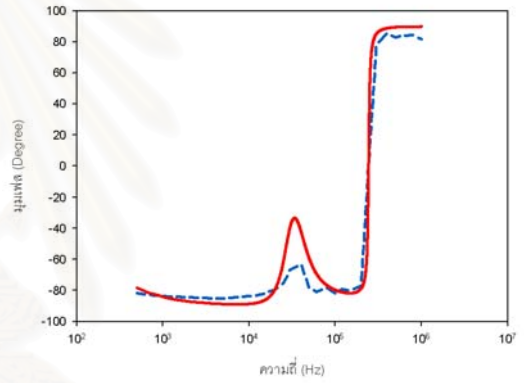


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.27 แอดมิตแตนซ์ขดลวดทุติยภูมิห้อยแปลง A เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

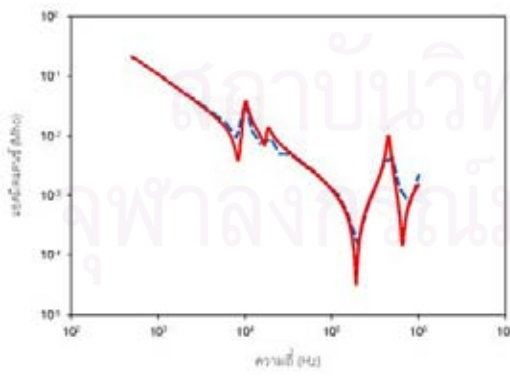


(ก) ขนาด

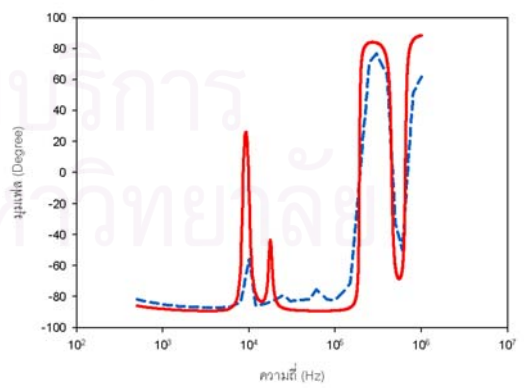


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.28 แอดมิตแตนซ์ขดลวดทุติยภูมิห้อยแปลง B เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.29 แอดมิตแตนซ์ขดลวดทุติยภูมิห้อยแปลง C เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

--- ค่าจากการวัด

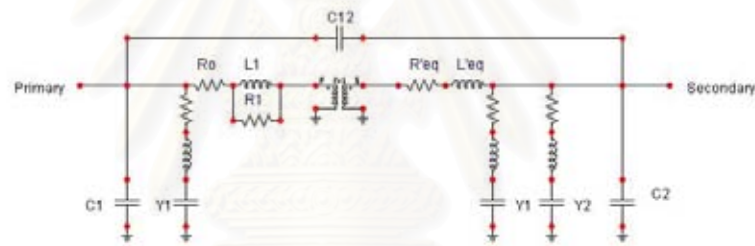
— ค่าจากการคำนวณ

### 3.3.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

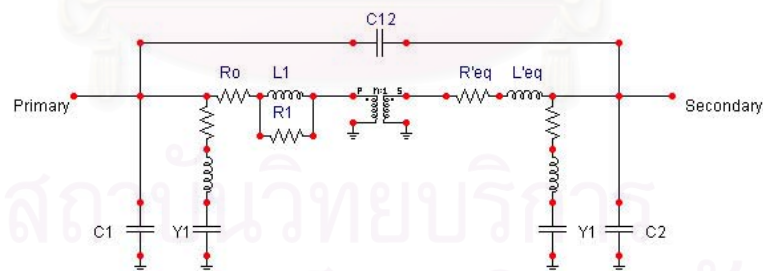
การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง A, B และ C สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ มีหลักในการพิจารณาเหมือนกับกรณีของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ ตามหัวข้อที่ 3.2.1

### 3.3.4 แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับโปรแกรม ATP/EMTP

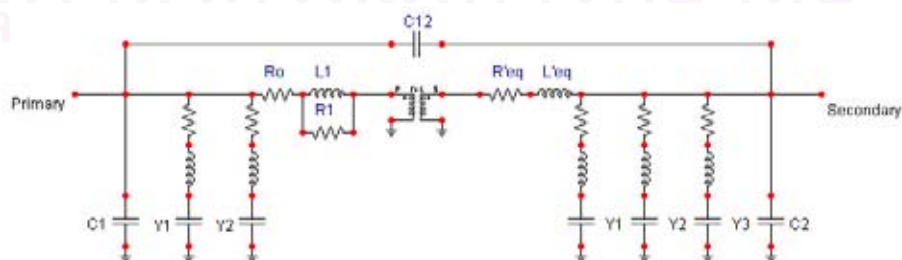
จากการหาค่าพารามิเตอร์วงจรฟอสเตอร์สำหรับปรากฏการณ์ตามผิว, การหาค่าพารามิเตอร์วงจรเรโซแนนซ์ทวีคูณ และการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดระหว่างขั้วของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ตามหัวข้อที่ได้แสดงข้างต้นของหม้อแปลง A, B และ C สามารถสร้างแบบจำลองหม้อแปลงด้วยโปรแกรม ATP/EMTP จะได้ตามรูปที่ 3.30 - 3.32



รูปที่ 3.30 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง A



รูปที่ 3.31 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง B



รูปที่ 3.32 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง C

### 3.4 การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์

#### 3.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์ $Y_m$ , $Y_{s1}$ และ $Y_{s2}$ สำหรับแบบจำลองพาย

ค่าพารามิเตอร์  $Y_m$ ,  $Y_{s1}$  และ  $Y_{s2}$  ของแบบจำลองพายตามรูปที่ 2.23 สามารถหาได้จากการวัดแอดมิตแตนซ์ตามความถี่ต่างๆ ด้วย LCR มิเตอร์ตามวิธีการตามรูปที่ 2.24 ถึง 2.26 ซึ่งค่าที่วัดได้คือ  $Y_{11}$ ,  $Y_{22}$  และ  $Y_{12}$  จากนั้นคำนวณค่า  $Y_m$ ,  $Y_{s1}$  และ  $Y_{s2}$  ตามสมการ (2.17) ถึง (2.19) โดยค่าพารามิเตอร์  $Y_m$ ,  $Y_{s1}$  และ  $Y_{s2}$  ของหม้อแปลง A, B และ C สรุปได้ตามตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.21 ค่าพารามิเตอร์  $Y_m$  ของหม้อแปลง A, B และ C

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	1.53E-06	89.61	5.15E-06	83.50	4.24E-07	89.90
2	600	1.83E-06	89.62	6.1E-06	83.50	5.11E-07	89.91
3	800	2.44E-06	89.64	7.95E-06	84.60	6.88E-07	89.85
4	1000	3.05E-06	89.65	9.85E-06	85.00	8.84E-07	89.80
5	1200	3.66E-06	89.65	1.17E-05	85.44	1.08E-06	89.70
6	1500	4.57E-06	89.67	1.45E-05	85.81	1.42E-06	89.04
7	2000	6.09E-06	89.67	1.91E-05	86.29	2.25E-06	86.15
8	2500	7.60E-06	89.68	2.37E-05	86.64	5.15E-06	49.75
9	3000	9.12E-06	89.67	2.83E-05	86.85	7.64E-07	37.10
10	4000	1.21E-05	89.67	3.75E-05	87.20	2.04E-06	87.39
11	5000	1.52E-05	89.66	4.67E-05	87.44	2.88E-06	89.00
12	6000	1.82E-05	89.65	5.58E-05	87.60	3.62E-06	89.50
13	8000	2.42E-05	89.64	7.42E-05	87.79	5.01E-06	89.78
14	10000	3.03E-05	89.58	9.27E-05	87.79	6.33E-06	89.50
15	12000	3.62E-05	89.51	1.12E-04	87.41	7.72E-06	89.66
16	15000	4.53E-05	89.61	1.36E-04	85.82	9.68E-06	89.92
17	20000	6.04E-05	89.50	1.78E-04	87.94	1.30E-05	89.86
18	25000	7.54E-05	89.52	2.24E-04	88.21	1.64E-05	89.87
19	30000	9.04E-05	89.45	2.69E-04	88.10	2.03E-05	89.76
20	40000	1.20E-04	89.46	3.58E-04	87.89	1.86E-05	84.58
21	50000	1.50E-04	89.41	4.45E-04	87.57	3.01E-05	89.76
22	60000	1.80E-04	89.38	5.30E-04	87.90	3.72E-05	89.00

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
23	80000	2.38E-04	89.90	7.11E-04	87.62	4.91E-05	90.12
24	100000	3.02E-04	89.32	8.84E-04	87.70	5.99E-05	95.72
25	120000	3.61E-04	89.22	1.07E-03	87.21	8.09E-05	84.34
26	150000	4.50E-04	89.11	1.35E-03	86.25	9.60E-05	89.16
27	200000	5.99E-04	88.99	1.75E-03	84.83	1.28E-04	88.71
28	250000	7.50E-04	88.90	2.20E-03	86.49	1.59E-04	87.40
29	300000	9.00E-04	88.86	2.77E-03	85.22	1.90E-04	88.79
30	400000	1.21E-03	88.71	3.93E-03	84.63	2.56E-04	88.26
31	500000	1.54E-03	88.34	5.40E-03	72.67	3.21E-04	87.35
32	600000	1.90E-03	87.04	6.36E-03	68.83	3.83E-04	85.88
33	800000	2.40E-03	80.74	7.93E-03	64.52	5.04E-04	85.91
34	1000000	2.92E-03	84.03	1.00E-02	48.09	6.41E-04	84.20

ตารางที่ 3.22 ค่าพารามิเตอร์  $Y_{s1}$  ของหม้อแปลง A, B และ C

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	5.54E-05	-86.45	5.46E-04	-84.37	5.55E-06	-82.75
2	600	4.64E-05	-86.87	4.59E-04	-84.70	4.74E-06	-83.86
3	800	3.53E-05	-87.37	3.52E-04	-85.06	3.76E-06	-85.33
4	1000	2.86E-05	-87.64	2.88E-04	-85.28	3.22E-06	-86.35
5	1200	2.44E-05	-87.84	2.47E-04	-85.46	2.91E-06	-87.06
6	1500	2.02E-05	-87.94	2.06E-04	-85.77	2.70E-06	-88.25
7	2000	1.62E-05	-88.12	1.66E-04	-86.33	2.91E-06	-91.64
8	2500	1.40E-05	-88.65	1.44E-04	-86.87	5.32E-06	-128.24
9	3000	1.27E-05	-88.29	1.31E-04	-87.40	6.78E-07	-156.59
10	4000	1.15E-05	-88.48	1.19E-04	-88.23	1.31E-06	-93.02
11	5000	1.13E-05	-88.69	1.16E-04	-88.86	1.67E-06	-91.04
12	6000	1.14E-05	-88.89	1.17E-04	-89.34	1.97E-06	-90.40
13	8000	1.19E-05	-88.92	1.27E-04	-89.97	2.47E-06	-89.87
14	10000	1.11E-05	-84.02	1.43E-04	-90.45	3.81E-06	-81.20
15	12000	2.22E-05	-78.48	1.61E-04	-91.13	3.90E-06	-90.36

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
16	15000	2.04E-05	-87.76	1.84E-04	-93.17	4.58E-06	-89.82
17	20000	2.25E-05	-73.60	2.28E-04	-90.86	6.31E-06	-89.32
18	25000	2.53E-05	-72.08	2.78E-04	-90.22	7.41E-06	-89.58
19	30000	6.27E-05	-63.29	3.27E-04	-89.25	7.91E-06	-88.33
20	40000	6.46E-05	-86.17	4.64E-04	-86.45	9.43E-06	-98.87
21	50000	7.39E-05	-87.35	5.76E-04	-90.72	1.57E-05	-89.97
22	60000	9.03E-05	-84.05	6.68E-04	-90.61	1.92E-05	-89.54
23	80000	1.17E-04	-84.78	8.98E-04	-88.58	2.49E-05	-89.45
24	100000	1.57E-04	-83.29	1.08E-03	-89.97	3.09E-05	-85.93
25	120000	1.90E-04	-86.46	1.37E-03	-89.84	4.40E-05	-92.28
26	150000	2.33E-04	-87.14	1.78E-03	-91.41	4.89E-05	-89.45
27	200000	3.09E-04	-86.61	2.26E-03	-94.40	6.46E-05	-89.32
28	250000	4.00E-04	-87.40	2.78E-03	-92.27	8.16E-05	-89.47
29	300000	4.78E-04	-87.42	3.48E-03	-91.88	9.66E-05	-89.65
30	400000	6.39E-04	-87.77	4.48E-03	-91.07	1.26E-04	-89.05
31	500000	8.02E-04	-87.61	7.44E-03	-88.95	1.58E-04	-88.25
32	600000	9.81E-04	-87.54	1.02E-02	-100.63	1.93E-04	-87.03
33	800000	1.25E-03	-84.45	1.12E-02	-112.50	2.61E-04	-86.45
34	1000000	1.75E-03	-87.01	1.54E-02	-121.11	3.38E-04	-85.16

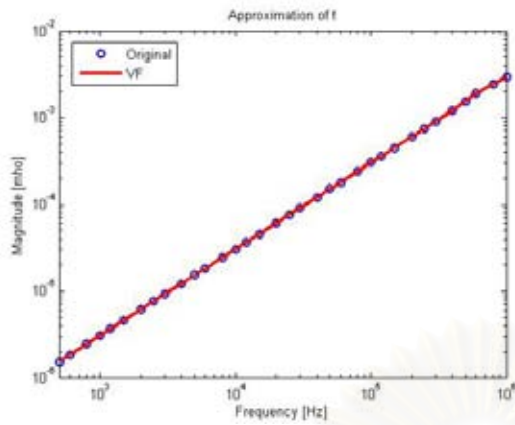
ตารางที่ 3.23 ค่าพารามิเตอร์  $Y_{s2}$  ของหม้อแปลง A, B และ C

ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	500	3.82E-01	-86.14	1.35E+00	-84.11	2.12E-01	-82.50
2	600	3.81E-01	-86.59	1.13E+00	-84.42	1.77E-01	-83.53
3	800	2.39E-01	-87.11	8.56E-01	-84.69	1.33E-01	-84.78
4	1000	1.92E-01	-87.37	6.91E-01	-84.80	1.07E-01	-85.52
5	1200	1.60E-01	-87.53	5.81E-01	-84.85	8.93E-02	-85.98
6	1500	1.28E-01	-87.60	4.70E-01	-84.92	7.16E-02	-86.42
7	2000	9.57E-02	-87.59	3.58E-01	-85.05	5.38E-02	-86.80
8	2500	7.63E-02	-87.46	2.89E-01	-85.18	4.29E-02	-86.98

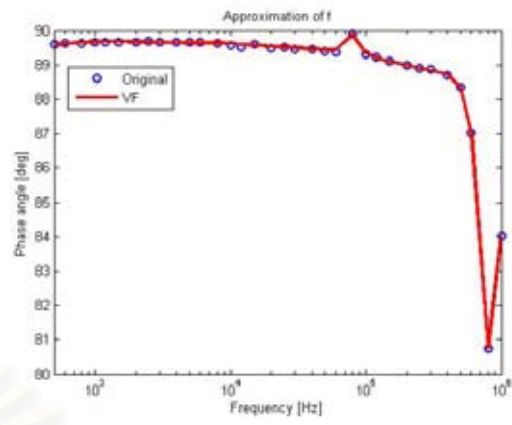
ลำดับที่	ความถี่ (Hz)	หม้อแปลง A		หม้อแปลง B		หม้อแปลง C	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
9	3000	6.33E-02	-87.34	2.43E-01	-85.26	3.57E-02	-87.03
10	4000	4.68E-02	-87.05	1.84E-01	-85.30	2.64E-02	-87.06
11	5000	3.64E-02	-86.74	1.48E-01	-85.20	2.07E-02	-86.92
12	6000	2.90E-02	-86.40	1.24E-01	-85.00	1.65E-02	-86.60
13	8000	1.77E-02	-84.44	9.36E-02	-84.44	9.57E-03	-83.26
14	10000	5.64E-03	-14.38	7.53E-02	-83.82	3.59E-02	-55.22
15	12000	4.24E-02	-62.22	6.29E-02	-83.15	1.24E-02	-85.60
16	15000	1.77E-02	-79.56	5.04E-02	-82.07	7.54E-03	-84.83
17	20000	1.55E-02	-25.51	3.75E-02	-79.58	9.02E-03	-82.03
18	25000	1.17E-02	-71.57	2.96E-02	-75.31	5.06E-03	-78.85
19	30000	1.34E-02	-44.25	2.51E-02	-67.13	4.97E-03	-82.77
20	40000	9.70E-03	-70.17	2.97E-02	-63.87	4.02E-03	-82.28
21	50000	7.32E-03	-71.20	2.37E-02	-78.85	3.05E-03	-81.90
22	60000	6.85E-03	-67.99	1.85E-02	-81.59	2.83E-03	-75.69
23	80000	5.11E-03	-73.91	1.40E-02	-79.62	1.82E-03	-81.81
24	100000	4.30E-03	-74.01	1.12E-02	-83.40	1.39E-03	-81.89
25	120000	3.53E-03	-76.77	9.28E-03	-82.24	1.12E-03	-78.64
26	150000	2.72E-03	-77.28	7.79E-03	-84.77	6.46E-04	-74.64
27	200000	1.85E-03	-77.72	5.63E-03	-88.14	2.03E-04	-41.22
28	250000	1.30E-03	-75.00	4.32E-03	-88.44	3.67E-04	61.86
29	300000	8.02E-04	-74.77	3.65E-03	-91.18	8.96E-04	73.19
30	400000	1.63E-04	-30.22	2.79E-03	-97.07	3.21E-03	60.67
31	500000	4.58E-04	75.88	3.29E-03	-133.30	4.73E-03	-36.30
32	600000	8.91E-04	84.66	3.76E-03	-160.68	1.75E-03	-61.22
33	800000	1.76E-03	93.31	5.80E-03	153.33	4.10E-04	-11.36
34	1000000	2.71E-03	90.68	1.43E-02	133.78	1.43E-03	49.66

### 3.4.2 การพิตตั้งทางเวกเตอร์ของข้อมูลแอดมิตแตนซ์จากการวัด

จากข้อมูลในตารางที่ 3.21 - 3.23 เมื่อผ่านกระบวนการพิตตั้งทางเวกเตอร์จะได้ฟังก์ชันตรรกยะจากการประมาณ ซึ่งสามารถวาดกราฟแอดมิตแตนซ์เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัด (จุดวงกลม) กับค่าที่ได้จากกระบวนการพิตตั้งทางเวกเตอร์ (เส้นหนา) ดังรูปที่ 3.33 – 3.41

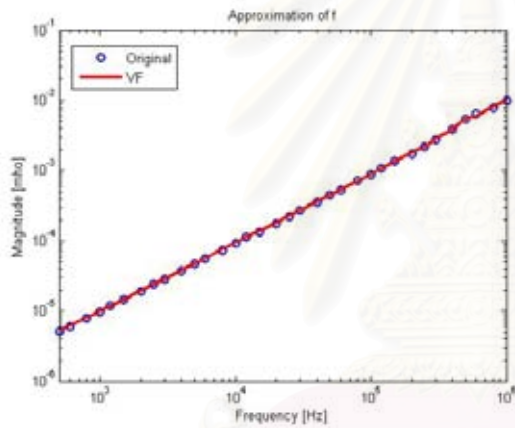


(ก) ขนาด

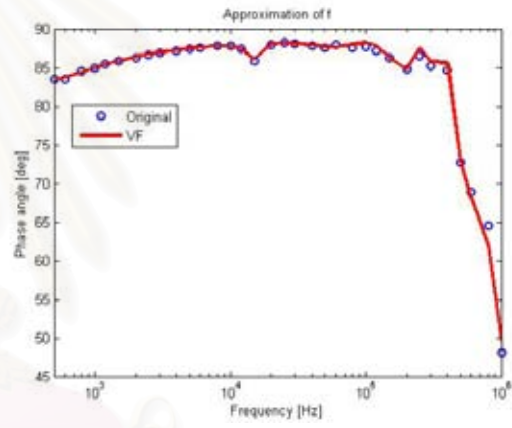


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.33 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง A

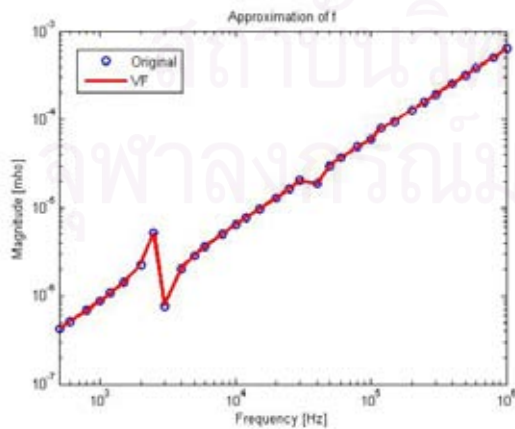


(ก) ขนาด

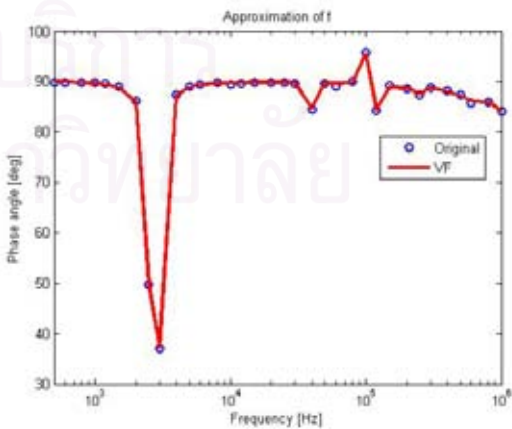


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.34 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง B



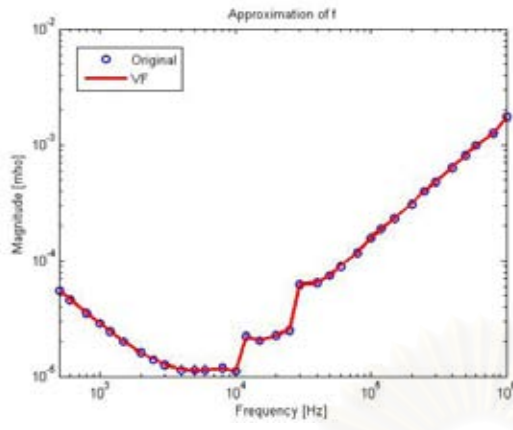
(ก) ขนาด



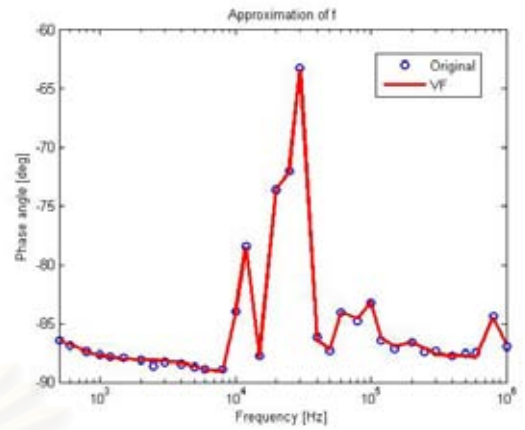
(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.35 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง C



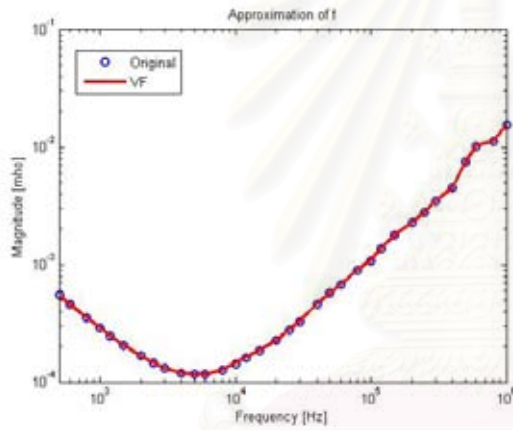


(ก) ขนาด

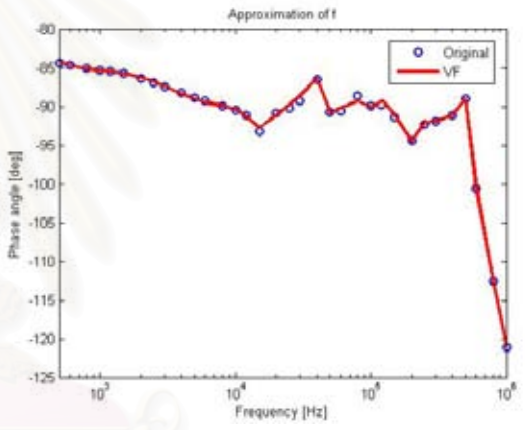


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.36 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง A

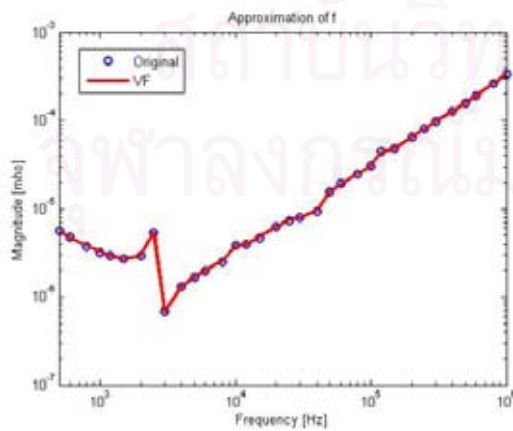


(ก) ขนาด

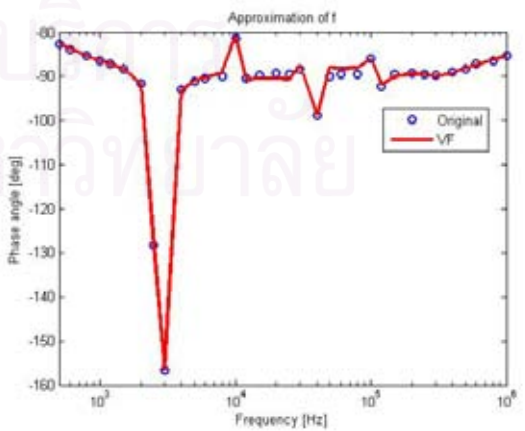


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.37 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง B

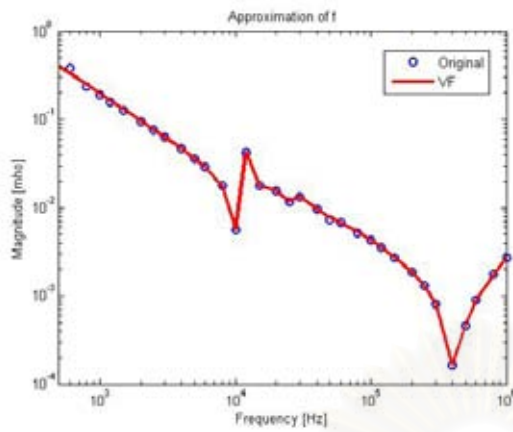


(ก) ขนาด

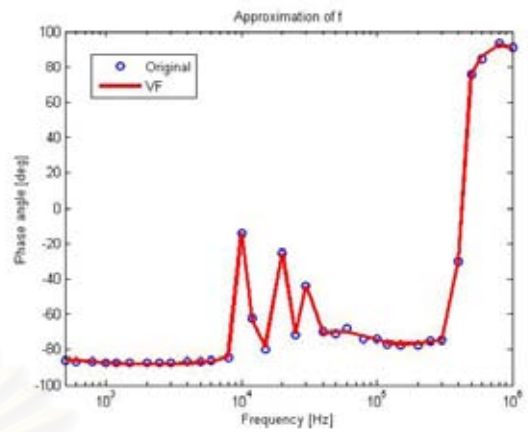


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.38 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง C

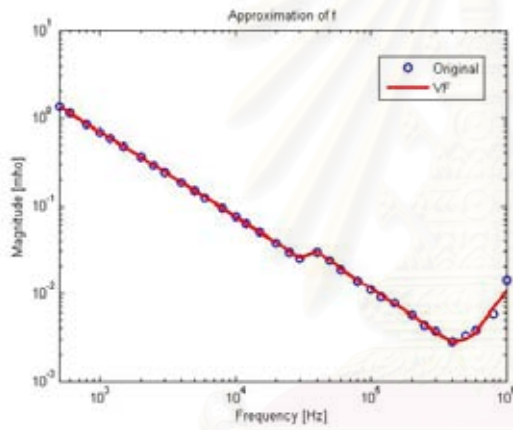


(ก) ขนาด

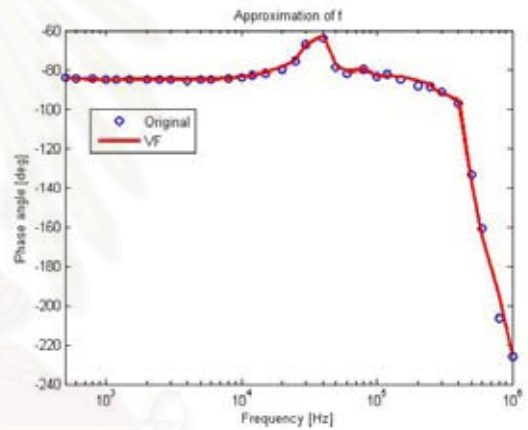


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.39 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง A

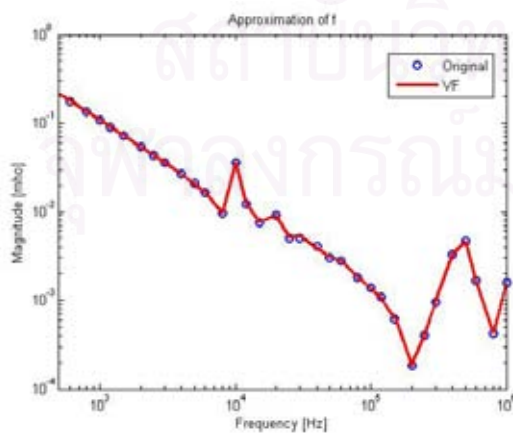


(ก) ขนาด

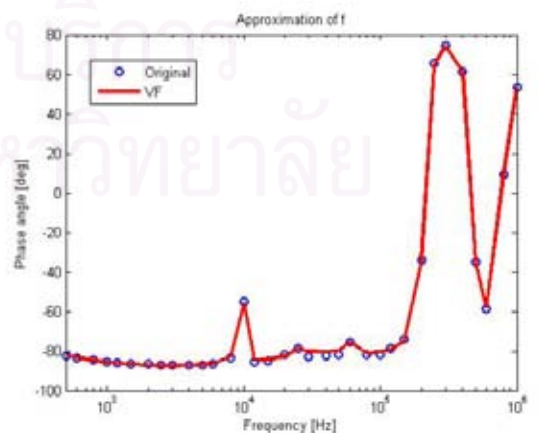


(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.40 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง B



(ก) ขนาด



(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.41 แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง C

ฟังก์ชันตรรกยะจากการประมาณแอดมิตแตนซ์ตามรูปที่ 3.33 - 3.41 เมื่อนำมาคำนวณองค์ประกอบแบบแพสซีฟตามหัวข้อที่ 2.4.4 ได้ค่าตามตารางที่ 3.24 – 3.26

ตารางที่ 3.24 ค่าองค์ประกอบแบบแพสซีฟจากฟังก์ชันตรรกยะของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ )

(ก) หม้อแปลง A

$R_o = -13215 \Omega$ ,  $C_o = 3.8844e-10 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	-1.051e7	-572.65	-	-
2	-91097	-0.10099	-	-
3	-3.7534e5	-89.655	-2.6922e-12	-2.1865e-7
4	-3.287e5	-2.3516	-1.4541e-12	7.4751e-8
5	3.4071e5	0.46502	5.0238e-13	-1.0769e-7
6	10897	0.0024862	1.1743e-11	-3.2011e-5
7	-118.88	0.0001452	5.8961e-11	0.00013398

(ข) หม้อแปลง B

$R_o = -22.99 \Omega$ ,  $C_o = 1.451e-9 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	-1.45E+06	-525.8	-	-
2	-6.92E+05	-29.43	-	-
3	1.49E+05	6.712	1.75E-11	1.32E+07
4	-1.35E+06	0.245	1.19E-13	1.36E+06
5	-8.59E+04	-0.0176	-2.50E-12	9.56E+04
6	4209	-0.002747	-3.43E-11	-1.42E+04
7	-1063	-0.0006558	-6.68E-11	-4.07E+04
8	6.424	1.16E-06	4.66E-09	1.66E+01

(ค) หม้อแปลง C

$R_o = -54959 \Omega$ ,  $C_o = 8.8203E-11 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	1.76E+08	30049	-	-
2	2.23E+07	92.786	-	-
3	2.98E+05	121.5	3.1E-11	-2.2E-08
4	74472	6.3579	2.73E-12	-1.9E-08
5	-6.23E+06	-3.2694	-8.2E-14	1.43E-07
6	2.84E+07	6.4183	7.81E-15	-3.4E-08
7	-2.65E+05	0.90898	4.08E-13	2.2E-07
8	45528	0.037633	1.69E-12	9.65E-07
9	2931.1	0.000892	1.29E-11	1.79E-05

ตารางที่ 3.25 ค่าองค์ประกอบแบบพาสซีฟจากฟังก์ชันตรรกยะของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s1}$ )

(ก) หม้อแปลง A

$R_o = -4.4117e5 \Omega$ ,  $C_o = -2.5803e-10F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	1172.6	5.7523	-	-
2	-37193	-0.02572	-	-
3	1.73E+05	14.793	1.33E-11	-8.23E-08
4	4.47E+05	13.282	4.40E-12	-9.10E-08
5	48625	1.1012	2.72E-11	-4.69E-07
6	1.83E+06	3.4548	8.08E-13	-3.55E-07
7	75890	0.5284	4.94E-12	4.39E-08
8	26376	-0.02127	-2.27E-12	-3.21E-06
9	-18917	0.0046	3.60E-12	2.09E-05

## (ข) หม้อแปลง B

$R_o = -15.874 \Omega$ ,  $C_o = 1.9142e-9 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	136.26	0.59092	-	-
2	53523	3.6265	-	-
3	-95.821	-2.50E-05	-	-
4	13.55	1.14E-06	-	-
5	-8.87E+05	-4.85	-6.27E-12	8.68E-07
6	-1.81E+05	0.57593	9.11E-12	3.47E-06
7	-11177	-0.30473	-9.15E-12	4.93E-08
8	-9401.1	-0.00765	-6.05E-11	3.79E-05
9	16943	0.002538	8.36E-12	-4.96E-05
10	325.88	-0.00049	-1.04E-10	-0.00012

## (ค) หม้อแปลง C

$R_o = 20739 \Omega$ ,  $C_o = -5.7258e-11 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	24751	59.518	-	-
2	-18256	-0.00345	-	-
3	-3.11E+05	-117.24	-3.20E-11	2.81E-08
4	-1.11E+06	345.05	7.57E-13	4.52E-09
5	5.53E+05	8.9409	2.38E-12	-1.09E-07
6	-27744	-10.505	-1.61E-12	-9.62E-09
7	-2.24E+06	3.3524	3.03E-13	2.11E-07
8	-2.70E+08	-3.0091	-4.24E-17	3.70E-09

ตารางที่ 3.26 ค่าองค์ประกอบแบบพีชคณิตจากฟังก์ชันตรรกยะของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ )

(ก) หม้อแปลง A

$R_o = 1405.4 \Omega$ ,  $C_o = 4.1796e-10 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	396.82	0.000732	-	-
2	-1889.2	-0.00051	-	-
3	0.17932	0.000816	0.003132	0.60148
4	40.983	0.003299	5.96E-08	-0.00041
5	131.82	0.005239	1.14E-08	-0.00013
6	231.79	0.004775	5.73E-09	-0.00012
7	32784	0.032486	3.17E-11	-2.83E-05
8	166.66	-0.00042	-5.62E-11	-0.00025

(ข) หม้อแปลง B

$R_o = -71.188 \Omega$ ,  $C_o = 2.1525e-9 F$

Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	0.055215	0.00023504	-	-
2	29.579	0.0021077	-	-
3	263.98	0.0009711	-	-
4	62.536	9.3597e-6	-	-
5	-11.312	0.0010682	1.525e-8	0.0014523
6	-23817	0.029239	3.1907e-11	2.8899e-5
7	-2762.3	-0.0038041	-1.8212e-10	-4.3468e-5
8	-3297.5	0.0048983	2.8674e-11	2.6525e-5
9	727.92	-0.00019147	-9.0936e-11	-0.00051866

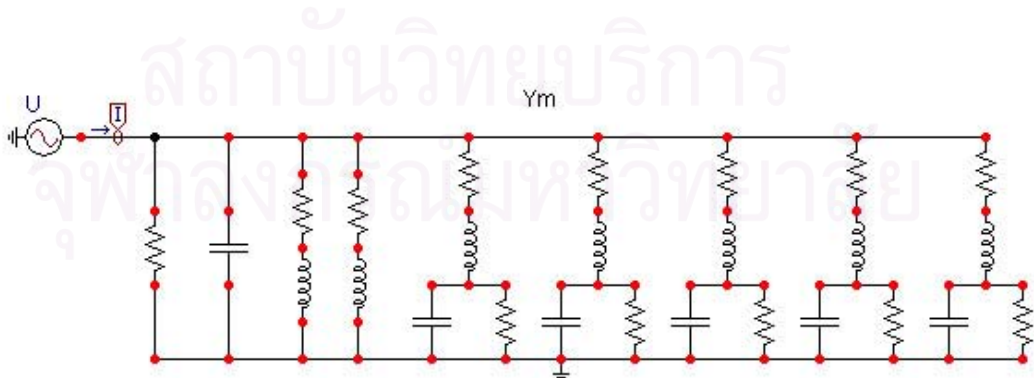
(ค) หม้อแปลง C

$R_o = 1495.2 \Omega$ ,  $C_o = -3.1155e-11 F$

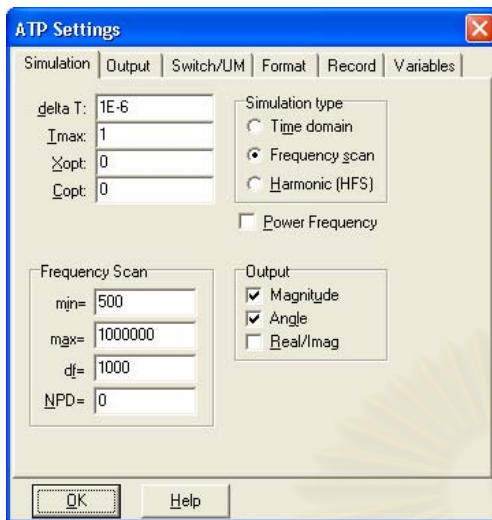
Branch No.	R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	G (S)
1	0.64061	0.0014787	-	-
2	1395.7	0.0038992	-	-
3	21.255	0.010556	2.4965e-8	1.3573e-5
4	360.47	0.01886	4.0094e-9	-7.0207e-5
5	-2107.7	0.056482	5.5896e-10	2.1705e-5
6	-1.1299e7	2.9523	2.2859e-14	8.7641e-8
7	-2.0062e6	-0.77563	-1.8111e-13	4.5764e-7
8	223.3	0.0003165	3.6819e-10	-7.4521e-5
9	1013.1	0.00014361	7.7045e-11	-0.00034246

### 3.4.3 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยองค์ประกอบแบบแพสซีฟ

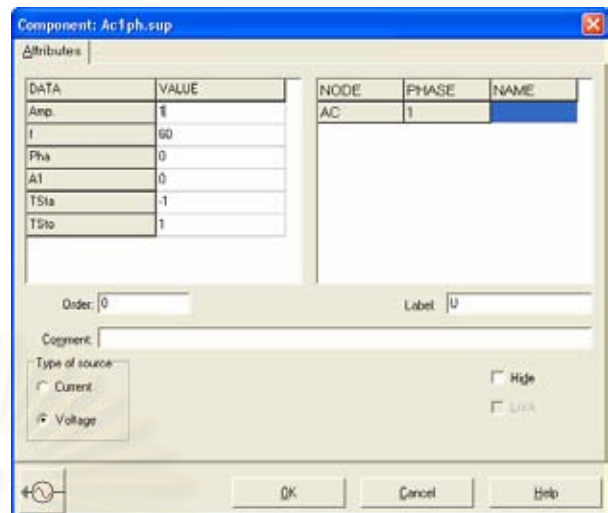
การตรวจสอบความถูกต้องของแอดมิตแตนซ์  $Y_m$ ,  $Y_{s1}$  และ  $Y_{s2}$  ที่สังเคราะห์ได้ตามตารางที่ 3.24 ถึง 3.26 สามารถทำได้โดยวาดแผนภาพวงจร RLCG ด้วยโปรแกรม ATPDraw ตามรูปที่ 3.42 ซึ่งเป็นกรณีตัวอย่างค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_m$  ของหม้อแปลง A จากนั้นตั้งค่าที่ใช้ในการคำนวณสำหรับแหล่งจ่ายตามรูปที่ 3.43 ผลลัพธ์จากการคำนวณคือ แอดมิตแตนซ์จากการสังเคราะห์ด้วยองค์ประกอบแบบแพสซีฟ



รูปที่ 3.42 วงจร RLCG จากการสังเคราะห์แอดมิตแตนซ์ด้วยกระบวนการพิตตั้งทางเวกเตอร์



(ก) การตั้งค่าการคำนวณ



(ข) การตั้งค่าพารามิเตอร์แหล่งจ่าย

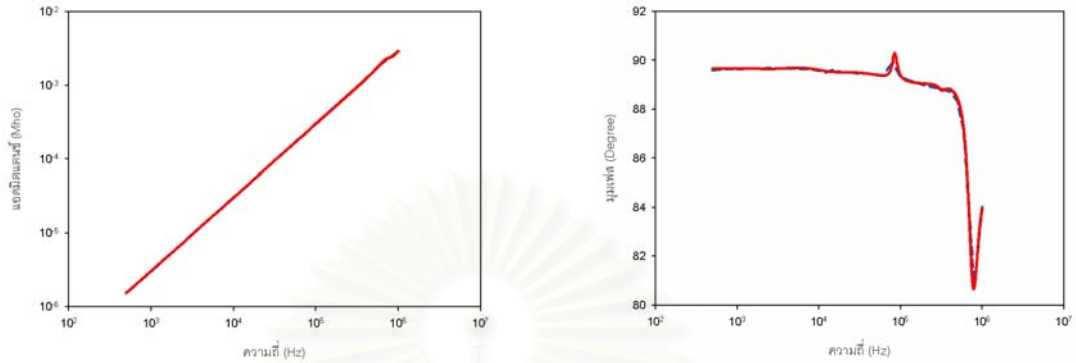
รูปที่ 3.43 การตั้งค่าการคำนวณแอดมิตแตนซ์ของวงจร RLCG

ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณสามารถนำไปวาดกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด (เส้นประ) กับค่าที่ได้จากกระบวนการติดตั้งทางเวกเตอร์ (เส้นหนา) ดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

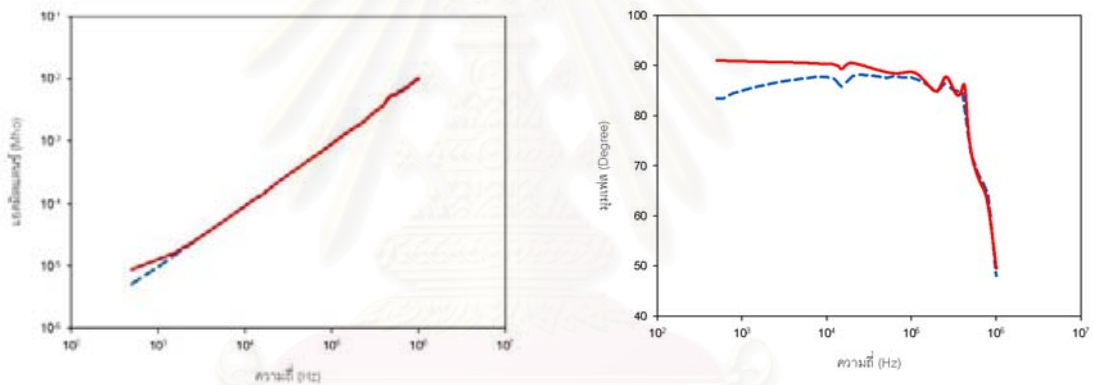


3.4.3.1 การเปรียบเทียบค่า  $Y_m$  ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์  
ด้วยองค์ประกอบแบบแพสซีฟ



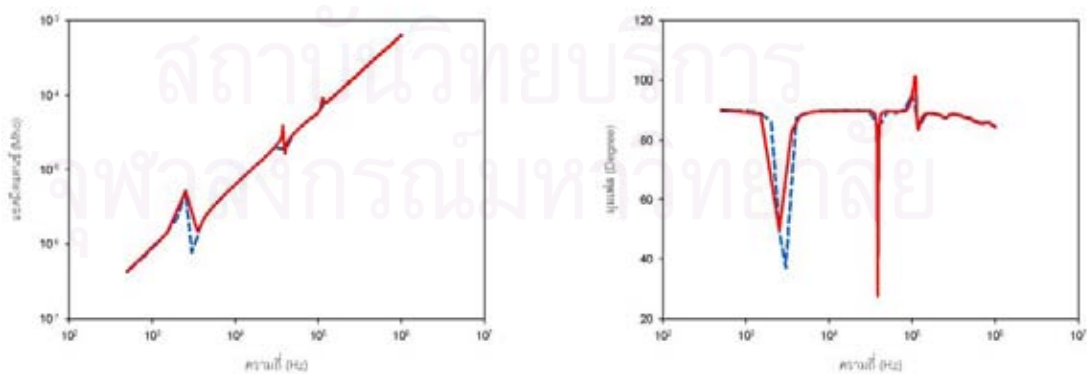
(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.44 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง A

(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.45 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง B

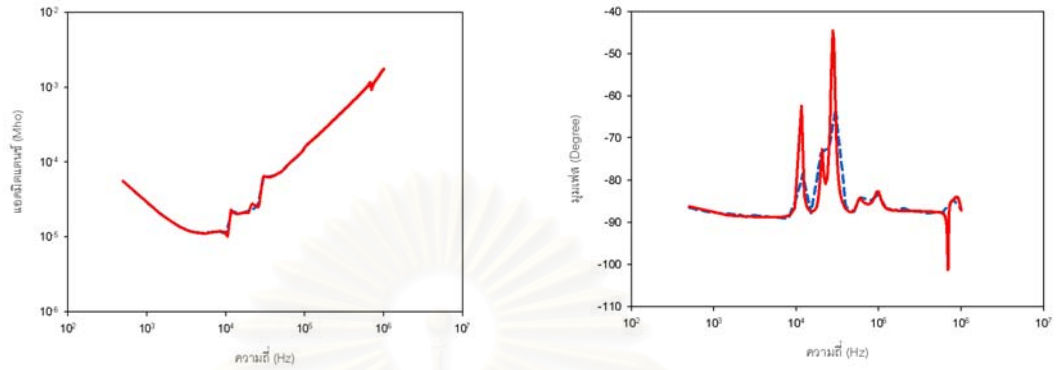
(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.46 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_m$ ) หม้อแปลง C

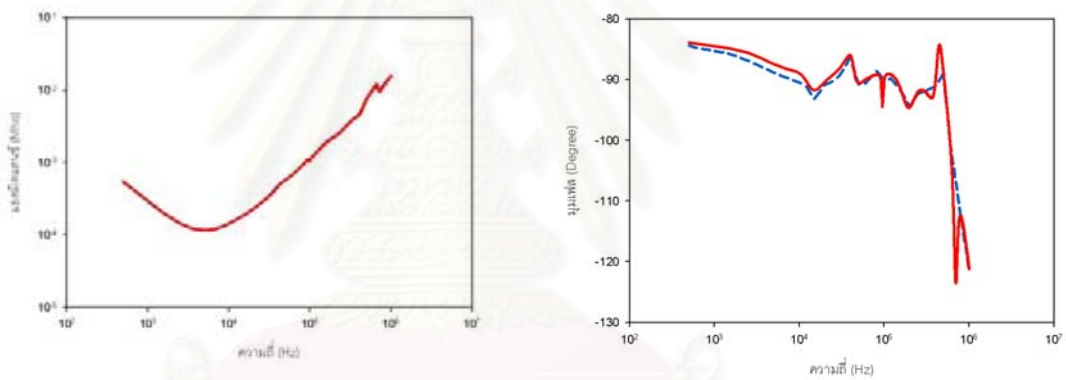
--- ค่าจากการวัด      — ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

3.4.3.2 การเปรียบเทียบค่า  $Y_{s1}$  ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์  
ด้วยองค์ประกอบแบบแพสซีฟ



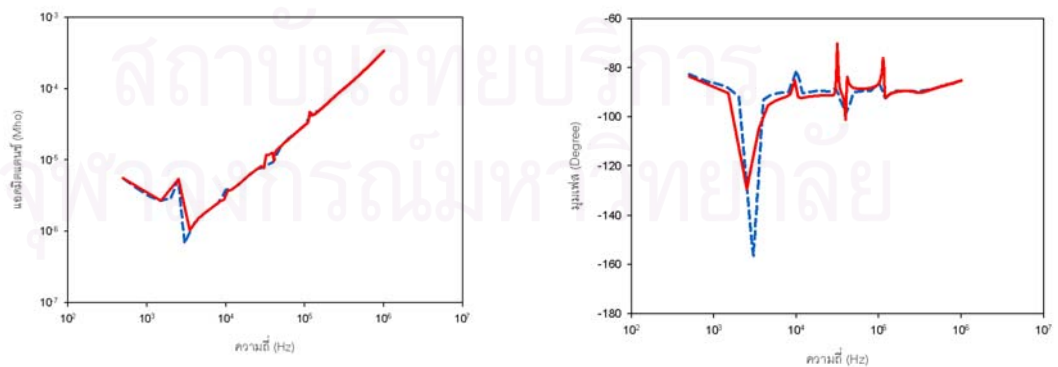
(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.47 การเปรียบเทียบแอดมิแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง A

(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.48 การเปรียบเทียบแอดมิแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง B

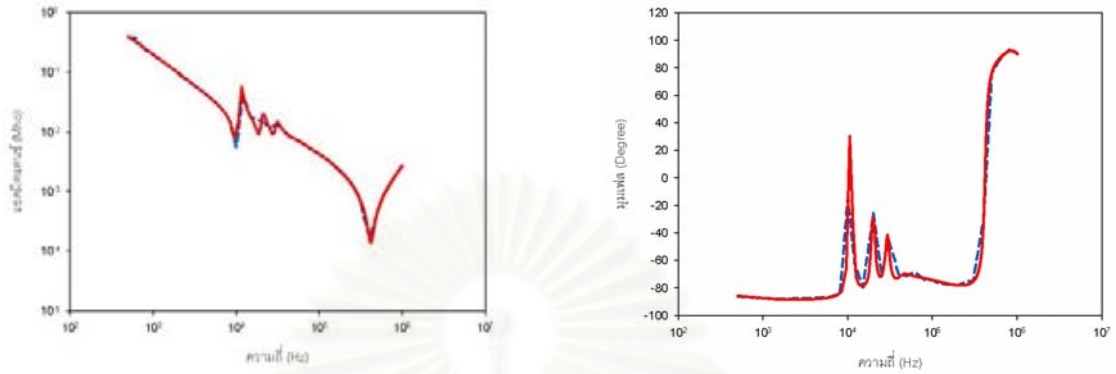
(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.49 การเปรียบเทียบแอดมิแตนซ์ ( $Y_{s1}$ ) หม้อแปลง C

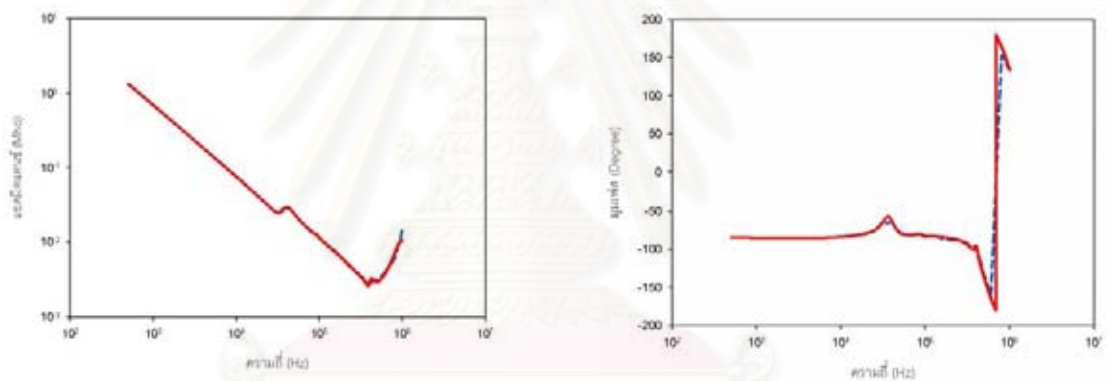
--- ค่าจากการวัด      — ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

3.4.3.3 การเปรียบเทียบค่า  $Y_{s2}$  ที่ได้จากการวัดกับค่าที่ได้จากการสังเคราะห์  
ด้วยองค์ประกอบแบบแพสซีฟ



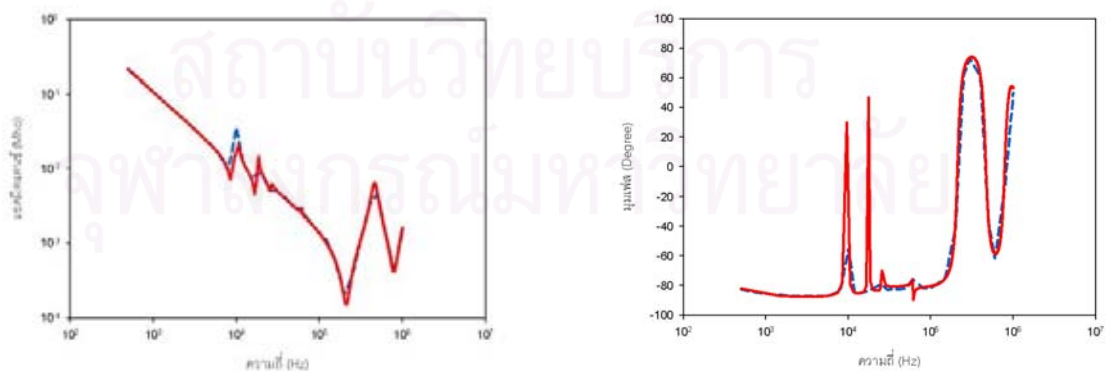
(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.50 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง A

(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

รูปที่ 3.51 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง B

(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

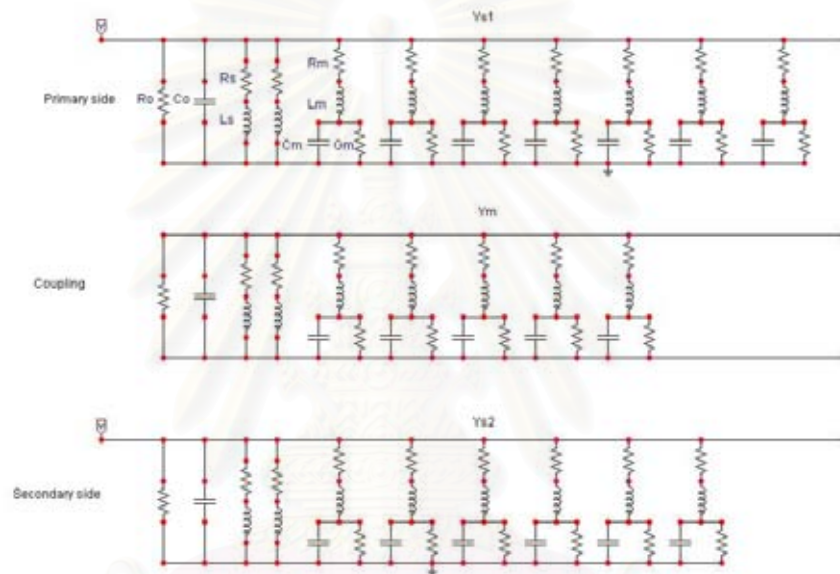
รูปที่ 3.52 การเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์ ( $Y_{s2}$ ) หม้อแปลง C

--- ค่าจากการวัด      — ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

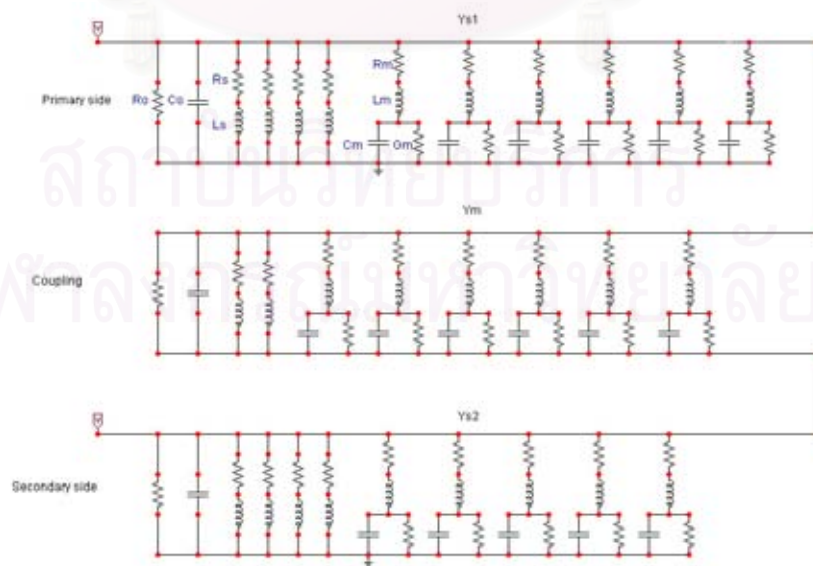
ผลการเปรียบเทียบแอดมิตแตนซ์  $Y_m$ ,  $Y_{s1}$  และ  $Y_{s2}$  ระหว่างค่าจากการวัดกับค่าจากการสังเคราะห์ด้วยองค์ประกอบแบบแพสซีฟตามรูปที่ 3.44 – 3.52 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในบางย่านความถี่ แต่เมื่อพิจารณาช่วงความถี่โดยรวมพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

### 3.4.4 วงจรสมมูลแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์สำหรับโปรแกรม ATP/EMTP

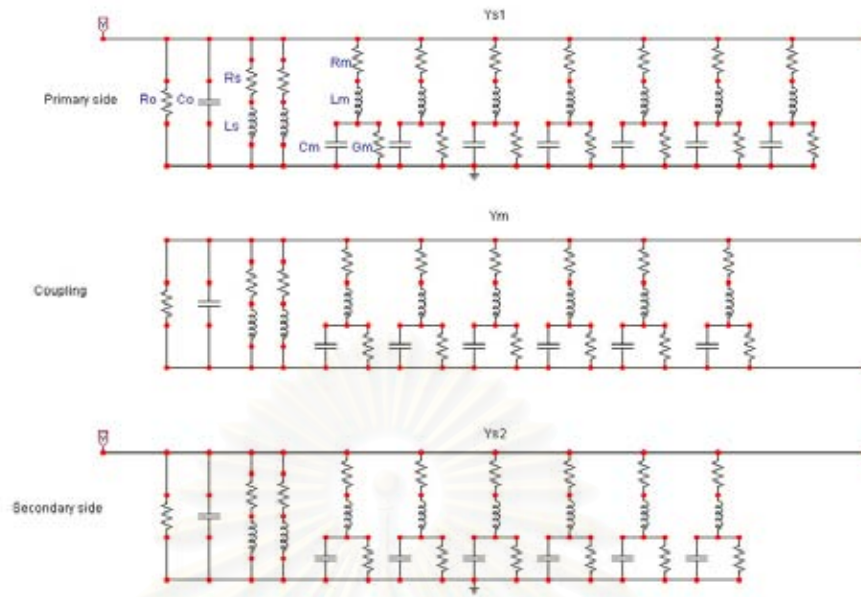
ค่าพารามิเตอร์องค์ประกอบแบบแพสซีฟตามตารางที่ 3.24 – 3.26 ของหม้อแปลง A, B และ C เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองพายด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ได้ตามรูปที่ 3.53 – 3.55



รูปที่ 3.53 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง A



รูปที่ 3.54 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง B

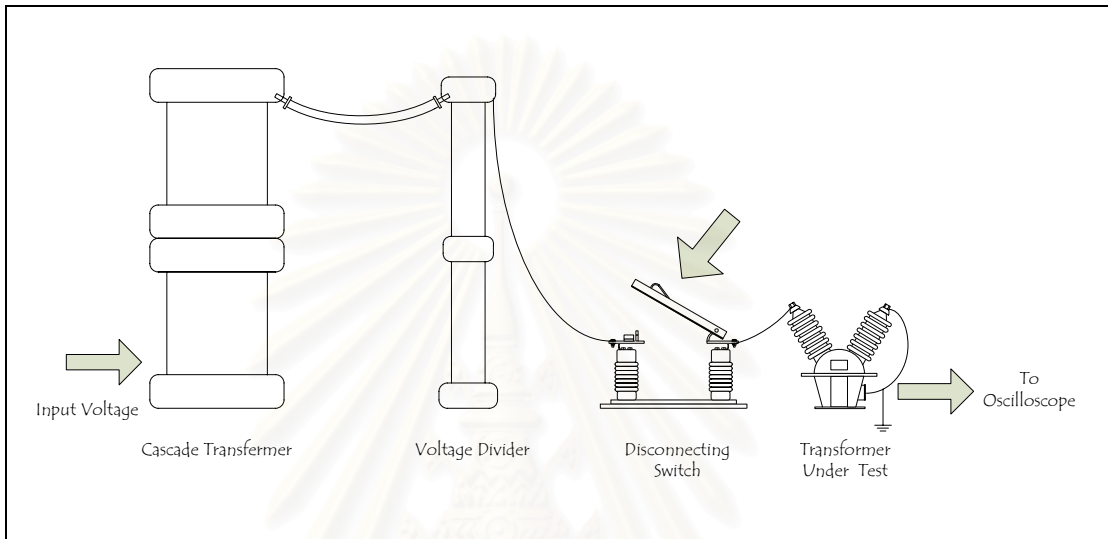


รูปที่ 3.55 แบบจำลองหม้อแปลงสำหรับหม้อแปลง C

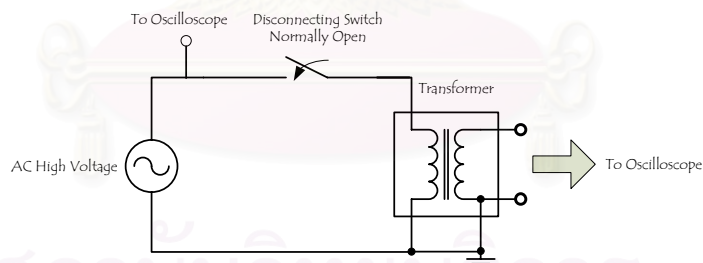
## บทที่ 4

### การวัดผลตอบสนองของหม้อแปลง

#### 4.1 การศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงด้วยแรงดันสวิทซ์เชิงเสิร์จ

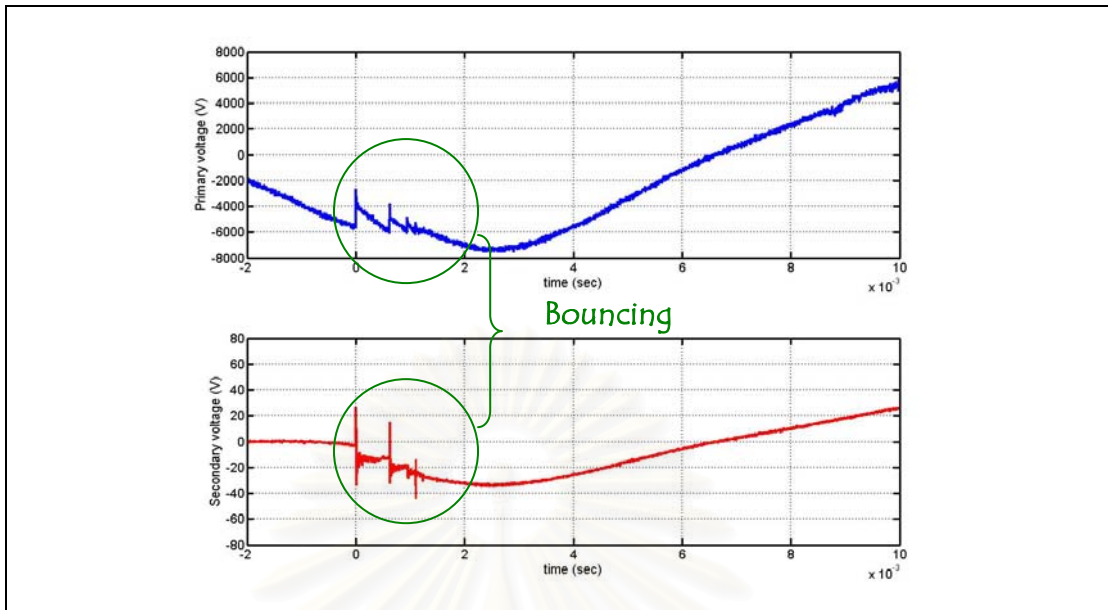


รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาผลของสวิทซ์เชิงเสิร์จที่มีต่อหม้อแปลงจากการสับสวิทซ์ตัดตอน

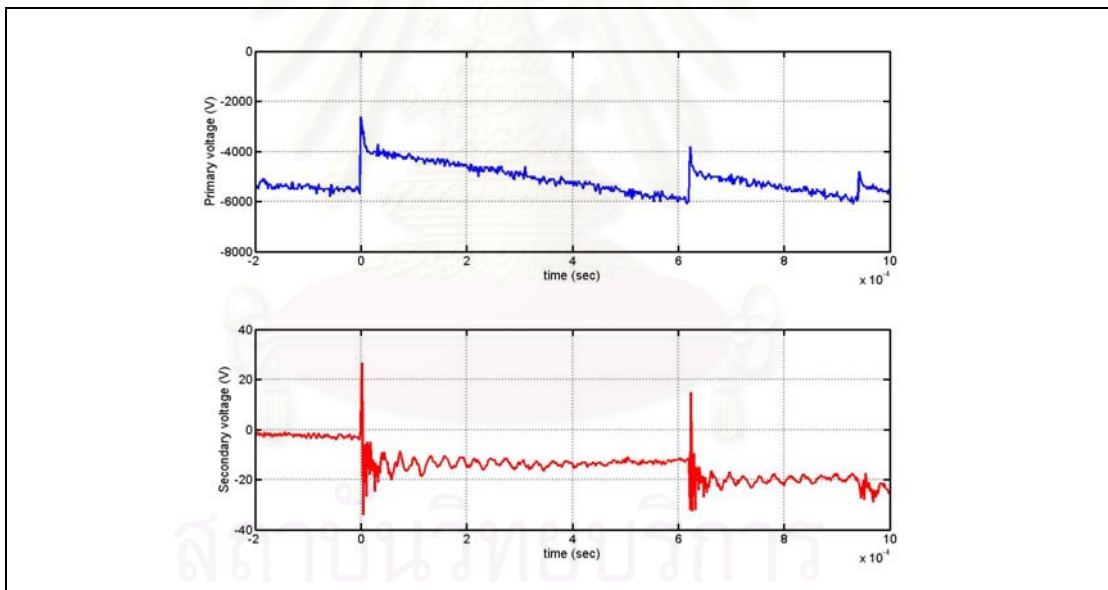


รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลเพื่อศึกษาผลของสวิทซ์เชิงเสิร์จ

ในรูปที่ 4.1 เป็นการต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบหม้อแปลงด้วยแรงดันสวิทซ์เชิงเสิร์จ และวงจรสมมูลสามารถแสดงตามรูปที่ 4.2 จากวงจรสมมูลเมื่อสับสวิทซ์ตัดตอน รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้ ณ ตำแหน่งก่อนสวิทซ์ตัดตอน และตำแหน่งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจะได้ผลดังรูปที่ 4.3 โดยขณะที่มีการปิดหน้าสัมผัสของสวิทซ์ตัดตอนจะเกิดการสั้นทางกล ซึ่งจะส่งผลให้เกิดบริเวณที่มีการแกว่งของรูปคลื่นแรงดัน (bouncing) โดยเมื่อทำการขยายรูปคลื่นแรงดันในบริเวณที่เกิดการแกว่ง จะได้ผลตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งก่อนสวิตช์ตัดตอนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (บน) และรูปคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ล่าง)



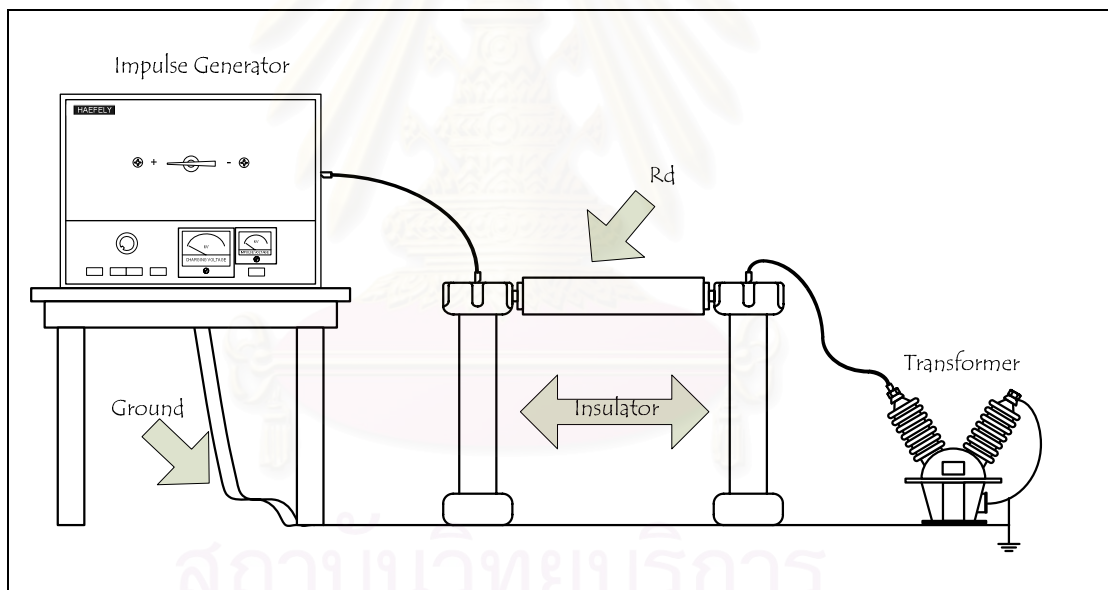
รูปที่ 4.4 รูปขยายคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งก่อนสวิตช์ตัดตอนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (บน) และรูปขยายคลื่นแรงดัน ณ ตำแหน่งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (ล่าง)

รูปขยายคลื่นแรงดันที่เกิดการแกว่งตามรูปที่ 4.4 พบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะคล้ายแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งเมื่อแรงดันดังกล่าวส่งถ่ายไปยังขดลวดทางด้านทุติยภูมิจะทำให้เกิดแรงดันเสิร์จที่มีลักษณะของรูปคลื่นเป็นไปตามผลตอบสนองในย่านทรานเซียนท์ที่ขึ้นกับลักษณะเฉพาะของหม้อแปลง จากการทดลองพบว่าแรงดันสวิตช์ซึ่งเสิร์จ อันเนื่องมาจากการสับสวิตช์ตัดตอน สามารถนำหลักการของทฤษฎีข้อนี้มาอธิบายโดยแรงดันที่

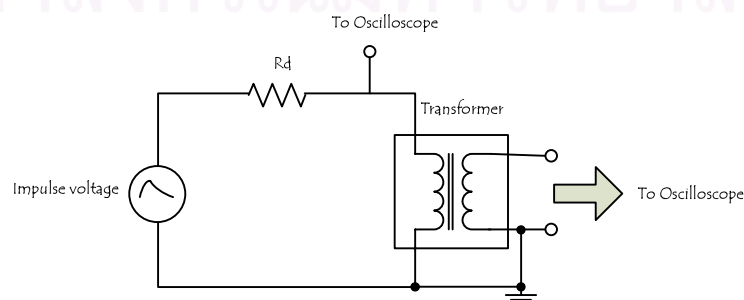
เกิดขึ้นที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิจะประกอบไปด้วยแรงดันในส่วนสภาวะคงตัว และแรงดันสภาวะชั่วคราว ดังนั้นการเกิดแรงดันเกินที่ทำให้มีค่ายอดสูงสุดเนื่องมาจากสวิตช์ซึ่งเสิร์จสามารถคิดผลตอบแทนในสภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นที่ขั้วขดลวดทุติยภูมิรวมกับผลตอบแทนในสภาวะคงตัวซึ่งเป็นตำแหน่งเวลาที่เกิดค่ายอดสูงสุดได้

#### 4.2 การศึกษาผลตอบแทนของหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนค่าขนาด

ผลตอบแทนของหม้อแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าขนาดต่างๆ ทำโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์เข้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งระหว่างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงมีการต่อความต้านทาน  $R_d$  ขนาด 462  $\Omega$  ตามรูปที่ 4.5 จากนั้นวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วปฐมภูมิของหม้อแปลง และวัดแรงดันเสิร์จซึ่งเป็นผลตอบแทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ขั้วทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยวงจรสมมูลของรูปที่ 4.5 แสดงได้ตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การต่ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาผลแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลเพื่อศึกษาผลของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อหม้อแปลง



แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลง A, B และ C สร้างโดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ s ของบริษัท HAEFELY โดยการทดสอบจะปรับค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับ 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเสิร์จเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดแรงดันอิมพัลส์ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ทางด้านปฐมภูมิและแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่วัดได้ทั้งหมดจะผ่านกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวน (denoise) พิจารณาตามภาคผนวก ง โดยสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.7 - 4.9 และพิจารณาผลของหม้อแปลงแต่ละตัวได้ดังนี้

#### หม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดของแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV คือ 155, 320 และ 480V โดยอัตราส่วนแรงดันด้านปฐมภูมิต่อแรงดันด้านทุติยภูมิมีค่า 64.5, 62.5 และ 62.5 ตามลำดับ
- a.2 รูปร่างของแรงดันเสิร์จจะมีลักษณะของการกวัดแกว่งในช่วงบวก และมีการหน่วงของขนาดโดยจะมีค่าลดลงตามลำดับ

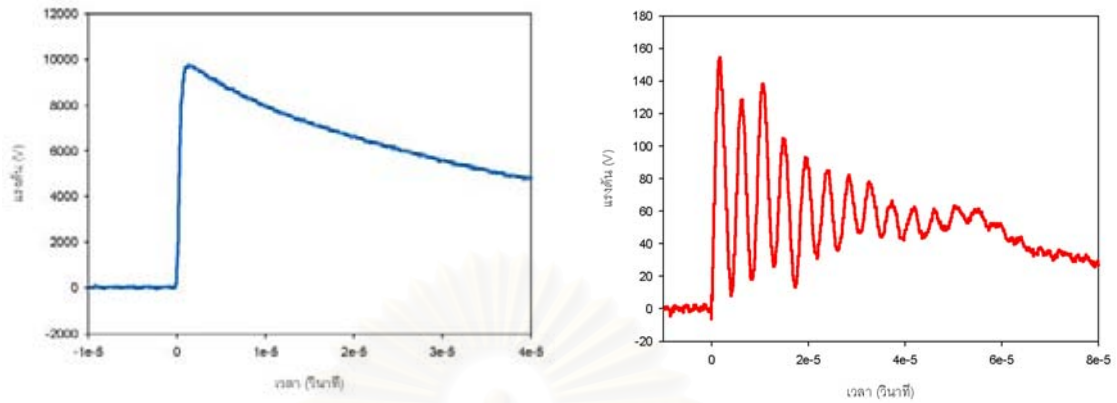
#### หม้อแปลง B

- b.1 ค่ายอดของแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV คือ 517, 1018 และ 1580 V โดยอัตราส่วนแรงดันด้านปฐมภูมิต่อแรงดันด้านทุติยภูมิมีค่า 19.3, 19.6 และ 19 ตามลำดับ
- b.2 รูปร่างของแรงดันเสิร์จจะมีลักษณะของการลดทอน และมีการกวัดแกว่งของสัญญาณแบบไม่สมมาตรโดยจะมีค่าในช่วงบวกมากกว่าช่วงลบ

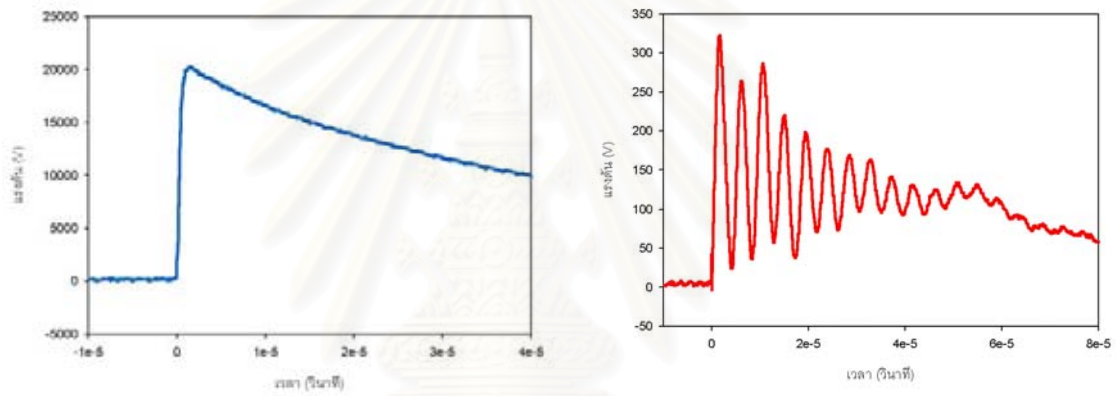
#### หม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดของแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV คือ 254, 580 และ 730 V โดยอัตราส่วนแรงดันด้านปฐมภูมิต่อแรงดันด้านทุติยภูมิมีค่า 39, 35 และ 41 ตามลำดับ
- c.2 รูปร่างของแรงดันเสิร์จจะมีลักษณะของการลดทอน และมีการกวัดแกว่งแบบไม่สมมาตร เช่นเดียวกับกรณีของหม้อแปลง B แต่ในช่วงวัฏจักรแรกจะสังเกตเห็นการยุบตัวของแรงดันทั้งในช่วงบวก และช่วงลบ

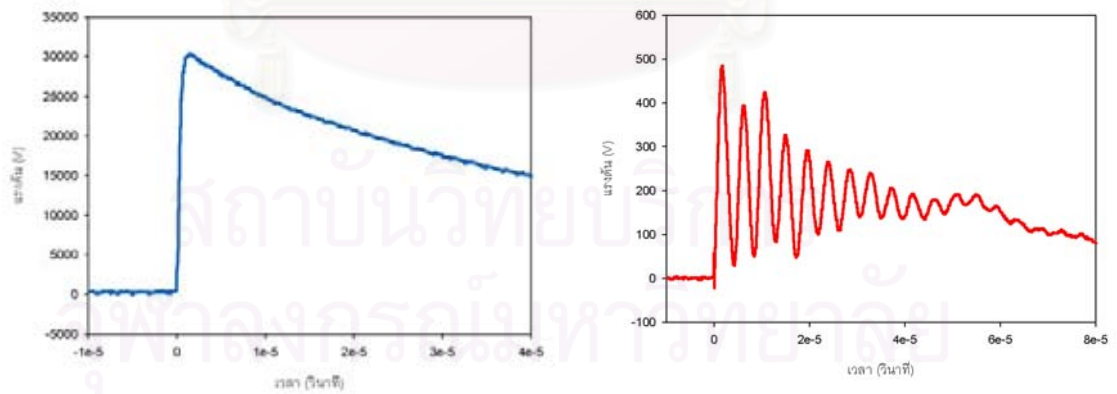
จากข้อมูลข้างต้นขนาดค่ายอดของแรงดันเสิร์จที่วัดได้ของหม้อแปลง A, B และ C จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเพิ่มของขนาดจาก 10, 20 และ 30 kV พบว่าอัตราส่วนของค่ายอดแรงดันด้านปฐมภูมิต่อค่ายอดแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่าใกล้เคียงกัน ในทุกระดับของการป้อนแรงดันอิมพัลส์



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

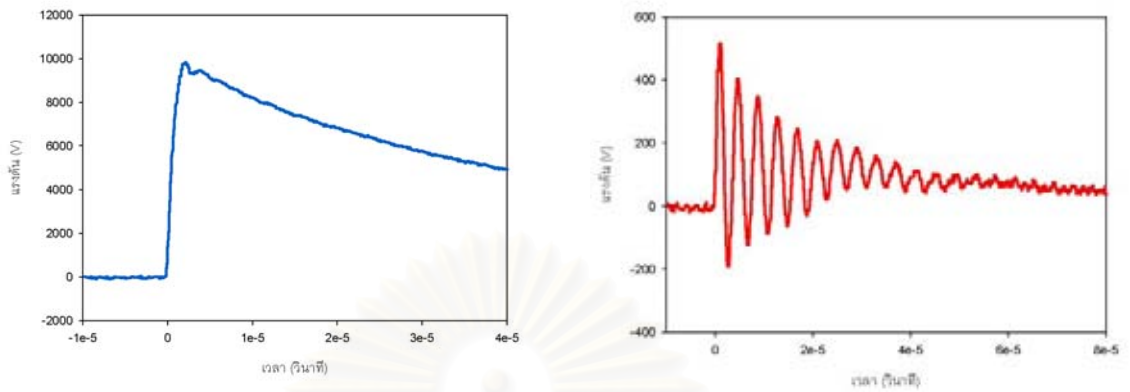


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

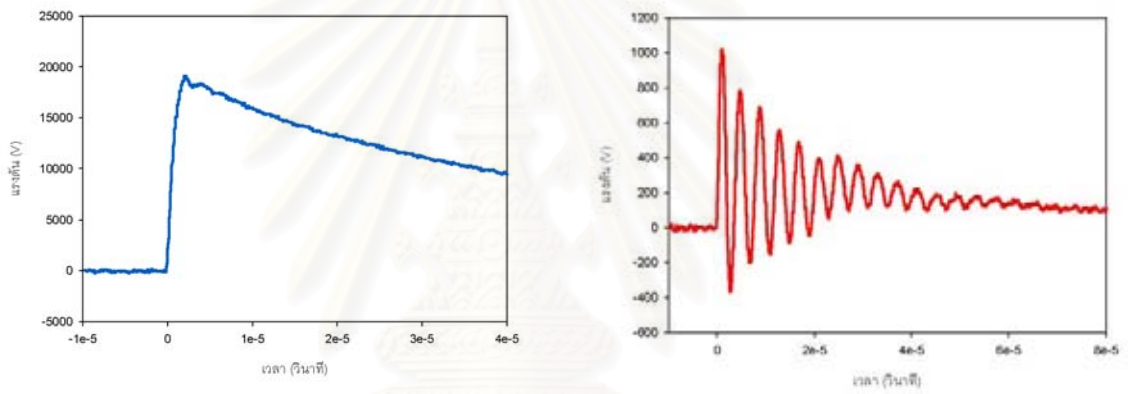


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

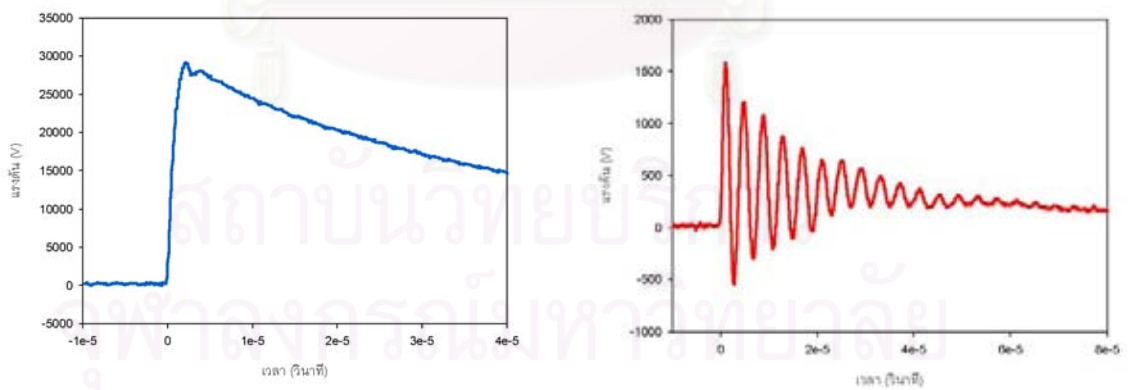
รูปที่ 4.7 ผลการวัดขนาดแรงดันอิมพัลส์ด้านปฐมภูมิ (ซ้ายมือ) และแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิ (ขวามือ) ของหม้อแปลง A



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

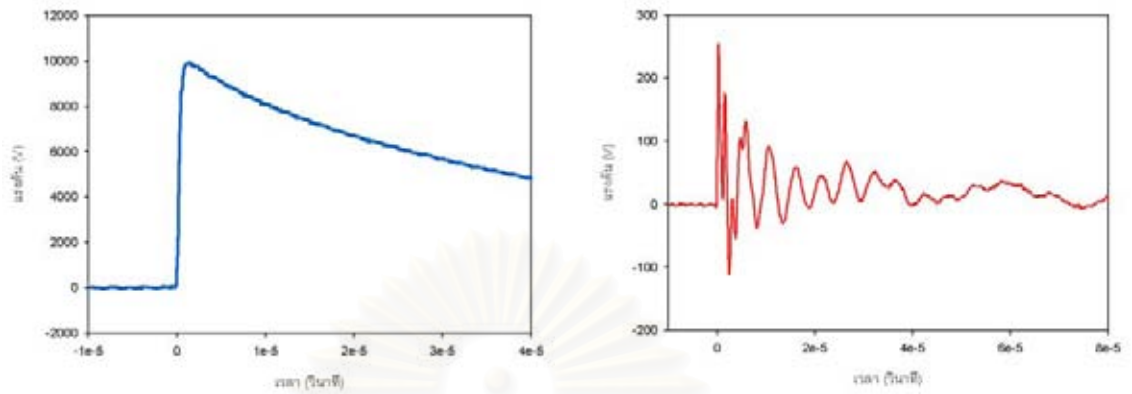


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

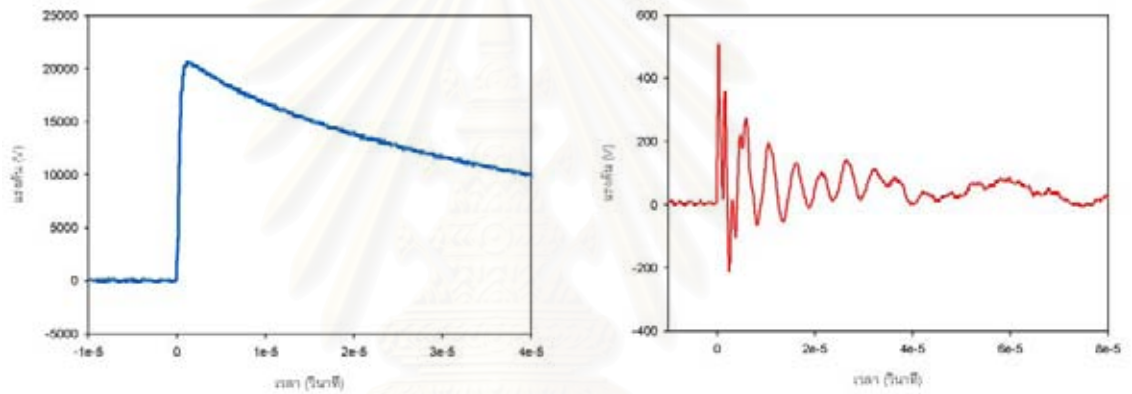


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

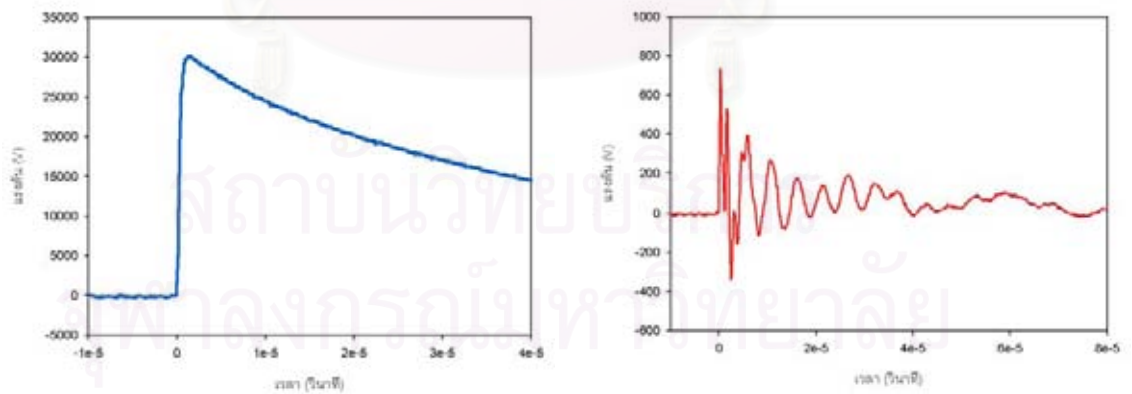
รูปที่ 4.8 ผลการวัดขนาดแรงดันอิมพัลส์ด้านปฐมภูมิ (ซ้ายมือ) และแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิ (ขวามือ) ของหม้อแปลง B



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

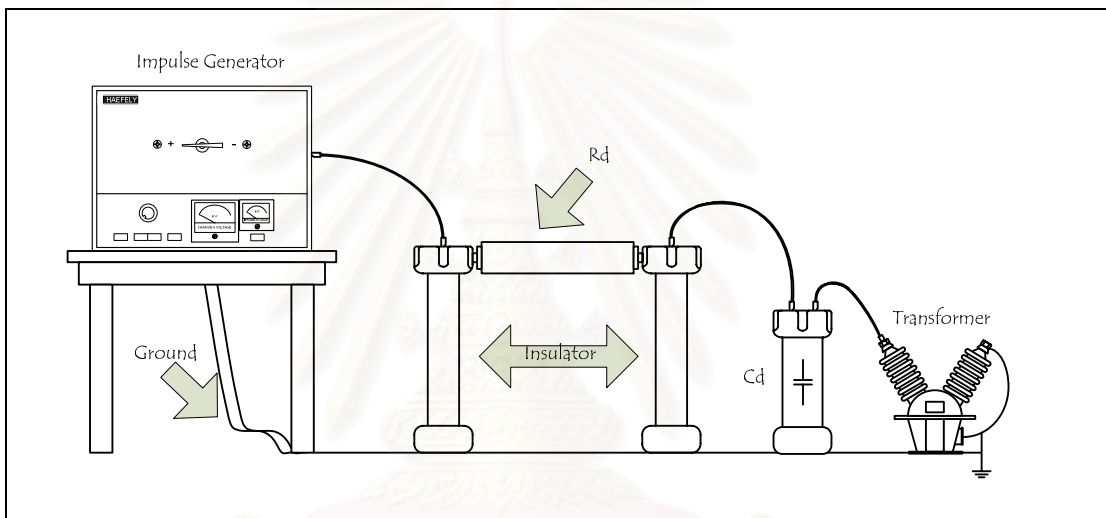


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

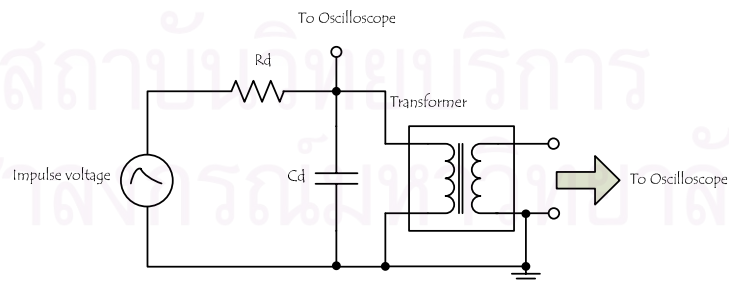
รูปที่ 4.9 ผลการวัดขนาดแรงดันอิมพัลส์ด้านปฐมภูมิ (ซ้ายมือ) และแรงดันเล็ร็จทางด้านทุติยภูมิ (ขวามือ) ของหม้อแปลง C

### 4.3 การศึกษาผลตอบสนองของหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่น

การศึกษาค้นคว้าผลตอบสนองของหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ในหัวข้อที่ 4.2 แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ แต่เวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ยังคงมีค่าคงที่เท่ากับ  $1.2\mu\text{s}$  ซึ่งการศึกษาค้นคว้าของแรงดันอิมพัลส์จากการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ สามารถทำได้โดยต่อตัวเก็บประจุค่า  $1000\text{ pF}$  ระหว่าง  $R_d$  และหม้อแปลงที่ต้องการวัดตามรูปที่ 4.10 โดยวงจรสมมูลแสดงตามรูปที่ 4.11 สำหรับระดับแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการศึกษาจะมีค่าคงที่  $10\text{ kV}$  ซึ่งผลที่ได้จากการวัดจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดก่อนมีการต่อตัวเก็บประจุ  $1000\text{ pF}$

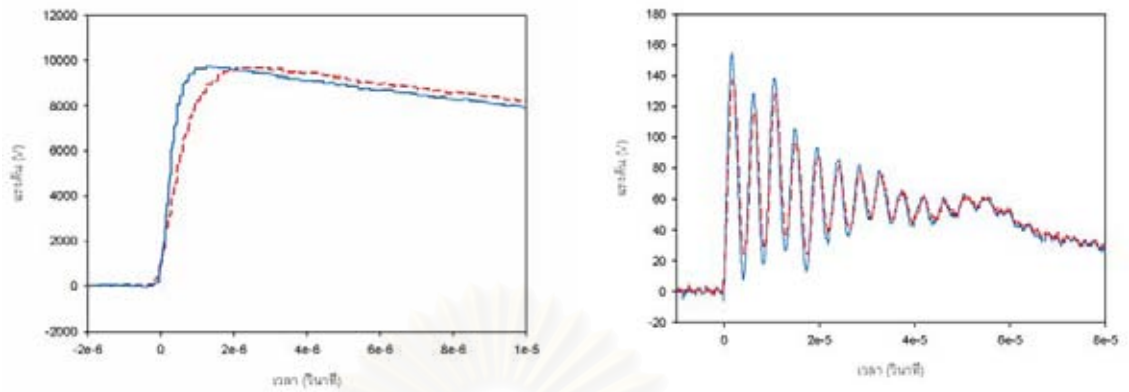


รูปที่ 4.10 การต่ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงเพื่อศึกษาผลแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่น

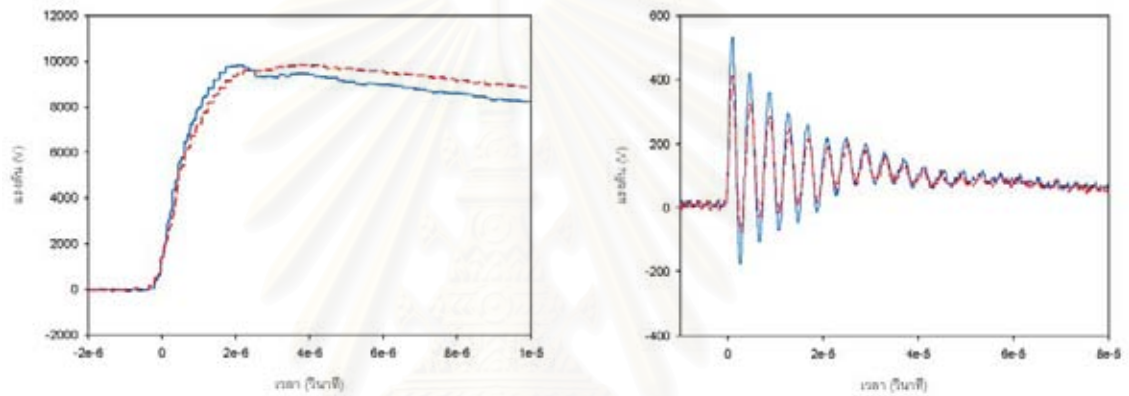


รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลเพื่อศึกษาผลแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่น

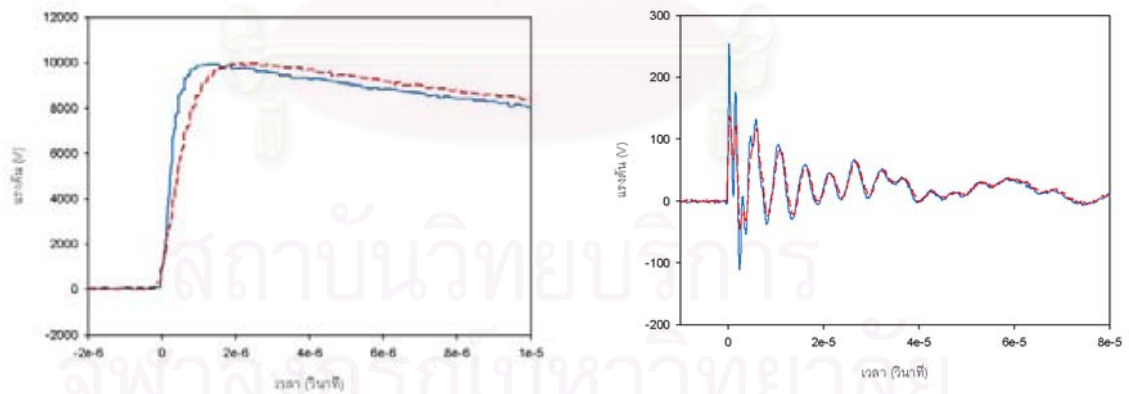
สำหรับผลการวัดแรงดันอิมพัลส์ และแรงดันเสิร์จทั้งก่อน และหลังการต่อตัวเก็บประจุของหม้อแปลง A, B และ C ได้ผลตามรูปที่ 4.12 ดังนี้



(ก) หม้อแปลง A



(ข) หม้อแปลง B



(ค) หม้อแปลง C

———— ค่าวัดก่อนการต่อตัวเก็บประจุ      - - - - - ค่าวัดหลังการต่อตัวเก็บประจุ

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการวัดแรงดันอิมพัลส์ (ซ้ายมือ) และแรงดันเลิร์จ (ขวามือ) ที่มีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ข้อมูลในรูปที่ 4.12 สามารถแยกผลการพิจารณาแต่ละหม้อแปลงได้ผลดังนี้

หม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.12 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$
- a.2 เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ก่อนการต่อตัวเก็บประจุวัดได้  $1.2\mu\text{s}$  ในขณะที่เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์หลังการต่อตัวเก็บประจุวัดได้  $2\mu\text{s}$
- a.3 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จ เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่นจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยจะมีการเลื่อนของมุมเฟสอยู่บ้าง

หม้อแปลง B

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.3 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$
- b.2 เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ก่อนการต่อตัวเก็บประจุวัดได้  $2\mu\text{s}$  ในขณะที่เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์หลังการต่อตัวเก็บประจุวัดได้  $3.8\mu\text{s}$
- b.3 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จ เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่นจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยจะมีการเลื่อนของมุมเฟสอยู่บ้าง

หม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.85 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2.1\mu\text{s}$
- c.2 เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ก่อนการต่อตัวเก็บประจุวัดได้  $1.2\mu\text{s}$  ในขณะที่เวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์หลังการต่อตัวเก็บประจุวัดได้  $2.1\mu\text{s}$
- c.3 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จ เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนของเวลาหน้าคลื่นจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยจะมีการเลื่อนของมุมเฟสอยู่บ้าง

ผลการศึกษาการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อแรงดันเสิร์จของหม้อแปลง A, B และ C พบว่าเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์จะทำให้ค่ายอดแรงดันเสิร์จมีค่าลดลง รวมทั้งมีการเลื่อนมุมเฟส ซึ่งสรุปได้ว่าค่ายอดแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแปรผกผันกับเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการจำลอง

ผลการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงตามบทที่ 3 ต้องมีการเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงในสถานะชั่วคราวตามบทที่ 4 ซึ่งก่อนการเปรียบเทียบจะต้องสร้างแบบจำลองของแรงดันอิมพัลส์ เพื่อป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิของแบบจำลอง โดยการสร้างแบบจำลองของแรงดันอิมพัลส์สามารถทำได้ดังนี้

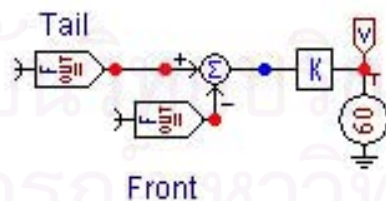
#### 5.1 แบบจำลองของแรงดันอิมพัลส์

วงจรสมมูลของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งเป็นสัญญาณป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิของแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว สามารถสร้างโดยใช้สมการดังนี้

$$U(t) = k U_0 (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (5.1)$$

เมื่อ	$\alpha_1$	เป็นค่าคงที่เวลาหลังคลื่น
	$\alpha_2$	เป็นค่าคงที่เวลาหน้าคลื่น
	$U_0$	เป็นค่ายอดแรงดันอิมพัลส์
	$k$	เป็นค่าคงที่ที่ใช้ในการปรับค่ายอด

จากสมการ (5.1) สามารถสร้างวงจรสมมูลด้วยโปรแกรม ATP/EMTP ได้ดังต่อไปนี้

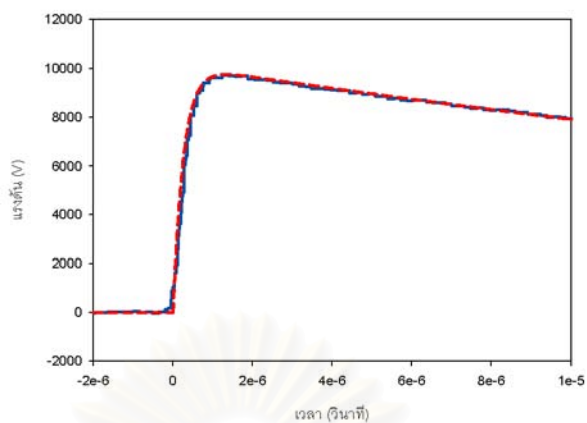


รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างโดยอุปกรณ์ TACS

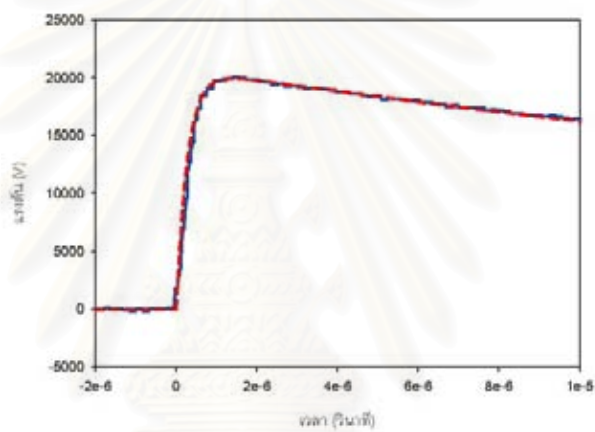
#### 5.2 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากการวัดและการจำลอง

แรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการสร้างตามรูปที่ 5.1 เพื่อความถูกต้องจึงได้มีการนำผลการจำลองแรงดันอิมพัลส์เปรียบเทียบกับผลแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยสามารถวาดกราฟเปรียบเทียบได้ผลดังรูปที่ 5.2 – 5.4

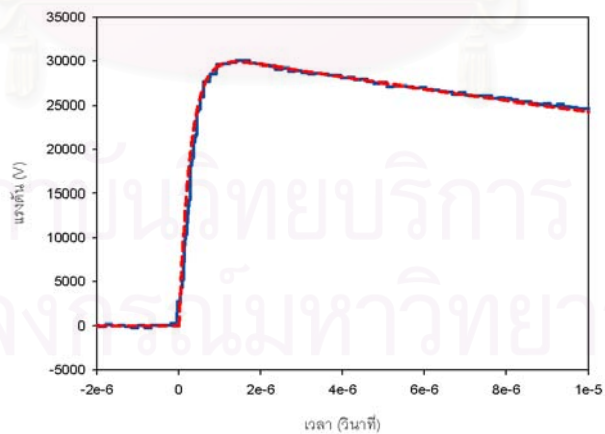




(ก) ขนาดแรงดัน 10 kV



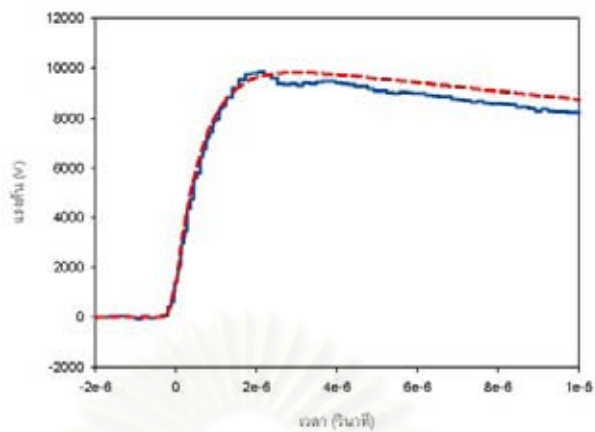
(ข) ขนาดแรงดัน 20 kV



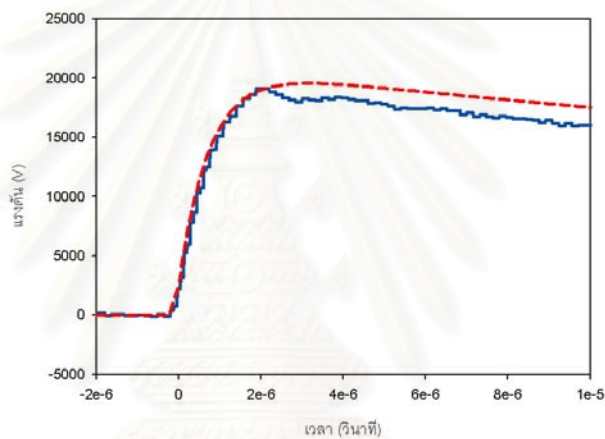
(ค) ขนาดแรงดัน 30 kV

— ค่าจากการวัด      - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

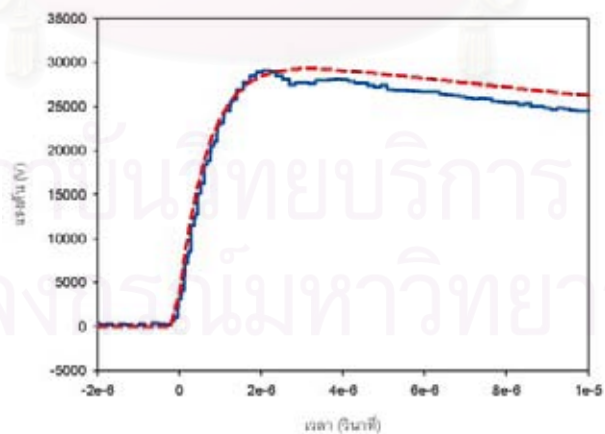
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัดกับผลการจำลองของหม้อแปลง A



(ก) ขนาดแรงดัน 10 kV



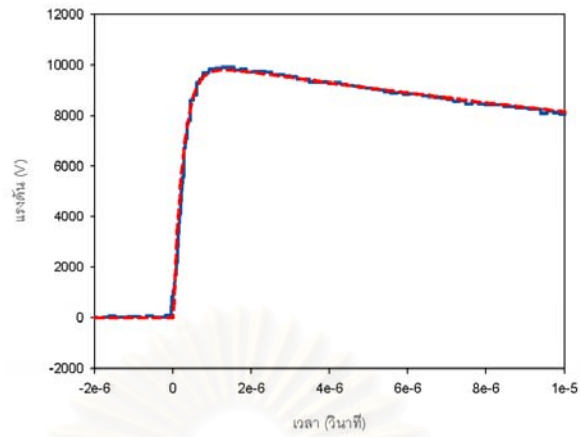
(ข) ขนาดแรงดัน 20 kV



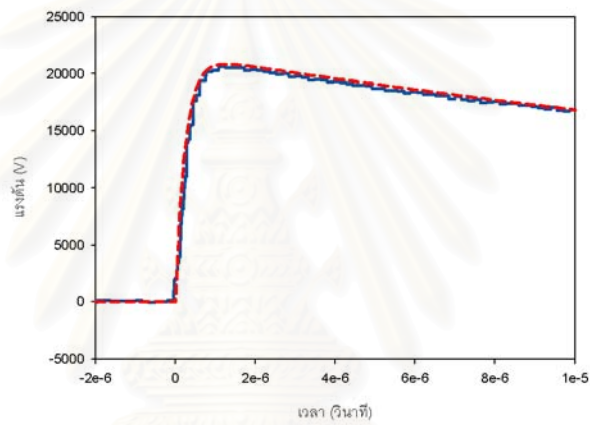
(ค) ขนาดแรงดัน 30 kV

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

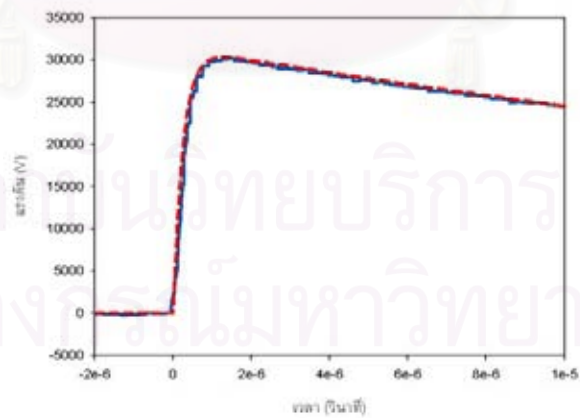
รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัดกับผลการจำลองของหม้อแปลง B



(ก) ขนาดแรงดัน 10 kV



(ข) ขนาดแรงดัน 20 kV



(ค) ขนาดแรงดัน 30 kV

— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัดกับผลการจำลองของหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์กับผลการสร้างด้วยแบบจำลอง แสดงตามรูปที่ 5.2 – 5.4 โดยแยกพิจารณาแต่ละหม้อแปลงได้ดังนี้

หม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากผลการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ระดับแรงดัน 10, 20 และ 30 kV มีค่าใกล้เคียงกัน
- a.2 เวลาค้นคืนของแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัด และผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันโดยอ่านได้  $1.2\mu\text{s}$
- a.3 เวลาหลังคืนของแรงดันอิมพัลส์จากผลการจำลอง พบว่ามีอัตราการลดลงที่มีความใกล้เคียงกับผลการวัด

หม้อแปลง B

- b.1 ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากผลการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ระดับแรงดัน 10, 20 และ 30 kV มีค่าใกล้เคียงกัน
- b.2 เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งควรจะมีหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  แต่เวลาค้นคืนของแรงดันอิมพัลส์ที่วัดได้มีเวลาค้นคืน  $2\mu\text{s}$  อาจเนื่องมาจากผลของโหลด (Loading effect) โดยผลการจำลองเวลาค้นคืนมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัด
- b.3 เวลาหลังคืนของแรงดันอิมพัลส์จากผลการจำลองมีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกับผลการวัด แต่จะไม่มีลักษณะการยุบตัวของสัญญาณเหมือนแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัด

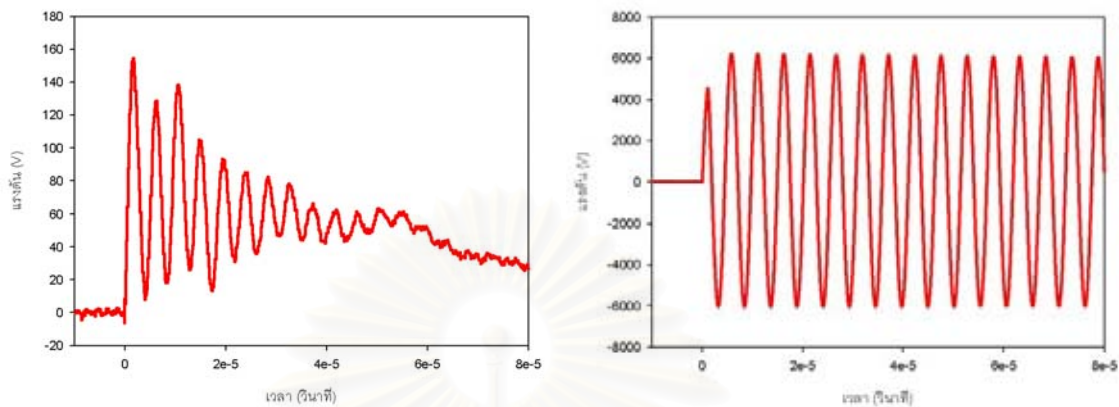
หม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากผลการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ระดับแรงดัน 10, 20 และ 30 kV มีค่าใกล้เคียงกัน
- c.2 เวลาค้นคืนของแรงดันอิมพัลส์จากผลการวัด และผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอ่านได้  $1.2\mu\text{s}$
- c.3 เวลาหลังคืนของแรงดันอิมพัลส์จากผลการจำลอง พบว่ามีอัตราการลดลงที่มีความใกล้เคียงกับผลการวัด

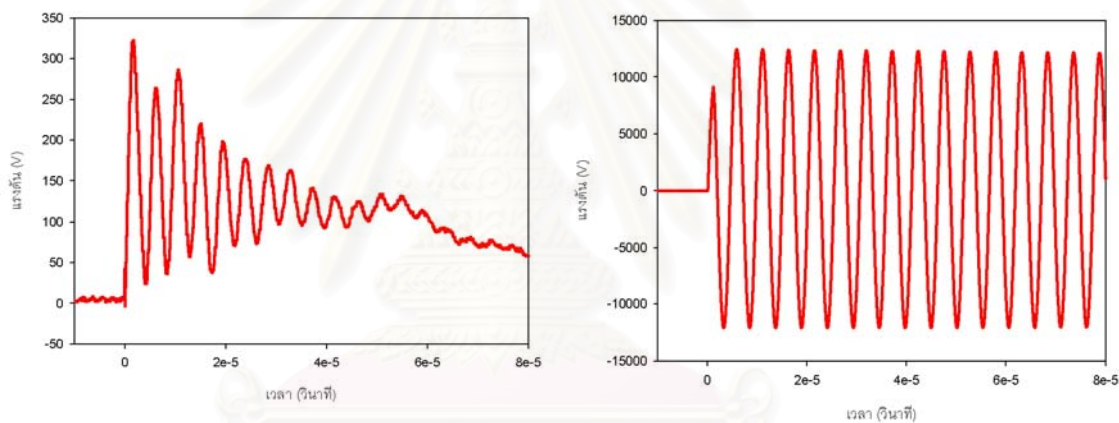
### 5.3 การศึกษาผลแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงต่อการเปลี่ยนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์

แบบจำลองแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างตามหัวข้อ 5.2 ใช้เพื่อป้อนเข้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิของแบบจำลองหม้อแปลง เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ทางด้านปฐมภูมิซึ่งมีเวลาค้นคืนคงที่ ต่อการเปลี่ยนค่ายอดและรูปร่างคลื่นแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลง โดยค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการศึกษามีค่า 10, 20 และ 30 kV

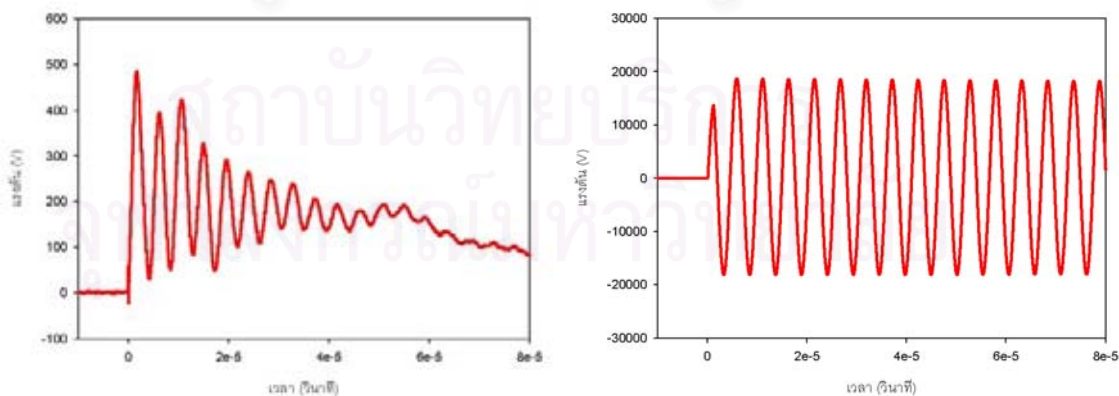
### 5.3.1 ผลการเปลี่ยนค่ายอดสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

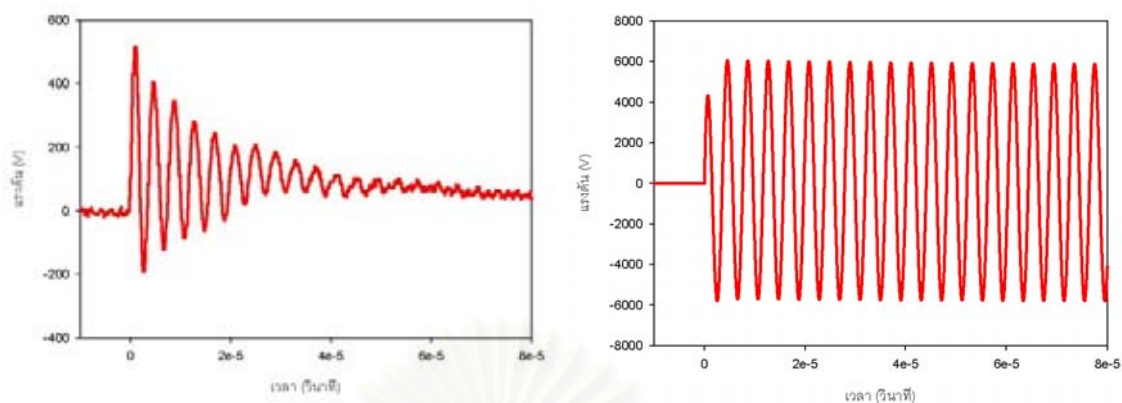


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

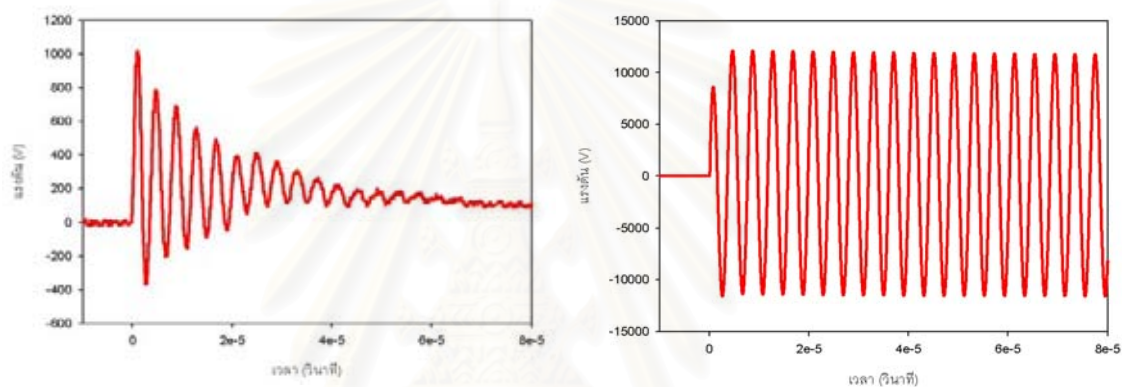


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

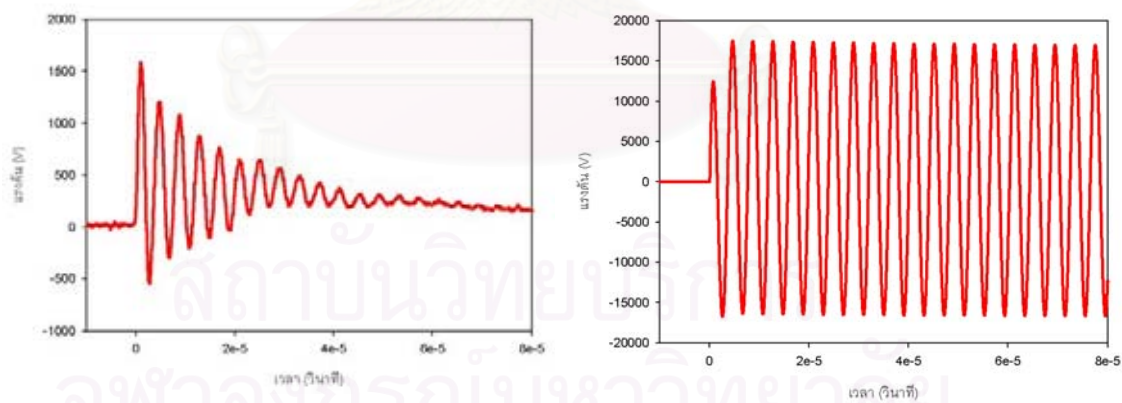
รูปที่ 5.5 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สำหรับหม้อแปลง A



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

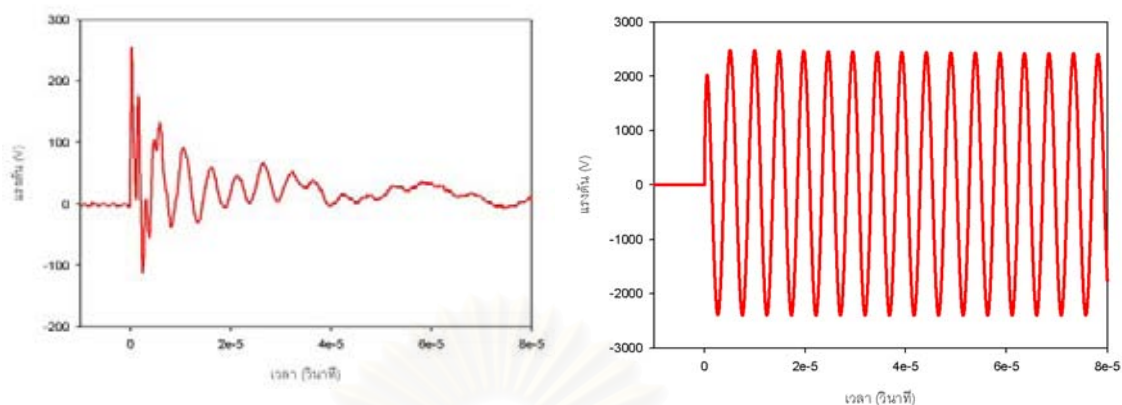


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

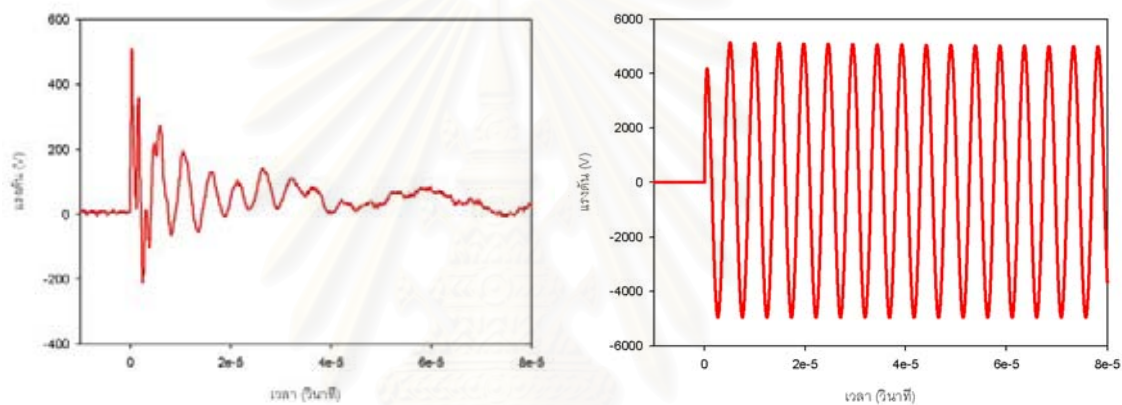


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

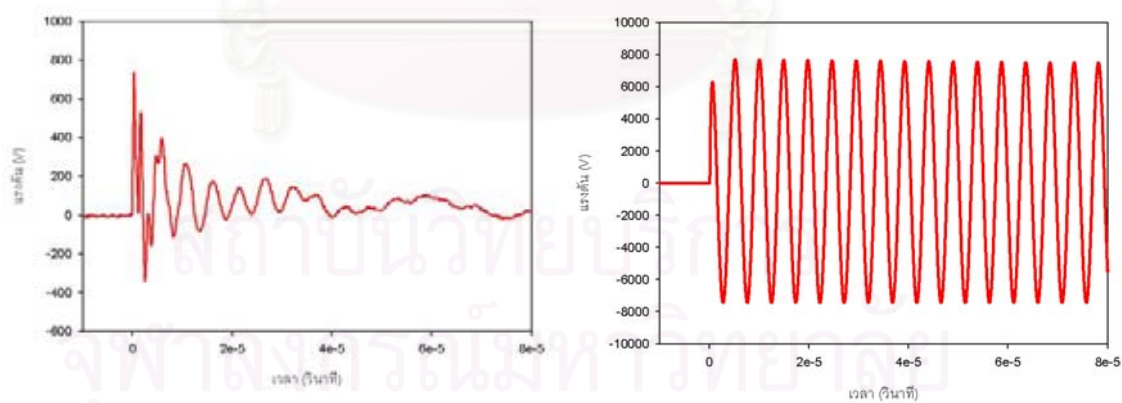
รูปที่ 5.6 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สำหรับหม้อแปลง B



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

รูปที่ 5.7 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สำหรับหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองกับผลจากการวัดตามรูปที่ 5.5 – 5.7 สามารถแยกพิจารณาแต่ละหม้อแปลงได้ดังนี้

#### หม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 40, 37.5 และ 38.5 เท่า เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- a.2 รูปคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองปราศจากการลดทอนของสัญญาณ โดยมีการกวัดแกว่งทั้งในย่านบวกและลบ ในขณะที่ผลการวัดจะมีการลดทอนของสัญญาณ แต่มีการกวัดแกว่งในย่านบวกเท่านั้น
- a.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งของผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัด

#### หม้อแปลง B

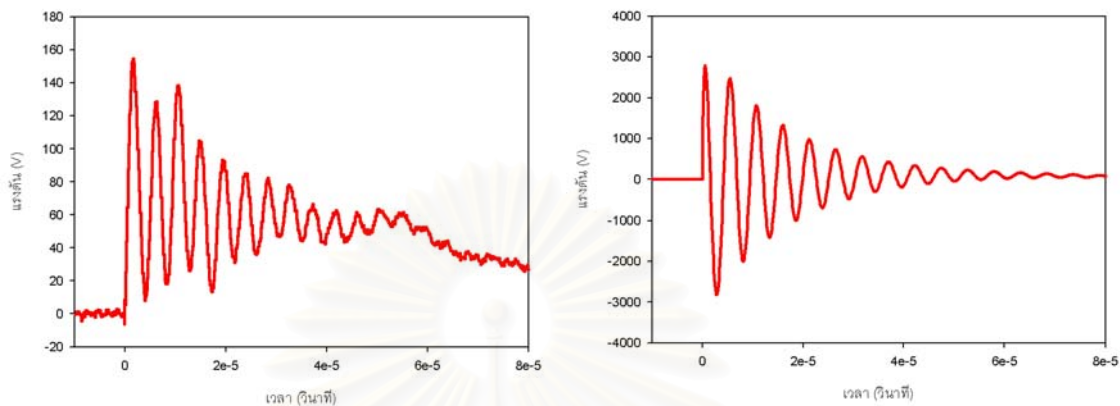
- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 11.5, 12 และ 11.3 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- b.2 รูปคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองปราศจากการลดทอนของสัญญาณ แต่มีการกวัดแกว่งในย่านบวกและลบ เช่นเดียวกับผลการวัด
- b.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งมีความใกล้เคียงกัน ระหว่างผลการจำลอง และผลการวัด

#### หม้อแปลง C

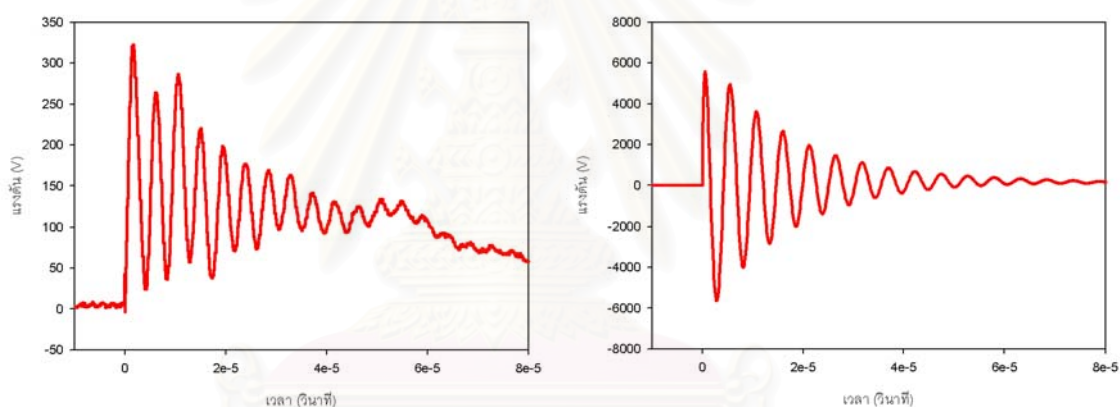
- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 10, 10 และ 10.5 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- c.2 รูปคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองปราศจากการลดทอนของสัญญาณ แต่มีการกวัดแกว่งในย่านบวกและลบ เช่นเดียวกับผลการวัด
- c.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งมีความใกล้เคียงกัน ระหว่างผลการจำลอง และผลการวัด



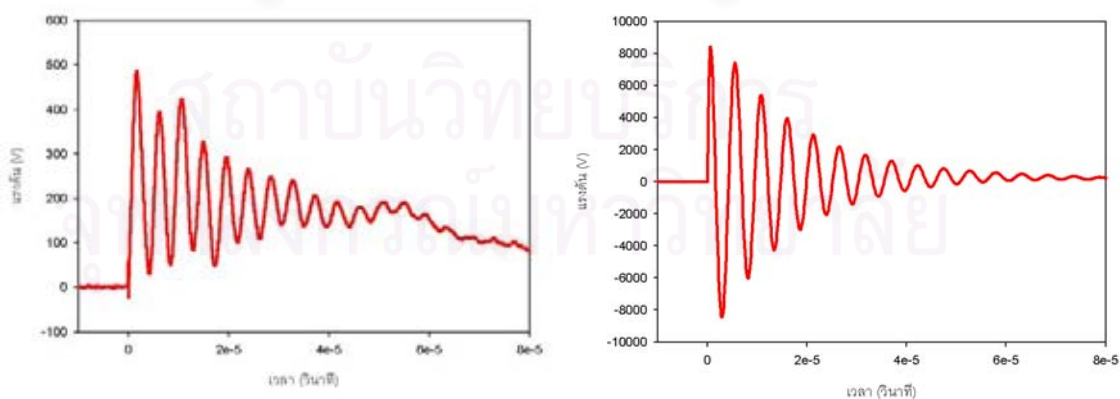
### 5.3.2 ผลการเปลี่ยนค่ายอดสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

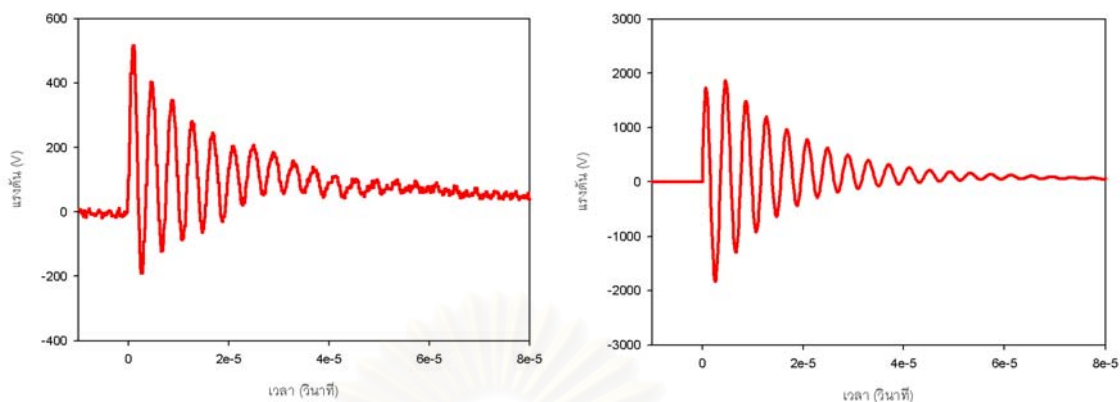


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

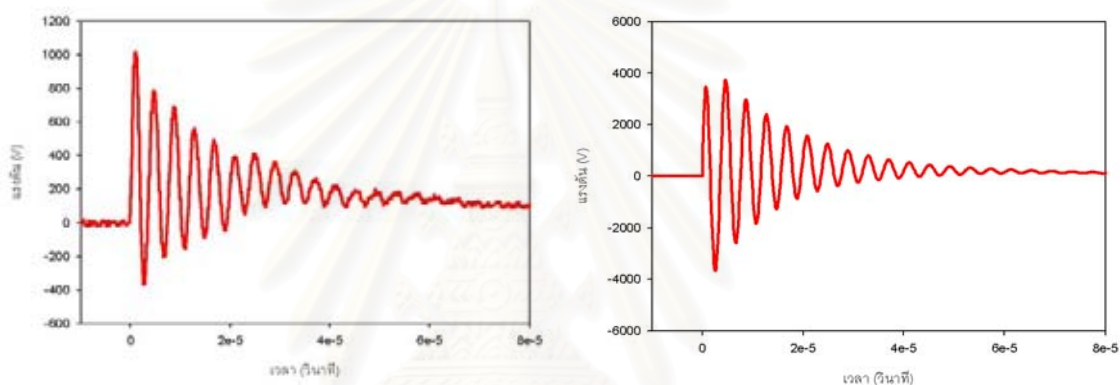


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

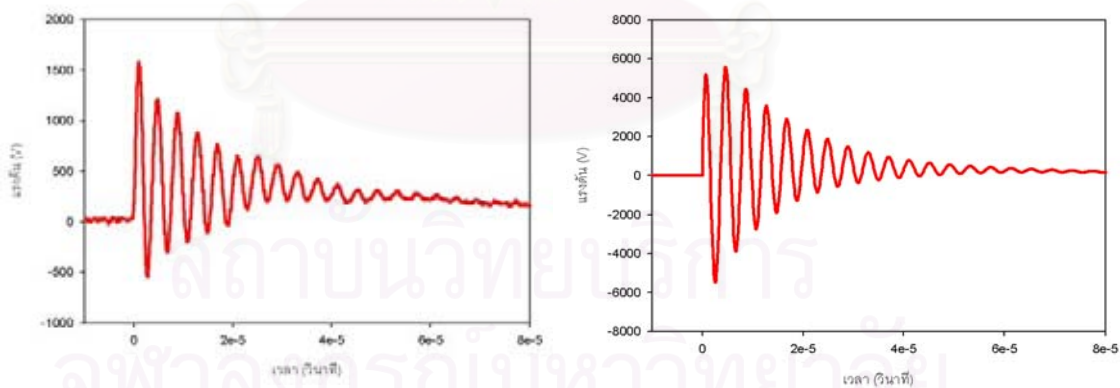
รูปที่ 5.8 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง A



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

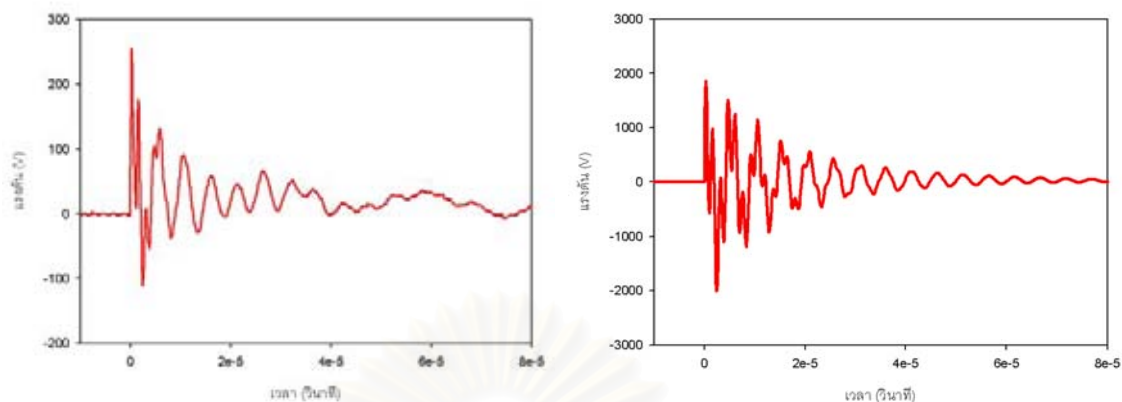


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

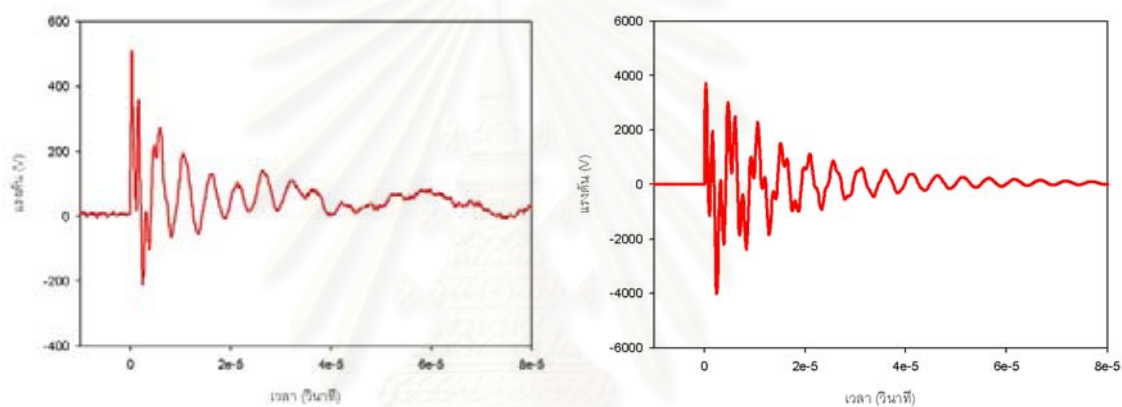


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

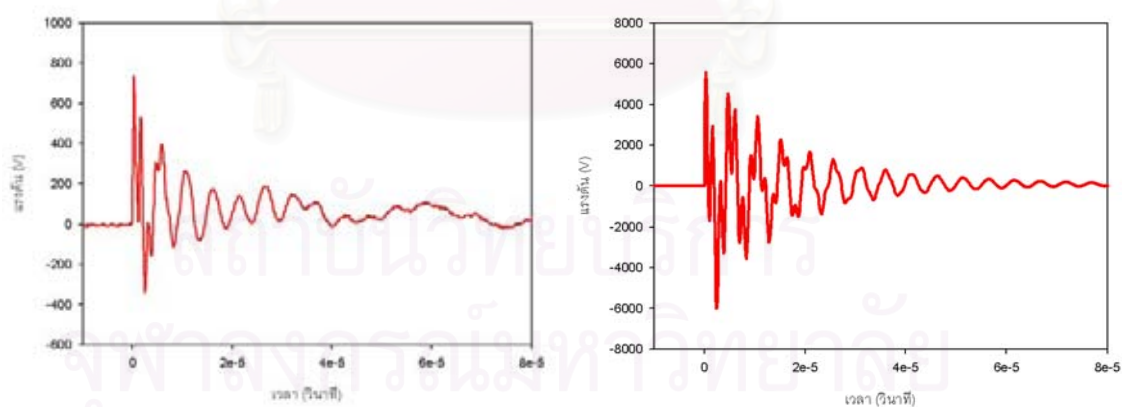
รูปที่ 5.9 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง B



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

รูปที่ 5.10 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองกับผลจากการวัดตามรูปที่ 5.8 – 5.10 สามารถแยกพิจารณาแต่ละหม้อแปลงได้ดังนี้

#### หม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 16, 15.3 และ 15.2 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- a.2 รูปร่างคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองมีการลดทอนของสัญญาณ โดยมีการกวัดแกว่งทั้งในย่านบวกและลบ ในขณะที่ผลการวัดจะมีการลดทอนของสัญญาณเช่นเดียวกับผลการจำลอง แต่มีการกวัดแกว่งในย่านบวกเท่านั้น
- a.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งของผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัด

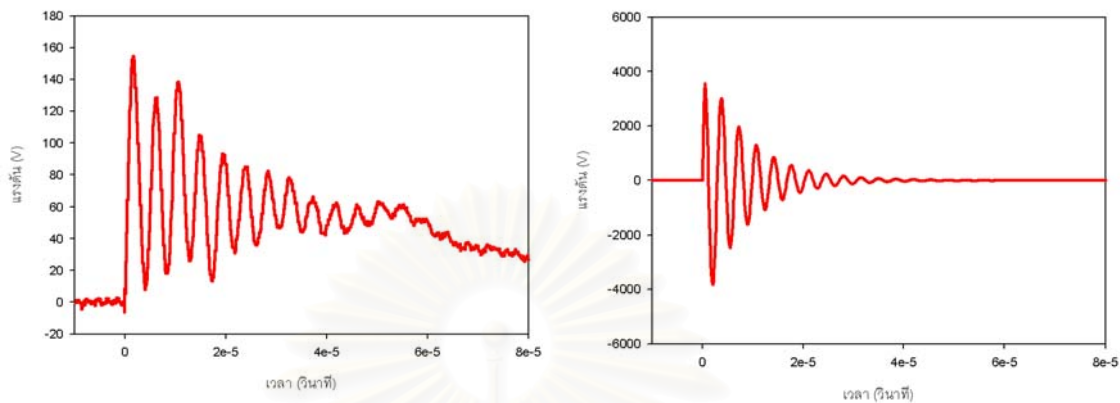
#### หม้อแปลง B

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 4.2, 4.3 และ 4.1 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- b.2 รูปร่างคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองมีการลดทอน และมีการกวัดแกว่งในย่านบวกและลบ เช่นเดียวกับผลการวัด
- b.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งมีความใกล้เคียงกันระหว่างผลการจำลอง และผลการวัด

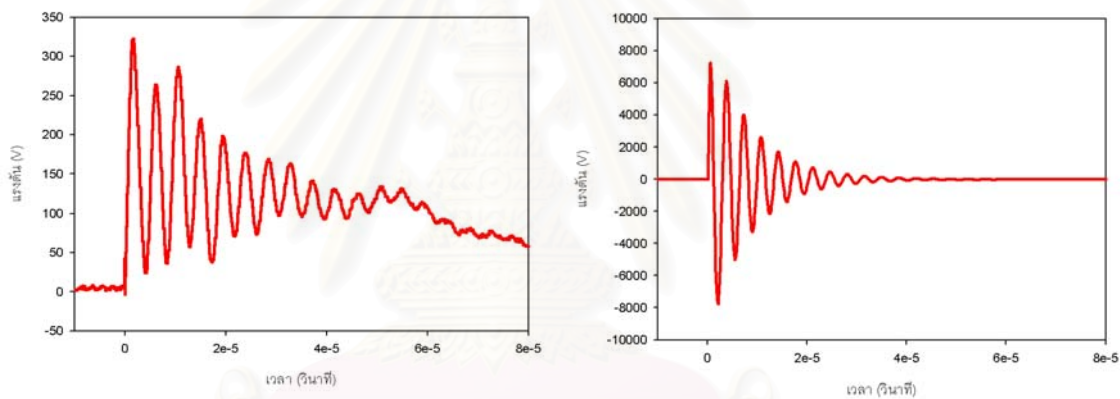
#### หม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 7.4, 7.4 และ 7.6 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- c.2 รูปร่างคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองมีการลดทอน และมีการกวัดแกว่งในย่านบวกและลบ รวมทั้งมีลักษณะการยุบตัวของรูปร่างคลื่นสัญญาณเช่นเดียวกับผลการวัด
- c.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งมีความใกล้เคียงกันระหว่างผลการจำลอง และผลการวัด

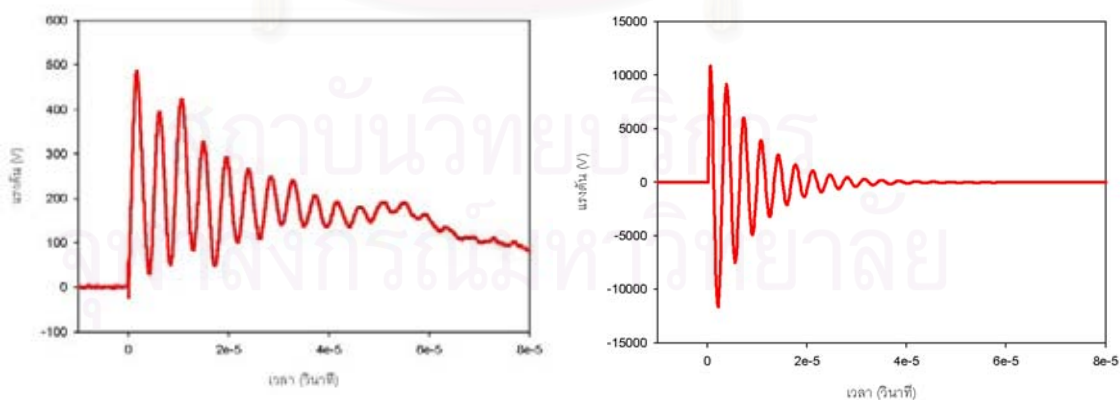
### 5.3.3 ผลการเปลี่ยนค่ายอดสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวคเตอร์



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

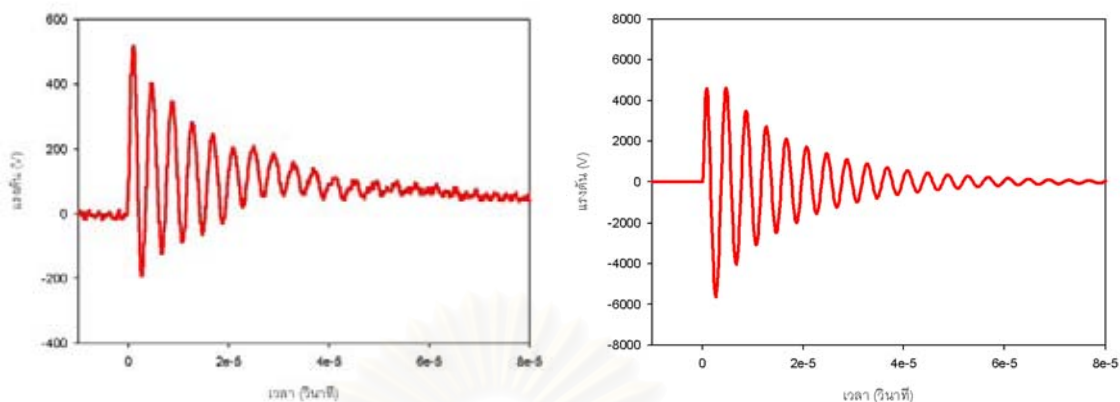


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

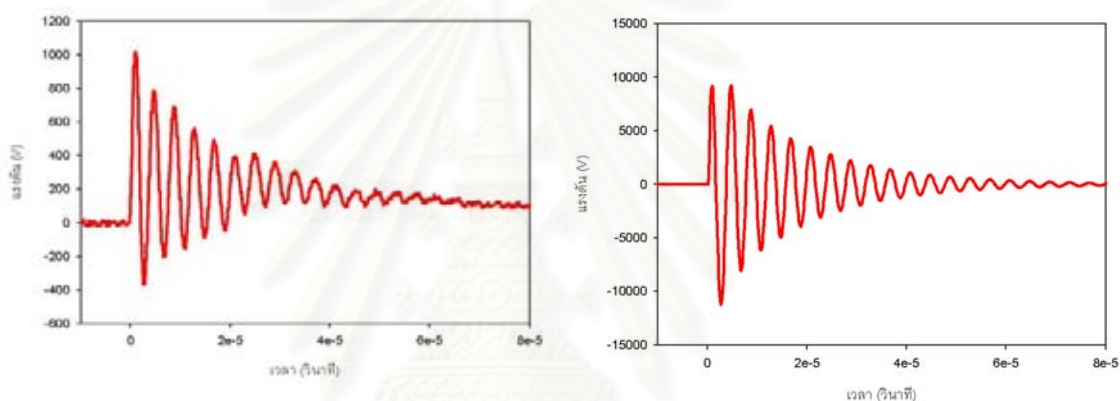


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

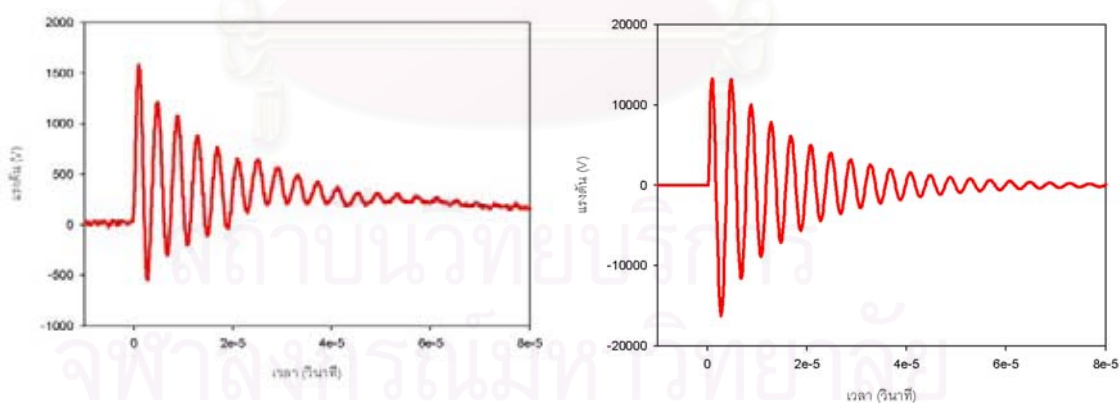
รูปที่ 5.11 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวคเตอร์ สำหรับหม้อแปลง A



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV

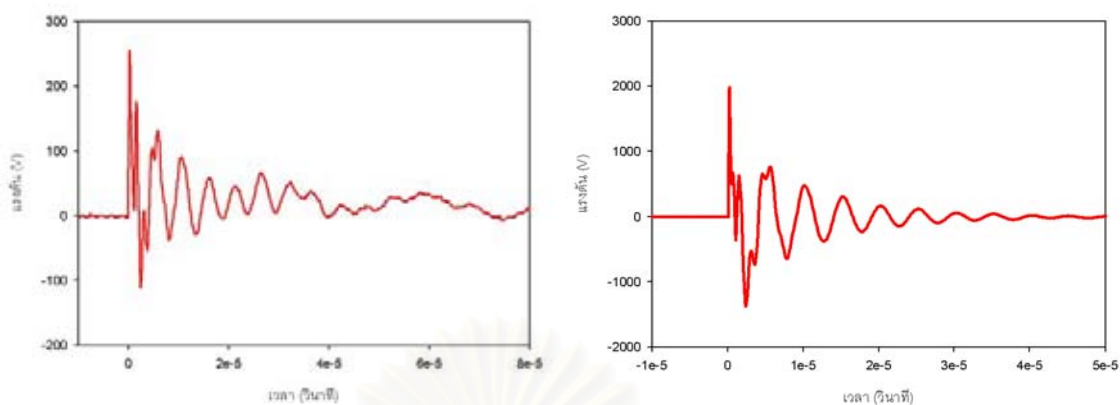


(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV

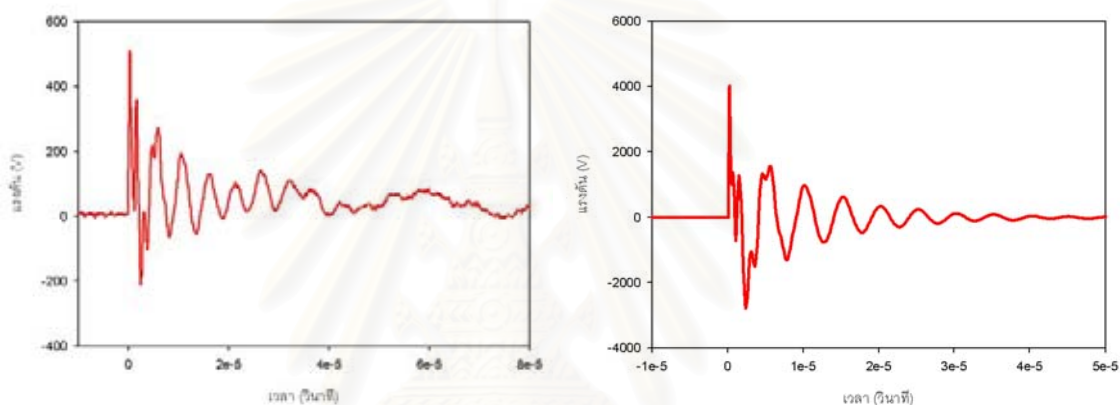


(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

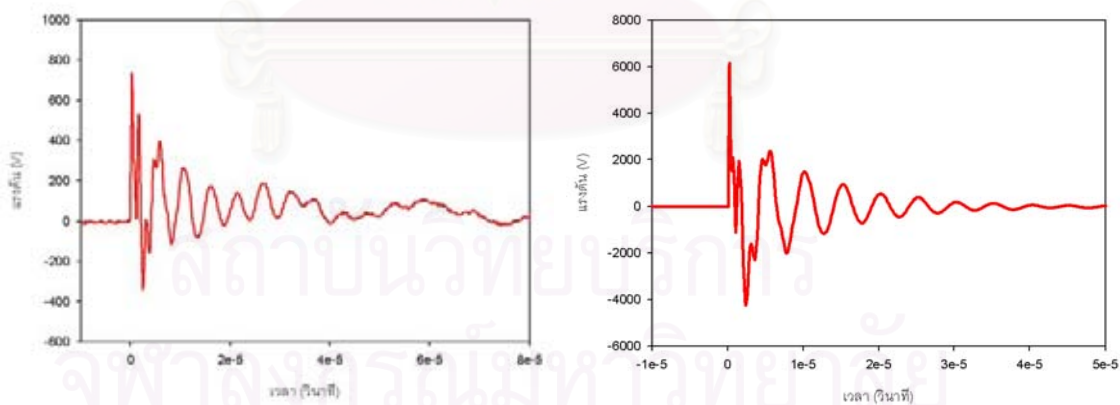
รูปที่ 5.12 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หึ่งค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตตั้งทางเวกเตอร์ สำหรับหม้อแปลง B



(ก) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

รูปที่ 5.13 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพีดีตีงทางเวกเตอร์ สำหรับหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองกับผลจากการวัดตามรูปที่ 5.11 – 5.13 สามารถแยกพิจารณาแต่ละหม้อแปลงได้ดังนี้

#### หม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 23, 22.4 และ 22.5 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- a.2 รูปร่างคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองมีการลดทอนของสัญญาณ โดยมีการกวัดแกว่งทั้งในย่านบวกและลบ ในขณะที่ผลการวัดจะมีการลดทอนของสัญญาณเช่นเดียวกับผลการจำลอง แต่มีการกวัดแกว่งในย่านบวกเท่านั้น
- a.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งของผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัด

#### หม้อแปลง B

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 8.8, 9.1 และ 8.4 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- b.2 รูปร่างคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองมีการลดทอน และมีการกวัดแกว่งในย่านบวกและลบ เช่นเดียวกับผลการวัด
- b.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งมีความใกล้เคียงกันระหว่างผลการจำลอง และผลการวัด

#### หม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของผลการจำลองมีค่ามากกว่าผลการวัดเป็น 7.9, 8 และ 8.4 เท่าของผลการวัด เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ตามลำดับ
- c.2 รูปร่างคลื่นของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV พบว่าผลการจำลองมีการลดทอน และมีการกวัดแกว่งในย่านบวกและลบ รวมทั้งมีลักษณะการยุบตัวของรูปร่างคลื่นสัญญาณเช่นเดียวกับผลการวัด
- c.3 ความถี่ และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV ในช่วงที่เกิดการกวัดแกว่งมีความใกล้เคียงกันระหว่างผลการจำลอง และผลการวัด

คุณสมบัติของแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 ตามการศึกษาผลการเปลี่ยนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์คงที่ ต่อการเปลี่ยนค่ายอดและรูปร่างคลื่นแรงดันเสิร์จ



ทางด้านพฤติกรรมของแบบจำลองหม้อแปลง A, B และ C พบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จทางด้านพฤติกรรมของแบบจำลองหม้อแปลงแปรผันตรงกับค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของแบบจำลอง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดผลการตอบสนองของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ผลของค่ายอด, รูปคลื่น และค่าความถี่ รวมทั้งมุมเฟสของแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงมีความแตกต่างกัน โดยสามารถเรียงลำดับความใกล้เคียงจากมากไปน้อยได้ดังตารางที่ 5.1

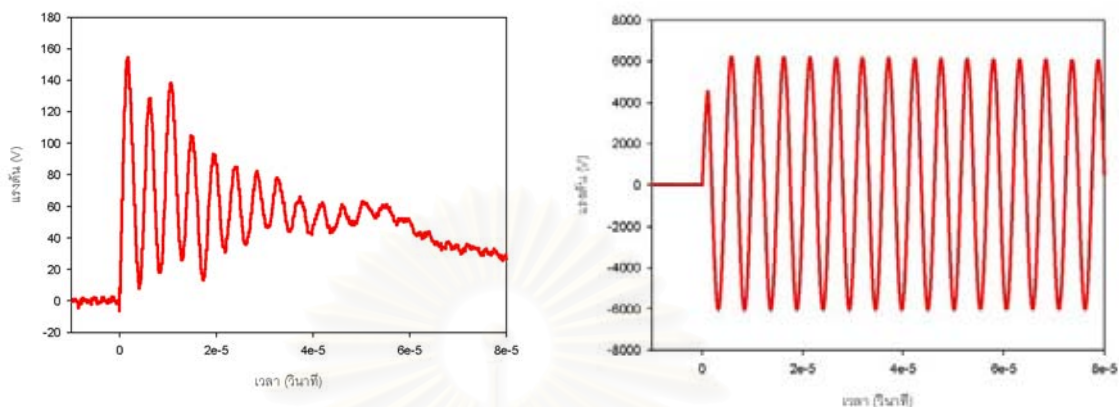
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบความถูกต้องแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง

เกณฑ์พิจารณา	แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ			แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ			แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ค่ายอดแรงดันเสิร์จ	น้อย	น้อย	น้อย	มาก	มาก	มาก	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ความถูกต้องของรูปคลื่น	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	น้อย	มาก	มาก
ความถูกต้องของค่าความถี่และมุมเฟส	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก	มาก	มาก	น้อย	มาก	มาก

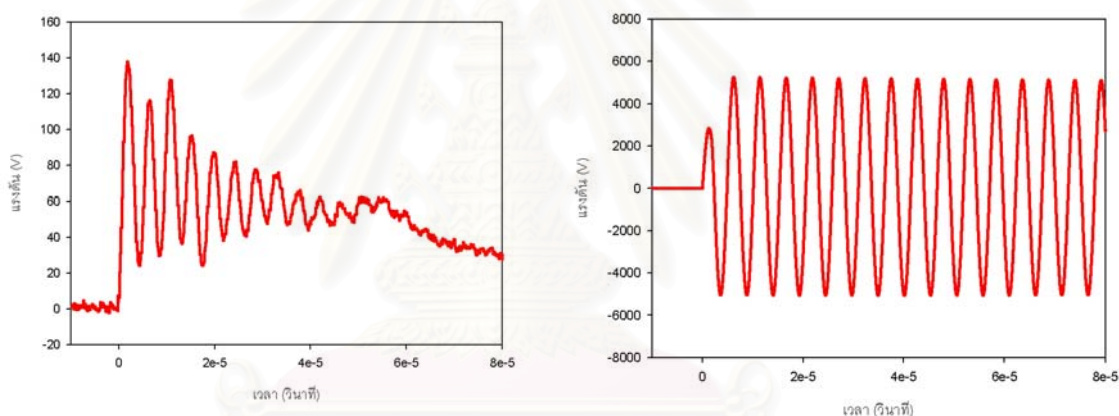
#### 5.4 การศึกษาผลแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงต่อการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์

การศึกษาผลแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงต่อการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทำโดยสร้างแบบจำลองแรงดันอิมพัลส์ตามหัวข้อที่ 5.1 และกำหนดค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ให้มีค่าคงที่ โดยหัวข้อนี้กำหนดค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ 10 kV จากนั้นปรับค่าคงที่  $\alpha_2$  ในสมการที่ 5.1 เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นเช่นเดียวกับแรงดันอิมพัลส์ซึ่งได้จากการวัดภายหลังการต่อตัวเก็บประจุตามหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งผลการจำลองแรงดันเสิร์จจากการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของแบบจำลองหม้อแปลงสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดแรงดันเสิร์จจากการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ของหม้อแปลง สามารถแยกตามแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงได้ดังนี้

### 5.4.1 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ



(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$

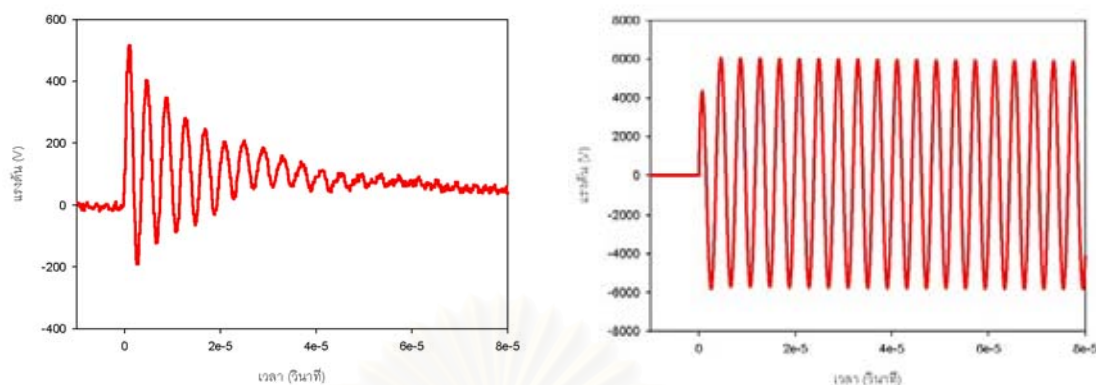
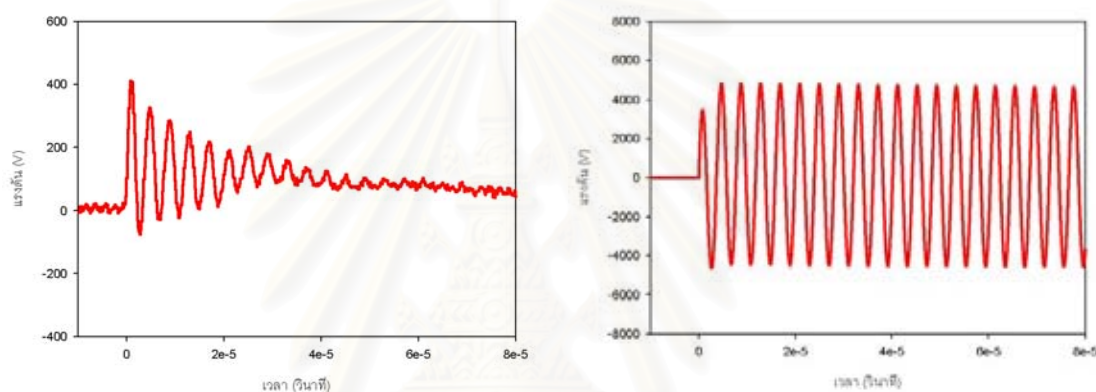


(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$

รูปที่ 5.14 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สำหรับหม้อแปลง A

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.14 สามารถสรุปได้ดังนี้

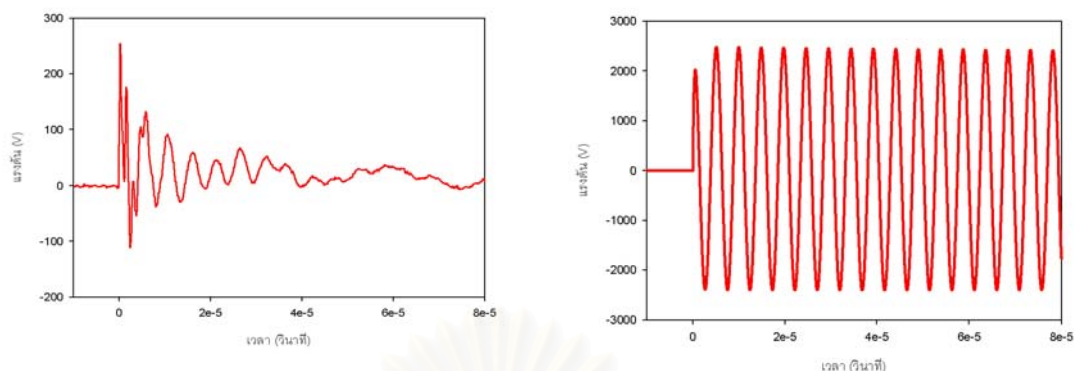
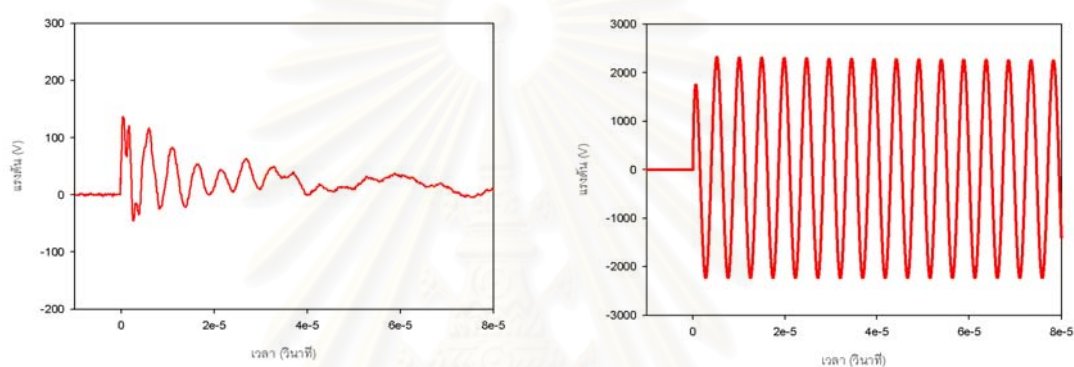
- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.1 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.12 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$
- a.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  แต่จะมีความต่างเฟสอยู่เล็กน้อย

(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$ 

รูปที่ 5.15 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สำหรับหม้อแปลง B

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.15 สามารถสรุปได้ดังนี้

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.25 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.3 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$
- b.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  แต่จะมีความต่างเฟสอยู่เล็กน้อย

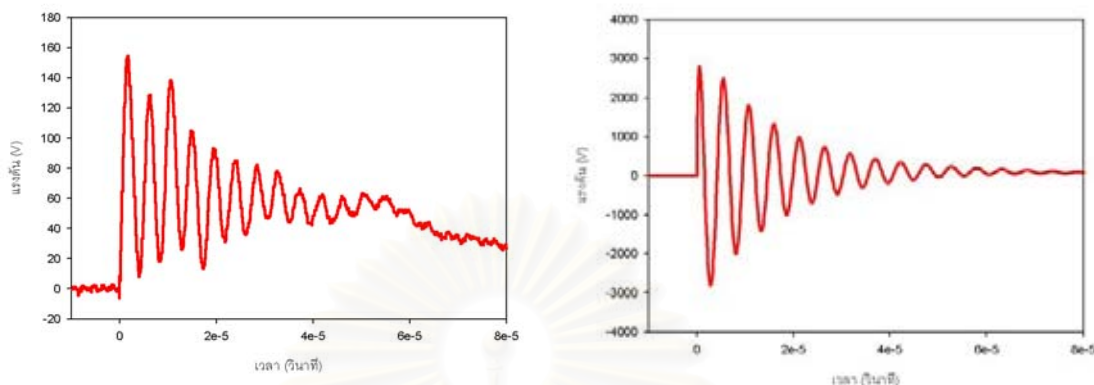
(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2.1\mu\text{s}$ 

รูปที่ 5.16 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ สำหรับหม้อแปลง C

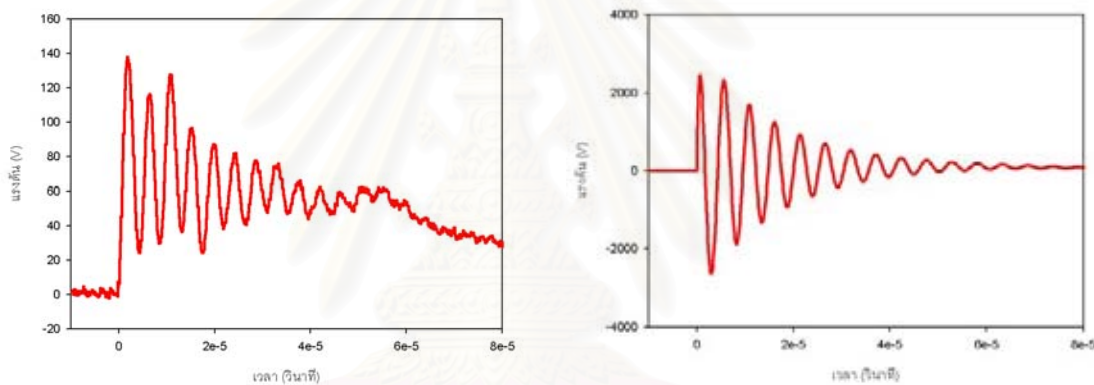
จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.16 สามารถสรุปได้ดังนี้

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.08 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2.1\mu\text{s}$  ซึ่งมีความแตกต่างกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.85 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2.1\mu\text{s}$
- c.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2.1\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  แต่จะมีการเลือนของมุมเฟสอยู่เล็กน้อย

### 5.4.2 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลของค้ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ



(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$

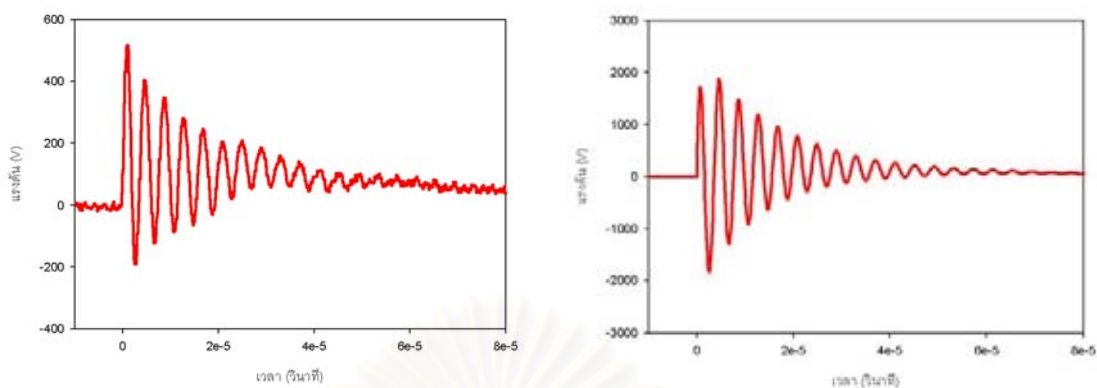
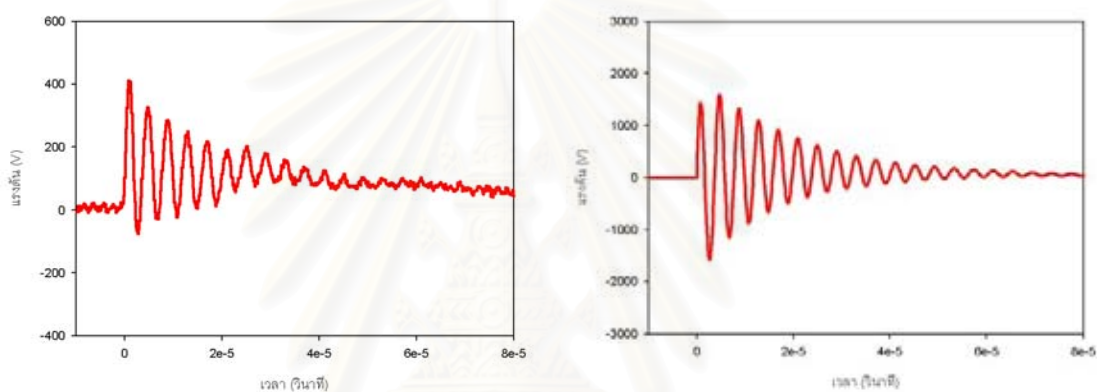


(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$

รูปที่ 5.17 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลของค้ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง A

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.17 สามารถสรุปได้ดังนี้

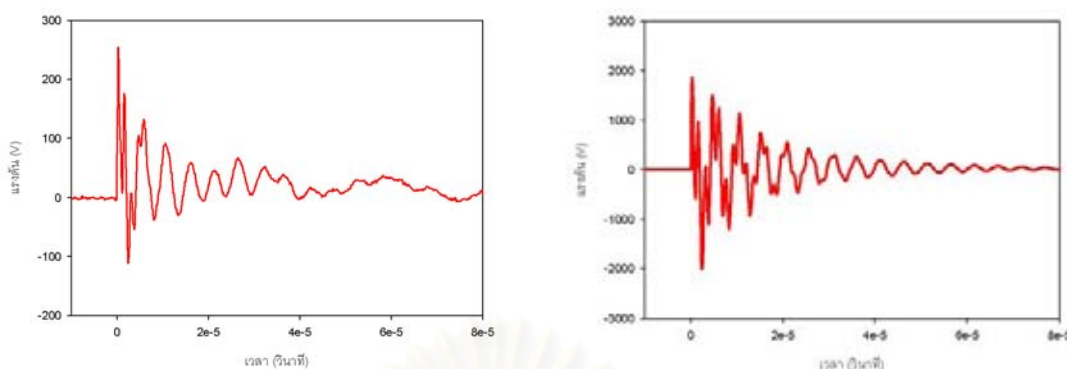
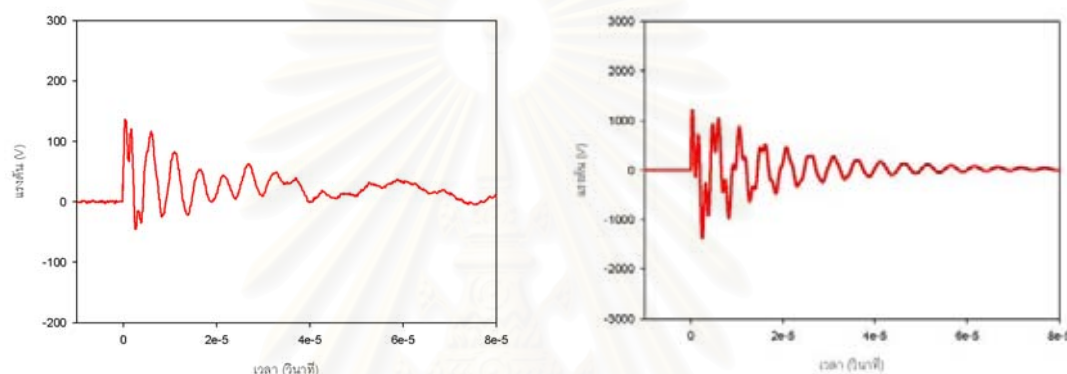
- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.14 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.12 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$
- a.2 รูปลักษณ์ของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  แต่จะมีความต่างเฟสอยู่เล็กน้อย

(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$ 

รูปที่ 5.18 แรงดันเสิร์จทางด้านทฤษฎีจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง B

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.18 สามารถสรุปได้ดังนี้

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.36 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.3 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$
- b.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  แต่จะมีความต่างเฟสอยู่เล็กน้อย

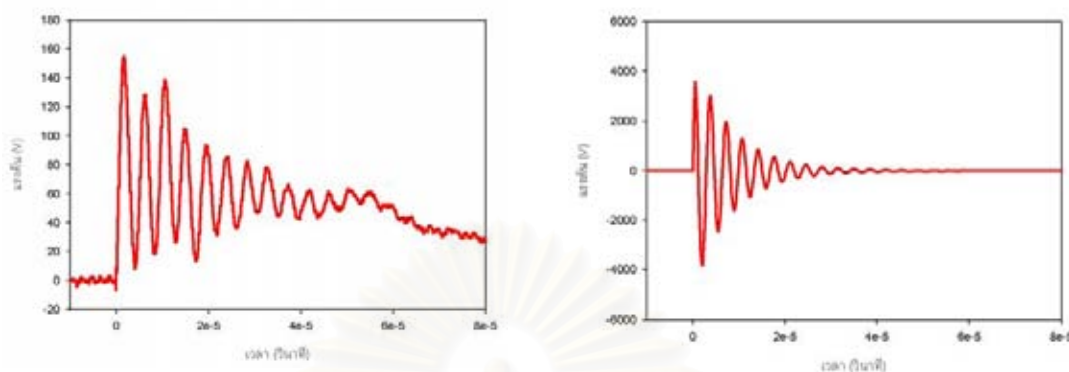
(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1 $\mu$ s

รูปที่ 5.19 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง C

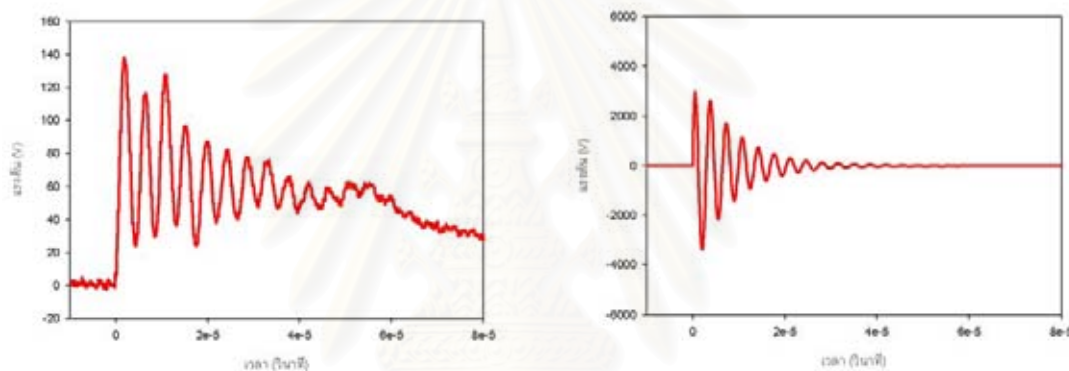
จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.19 สามารถสรุปได้ดังนี้

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง สำหรับแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s วัดขนาดได้เป็น 1.48 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 2.1 $\mu$ s ซึ่งมีความแตกต่างกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s วัดขนาดได้เป็น 1.85 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 2.1 $\mu$ s
- c.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1 $\mu$ s จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s แต่จะมีความต่างเฟสอยู่เล็กน้อย

### 5.4.3 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์



(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s



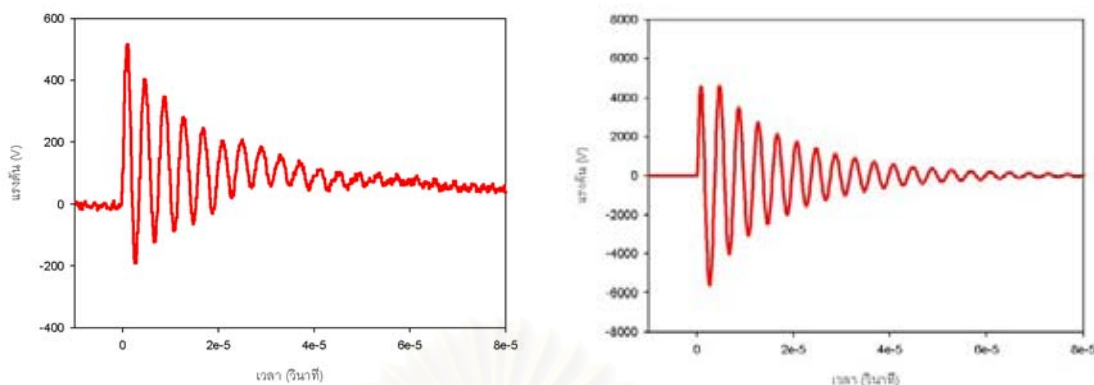
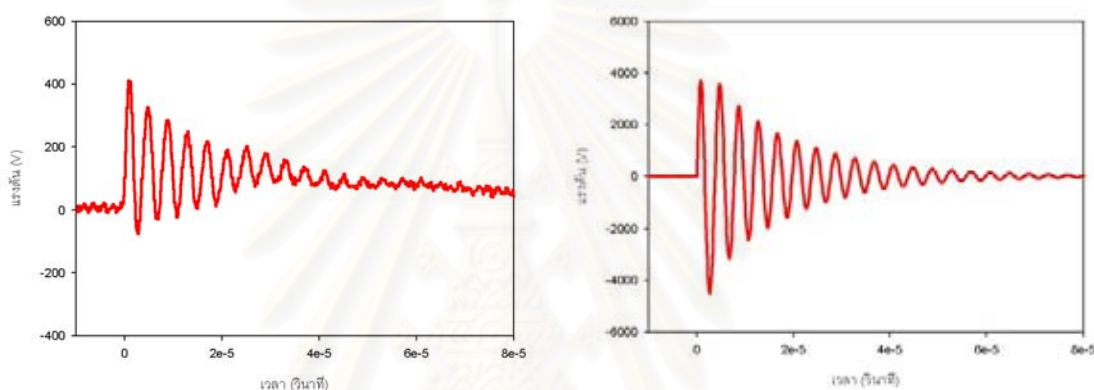
(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2 $\mu$ s

รูปที่ 5.20 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์สำหรับหม้อแปลง A

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.20 สามารถสรุปได้ดังนี้

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s วัดขนาดได้เป็น 1.19 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 2 $\mu$ s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s วัดขนาดได้เป็น 1.12 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 2 $\mu$ s
- a.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2 $\mu$ s จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s แต่จะมีการเลื่อนของมุมเฟสอยู่เล็กน้อย

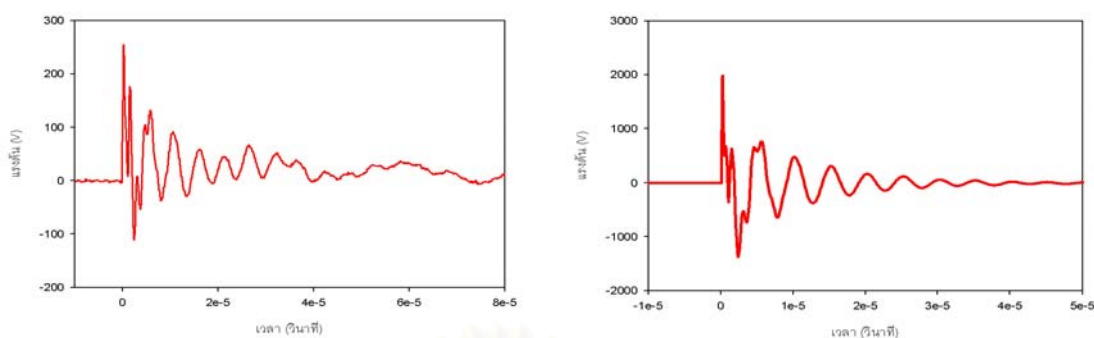
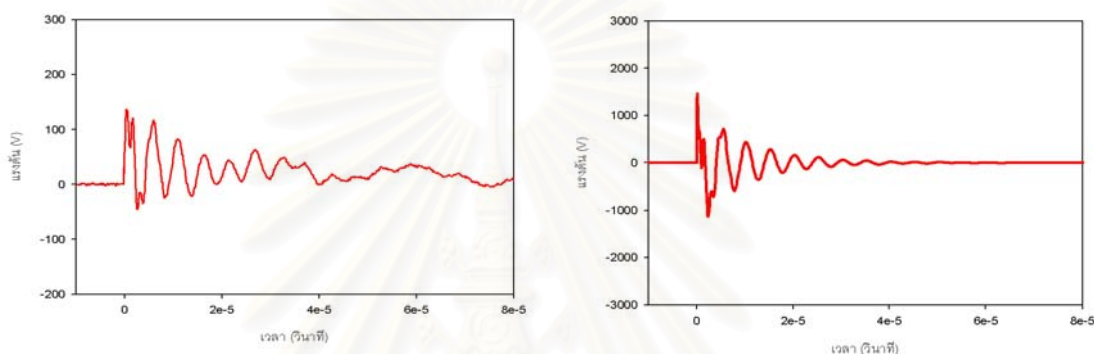


(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$ 

รูปที่ 5.21 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หอนี้ประกอบด้วยกระบวนการพิตตั้งทางเวกเตอร์สำหรับหม้อแปลง B

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.21 สามารถสรุปได้ดังนี้

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.2 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.3 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$
- b.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$  แต่จะมีการเลื่อนของมุมเฟสอยู่เล็กน้อย

(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2  $\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1  $\mu\text{s}$ 

รูปที่ 5.22 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการวัด (ซ้ายมือ) และจากการจำลอง (ขวามือ) ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยกระบวนการพีดีทีงทางเวคเตอร์สำหรับหม้อแปลง C

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.22 สามารถสรุปได้ดังนี้

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลง สำหรับแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 1.2  $\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.37 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 2.1  $\mu\text{s}$  ซึ่งมีความแตกต่างกับผลการวัดผลตอบสนองของหม้อแปลงเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 1.2  $\mu\text{s}$  วัดขนาดได้เป็น 1.85 เท่าของแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่น 2.1  $\mu\text{s}$
- c.2 รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1  $\mu\text{s}$  จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแรงดันเสิร์จเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น 1.2  $\mu\text{s}$  แต่จะมีการเลือนของมุมเฟสอยู่เล็กน้อย

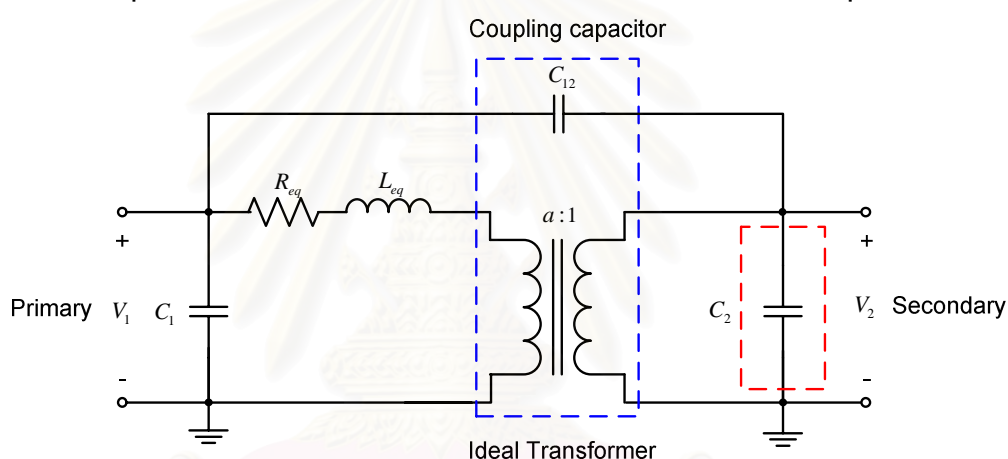
การศึกษาแรงดันเสิร์จต่อการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 พบว่าแบบจำลองหม้อแปลง A, B และ C มีค่ายอดแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการจำลองแปรผกผันกับเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของแบบจำลองหม้อแปลง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดผลการตอบสนองของหม้อแปลงไฟฟ้า

## บทที่ 6

### การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลง

จากผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม ATP/EMTP กับผลที่ได้จากการวัดในบทที่ 5 พบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองมีค่าสูงกว่าค่ายอดที่ได้จากการวัดค่อนข้างมาก ดังนั้นในบทนี้จึงเสนอแนวทางปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 แบบโดยแยกพิจารณาการปรับปรุงแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงได้ดังนี้

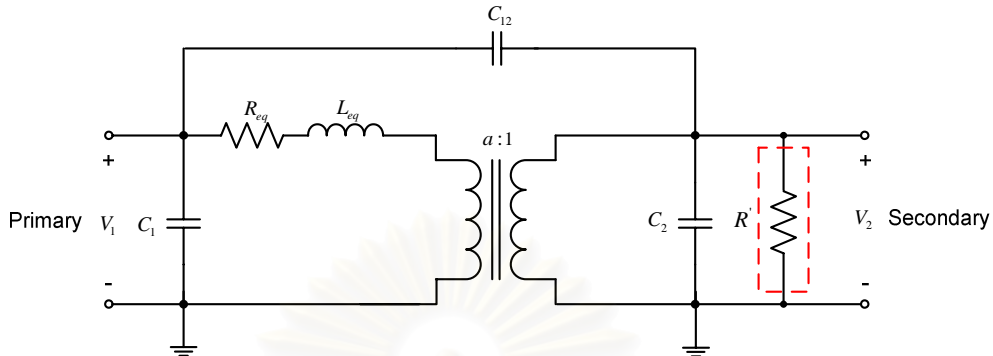
#### 6.1 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.1 องค์ประกอบที่มีนัยสำคัญต่อการส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ

ผลการจำลองแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุในบทที่ 5 พบว่านอกจากค่ายอดของแรงดันเสิร์จจะมีค่าที่สูงกว่าค่ายอดที่ได้จากการวัดแล้ว รูปคลื่นของแรงดันเสิร์จยังปราศจากการลดทอน ซึ่งองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญต่อการส่งถ่ายแรงดันเสิร์จสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุจะประกอบด้วย อัตราส่วนจำนวนรอบหม้อแปลงอุดมคติ, ค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  และค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ตามรูปที่ 6.1 ซึ่งวิธีการที่ใช้ปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังหัวข้อต่อไป

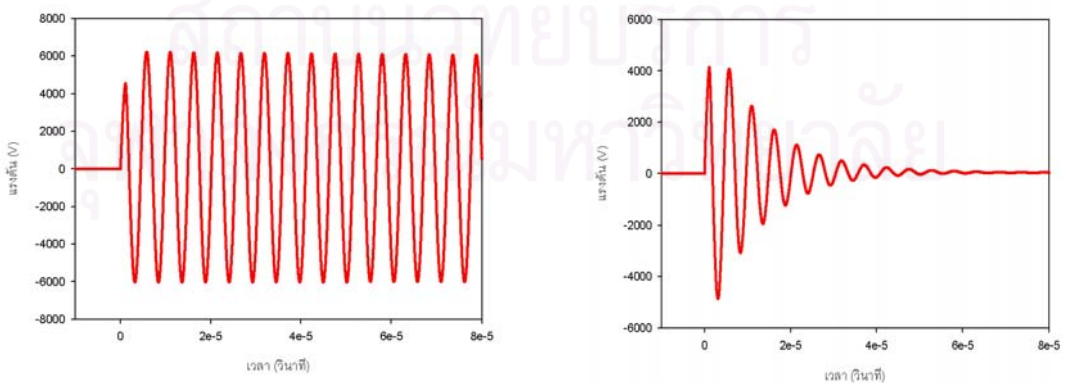
6.1.1 การต่อค่าความต้านทานที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ในแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.2 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุโดยการต่อเพิ่มค่าความต้านทาน  $R'$  ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$

ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุปราศจากการลดทอน ซึ่งเมื่อวิเคราะห์แบบจำลองหม้อแปลงตามรูปที่ 6.1 พบว่าค่าความจุไฟฟ้า  $C_1$  เป็นองค์ประกอบที่ไม่มีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดัน สำหรับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  และ  $C_{12}$  ซึ่งมีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดันนั้น เมื่อพิจารณาด้วยทฤษฎีวงจรมูลเทวินินผลรวมของค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  และ  $C_{12}$  สามารถแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า  $C_h$  ซึ่งต่อระหว่างด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ พบว่าอัตราการลดทอนของแบบจำลองจะขึ้นกับแรงดันอิมพัลส์ที่ส่งถ่ายผ่านทางหม้อแปลงอุดมคติ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการลดทอนของรูปคลื่นสามารถทำได้โดยการต่อเพิ่มค่าความต้านทาน  $R'$  ตามรูปที่ 6.2 เสมือนวงจรรองความถี่สูง CR

ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จจากการจำลองก่อนการเพิ่มความต้านทาน และหลังเพิ่มความต้านทานแสดงตามรูปที่ 6.3



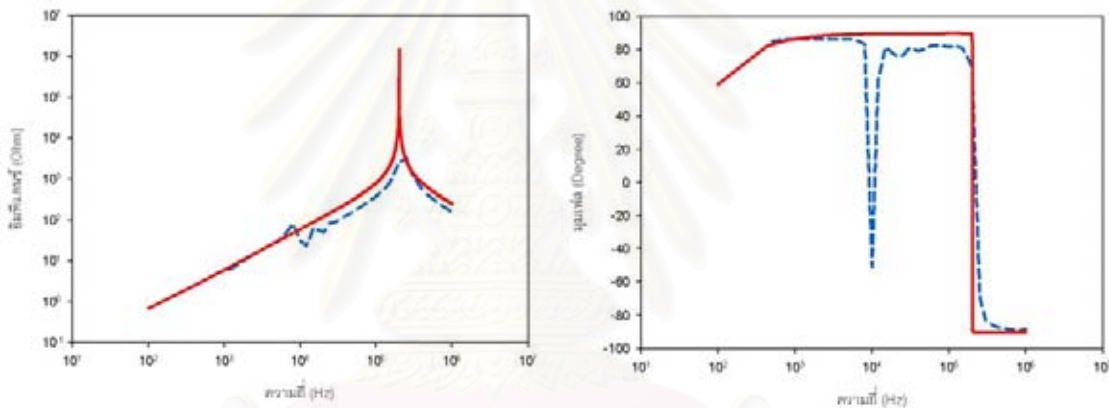
รูปที่ 6.3 แรงดันเสิร์จของแบบจำลองที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุก่อน (ซ้ายมือ) และหลังเพิ่มความต้านทาน  $R'$  ขนาด  $9k\Omega$  (ขวามือ) สำหรับหม้อแปลง A เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์  $10kV$

อิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลงก่อนการต่อความต้านทาน  $R'$  มีค่าตามสมการที่ 6.1

$$Z(j\omega) = \frac{1}{[1/(R'_{eq} + j\omega L'_{eq})] + j\omega(C_2 + C_{12})} \tag{6.1}$$

เมื่อ  $R'_{eq}$  และ  $L'_{eq}$  ค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของขดลวดหม้อแปลงที่อ้างทางด้านทุติยภูมิหม้อแปลง

จากสมการที่ 6.1 เมื่อเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดอิมพีแดนซ์ด้วย LCR มิเตอร์ ตามหัวข้อที่ 3.2.5 จะได้ผลตามรูปที่ 6.4



(ก) ขนาด

(ข) มุมเฟส

--- ค่าจากการวัด

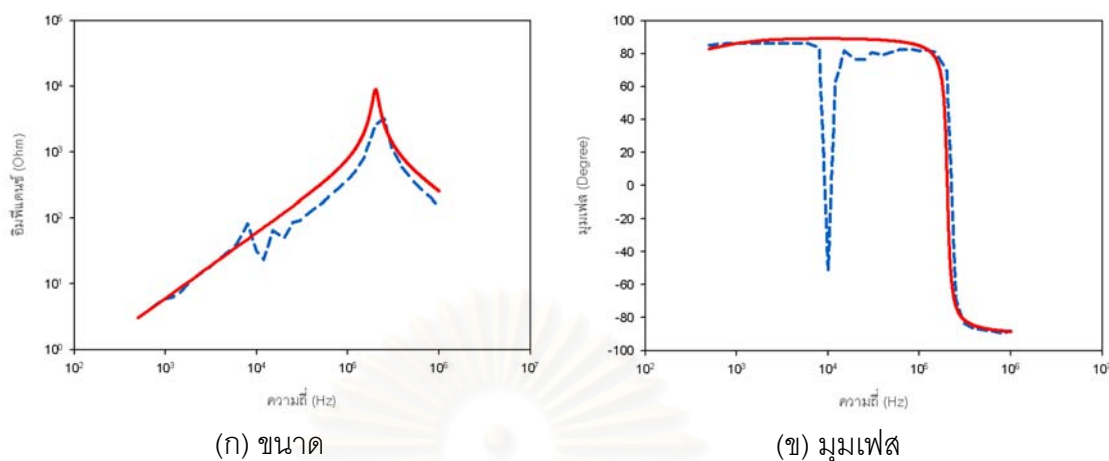
— ค่าจากการคำนวณ

รูปที่ 6.4 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A ก่อนการต่อค่าความต้านทาน  $R'$  เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

หลังการต่อความต้านทาน  $R'$  อิมพีแดนซ์ของขดลวดทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลง มีค่าตามสมการที่ 6.2

$$Z(j\omega) = \frac{1}{[1/(R'_{eq} + j\omega L'_{eq})] + j\omega(C_2 + C_{12}) + 1/R'} \tag{6.2}$$

จากสมการที่ 6.2 เมื่อเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ใช้ องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุระหว่างผลการคำนวณกับผลการวัดอิมพีแดนซ์ด้วย LCR มิเตอร์ โดยความต้านทาน  $R'$  ที่ใช้มีขนาด  $9k\Omega$  จะได้ผลตามรูปที่ 6.5



----- ค่าจากการวัด

————— ค่าจากการคำนวณ

รูปที่ 6.5 อิมพีแดนซ์ขดลวดทุติยภูมิหม้อแปลง A หลังการต่อค่าความต้านทาน  $R'$  เปรียบเทียบระหว่างค่าวัดกับค่าการคำนวณ

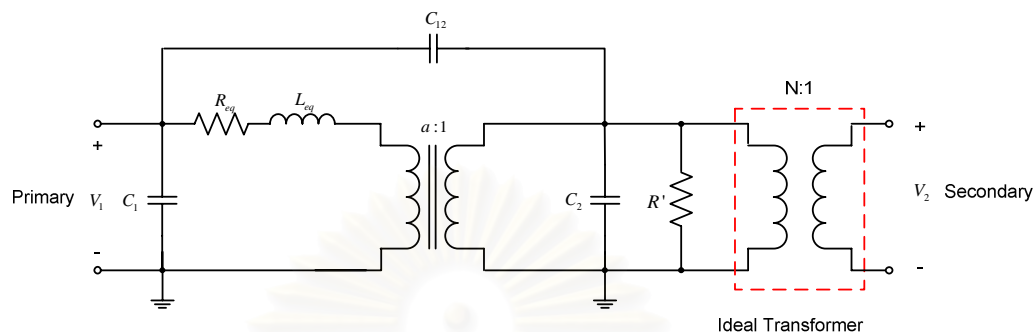
จากข้อมูลตามรูปที่ 6.4 และ 6.5 พบว่าขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณ ณ ค่าความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์ภายหลังการต่อความต้านทาน  $R'$  จะมีน้อยกว่าประมาณ 100 เท่า เปรียบเทียบกับขนาดอิมพีแดนซ์ก่อนการต่อความต้านทาน

สำหรับการหาค่าความต้านทาน  $R'$  ทำโดยกำหนดค่าความต้านทานเริ่มต้น ซึ่งเมื่อวัดรูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองแล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัด ถ้าอัตราการลดทอนที่ได้ยังมีค่าความแตกต่างอยู่ ให้ปรับค่าความต้านทาน  $R'$  เพิ่มขึ้นหรือลดลงจนกระทั่งผลการเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันเสิร์จจะมีความแตกต่างน้อยที่สุด สำหรับค่าความต้านทานที่ใช้สำหรับแบบจำลองที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุของหม้อแปลง A, B และ C สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าความต้านทาน  $R'$  ที่ต่อขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$

หม้อแปลง	ค่าความต้านทาน
A	9 k $\Omega$
B	3.5 k $\Omega$
C	15 k $\Omega$

### 6.1.2 การต่อหม้อแปลงอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า $C_2$ ในแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.6 แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มค่าความต้านทานและหม้อแปลงในอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$

การต่อความต้านทาน  $R'$  ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  นอกจากจะเพิ่มอัตราการลดทอนของรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ ยังพบว่าค่าขนาดของแรงดันเสิร์จจากการจำลองจะมีขนาดที่ลดลง แต่ขนาดแรงดันเสิร์จที่ลดลงนี้ยังคงมีขนาดสูงกว่าค่าจากการวัดมาก ซึ่งจากการศึกษาของ Dr.Noda และคณะ [4] พบว่าการส่งผ่านสเปกตรัมในช่วงความถี่เกิน 1 MHz นั้นไม่สามารถที่จะแทนฉนวนหม้อแปลงที่คั่นระหว่างขั้วลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิด้วยค่าความจุไฟฟ้าอย่างเดียวได้ เนื่องจากฉนวนหม้อแปลงที่เป็นน้ำมันจะเกิดการโพลาไรเซชัน ทำให้ในความถี่ช่วงที่เกินนี้จะเกิดการเรโซแนนซ์อีก โดยจะส่งผลให้การส่งผ่านสเปกตรัมของแรงดันอิมพัลส์มีค่าลดลง

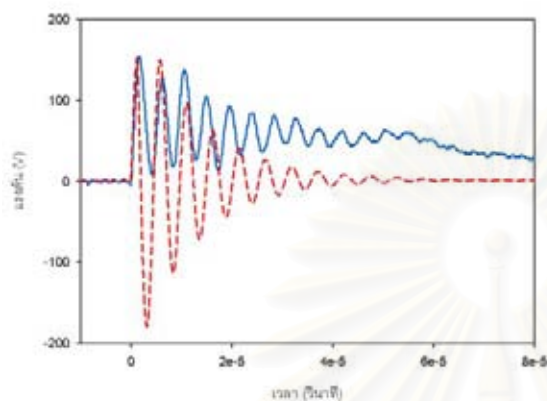
สำหรับการปรับปรุงผลของขนาดแรงดันเสิร์จตามการศึกษาของ Bruno Cogitore และคณะ [6] ได้เสนอแบบจำลองหม้อแปลงที่มีการต่อเพิ่มหม้อแปลงอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ตามรูปที่ 6.6 สำหรับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติสามารถหาด้วยวิธีการเดียวกับการหาค่าความต้านทาน  $R'$  ตามหัวข้อ 6.1.1 โดยค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง A, B และ C มีค่าตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ

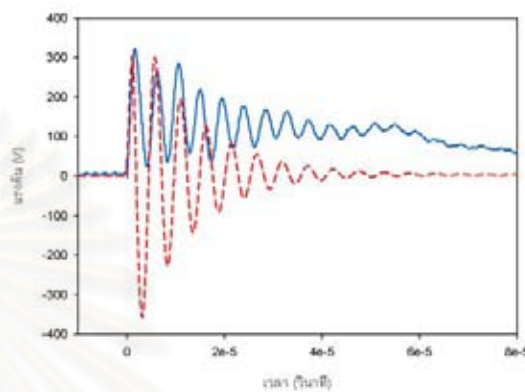
หม้อแปลง	อัตราส่วนจำนวนรอบ
A	27
B	9
C	8

## 6.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบรวมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุง

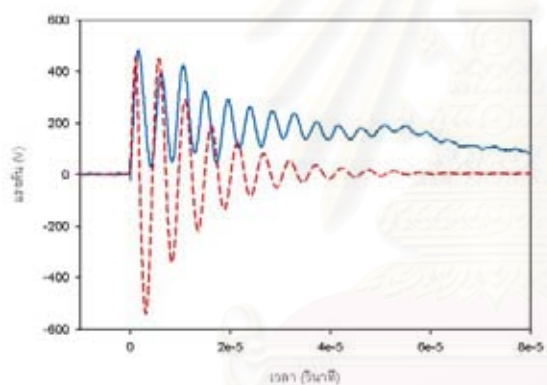
แบบจำลองหม้อแปลงที่ต่อเพิ่มความต้านทาน และหม้อแปลงอุดมคติตามข้อมูลตารางที่ 6.1 และ 6.2 สามารถจำลองผลและนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัดได้ดังรูปที่ 6.7 – 6.9



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

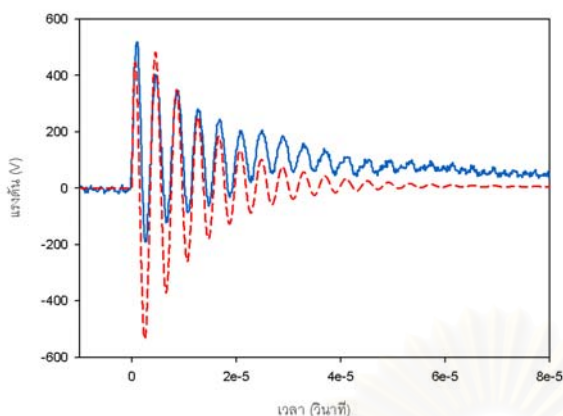
———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.7 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบรวมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A

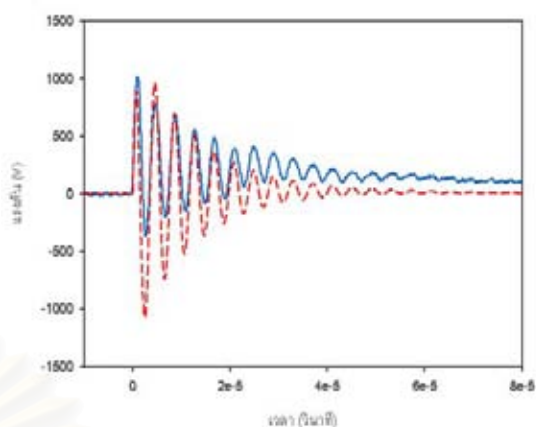
ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.7 สามารถสรุปได้ดังนี้

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด
- a.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการวัดแกว่งจะมีค่าใกล้เคียงในช่วงสองวัฏจักรแรก แต่จากนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้น
- a.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการวัดแกว่งจะมีค่าใกล้เคียงในช่วงสองวัฏจักรแรก แต่จากนั้นจะมีความต่างเฟสเกิดขึ้น

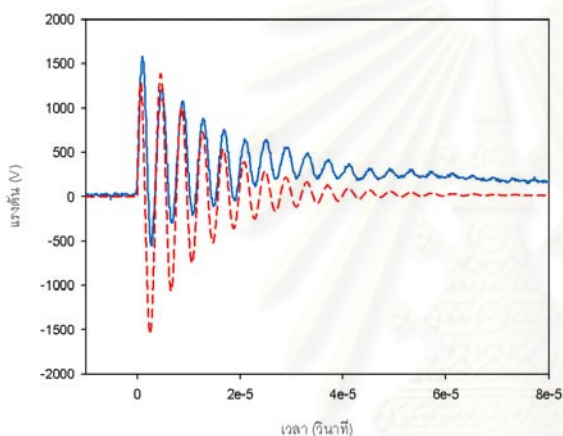




(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



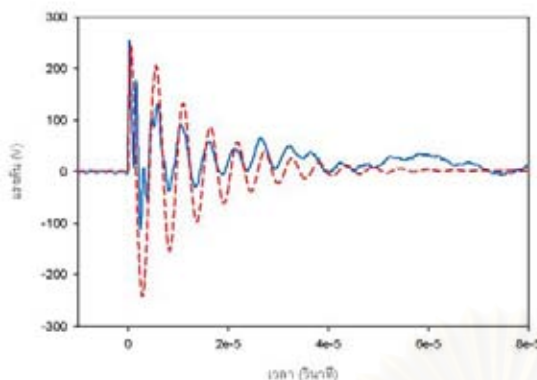
(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

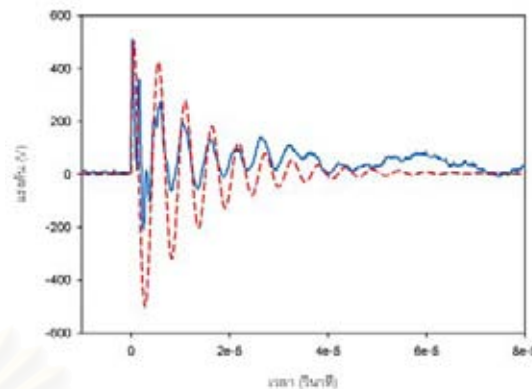
รูปที่ 6.8 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง B

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.8 สามารถสรุปได้ดังนี้

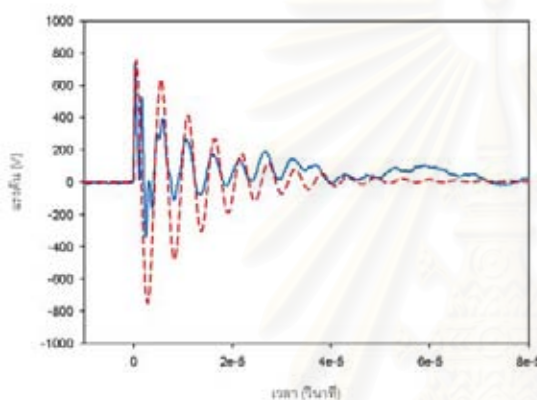
- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่จะพบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองจะมีค่าสูงสุดในวัฏจักรที่สอง ซึ่งต่างจากผลการวัดที่มีค่าสูงสุดในวัฏจักรแรก
- b.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง
- b.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

————— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.9 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง C

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.9 สามารถสรุปได้ดังนี้

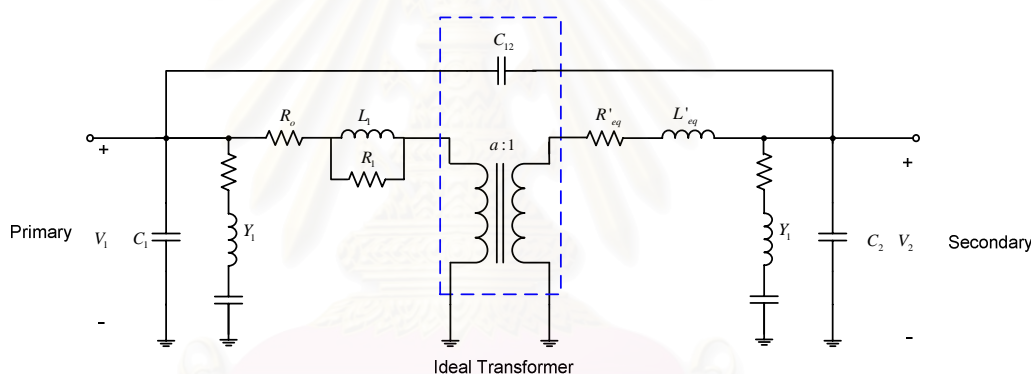
- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่จะพบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากการจำลองปราศจากการการยุบตัวของรูปคลื่นในช่วงวัฏจักรแรกเหมือนกับผลแรงดันเสิร์จที่ได้จากการวัด
- c.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง
- c.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้ องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A, B และ C สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากการจำลองกับค่าจากการวัดจริงสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุง

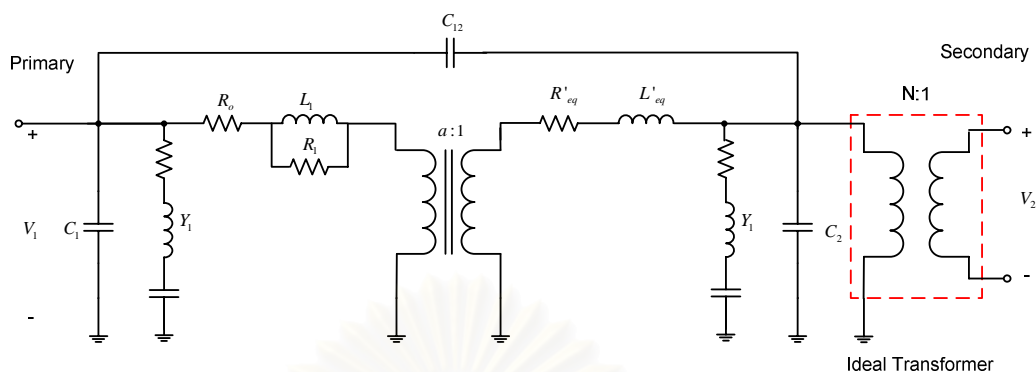
เกณฑ์พิจารณา	หม้อแปลง A	หม้อแปลง B	หม้อแปลง C
ค่ายอดแรงดันจากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
ความถี่รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ไม่ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
มุมเฟสรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ไม่ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง

### 6.3 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ



รูปที่ 6.10 องค์ประกอบที่มีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ

ผลการจำลองแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลขององค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ในบทที่ 5 พบว่ารูปคลื่นแรงดันเสิร์จจากการจำลองจะมีลักษณะการลดทอนสัญญาณเหมือนผลที่ได้จากการวัด เนื่องจากวิธีการคำนวณเพื่อประมาณแอมพลิจูดของขดลวดทุติยภูมิมีความละเอียดกว่าในกรณีแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามค่ายอดแรงดันเสิร์จจากการจำลองนั้นยังมีค่าที่สูงกว่าค่ายอดที่ได้จากการวัด ซึ่งองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์คือ อัตราส่วนจำนวนรอบหม้อแปลงอุดมคติ และค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ตามรูปที่ 6.10 เช่นเดียวกับกรณีของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ ซึ่งวิธีการปรับปรุงค่ายอดทำได้โดยต่อเพิ่มหม้อแปลงอุดมคติตามรูปที่ 6.11 สำหรับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคตินั้นมีหลักการพิจารณาเหมือนกับกรณีของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.11 แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มหม้อแปลงในอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$

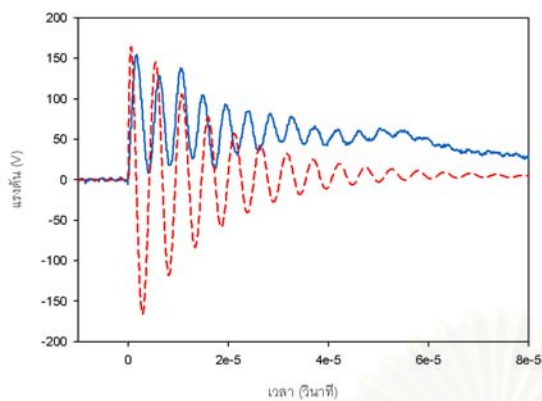
ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบหม้อแปลงในอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ของหม้อแปลง A, B และ C มีค่าตามตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ

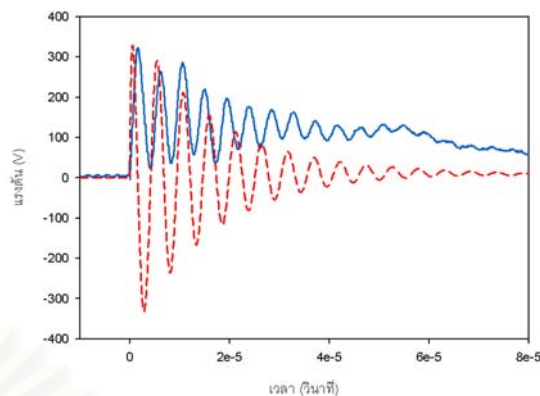
หม้อแปลง	อัตราส่วนจำนวนรอบ
A	17
B	4.5
C	7

#### 6.4 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุง

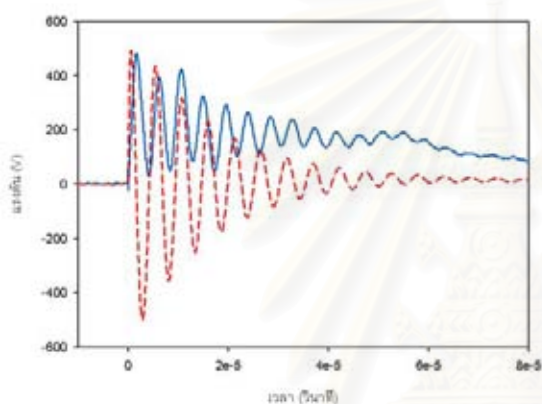
แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ต่อเพิ่มหม้อแปลงอุดมคติตามข้อมูลตารางที่ 6.4 สามารถจำลองผลและนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัดได้ดังรูปที่ 6.12



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



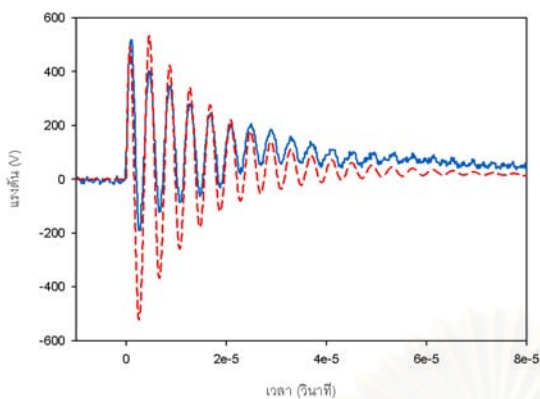
(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

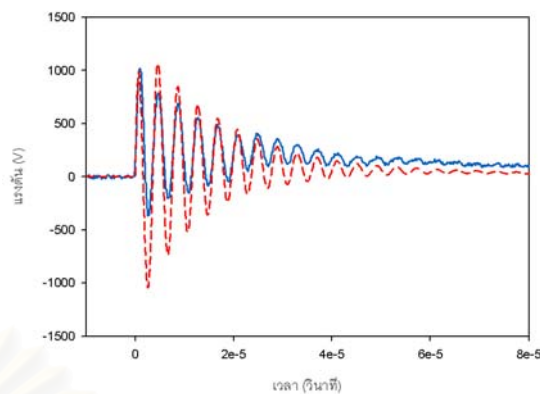
รูปที่ 6.12 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.12 สามารถสรุปได้ดังนี้

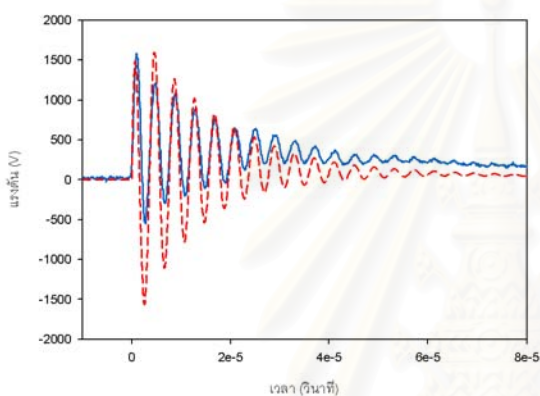
- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด
- a.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งจะมีค่าใกล้เคียงในช่วงสองวัฏจักรแรก แต่จากนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้น
- a.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งจะมีค่าใกล้เคียงในช่วงสองวัฏจักรแรก แต่จากนั้นจะเกิดความต่างเฟสขึ้น



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



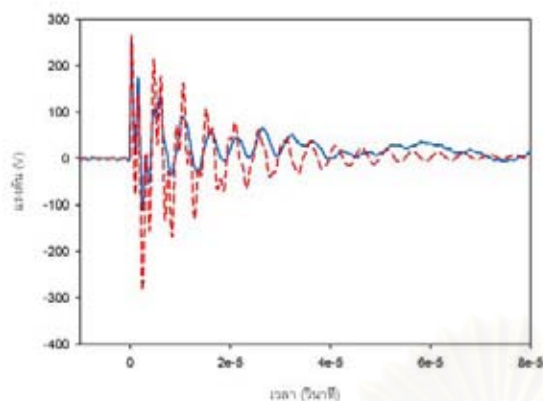
(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

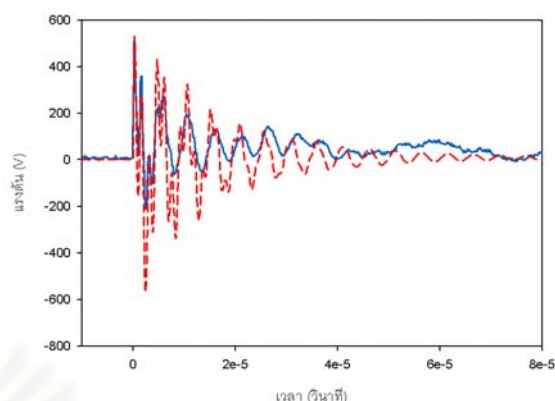
รูปที่ 6.13 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง B

จากผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 6.13 สามารถสรุปได้ดังนี้

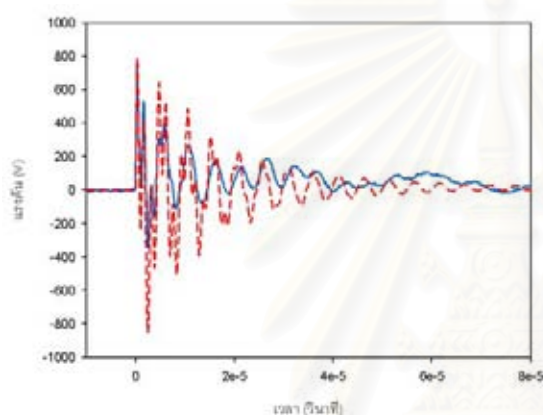
- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่จะพบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองจะมีค่าสูงสุดในวัฏจักรที่สอง ซึ่งต่างจากผลการวัดที่มีค่าสูงสุดในวัฏจักรแรก
- b.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง
- b.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.14 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง C

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.13 สามารถสรุปได้ดังนี้

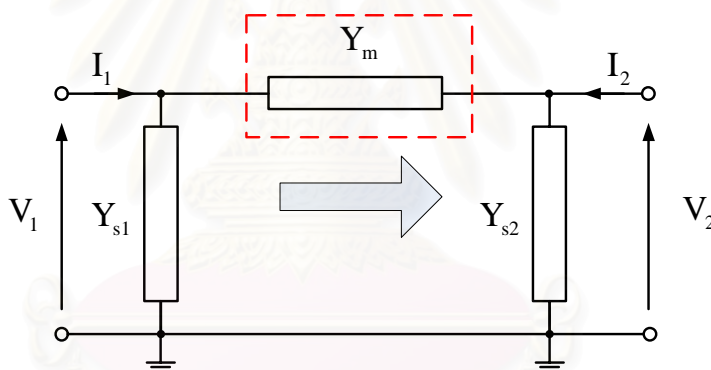
- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30 kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด รวมทั้งรูปคลื่นมีลักษณะการยุบตัวในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเช่นเดียวกัน แต่จะพบว่ารูปคลื่นจากการจำลองมีการลดทอนน้อยกว่ารูปคลื่นจากการวัด
- c.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง
- c.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A, B และ C สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัดจริง สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุง

เกณฑ์พิจารณา	หม้อแปลง A	หม้อแปลง B	หม้อแปลง C
ค่ายอดแรงดันจากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
ความถี่รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ไม่ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
มุมเฟสรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ไม่ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง

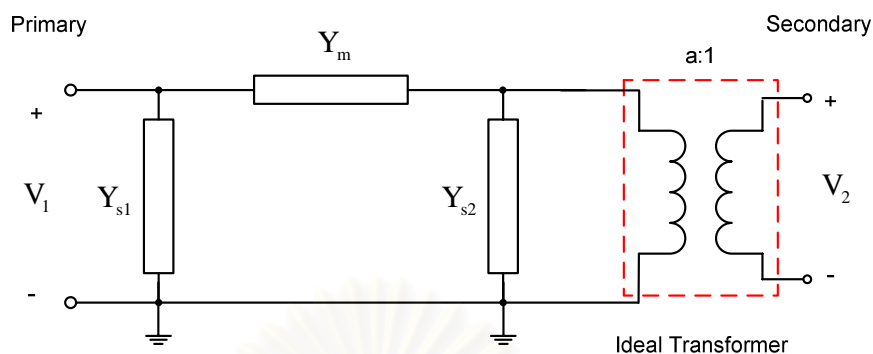
### 6.5 การปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์



รูปที่ 6.15 องค์ประกอบที่มีนัยสำคัญในการส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์ของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์

ผลการจำลองแรงดันเสิร์จสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์ ในบทที่ 5 การส่งถ่ายแรงดันอิมพัลส์ผ่านทางแอดมิตแตนซ์ถ่ายโอน (transfer admittances)  $Y_m$  ซึ่งเป็นแอดมิตแตนซ์ที่ต่อระหว่างด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงตามรูปที่ 6.15 ผลค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากการจำลองยังคงมีขนาดสูงกว่าค่าจากการวัด โดยแนวทางการปรับปรุงจะใช้หม้อแปลงอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  ตามรูปที่ 6.16 เหมือนแบบจำลองหม้อแปลงก่อนหน้านี





รูปที่ 6.16 แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หอนัดประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวคเตอร์ที่ปรับปรุงโดยการต่อเพิ่มหม้อแปลงในอุดมคติขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$

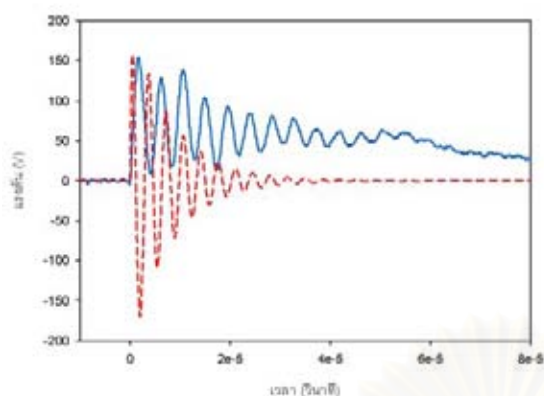
ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบหม้อแปลงในอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หอนัดประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวคเตอร์ของหม้อแปลง A, B และ C มีค่าตามตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงอุดมคติที่ขนานกับค่าความจุไฟฟ้า  $C_2$  สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หอนัดประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวคเตอร์

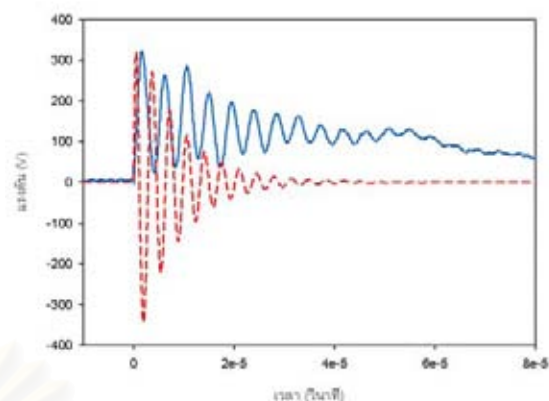
หม้อแปลง	อัตราส่วนจำนวนรอบ
A	22.5
B	9
C	8

## 6.6 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หอนัดประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวคเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุง

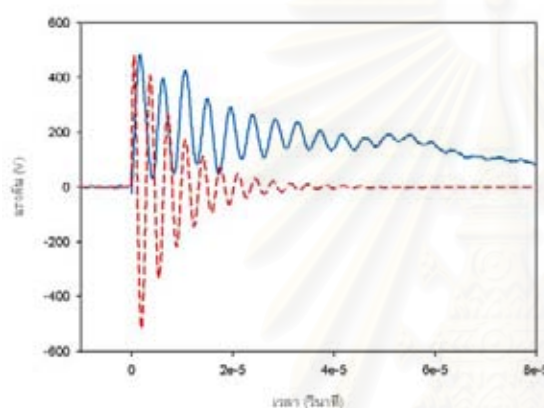
แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์หอนัดประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวคเตอร์ที่ต่อเพิ่มหม้อแปลงอุดมคติตามข้อมูลตารางที่ 6.6 สามารถจำลองผลและนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัดได้ดังรูปที่ 6.17 – 6.19



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



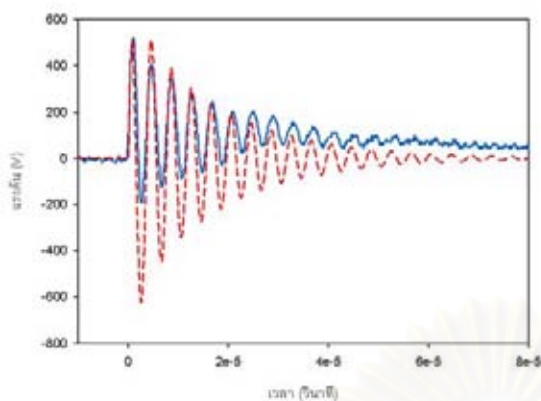
(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

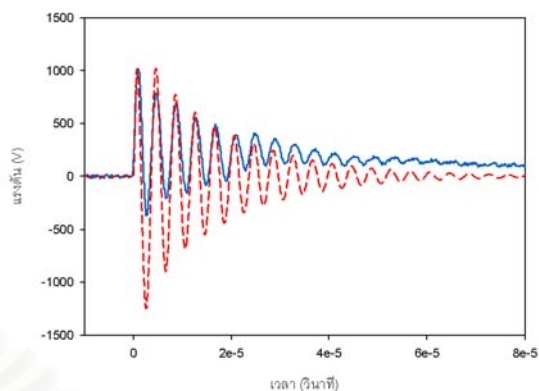
รูปที่ 6.17 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวคเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.17 สามารถสรุปได้ดังนี้

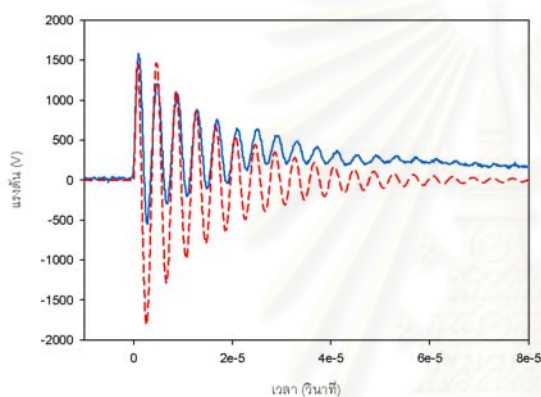
- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด
- a.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งไม่มีความใกล้เคียงกัน และมีความมากกว่าค่าที่ได้จากการวัด
- a.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีความต่างเฟสกันมาก



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



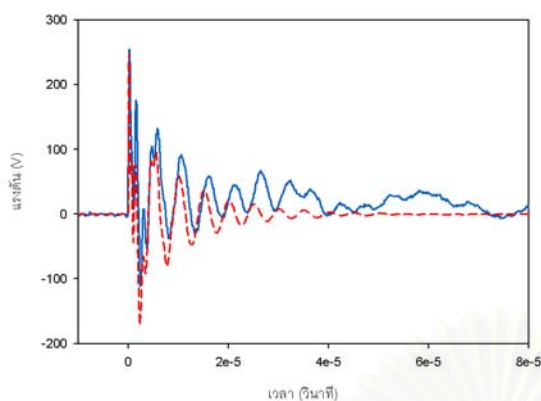
(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

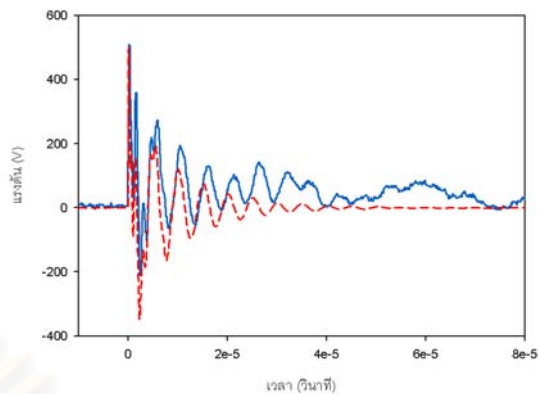
รูปที่ 6.18 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตตั้งทางเวคเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง B

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.18 สามารถสรุปได้ดังนี้

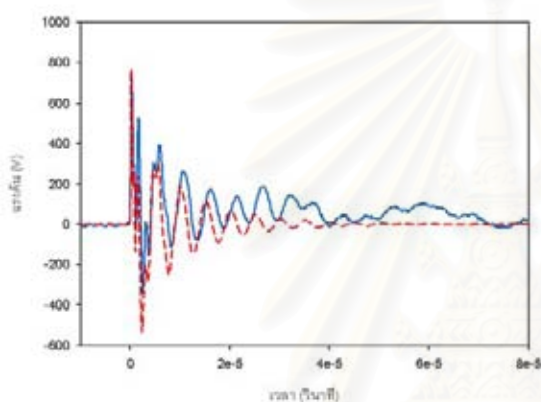
- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่จะพบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองจะมีค่าสูงสุดในวัฏจักรที่สอง ซึ่งต่างจากผลการวัดที่มีค่าสูงสุดในวัฏจักรแรก
- b.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง
- b.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง



(ก) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 10 kV



(ข) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 20 kV



(ค) แรงดันอิมพัลส์ขนาด 30 kV

— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.19 แรงดันเสิร์จเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการติดตั้งทางเวคเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง C

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดตามรูปที่ 6.19 สามารถสรุปได้ดังนี้

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลอง เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10, 20 และ 30kV มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด และพบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จจากการจำลองมีการยุบตัวของแรงดันในช่วงที่มีการกวัดแกว่ง ซึ่งรูปร่างมีความใกล้เคียงกับผลจากการวัดมากกว่า กรณีของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ
- c.2 ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง
- c.3 มุมเฟสของสัญญาณในช่วงที่มีการกวัดแกว่งมีค่าใกล้เคียง

จากผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับหม้อแปลง A, B และ C สามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากการคำนวณกับค่าจากการวัดจริงสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์

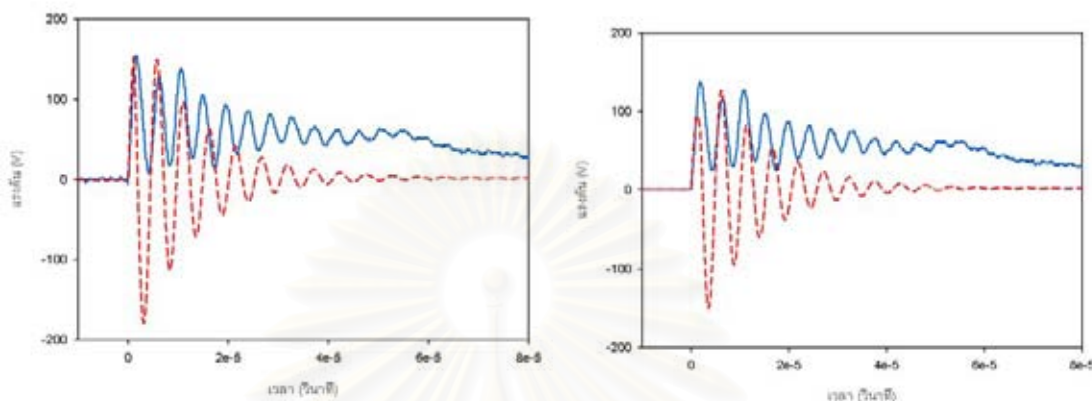
เกณฑ์พิจารณา	หม้อแปลง A	หม้อแปลง B	หม้อแปลง C
ค่ายอดแรงดันจากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
ความถี่รูปคลื่นที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ไม่ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
มุมเฟสรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าวัด	ไม่ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง

คุณสมบัติของแบบจำลองหม้อแปลงภายหลังผ่านการปรับปรุงทั้ง 3 แบบ ตามการศึกษาผลการเปลี่ยนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์คงที่ ต่อการเปลี่ยนค่ายอดและรูปคลื่นแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลง A, B และ C พบว่าค่ายอดของแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลงแปรผันตรงกับค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของแบบจำลอง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดผลการตอบสนองของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่ผลความถูกต้องของค่าขนาด, รูปคลื่น และค่าความถี่ รวมทั้งมุมเฟส แต่ละแบบจำลองหม้อแปลงจะมีความแตกต่างกัน

## 6.7 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จซึ่งมีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์สำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุง

จากการศึกษาผลของแรงดันเสิร์จต่อการเปลี่ยนขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นคงที่ของแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุงในหัวข้อก่อนหน้านี้ สำหรับการศึกษาผลแรงดันเสิร์จต่อการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอดคงที่ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุงสามารถแยกพิจารณาแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงได้ดังนี้

### 6.7.1 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุง

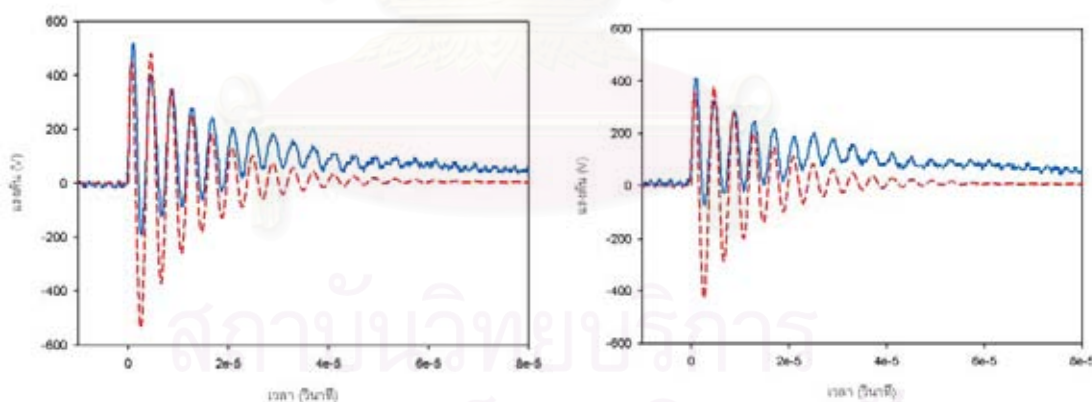


(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s

(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2 $\mu$ s

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง A

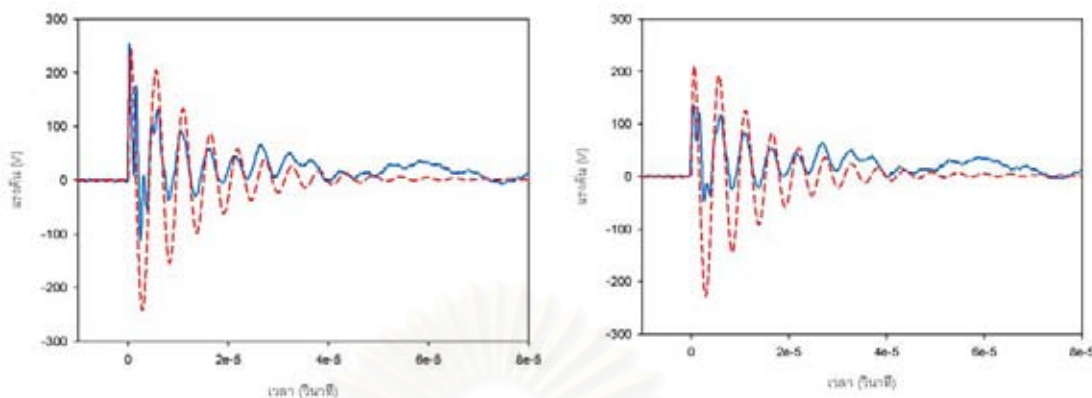


(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2 $\mu$ s

(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 3.8 $\mu$ s

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง B

(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1 $\mu$ s

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบรวมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองกับผลจากการวัดตามรูปที่ 6.20 - 6.22 สามารถแยกพิจารณาตามแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงได้ดังนี้

แบบจำลองหม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .2 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 1.2 $\mu$ s เป็น 2 $\mu$ s ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 1.2 $\mu$ s เป็น 2 $\mu$ s พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง 0.12 เท่า
- a.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 1.2 $\mu$ s เป็น 2 $\mu$ s โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลอง และผลการวัดจะมีความแตกต่างกัน

แบบจำลองหม้อแปลง B

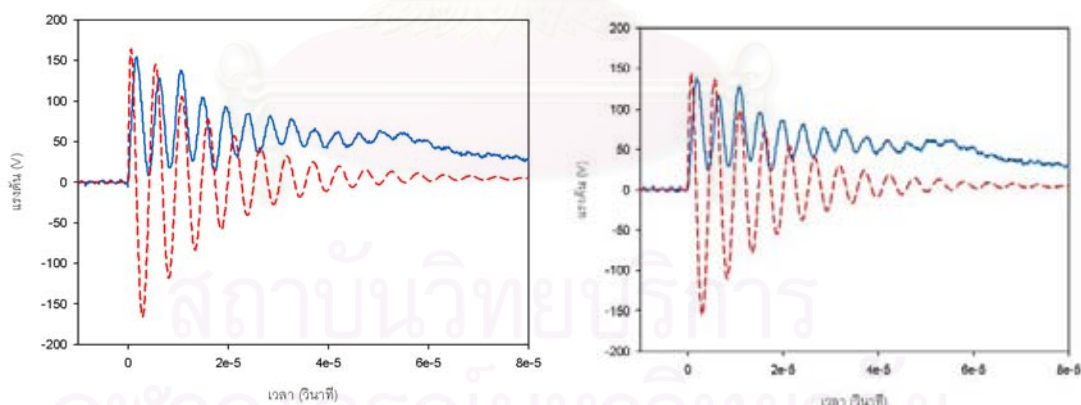
- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .23 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 2 $\mu$ s เป็น 3.8 $\mu$ s ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 2 $\mu$ s เป็น 3.8 $\mu$ s พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง 0.26 เท่า
- b.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 2 $\mu$ s เป็น 3.8 $\mu$ s โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลอง และผลการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน

### แบบจำลองหม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .21 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง 0.46 เท่า
- c.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลอง และผลการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาพบว่าค่ายอดแรงดันเสิร์จเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ายอดที่ได้จากผลการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุที่ผ่านการปรับปรุงจะมีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่สำหรับแบบจำลองหม้อแปลง C จะพบความแตกต่างกันมาก

### 6.7.2 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุง

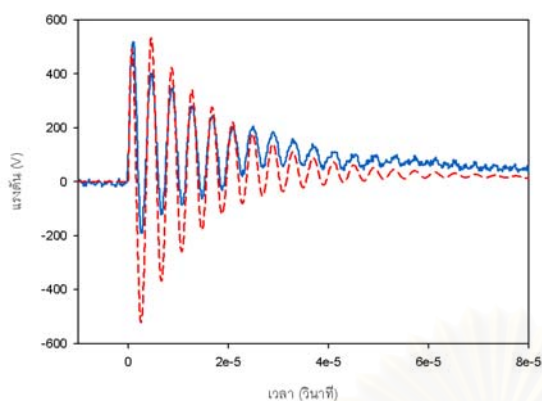
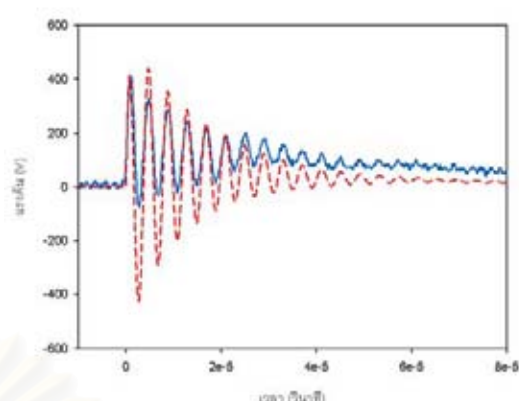


(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$  (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$

— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

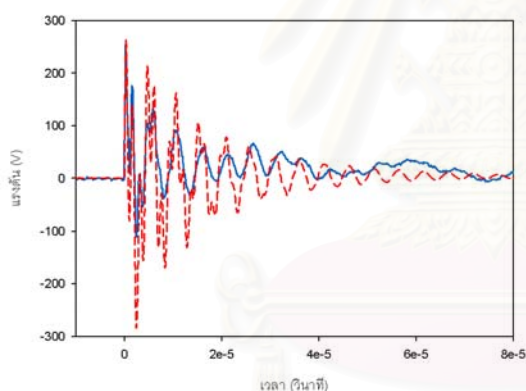
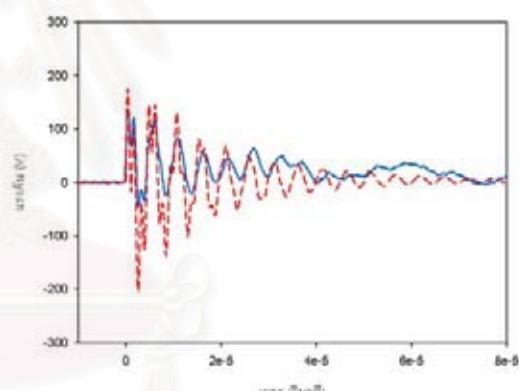
รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง A



(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2  $\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 3.8  $\mu\text{s}$ 

————— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.24 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง B

(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2  $\mu\text{s}$ (ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1  $\mu\text{s}$ 

————— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.25 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองกับผลจากการวัดตามรูปที่ 6.23 - 6.25 สามารถแยกพิจารณาตามแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงได้ดังนี้

แบบจำลองหม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .18 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2\mu\text{s}$  ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2\mu\text{s}$  พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง .12 เท่า
- a.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2\mu\text{s}$  โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากผลการจำลอง และผลการวัด พบว่ามีความแตกต่างกันมาก

แบบจำลองหม้อแปลง B

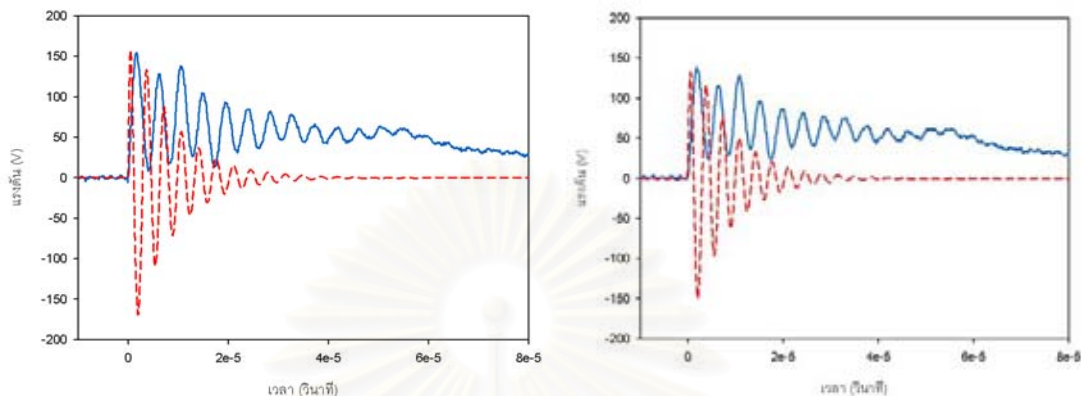
- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .2 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $2\mu\text{s}$  เป็น  $3.8\mu\text{s}$  ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $2\mu\text{s}$  เป็น  $3.8\mu\text{s}$  พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง .26 เท่า
- b.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $2\mu\text{s}$  เป็น  $3.8\mu\text{s}$  โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากผลการจำลอง และผลการวัด จะมีค่าใกล้เคียงกัน

แบบจำลองหม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .33 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง .46 เท่า
- c.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากผลการจำลอง และผลการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาพบว่าค่ายอดแรงดันเสิร์จเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ายอดที่ได้จากผลการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงจะมีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่สำหรับแบบจำลองหม้อแปลง C จะพบความแตกต่างกันมาก

### 6.7.3 ผลการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุง

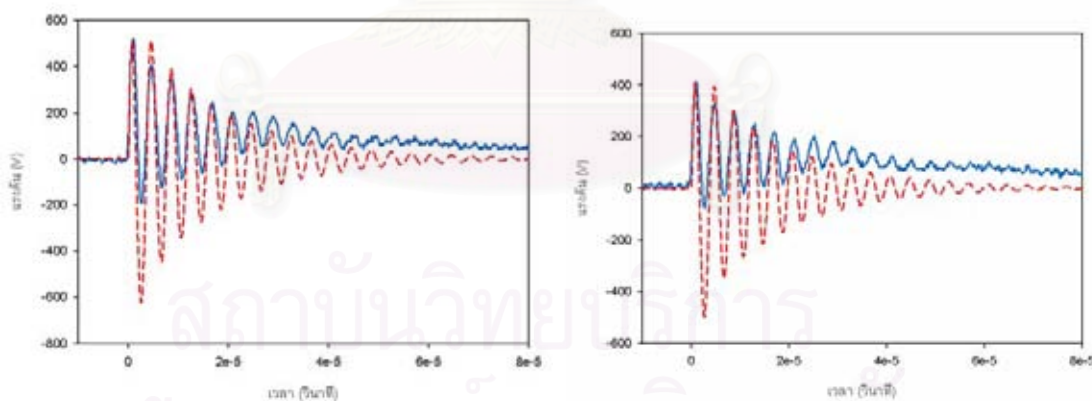


(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $1.2\mu\text{s}$

(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.26 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง A

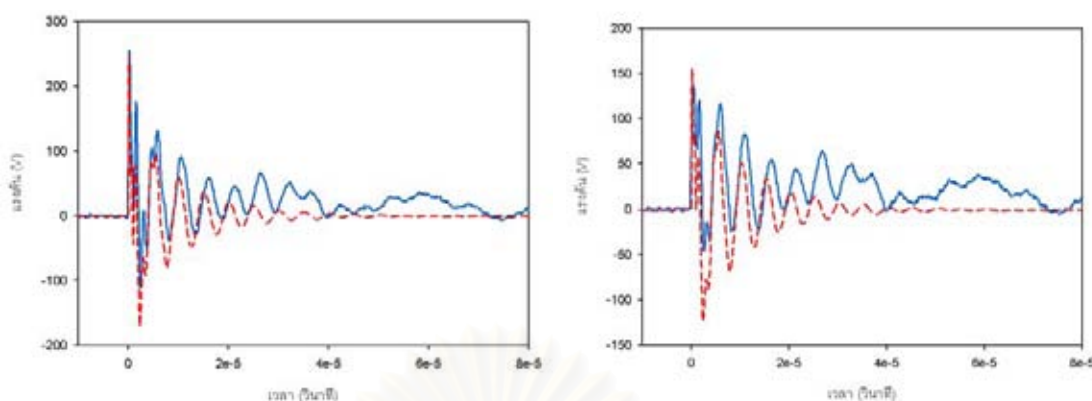


(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $2\mu\text{s}$

(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น  $3.8\mu\text{s}$

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.27 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง B

(ก) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 1.2 $\mu$ s(ข) แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่น 2.1 $\mu$ s

———— ค่าจากการวัด      - - - - - ค่าจากการจำลองด้วย ATP/EMTP

รูปที่ 6.28 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบ โดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงเพื่อศึกษาผลเวลาหน้าคลื่นอิมพัลส์สำหรับหม้อแปลง C

การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากผลการจำลองกับผลจากการวัดตามรูปที่ 6.26 - 6.28 สามารถแยกพิจารณาตามแต่ละแบบจำลองหม้อแปลงได้ดังนี้

แบบจำลองหม้อแปลง A

- a.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .17 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 1.2 $\mu$ s เป็น 2 $\mu$ s ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 1.2 $\mu$ s เป็น 2 $\mu$ s พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง .12 เท่า
- a.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 1.2 $\mu$ s เป็น 2 $\mu$ s โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากผลการจำลอง และผลการวัด พบว่ามีความแตกต่างกันมาก

แบบจำลองหม้อแปลง B

- b.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .2 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 2 $\mu$ s เป็น 3.8 $\mu$ s ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 2 $\mu$ s เป็น 3.8 $\mu$ s พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง .26 เท่า
- b.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก 2 $\mu$ s เป็น 3.8 $\mu$ s โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากผลการจำลอง และผลการวัด จะมีค่าใกล้เคียงกัน

### แบบจำลองหม้อแปลง C

- c.1 ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการจำลองลดลง .37 เท่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  ในขณะที่ค่ายอดแรงดันเสิร์จจากผลการวัดเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  พบว่าค่ายอดมีค่าลดลง .46 เท่า
- c.2 ค่าความถี่ และมุมเฟสของแรงดันเสิร์จในช่วงที่มีการกวัดแกว่งเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นจาก  $1.2\mu\text{s}$  เป็น  $2.1\mu\text{s}$  โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากผลการจำลอง และผลการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาพบว่าค่ายอดแรงดันเสิร์จเมื่อมีการเพิ่มเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ายอดที่ได้จากผลการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงจะมีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด แต่สำหรับแบบจำลองหม้อแปลง C จะพบความแตกต่างกันมาก

ตามการศึกษาผลแรงดันเสิร์จต่อการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุงทั้ง 3 แบบ ของแบบจำลองหม้อแปลง A, B และ C ในหัวข้อที่ 6.7 พบว่าค่ายอดแรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิจากการจำลองแปรผกผันกับเวลาหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของแบบจำลองหม้อแปลง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวัดผลการตอบสนองของหม้อแปลงไฟฟ้า

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองหม้อแปลงชนิดชั่วคราวสำหรับการจำลองสถานะชั่วคราว เพื่อใช้ในการพิจารณาผลการส่งถ่ายแรงดันเสิร์จผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแบบจำลองหม้อแปลงที่ได้ศึกษามีทั้งหมด 3 แบบดังต่อไปนี้

- แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ

แบบจำลองที่สร้างจากแบบจำลองหม้อแปลงในสถานะคงตัว โดยมีการต่อเพิ่มตัวเก็บประจุระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิ, ขั้วขดลวดทุติยภูมิ และระหว่างขั้วขดลวดปฐมภูมิกับขั้วขดลวดทุติยภูมิ สำหรับการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะอาศัยข้อมูลผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดขดลวดดำนปฐมภูมิ, ขดลวดดำนทุติยภูมิ และฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ จากนั้นจะคำนวณค่าความจุไฟฟ้า

- แบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ

แบบจำลองที่สร้างจากการต่อรวมวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ย่านต่างๆ ในรูปแอดมิตแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลง และฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวด ในลักษณะการประมาณผลตอบสนอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณค่าองค์ประกอบกับแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุจะมีความยุ่งยาก และซับซ้อนกว่า

- แบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์

แบบจำลองที่สร้างโดยการสังเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปแอดมิตแตนซ์ของขดลวดหม้อแปลง และฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวด ผ่านกระบวนการระบุเชิงตัวเลขที่เรียกว่า “การพิตติงทางเวกเตอร์” โดยผลการสังเคราะห์จะอยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้า เช่นเดียวกับกรณีของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ แต่มีความซับซ้อนกว่า

ตามการศึกษาทฤษฎีของแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 แบบ สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วยหม้อแปลง A, B และ C ตามรูปในบทที่ 3 โดย LCR มิเตอร์ รุ่น HP4284A เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ทั้งในรูปอิมพีแดนซ์ และแอดมิตแตนซ์ ซึ่งมีย่านความถี่การทำงานตั้งแต่ 20Hz – 1MHz

ซึ่งผลตอบสนองเชิงความถี่ขององค์ประกอบขดลวด และฉนวนที่คั่นระหว่างขดลวด ตาม การสังเคราะห์แบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 แบบ จะมีการนำผลมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ ได้จากการวัดเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง พบว่าผลการเปรียบเทียบกรณีของแบบจำลองหม้อ แปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์จะมีความถูกต้องมาก ที่สุด ในขณะที่ผลการเปรียบเทียบกรณีของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บ ประจุจะมีความถูกต้องน้อยที่สุด

สำหรับการศึกษาผลตอบสนองหม้อแปลงไฟฟ้าตามบทที่ 4 จะประกอบด้วยการวัดผล ตอบสนองหม้อแปลงด้วยแรงดันสวิตช์เชิงเส้น, ผลตอบสนองหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีการ เปลี่ยนค่าขนาด และผลตอบสนองหม้อแปลงด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีการเปลี่ยนเวลาหน้าคลื่น ซึ่ง สามารถสรุปได้ดังนี้

- รูปคลื่นของแรงดันทางด้านปฐมภูมิในช่วงที่มีการสับสวิตช์ เมื่อขยายรูปคลื่นแรงดัน ในช่วงดังกล่าว พบว่ามีลักษณะเป็นรูปคลื่นอิมพัลส์รวมอยู่กับรูปคลื่นไซน์ชอยดอลล์
- ค่ายอดของแรงดันเชิงเส้นทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแปรผันตรงกับค่ายอดของ แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง
- ค่ายอดของแรงดันเชิงเส้นทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแปรผกผันกับเวลาหน้าคลื่น แรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองหม้อแปลง A, B และ C พบว่าลักษณะแรงดันเชิงเส้นทางด้าน ทุติยภูมิของแต่ละหม้อแปลงมีความแตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของหม้อแปลง ได้แก่ อัตราส่วนจำนวนรอบ, ขนาดพิทัก, วิธีการพัน, วิธีการฉนวน ตลอดจนวัสดุที่ใช้ในการสร้าง หม้อแปลง โดยภายหลังการศึกษาผลตอบสนองหม้อแปลงจะมีการศึกษาผลการจำลองสถานะชั่ว ครู่ของแบบจำลองหม้อแปลงตามบทที่ 5 ซึ่งพบว่าแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 แบบมีคุณสมบัติ การตอบสนองต่อแรงดันอิมพัลส์เหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยผล ความถูกต้องของแรงดันเชิงเส้นเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองกับผลการวัดสามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากแบบจำลองหม้อแปลงกับค่าจากการวัด

เกณฑ์พิจารณา	แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้ องค์ประกอบร่วมตัวเก็บ ประจุ			แบบจำลองหม้อแปลงซึ่ง รวมผลองค์ประกอบเชิง ความถี่ต่างๆ			แบบจำลองหม้อแปลงจากการ สังเคราะห์องค์ประกอบโดย กระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ความถูกต้อง ค่ายอดแรงดัน เสิร์จ	น้อย	น้อย	น้อย	มาก	มาก	มาก	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ความถูกต้อง ของรูปคลื่น	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	น้อย	มาก	มาก
ความถูกต้อง ของความถี่ และมุมเฟส	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก	มาก	มาก	น้อย	มาก	มาก

จากตารางที่ 7.1 เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 พบว่าแบบจำลองหม้อแปลงจากการสังเคราะห์องค์ประกอบโดยกระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์เป็นแบบจำลองที่ให้ความถูกต้องมากที่สุด ในขณะที่แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุจะเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามผลการจำลองค่ายอดแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 จะมีค่าที่สูงกว่าค่าจากการวัด ซึ่งนอกจากนั้นในกรณีของแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้องค์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุรูปคลื่นแรงดันยังไม่มีลักษณะของการลดทอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเสนอวิธีการปรับปรุงแบบจำลองหม้อแปลงเพื่อลดผลของความคลาดเคลื่อนดังกล่าวตามแสดงในบทที่ 6 ซึ่งผลการจำลองของแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จที่ได้จากแบบจำลองหม้อแปลงที่ผ่านการปรับปรุงกับค่าจากการวัด

เกณฑ์พิจารณา	แบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้ องค์ประกอบร่วมตัวเก็บ ประจุ			แบบจำลองหม้อแปลงซึ่ง รวมผลองค์ประกอบเชิง ความถี่ต่างๆ			แบบจำลองหม้อแปลงจากการ สังเคราะห์องค์ประกอบโดย กระบวนการพิตติงทางเวกเตอร์		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
ค่ายอดแรงดัน									
รูปคลื่น									
ความถี่และเฟส									



ใกล้เคียงกัน

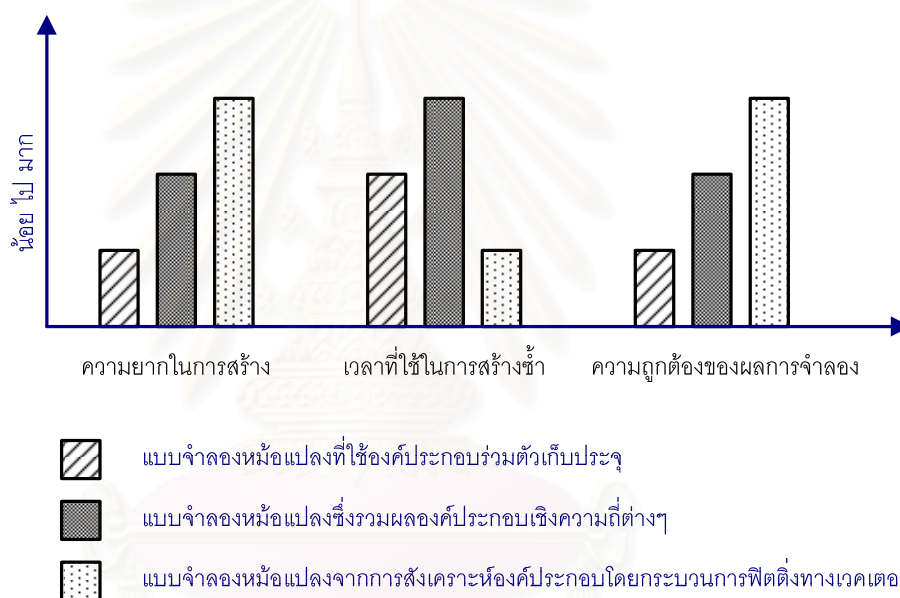


ไม่ใกล้เคียงกัน



จากการสังเกตผลตามตาราง 7.2 พบว่าแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 ในกรณีของหม้อแปลง A แม้ว่าจะผ่านการปรับปรุงแล้ว แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในส่วนของความถี่ และมุมเฟสของรูปคลื่นในช่วงที่มีการวัดแกว่ง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างทางกายภาพของหม้อแปลง A ซึ่งไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอนนั้น ทำให้ไม่สามารถใช้ลักษณะการจัดวางองค์ประกอบแบบพายได้

สรุปผลการเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงสำหรับการจำลองสถานะชั่วคราว เมื่อพิจารณารวมในส่วนของความยากง่าย, เวลาในการสร้างแบบจำลองซ้ำ และความถูกต้องของการจำลองสำหรับแบบจำลองหม้อแปลงทั้ง 3 แบบ สามารถแสดงได้ดังแผนภูมิในรูปที่ 7.1

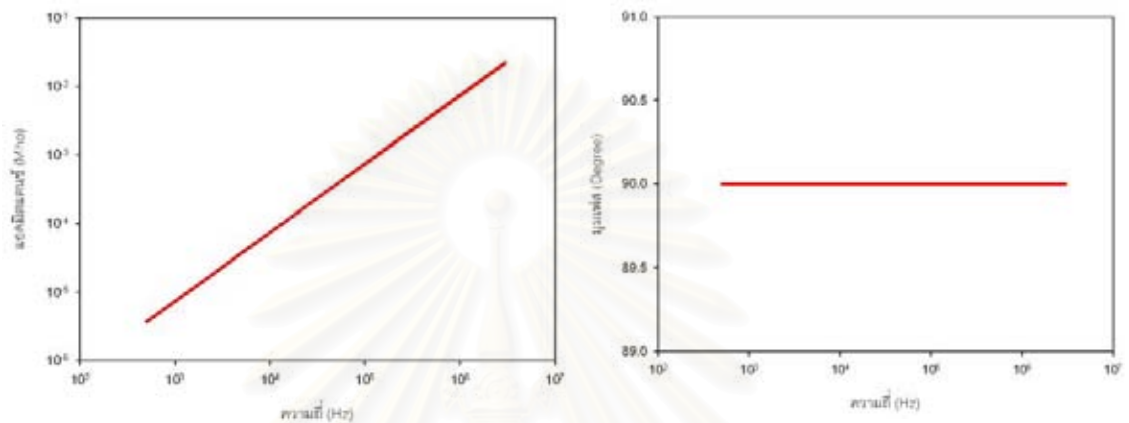


รูปที่ 7.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองหม้อแปลงสำหรับการจำลองสถานะชั่วคราว

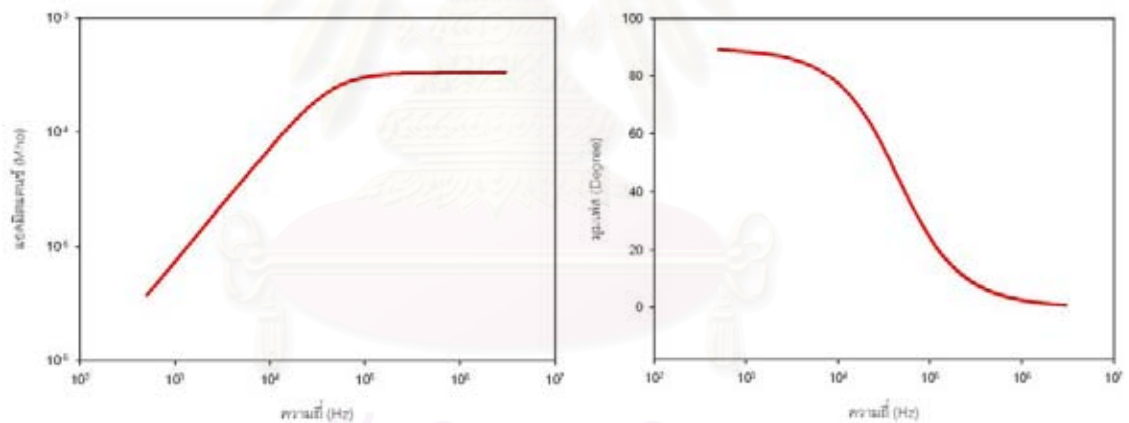
## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงควรมีการพิจารณาผลของโครงสร้างทางกายภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบต่างๆ ที่มีต่อการจัดวางโครงสร้างองค์ประกอบของแบบจำลองแบบพาย
2. เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิในแบบจำลองหม้อแปลงที่ใช้อุปกรณ์ประกอบร่วมตัวเก็บประจุ และแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ มีค่าเท่ากัน โดยสามารถวาดกราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.41nF ในกรณีหม้อแปลง B ได้ตามรูปที่ 7.2 (ก) จากการศึกษาของ Dr.Noda และคณะ [4] ที่ว่าองค์ประกอบที่ต่อเชื่อมระหว่างขดลวดด้านปฐมภูมิและขดลวดด้านทุติยภูมิมีผลต่อรูปคลื่นแรงดันเสิร์จ

ดังนั้นเมื่อทดลองแทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ด้วยวงจรค่าต้านทานอนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าจะมีผลทำให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ในรูปของแอดมิตแตนซ์มีค่าลดลงในช่วงความถี่สูง ตามรูปที่ 7.2 (ข)



(ก) แอดมิตแตนซ์ของค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ซึ่งมีค่า 1.41nF

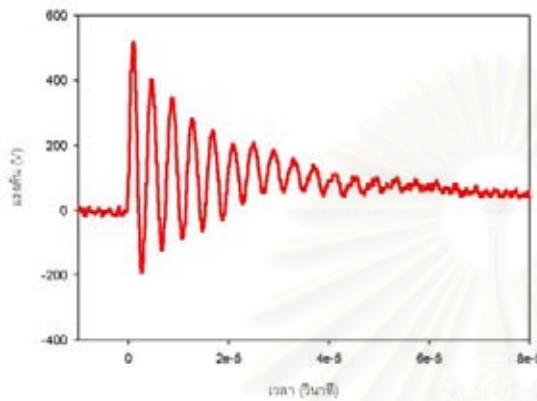


(ข) แอดมิตแตนซ์ของวงจรค่าต้านทาน 3000Ω อนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้า 1.41nF

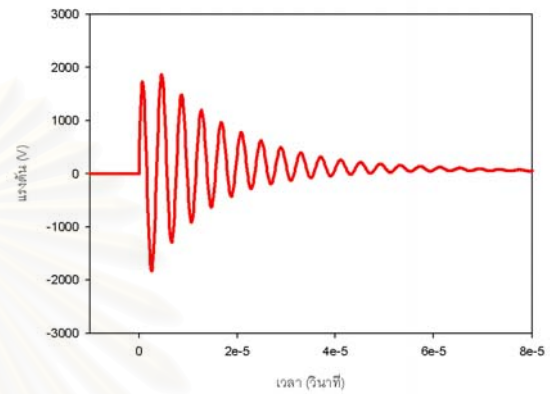
รูปที่ 7.2 แอดมิตแตนซ์ของค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  ที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง B

เมื่อพิจารณาผลการจำลองแรงดันเสิร์จด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ โดยการป้อนแรงดันอิมพัลส์ขนาด 10kV โดยที่องค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  1.41nF จะได้ผลการจำลองแรงดันเสิร์จตามรูปที่ 7.3

ในขณะที่ผลการจำลองแรงดันเสิร์จของแบบจำลองหม้อแปลงที่องค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแทนค่าความจุไฟฟ้า  $1.41\text{nF}$  อนุกรมกับค่าต้านทาน  $3000\ \Omega$  จะได้ผลตามรูปที่ 7.4

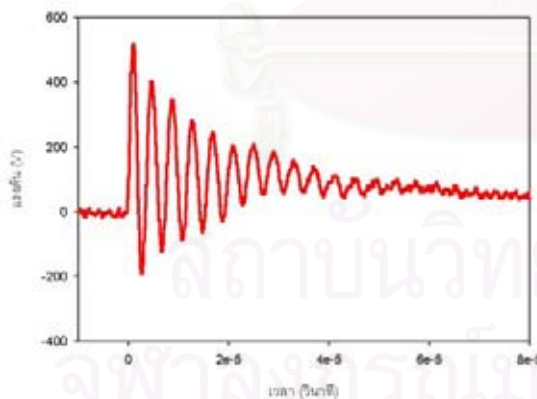


(ก) แรงดันเสิร์จที่ได้จากการวัด

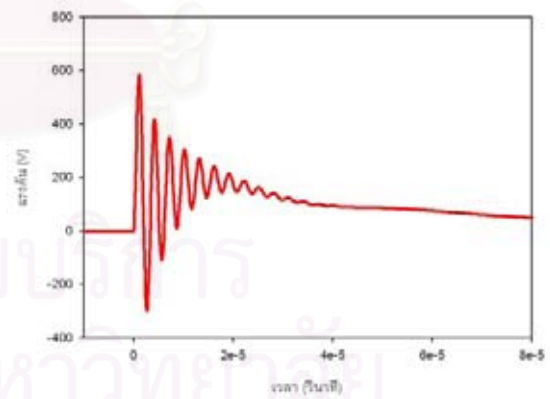


(ข) แรงดันเสิร์จที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 7.3 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง B ซึ่งองค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$   $1.41\text{nF}$



(ก) แรงดันเสิร์จที่ได้จากการวัด



(ข) แรงดันเสิร์จที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 7.4 การเปรียบเทียบแรงดันเสิร์จด้วยแบบจำลองหม้อแปลงซึ่งรวมผลองค์ประกอบเชิงความถี่ต่างๆ สำหรับหม้อแปลง B ซึ่งองค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$   $1.41\text{nF}$  อนุกรมกับค่าต้านทาน  $3000\ \Omega$

จากข้อมูลในรูปที่ 7.3 และ 7.4 พบว่าขนาดค่ายอดของแรงดันเสิร์จเมื่อองค์ประกอบที่ต่อระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิแทนค่าความจุไฟฟ้า  $C_{12}$  1.41nF อนุกรมกับค่าต้านทาน 3000Ω จะมีขนาดที่ลดลงใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัดจริง รวมทั้งมีลักษณะการกวัดแกว่งของรูปคลื่นในช่วงที่แรงดันมีค่าบวกมากกว่าในช่วงลบเช่นเดียวกันด้วย แต่ค่าความถี่ของสัญญาณในช่วงการกวัดแกว่งจะมีค่าสูงกว่าค่าความถี่จากการวัด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เมษายน 2547), หน้า 17.
- [2] Hermann W.Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 4(1969): 388-399.
- [3] Woivre V., Arthaud JP., Ahmad A. and Burais N., "Transient overvoltage study and model for shell-type power transformer", IEEE Transactions on Power Delivery, (August 1993): .
- [4] Taku Noda, Hiroshi Nakamoto and Shigeru Yokoyama, "Accurate modeling of core-type distribution transformers for electromagnetic transient studies", IEEE Transactions on Power Delivery, (October 2002): 969-976.
- [5] Gustavsen Bjørn and Semlyen Adam, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting", IEEE Transactions on Power Delivery, (July 1999): 1052-1061.
- [6] Bruno Cogitore, Jean P.Keradec and Jean Barbaroux, "The two-winding transformer: an experimental method to obtain a wide frequency range equivalent circuit", IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, (April 1994): 364-370.
- [7] Giulio Antonini, "SPICE equivalent circuits of frequency-domain responses", IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 45(August 2003): 502-512.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การฟิตติ้งทางเวกเตอร์

การฟิตติ้งทางเวกเตอร์ (Vector Fitting) เป็นเทคนิคระเบียบเชิงตัวเลขเพื่อสร้างฟังก์ชันตรรกยะจากผลตอบสนองเชิงความถี่ระบบเชิงเส้น ซึ่งลักษณะพิเศษของฟังก์ชันตรรกยะที่สังเคราะห์ได้จะมีโพลที่ทำให้ระบบเชิงเส้นมีเสถียรภาพ การฟิตติ้งทางเวกเตอร์ได้มีการนำเสนอครั้งแรกเมื่อปี 1999 โดย B.Gustavsen และ A.Semlyen ในรูปแบบของฟังก์ชันที่เขียนด้วยโปรแกรม Matlab ซึ่งอนุญาตให้ดาวน์โหลดได้ฟรีที่ [www.energy.sintef.no](http://www.energy.sintef.no) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพในการคำนวณ โดยปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 2.1

#### หลักการการฟิตติ้งทางเวกเตอร์

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเชิงเส้นสามารถแทนด้วยฟังก์ชันตรรกยะซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างโพลและซีโร และเมื่อผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการฟิตติ้งทางเวกเตอร์จะมีการกำหนดตำแหน่งของโพลใหม่ (pole relocation) จากกระบวนการทำซ้ำ โดยแต่ละขั้นของการทำซ้ำจะมีการแก้ระบบสมการโดยเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) เพื่อให้การประมาณมีความถูกต้องทั้งเศษ และส่วนของฟังก์ชันตรรกยะ สำหรับโพลที่ได้จากการประมาณใหม่ในแต่ละรอบการทำซ้ำจะได้มาจากการทำซ้ำในรอบก่อนหน้านั้น สามารถสรุปหลักการได้ดังนี้

1. การกำหนดตำแหน่งโพลเริ่มต้นสำหรับกระบวนการทำซ้ำ
2. การกำหนดฟังก์ชันตรรกยะและฟังก์ชันเสริมเพื่อสร้างสมการเชิงเส้น
3. การแก้สมการเชิงเส้นโดยเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุด
4. การกำจัดโพลเริ่มต้น

#### การวางตำแหน่งโพลเริ่มต้นสำหรับกระบวนการทำซ้ำ

การวางตำแหน่งโพลเริ่มต้นต้องคำนึงถึงปัจจัยดังต่อไปนี้

1. การแก้สมการเชิงเส้น จะเกิดเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม (ill-conditioned) ถ้าโพลเริ่มต้นเป็นค่าจำนวนจริง ซึ่งแก้โดยการใส่โพลเริ่มต้นที่เป็นคู่ของจำนวนเชิงซ้อน

$$a_n = -\alpha + j\beta, \quad a_{n+1} = -\alpha - j\beta \quad \text{เมื่อ } \alpha = \beta/100$$

2. ค่าความแตกต่างระหว่างโพลเริ่มต้นกับโพลจริงหากมีความแตกต่างมากเกินไปจะทำให้เกิดค่าความผันผวนมาก เนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการแก้สมการเชิงเส้นเป็นวิธีกำลังสองน้อย

ที่สุด ซึ่งสามารถแก้ด้วยการแทนโพลเริ่มต้นของการทำซ้ำในรอบใหม่ด้วยโพลที่ได้จากการประมาณของการทำซ้ำในรอบก่อนหน้า

### การกำหนดฟังก์ชันตรรกยะและฟังก์ชันเสริมเพื่อสร้างสมการเชิงเส้น

ฟังก์ชันตรรกยะ  $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  โดยที่  $f$  แทนชุดข้อมูลที่ได้มาจากการวัด  $(s_k)_{k=1}^n$  เมื่อกำหนดฟังก์ชันเสริม (arbitrary function)  $\sigma: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  เมื่อกำหนดให้  $\sigma(s)f(s)$  และ  $\sigma(s)$  เพื่อประมาณฟังก์ชันตรรกยะโดยการใช้ชุดโพลเดียวกัน ดังนั้นเราจะได้

$$\begin{pmatrix} f(s)\sigma(s) \\ \sigma(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^D \frac{c_i}{s-\bar{a}_i} + e + hs \\ \sum_{i=1}^D \frac{\tilde{c}_i}{s-\bar{a}_i} + 1 \end{pmatrix} \quad (ก1)$$

จากสมการ (ก1) นำค่า  $\sigma(s)$  ในแถวที่ 2 แทนค่าในแถวที่ 1 ได้

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^D \frac{c_i}{s-\bar{a}_i} + e + hs &= \left( \sum_{i=1}^D \frac{\tilde{c}_i}{s-\bar{a}_i} + 1 \right) f(s) \\ \left( \sum_{i=1}^D \frac{c_i}{s-\bar{a}_i} + e + hs \right) - \left( \sum_{i=1}^D \frac{\tilde{c}_i}{s-\bar{a}_i} \right) f(s) &= f(s) \end{aligned} \quad (ก2)$$

### การแก้สมการเชิงเส้นโดยเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุด

เมื่อ  $(s_k)_{k=1}^n$  เป็นข้อมูลจากการวัดที่ความถี่ต่างๆ สามารถเขียนสมการ (ก2) ในรูปของสมการเชิงเส้นดังนี้

$$A_k x = b_k \quad (ก3)$$

โดยที่

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 1 & s_k & \dots & \dots \\ \frac{1}{s_k - \bar{a}_1} & \dots & \frac{1}{s_k - \bar{a}_n} & 1 & s_k & \frac{-f(s_k)}{s_k - \bar{a}_1} & \dots & \frac{-f(s_k)}{s_k - \bar{a}_n} \end{bmatrix}$$

$$x = [c_1 \quad \dots \quad c_n \quad e \quad h \quad \tilde{c}_1 \quad \dots \quad \tilde{c}_n]^T, \quad b_k = f(s_k)$$

ซึ่งถ้าโพล  $\bar{a}_i$  ได้มีการกำหนดล่วงหน้าเราจะได้ระบบสมการเชิงเส้นซึ่งมีตัวแปรไม่ทราบค่า  $\{c_i, \tilde{c}_i, e, h\} \in x$  สำหรับเทคนิคที่ใช้แก้สมการจะเป็นวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และรากสมการที่ได้จะเป็นแบบหลายค่า (overdetermined)



### เทคนิคกำลังสองน้อยที่สุด

กำหนดฟังก์ชันที่ต้องการประมาณ  $H$  ด้วยฟังก์ชัน  $\tilde{H}$  ดังนี้

$$\tilde{H}(s) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i f_i(s)}{\sum_{j=1}^D \beta_j g_j(s)} =: \frac{p(s, \alpha)}{q(s, \beta)} \quad (ก4)$$

เมื่อ  $f_i$  และ  $g_j$  เป็นฟังก์ชันพื้นฐาน (basis function) ของตัวเศษ และตัวส่วนตามลำดับ  
 $\alpha_i$  และ  $\beta_j$  เป็นสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า

ถ้าจำนวนตัวอย่างของฟังก์ชัน  $H$  จำนวน  $(s_k)_{k=1}^n$  ตัวอย่าง การประมาณฟังก์ชัน  $H$  ด้วยฟังก์ชัน  $\tilde{H}$  ในแนวคิดของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือให้มีความแตกต่างน้อยที่สุดดังนี้

$$\min_{\alpha, \beta} \sum_{k=1}^n |H(s_k) - \tilde{H}(s_k)|^2 \quad (ก5)$$

แทน  $\tilde{H}$  จาก (ก4) ใน (ก5) ได้

$$\min_{\alpha, \beta} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^D \beta_j g_j(s_k) \right|^2} \left| \sum_{i=1}^N \alpha_i f_i(s_k) - H(s_k) \sum_{j=1}^D \beta_j g_j(s_k) \right|^2 \quad (ก6)$$

ซึ่งอยู่ในรูป linear LS  $\|Ax - b\|_2$  และจาก (ก6) สามารถเขียนได้อีกแบบดังนี้

$$\min_{\alpha, \beta} \sum_{k=1}^n \frac{1}{|q(s_k, \beta)|^2} |p(s_k, \alpha) - H(s_k)q(s_k, \beta)|^2 \quad (ก7)$$

โดยขั้นตอนการทำซ้ำเริ่มโดย  $|q(s, \beta^{(0)})| = 1$

จากนั้นทำการคำนวณ  $\alpha^{(t)}$  และ  $\beta^{(t)}$  โดยการทำซ้ำตามความสัมพันธ์

$$\min_{\alpha^{(t)}, \beta^{(t)}} \sum_{k=1}^n \frac{1}{|q(s_k, \beta^{(t-1)})|^2} |p(s_k, \alpha^{(t)}) - H(s_k)q(s_k, \beta^{(t)})|^2 \quad (ก8)$$

โดย  $t = 1, 2, \dots$  และ  $\frac{1}{|q(s_k, \beta^{(t-1)})|^2}$  เป็นตัวคูณค่าน้ำหนัก (weighting factor)

### แบบแผนการทำซ้ำเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุด

กำหนด  $D$  (degree of the denominator), กำหนด  $(\bar{a}_i)_{i=1}^D$  (Initial poles) และกำหนด  $N=D+2$  สำหรับฟังก์ชันพื้นฐานของการทำซ้ำครั้งที่ 1

$$f_i(s) = g_i(s) = \frac{1}{s - a_i} \quad \text{เมื่อ } i = 1, \dots, D$$

$$f_{D+1}(s) = g_{D+1}(s) = 1 \quad f_{D+2}(s) = s \quad (\text{ก9})$$

$$\text{span} \langle f_1, \dots, f_{D+2} \rangle = \frac{\mathbb{C}_{D+1}[s]}{\prod_{i=1}^D (s - a_i)} \quad (\text{ก10})$$

$$\text{span} \langle g_1, \dots, g_{D+1} \rangle = \frac{\mathbb{C}_D[s]}{\prod_{i=1}^D (s - a_i)} \quad (\text{ก11})$$

เมื่อ  $\mathbb{C}_k[s]$  เป็นพหุนาม  $s$  มีลำดับน้อยกว่าเท่ากับ  $k$  ถ้าพหุนาม  $p(s) \in \mathbb{C}_k[s]$  ฟังก์ชันพื้นฐานใน (ก7) สามารถการทำซ้ำครั้งที่ 2 ซึ่งในการทำซ้ำครั้งที่ 1 เราจะได้สัมประสิทธิ์  $\alpha_i^{(1)}$  และ  $\beta_i^{(1)}$  ซึ่งจาก (ก10) และ (ก11) เราสามารถเขียนในรูปของ  $p$  และ  $q$  ดังนี้

$$p(s, \alpha^{(1)}) = \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s - z_i^{(p,1)})}{\prod_{i=1}^D (s - a_i)} \quad q(s, \beta^{(1)}) = \frac{\prod_{j=1}^D (s - z_j^{(q,1)})}{\prod_{i=1}^D (s - a_i)} \quad (\text{ก12})$$

การทำซ้ำครั้งที่ 2 ใช้  $q(s, \beta^{(1)})$  เป็นตัวคูณค่านำหน้าได้  $p(s, \alpha^{(2)})$  และ  $q(s, \beta^{(2)})$  จาก (ก12)

เมื่อแทนในสมการที่ (ก8) ได้ผลดังนี้

$$\sum_{k=1}^n \left| \frac{\prod_{i=1}^D (s_k - a_i)}{\prod_{j=1}^D (s_k - z_j^{(q,1)})} \right|^2 \left| \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s_k - z_i^{(p,2)})}{\prod_{i=1}^D (s_k - a_i)} - H(s) \frac{\prod_{j=1}^D (s_k - z_j^{(q,2)})}{\prod_{i=1}^D (s_k - a_i)} \right|^2 \quad (\text{ก13})$$

ลดรูปได้

$$\sum_{k=1}^n \left| \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s_k - z_i^{(p,2)})}{\prod_{j=1}^D (s_k - z_j^{(q,1)})} - H(s) \frac{\prod_{j=1}^D (s_k - z_j^{(q,2)})}{\prod_{j=1}^D (s_k - z_j^{(q,1)})} \right|^2 \quad (\text{ก14})$$

จากสมการ (ก13) และ (ก14)  $\bar{a}_i$  สามารถแทนโดย  $z_j^{(q,1)}$  ซึ่งเมื่อพิจารณารวมกับสมการ (ก2) ได้

$$\sum_{k=1}^n \left| \sum_{i=1}^D \frac{c_i}{(s_k - z_i^{(q,1)})} + e + hs_k - H(s_k) \sum_{j=1}^D \frac{d_j}{(s_k - z_j^{(q,1)})} - H(s_k) \right|^2 \quad (\text{ก15})$$

เป็นค่าความแตกต่างน้อยที่สุด

### การกำจัดโพลเริ่มต้น

จากการแก้สมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะพบว่ารากสมการที่ได้จะเป็นแบบหลายค่า ดังนั้น จากสมการที่ (ก1) เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของผลคูณพหุนามของเศษและส่วนได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} f(s)\sigma(s) \\ \sigma(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s - z_i)}{\prod_{i=1}^D (s - \bar{a}_i)} \\ \frac{\prod_{j=1}^D (s - \tilde{z}_j)}{\prod_{i=1}^D (s - \bar{a}_i)} \end{pmatrix} \quad (\text{ก16})$$

จาก (ก16) นำฟังก์ชันแถว 2หารแถว 1 ได้

$$f(s) = \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s - z_i)}{\prod_{j=1}^D (s - \tilde{z}_j)} \quad (\text{ก17})$$

พบว่าซีโรของ  $\sigma$  จะกลายเป็นโพลของ  $f$  ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของกระบวนการทำซ้ำขั้นตอนสุดท้ายของวิธีกำลังสองน้อย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### การใช้งานฟังก์ชันเวกเตอร์พีตติงในโปรแกรม Matlab

ข้อกำหนดการใช้งานฟังก์ชันเวกเตอร์พีตติงในโปรแกรม Matlab ทั้งในส่วนอินพุทอาร์กิวเมนต์และเอาพุทอาร์กิวเมนต์ตาม (ข.1)

$$[A,B,C,D,E,rmserr,fit] = vectfit2(f,s,A,weight,VF); \quad (ข.1)$$

สามารถพิจารณาได้ดังนี้

#### อินพุทอาร์กิวเมนต์

Vectorfit2 (f(s), s, poles, weight, VF optional)

กำหนดให้

- Nc : จำนวนสมาชิกของฟังก์ชัน
- Ns : จำนวนของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ
- f(s) : ฟังก์ชันที่ต้องการประมาณ มีขนาด (Nc,Ns)
- s : จุดของความถี่ [rad/sec] มีขนาด (1,Ns)
- poles : จำนวนโพลตั้งต้นขนาด (1,N)
- weight : ค่าถ่วงน้ำหนัก มีขนาด (1,Ns)
- VF optional : ตัวเลือกที่ใช้ในการคำนวณ และปรับแต่งการแสดงผลต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- VF.kill=0 % unstable poles are kept unchanged
  - VF.kill=1 % unstable poles are deleted
  - VF.kill=2 % unstable poles are 'flipped' into the left half plane
  - VF.asymp=1 % Fitting with D=0, E=0
  - VF.asymp=2 % Fitting with D~0, E=0
  - VF.asymp=3 % Fitting with D~0, E~0
  - VF.spy1=1 % Plotting, after pole identification (A)
- figure(3): magnitude functions  
cyan trace : (sigma\*f)fit, red trace : (sigma)fit,  
green trace : f\*(sigma)fit - (sigma\*f)fit

VF.spy2=1                   % Plotting, after residue identification (C,D,E)  
                                   figure(1): magnitude functions  
                                   figure(2): phase angles

VF.logx=1                   % Plotting using logarithmic abscissa axis

VF.logy=1                   % Plotting using logarithmic ordinate axis

VF.errplot=1               % Include deviation in magnitude plot

VF.phaseplot=1            % Show plot also for phase angle

VF.skip\_pole=1            % The pole identification part is skipped, i.e (C,D,E) are  
                                   identified using the initial poles (A) as final pole.s

VF.skip\_res =1            % The residue identification part is skipped, i.e. only the  
                                   poles (A) are identified while C,D,E are returned as zero.

VF.use\_normal=1           % Solving Least Squares (LS) systems using the Normal  
                                   Equations.

VF.use\_normal=0           % Solving LS systems using QR decomposition

VF.use\_sparse=1           % Sparsity is used for formulating and solving LS system  
                                   of the pole identification problem.

VF.use\_sparse=0           % Full arithmetic is used (not very useful).

VF.cmplx\_ss=1             % The returned state-space model has real and complex  
                                   conjugate parameters. Output variable A is diagonal (and  
                                   sparse).

VF.cmplx\_ss=0             % The returned state-space model has real parameters  
                                   only. Output variable A is square with 2x2 blocks (and  
                                   sparse).

### เอาพูลทออาร์กิวเมนต์

$$\text{fit}(s) = C*(s*I-A)^{-1} * B + D + s*E \quad (\text{State Space form}) \quad (ข.2)$$

โดย

A    : Diagonal and complex matrix

B    : B-matrix,    C       : C-matrix

D    : ค่าคงที่,    E       : ค่าคงที่

rmser : root-mean-square error จากการประมาณ f(s)

ตัวอย่างการใช้งานฟังก์ชันเวคเตอร์พีตติงเพื่อคำนวณฟังก์ชันที่ประมาณจากค่าที่วัดได้

% กำหนดให้ y.csv เป็นแฟ้มข้อมูลที่เก็บค่าแอดมิตแตนซ์ที่ค่าความถี่ต่างๆ

load y.csv

inter\_N = length(y(:,1)); % Interested point

frequency = y(1:inter\_N,1)';

ymag = y(1:inter\_N,2);

yph = y(1:inter\_N,3);

Ns = length(frequency);

% เปลี่ยนแอดมิตแตนซ์ฟังก์ชันจากเฟสเซอร์ให้อยู่ในรูปจตุรัส

f1 = ymag(1:inter\_N).\*cos(yph(1:inter\_N)\*pi/180); % คำนวณส่วนจริง

f2 = ymag(1:inter\_N).\*sin(yph(1:inter\_N)\*pi/180); % คำนวณส่วนจินตภาพ

f = f1+i\*f2; f = f.';

w = 2\*pi\*frequency;

s = i.\*w;

% Rational function approximation of f(s):

N=16; % กำหนดจำนวนโพลตั้งต้นสำหรับฟังก์ชันที่ต้องการประมาณ

% กำหนดโพลตั้งต้น

beta = linspace(w(1),w(Ns),N/2); A=[];

for n = 1:length(beta)

    alfa = -beta(n)\*1e-2;

    A = [A (alfa-i\*beta(n)) (alfa+i\*beta(n)) ];

end

weight = 1./abs(f); % กำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก

% กำหนดตัวเลือกที่ใช้ในการคำนวณ และปรับแต่งการแสดงผลต่างๆ

VF.kill = 2; % Enforce stable poles

VF.asymp = 3; % Include both D, E in fitting

VF.skip\_pole = 0; % Do not skip pole identification

VF.skip\_res = 0; % Do not skip identification of residues (C,D,E)

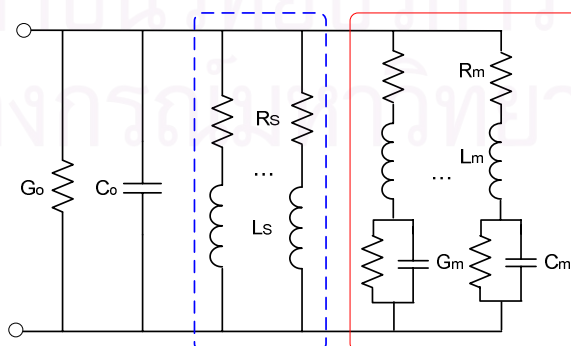
VF.use\_normal = 0; % Use Normal Equations

```

VF.use_sparse = 1;    % Use sparse computations
VF.cmplx_ss = 1;     % Create real-only state space model
VF.spy1 = 0;        % No plotting for first stage of vector fitting
VF.spy2 = 1;        % Create magnitude plot for fitting of f(s)
VF.logx = 1;        % Use linear abscissa axis
VF.logy = 1;        % Use logarithmic ordinate axis
VF.errplot = 0;     % Exclude deviation in magnitude plot
VF.phaseplot = 1;   % Include plot of phase angle
VF.legend = 0;      % Do NOT include legends in plots
disp('vector fitting...')
Niter = 5;
clf
for iter=1:Niter
    if iter==Niter, VF.legend=1; end %Include legend in final plot
    disp([' Iter ' num2str(iter)])
    [A,B,C,D,E,rmserr,fit]=vectfit2(f,s,A,weight,VF);
    rms(iter,1)=rmserr;
end

```

ฟังก์ชันการคำนวณค่าองค์ประกอบแบบแพสซีฟจากเอาพูทอาร์กิวเมนต์ของฟังก์ชัน  
เวคเตอร์ฟิตติ้ง



รูปที่ ข.1 องค์ประกอบแบบแพสซีฟที่ได้จากการสังเคราะห์ฟังก์ชันเวคเตอร์ฟิตติ้ง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยฟังก์ชันเวกเตอร์ฟิตดังตาม (ข.2) ซึ่งได้เมทริกซ์ A, B, C, D และ E ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จำเป็นต้องมีฟังก์ชันที่ทำการแปลงเมทริกซ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปขององค์ประกอบแบบแพสซีฟตามรูป ข.1

ฟังก์ชันการสังเคราะห์องค์ประกอบแบบแพสซีฟ

`function [R,L,Cap,G,Ro,Co] = synrlcg(A,C,D,E) % B column vector มีสมาชิกเป็น 1 ทั้งหมด`

`% synrlcg --> Synthesis R, L, C and G component from fit(s).`

`Ro = 1/D; % คำนวณค่าความนำ`

`Co = E; % คำนวณค่าตัวเก็บประจุ`

`A = diag(A); % เปลี่ยน diagonal matrix A ให้อยู่ในรูปของ column vector`

`C = C.'; % เปลี่ยน matrix C into column vector`

`% ตรวจสอบจำนวนเชิงซ้อน`

`index = find(abs(A)>abs(real(A))); % index(1) is the starting point of complex numbers.`

`% กำหนดตัวแปรเอาพุทชั่วคราว`

`N = length(A);`

`resistor = zeros(N,1);`

`inductor = zeros(N,1);`

`capacitor = zeros(N,1);`

`conductor = zeros(N,1);`

`R = []; L = []; Cap = []; G = [];`

`% คำนวณค่าองค์ประกอบในแขนง RL`

`loop1 = index(1)-1;`

`for i=1:loop1`

`resistor(i) = -A(i)/C(i);`

`inductor(i) = 1/C(i);`

`end`

`% คำนวณค่าองค์ประกอบในแขนง RLC`

`loop2 = N+1;`

`j = index(1);`

`while j < loop2`



```

inductor(j) = 1/(2*real(C(j)));
common = 2*(real(C(j))*real(A(j))+imag(C(j))*imag(A(j)));
resistor(j) = (common*inductor(j)-(2*real(A(j))))*inductor(j);
capacitor(j) = 1/(((real(A(j)))^2 + (imag(A(j)))^2 + common*resistor(j))*inductor(j));
conductor(j) = -1*common*capacitor(j)*inductor(j);

j = j+2;

end
for k=1:N
    if inductor(k) ~= 0
        R = [R;resistor(k)];           % ค่าความต้านทาน
        L = [L;inductor(k)];          % ค่าความเหนี่ยวนำ
        Cap = [Cap;capacitor(k)];     % ค่าความเก็บประจุ
        G = [G;conductor(k)];         % ค่าความนำ
    end
end
end

```

ผลลัพธ์ที่ได้แสดงตามรูปดังต่อไปนี้

The equivalence RLCG network ...

Branch no.	R	L	C	G
1	1173	5.752	0	0
2	-3.719e+004	-0.02572	0	0
3	1.732e+005	14.79	1.328e-011	-8.228e-008
4	4.465e+005	13.28	4.403e-012	-9.096e-008
5	4.862e+004	1.101	2.724e-011	-4.692e-007
6	1.826e+006	3.455	8.08e-013	-3.548e-007
7	7.589e+004	0.5284	4.939e-012	4.392e-008
8	2.638e+004	-0.02127	-2.273e-012	-3.208e-006
9	-1.892e+004	0.0046	3.601e-012	2.087e-005

Ro = -4.412e+005      Co = -2.58e-010

รูปที่ ข.2 เหาพหุจากฟังก์ชันการสังเคราะห์องค์ประกอบแบบแพสซีฟ

## ภาคผนวก ค

### วงจรมุมสำหรับการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่

ความสำคัญในการสร้างแบบจำลองในสถานะชั่วคราวคือ ต้องพิจารณาผลของความถี่อิสระเชิงความถี่ (Frequency-dependent) ในการจำลองเชิงเวลา (Time-domain simulation) สำหรับโปรแกรม EMTP ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองอุปกรณ์ในบางย่านความถี่จะประกอบด้วยซีโร และโพลเป็นค่าสังยุคเชิงซ้อน ซึ่งจากการศึกษาของ Giulio ได้พิจารณาวงจรมุมที่ประกอบด้วย RLC ในการแทนผลตอบสนองเชิงความถี่ตลอดย่านของแบบจำลอง

#### ฟังก์ชันตรรกยะสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอน  $F(s)$  ที่ประมาณด้วยฟังก์ชันตรรกยะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$F(s) = \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{(s - a_i)} + d + se \quad (\text{ค.1})$$

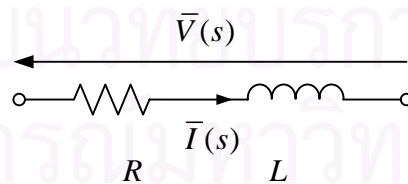
เมื่อ  $s = j\omega$  เป็นค่าความถี่เชิงซ้อน

$d$  และ  $e$  เป็นค่าคงที่

$c_i$  และ  $a_i$  เป็นเรขาคณิต และโพลซึ่งได้จากกระบวนการฟิตติ้งตามลำดับ

จาก (ค.1) ส่วนกลับของค่าคงที่  $d$  สามารถแทนด้วยความต้านทาน ในขณะที่ค่าคงที่  $e$  สามารถแทนด้วยค่าความเก็บประจุ

#### วงจรมุมสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลจำนวนจริง



รูปที่ ค.1 วงจรรวม RL สำหรับการสังเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลจำนวนจริง

เมื่อพิจารณาวงจรรวม RL ตามรูปที่ ค.1 ในรูปของฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ดังนี้

$$\bar{Y}_{RL}(s) = \frac{\bar{I}(s)}{\bar{V}(s)} = \frac{1}{(R + sL)} = \frac{1/L}{(s + \frac{R}{L})} \quad (\text{ค.2})$$

โดยเรขิติว และโพลคือ

$$\begin{aligned}c_{RL} &= \frac{1}{L} \\ a_{RL} &= -\frac{R}{L}\end{aligned}\quad (\text{ค.3})$$

ดังนั้นเมื่อทราบผลตอบสนองเชิงความถี่จากกระบวนการพิตตั้งสามารถสังเคราะห์วงจรมุมโดย

$$\begin{aligned}L &= \frac{1}{c_{RL}} \\ R &= -a_{RL}L = -\frac{a_{RL}}{c_{RL}}\end{aligned}\quad (\text{ค.4})$$

**ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อน**

กำหนดให้  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a_1$  และ  $a_2$  เป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนของเรขิติว และโพลตามลำดับเมื่อเขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน  $F(s)$  ได้ดังนี้

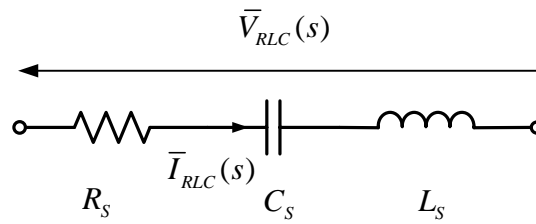
$$\begin{aligned}F(s) &= \frac{c_1}{(s-a_1)} + \frac{c_2}{(s-a_2)} \\ &= \frac{(c_1+c_2)s - (c_1a_2 + c_2a_1)}{s^2 - (a_1+a_2)s + a_1a_2} \\ &= \frac{rs}{s^2 - su + v} + \frac{t}{s^2 + su + v}\end{aligned}\quad (\text{ค.5})$$

โดย

$$\begin{aligned}r &= c_1 + c_2 \\ t &= -(c_1a_2 + c_2a_1) \\ u &= -(a_1 + a_2) \\ v &= a_1a_2\end{aligned}\quad (\text{ค.6})$$

จาก (ค.5) และการศึกษาของ Giulio [7] สามารถสังเคราะห์วงจรมุมสองวงจรมุมดังนี้

วงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนวงจรถูกที่ 1



รูปที่ ค.2 วงจรอนุกรม RLC

พิจารณาฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ของวงจรอนุกรม RLC ตามรูปที่ ค.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่ประกอบด้วยเรขาคณิต และโพลดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{RLC}(s) &= \frac{\bar{I}_{RLC}(s)}{\bar{V}_{RLC}(s)} \\ &= \frac{1}{\left(R_s + sL_s + \frac{1}{sC_s}\right)} \\ &= \frac{s/L_s}{\left(s^2 + s\frac{R_s}{L_s} + \frac{1}{L_s C_s}\right)}\end{aligned}\quad (\text{ค.7})$$

จากเทอม  $\frac{rs}{s^2 - su + v}$  ในสมการ (ค.5) และความสัมพันธ์ (ค.6) ฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ใน (ค.7) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{s/L_s}{\left(s^2 + s\frac{R_s}{L_s} + \frac{1}{L_s C_s}\right)} = \frac{(c_1 + c_2)s}{s^2 - (a_1 + a_2)s + a_1 a_2}\quad (\text{ค.8})$$

เทียบสัมประสิทธิ์ (ค.8) ผลรวมของเรขาคณิต และโพลมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}c_1 + c_2 &= \frac{1}{L_s} \\ a_1 + a_2 &= -\frac{R_s}{L_s}\end{aligned}$$

ดังนั้น  $R_s$  และ  $L_s$  เขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับของเรขาคณิต และโพลได้ดังนี้

$$L_s = \frac{1}{c_1 + c_2}\quad (\text{ค.9})$$

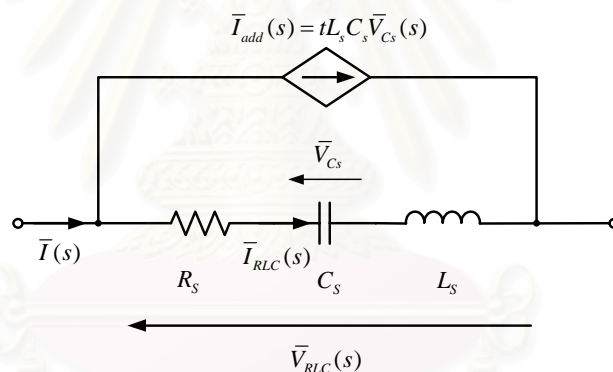
$$R_s = -\left(\frac{a_1 + a_2}{c_1 + c_2}\right) \quad (\text{ค.10})$$

ในขณะที่ค่า  $C_s$  หาโดย

$$\frac{1}{L_s C_s} = a_1 a_2$$

$$C_s = \frac{1}{L_s a_1 a_2} = \frac{(c_1 + c_2)}{a_1 a_2} \quad (\text{ค.11})$$

เมื่อพิจารณาสมการ (ค.5) พบว่า  $t = -(c_1 a_2 + c_2 a_1) = 0$  สำหรับฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ของวงจรอนุกรม RLC ฉะนั้นเมื่อต้องการวงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนด้วยวงจรอนุกรม RLC ต้องเพิ่มเทอม  $\frac{t}{s^2 + su + v}$  สามารถทำได้โดยการต่อแหล่งจ่ายกระแสซึ่งควบคุมด้วยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_s$  ตามแสดงในรูป ค.3



รูปที่ ค.3 วงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนแบบที่ 1

แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_s$  จากหลักการแบ่งแรงดันคือ

$$\bar{V}_{C_s}(s) = \frac{\bar{I}_{RLC}(s)}{sC_s} = \frac{1}{L_s C_s} \frac{1}{(s^2 + s\frac{R_s}{L_s} + \frac{1}{L_s C_s})} \bar{V}_{RLC}(s) \quad (\text{ค.12})$$

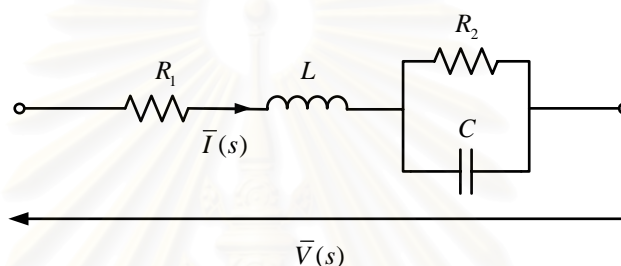
ดังนั้นฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ของวงจรอนุกรม RLC ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสซึ่งควบคุมด้วยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_s$  ตามรูปที่ ค.3 คือ

$$\bar{Y}(s) = \frac{\bar{I}(s)}{\bar{V}_{RLC}(s)} = \frac{\bar{I}_{RLC}(s) + \bar{I}_{add}(s)}{\bar{V}_{RLC}(s)} = \bar{Y}_{RLC} + \frac{tL_s C_s \bar{V}_{C_s}(s)}{\bar{V}_{RLC}(s)} \quad (\text{ค.13})$$

เมื่อ  $t = -(c_1 a_2 + c_2 a_1)$

จากสมการ (ค.13) เขียนให้อยู่ในรูป  $\bar{Y}(s) = \frac{rs}{s^2 - su + v} + \frac{t}{s^2 + su + v}$  ตามสมการ (ค.5) ได้  
 ดังนั้นฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ของวงจรตามรูป ค.3 สามารถแทนผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็น  
 คู่สังยุคเชิงซ้อนได้ โดยวงจรสมมูลดังกล่าวเหมาะกับโปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพีเอสไปซ์  
 (Pspice) เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไม่สามารถเป็นค่าติดลบได้

วงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนวงจรที่ 2



รูปที่ ค.4 วงจรสมมูลสำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนแบบที่ 2

วงจรสมมูลตามรูปที่ ค.4 เป็นวงจรอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ผลตอบสนองเชิง  
 ความถี่ที่มีโพลเป็นคู่สังยุคเชิงซ้อนได้โดย

$$Y(s) = \frac{1}{L} \frac{\left( s + \frac{1}{R_2 C} \right)}{\left( s^2 + \left( \frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C} \right) s + \left( \frac{R_1}{L} \frac{1}{R_2 C} + \frac{1}{LC} \right) \right)} \quad (\text{ค.14})$$

จากฟังก์ชันแอดมิตแตนซ์ตาม (ค.14) เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (ค.5) ได้ความสัมพันธ์  
 ดังต่อไปนี้

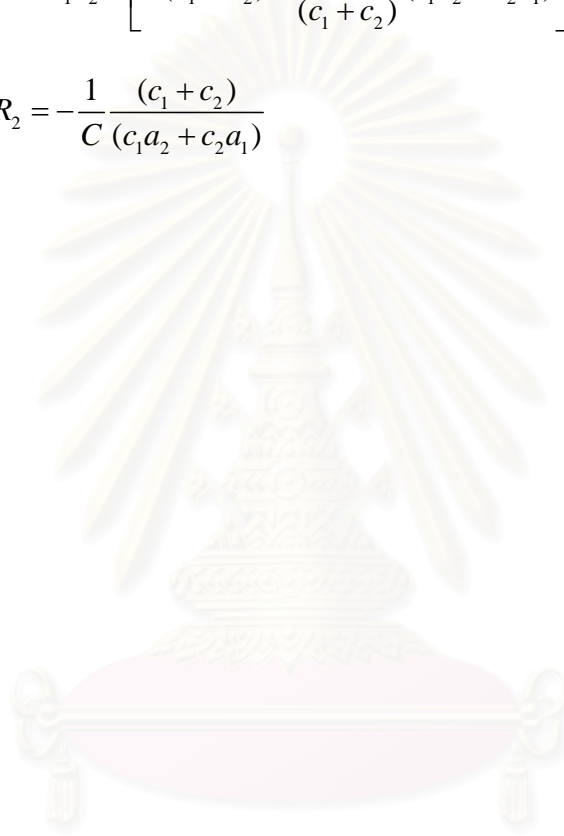
$$\begin{aligned} c_1 + c_2 &= \frac{1}{L} \\ -(a_1 + a_2) &= \frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C} \\ a_1 a_2 &= \frac{R_1}{L} \frac{1}{R_2 C} + \frac{1}{LC} \\ -(c_1 a_2 + c_2 a_1) &= \frac{1}{R_2 LC} \end{aligned}$$

$$L = \frac{1}{c_1 + c_2}$$

$$R_1 = \frac{1}{c_1 + c_2} \times \left[ -(a_1 + a_2) + \frac{1}{(c_1 + c_2)} (c_1 a_2 + c_2 a_1) \right]$$

$$C = \frac{(c_1 + c_2)^2}{a_1 a_2 + \left[ -(a_1 + a_2) + \frac{1}{(c_1 + c_2)} (c_1 a_2 + c_2 a_1) \right]} \times \frac{1}{(c_1 a_2 + c_2 a_1)}$$

$$R_2 = -\frac{1}{C} \frac{(c_1 + c_2)}{(c_1 a_2 + c_2 a_1)} \quad (\text{ค.15})$$

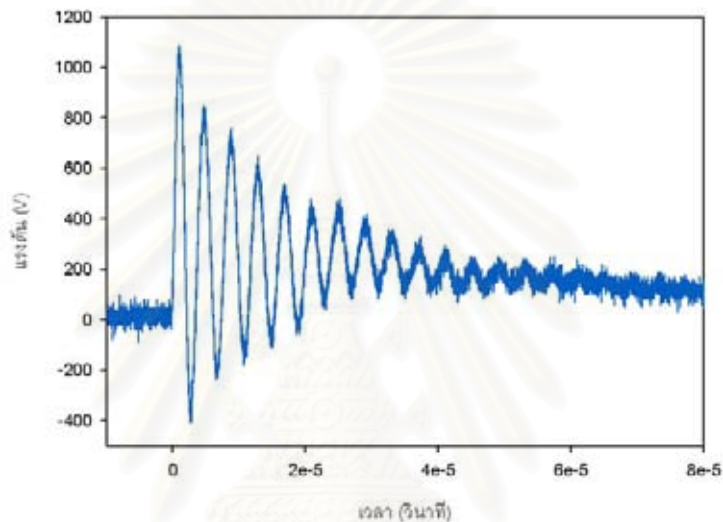


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยเวฟเลท

สัญญาณที่วัดได้จากดิจิตอลสโตเรจสโคปที่มีอัตราการสุ่มที่สูงๆ จะเกิดการแทรกสอดของสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้อาจทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดจริงดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 แอมพลิจูดสัญญาณรบกวนของหม้อแปลงที่วัดได้จากดิจิตอลสโตเรจสโคป

จากทฤษฎีเวฟเลทสามารถนำมาใช้ในการขจัดสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งในโปรแกรม Matlab ได้มีฟังก์ชันสำเร็จรูป โดยผู้ใช้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกโดยดิจิตอลสโตเรจสโคปในรูปแบบของเท็กซ์ไฟล์จากนั้นเขียนสคริปต์ไฟล์ดังต่อไปนี้

```
load test.csv % ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกโดยดิจิตอลสโตเรจสโคป
```

```
[c,l] = wavedec(test,4,'Haar');
```

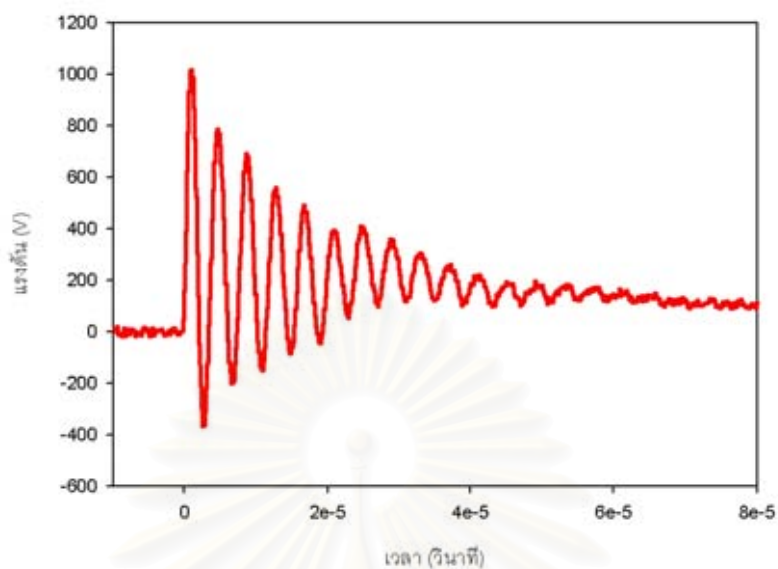
```
a3 = appcoef(c,l,'Haar',4);
```

```
[thr,sorh,keepapp] = ddencmp('den','wv',test);
```

```
clean = wdencmp('gbl',c,l,'Haar',3,thr,sorh,keepapp);
```

โดยผลลัพธ์ได้เป็นสัญญาณดังรูปที่ ง.2





รูปที่ ง.2 แรงดันเสิร์จทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ผ่านการขจัดสัญญาณรบกวน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไชยวัฒน์ อภินิวิทย์ เกิดเมื่อวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2521 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2542 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย