



250754



การออกแบบและพัฒนาวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเล็ร็จ  
ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ผดุงศิลป์  
พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล

สนับสนุนทุนวิจัยโดย  
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
ประจำปีงบประมาณ 2553





การออกแบบและพัฒนาวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเล็รจใน  
ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า



ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ผดุงศิลป์  
พร้อมศักดิ์ อภิริติกุล

สนับสนุนทุนวิจัยโดย  
สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ  
ประจำปีงบประมาณ 2553

**Design and Development of On-Line Monitoring Circuit for  
Metal-Oxide Surge Arrester in Distribution Power System**

**Asst. Prof. Wichai Phadungsilp**

**Promsak Apiratikul**

**Granted by**

**National Research Council of Thailand**

**Fiscal year 2010**

ส่วน ข : องค์ประกอบในการจัดทำโครงการวิจัย

1. ผู้รับผิดชอบและหน่วยงาน ประกอบด้วยหน่วยงานหลักและหน่วยงานสนับสนุน
- 1.1 ผู้รับผิดชอบ [คณะผู้วิจัย บทบาทของนักวิจัยแต่ละคนในการทำวิจัย และสัดส่วนที่ทำการวิจัย]

| ชื่อ - สกุล                 | สถานะภาพ<br>การวิจัย | บทบาทการทำวิจัย                                                                                                                                                                                                                                                              | สัดส่วนการ<br>ทำวิจัย (%) |
|-----------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. ผศ.วิชัย ผดุงศิลป์       | หัวหน้าโครงการ       | 1. วางแผนการทำโครงการวิจัยทั้งหมด<br>2. ออกแบบและจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์<br>3. ประกอบวงจรและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ<br>4. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย<br>5. ดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพ<br>6. จัดซื้อวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด<br>7. ดำเนินการอื่นๆที่เกี่ยวข้องทั้งหมด | 80                        |
| 2. นายพร้อมศักดิ์ อภิรติกุล | ผู้ร่วมวิจัย         | 1. ออกแบบและจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์<br>2. ติดตั้งระบบและทดสอบ<br>3. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย<br>4. ดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพ                                                                                                                                       | 20                        |

1.2 หน่วยงานหลักและหน่วยงานสนับสนุน

หน่วยงานหลัก

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110  
โทรศัพท์ 0-2549-34200 โทรสาร 0-2549-3422

หน่วยงานสนับสนุน

ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านการวิจัยและการจัดการพลังงานที่ยั่งยืน  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 หมู่ 1 อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี 12110

2. ประเภทของการวิจัย: การวิจัยประยุกต์ (Applied Science)
3. สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย: สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย
4. คำสำคัญ (keywords) ของแผนงานวิจัย: กักตักเสิร์จ (Metal-oxide Surge Arrester), วงจรแสดงสถานะกระแสรั่วไหล (Leakage Current Monitoring Circuit), การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก (Harmonics Current Analysis)

## บทคัดย่อ

**ชื่อโครงการ** : การออกแบบและพัฒนางจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จ  
ในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

**ชื่อนักวิจัย** : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย ผดุงศิลป์  
: อาจารย์ พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล

250754

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาออกแบบและพัฒนางจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จชนิด ZnO แบบไม่มีแก๊ส เพื่อประเมินความเสื่อมสภาพในขณะติดตั้งใช้งานอยู่ในระบบ ด้วยวิธีวัดกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จที่ไหลผ่านสายตัวนำลงดิน แล้วแยกกระแสรั่วความต้านทานออกจากกระแสรั่วไหลรวม โดยใช้หลักการวิเคราะห์หากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ซึ่งเป็นสัดส่วนกับองค์ประกอบของกระแสรั่วความต้านทาน อันเนื่องมาจากลักษณะเฉพาะทางความต้านทาน ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง ของวาริสเตอร์ชนิดซิงค์ออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของกับดักเสิร์จ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาปรับสเกลเพื่อให้แสดงค่ากระแสรั่วความต้านทานได้อย่างถูกต้อง

ในการศึกษาวิจัยจะมีการชดเชยความคลาดเคลื่อนของการวัด อันเนื่องมาจากส่วนประกอบแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันระบบที่กับดักเสิร์จติดตั้งใช้งานอยู่ โดยใช้แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการศึกษาวิเคราะห์กระแสรั่วไหล และใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นเครื่องมือในขั้นตอนวิธีการวัดและแยกส่วนประกอบกระแสรั่วความต้านทานออกจากกระแสรั่วไหลรวม ทั้งนี้รวมไปถึงการปรับสเกล และการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดันฮาร์โมนิกของแรงดันระบบ โดยจะมุ่งเน้นการศึกษาไปที่ย่านกระแสต่ำของกับดักเสิร์จ ที่ระดับแรงดันใช้งานของระบบ

การศึกษวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการทดสอบในขั้นตอนวิธีการวัดโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ผ่านทางตัวรับส่งข้อมูล NI USB-6009 DAQ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ สามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่เพื่อปรับสเกลที่เหมาะสมในการแสดงค่ากระแสรั่วความต้านทานได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการวิเคราะห์หาค่าชดเชยความคลาดเคลื่อนจากแรงดันฮาร์โมนิก โดยใช้แรงดันของระบบเป็นแรงดันอ้างอิง

**คำสำคัญ** : กับดักเสิร์จ, วงจรแสดงสถานะกระแสรั่วไหล, การวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิก

## Abstract

**Project name** : Design and Development of On-Line Monitoring Circuit for Metal-Oxide Surge Arrester in Distribution Power System

**Researcher** : Asst. Prof. Wichai Phadungsilp  
: Mr. Promsak Apiratikul

**250754**

This paper presents the design and development of on-line monitoring circuit for gapless metal-oxide (ZnO) surge arrester. The proposed diagnosis should be useful for predict the defection and performance deterioration of on-service ZnO surge arresters in power system. Due to the non-linear resistance characteristics of zinc oxide varister as the main component of surge arrester. The method of diagnosis ZnO arrester current is based on the analysis of the third harmonics content in the measured arrester total leakage current, flowing through ground conductor, which is proportional to its resistive current component. In order to determine the correct value of the resistive current component, the measurements must be rescaled.

The study will focus on the low current region of the ZnO arrester, at the operating system voltage. The errors of measurement due to the third harmonic component of the arrester supply voltage have been compensated, using the computer-base model implement in MATLAB as a tool to study the errors, analyze the leakage current components and find out rescale factor for actual resistive leakage current. The LabVIEW program is using to measure and extract the resistive current component from total leakage current.

The investigation, using the simulation model in MATLAB / SIMULINK program, and the measurement algorithm using LabVIEW software through the NI USB-6009 DAQ, the measuring result is satisfactory. The implement monitoring circuit can be determine the rescale constants appropriate to the resistive leakage current value correctly. Including the deviation compensation from voltage harmonic, using the operating system voltage as the reference.

**Key words** : metal-oxide surge arrester, leakage current monitoring circuit, harmonics current analysis



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากการสนับสนุนของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และแผนกงานวิจัยและประเมินผล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย แดงเฒ และ อาจารย์ณัฐพล หาอุปละ ที่สละเวลา ช่วยเหลือ จัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือ และดำเนินการทดสอบ งานวิจัยสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้ จึงขอขอบคุณมา ณ. โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย ผดุงศิลป์  
และคณะผู้วิจัย

12 สิงหาคม 2554

# สารบัญ

|                                                                                    | หน้า      |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                                                    | ก         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                                                 | ข         |
| กิตติกรรมประกาศ                                                                    | ค         |
| สารบัญ                                                                             | ง         |
| สารบัญตาราง                                                                        | ฉ         |
| สารบัญรูป                                                                          | ช         |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>                                                                | <b>1</b>  |
| 1.1 หลักการและเหตุผล                                                               | 1         |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย                                         | 4         |
| 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย                                                           | 4         |
| 1.4 ขอบเขตของการศึกษา                                                              | 5         |
| 1.5 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา                                                    | 6         |
| 1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย                                                          | 6         |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                                      | 7         |
| <b>บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>                                    | <b>8</b>  |
| 2.1 โครงสร้างของกัปดักเสิร์จแบบ ZnO ที่ใช้ป้องกันระบบกำลังไฟฟ้า                    | 8         |
| 2.2 รูปแบบการเสื่อมสภาพและความเสียหายของกัปดักเสิร์จแบบ ZnO                        | 15        |
| 2.3 เทคนิคการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO                           | 18        |
| 2.4 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                              | 26        |
| <b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>                                               | <b>27</b> |
| 3.1 แบบจำลองของกัปดักเสิร์จแบบ ZnO บนพื้นฐานการวัดกระแสรั่วไหล                     | 27        |
| 3.2 การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลโดยใช้แบบจำลองในโปรแกรม<br>MATLAB/SIMULINK             | 28        |
| 3.3 การวัดและศึกษาค่ากระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ           | 40        |
| 3.5 การออกแบบและสร้างวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสิร์จโดยใช้<br>โปรแกรม LabVIEW | 44        |



## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                               | หน้า      |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>บทที่ 4 ผลการทดสอบ</b>                                                     | <b>50</b> |
| 4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบ                            | 50        |
| 4.2 การทดสอบวัดค่ากระแสรั่วไหลรวมและกระแสรั่วความต้านทานเพื่อหาค่าอ้างอิง     | 51        |
| 4.3 การทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสิร์จค้นแบบ                        | 55        |
| 4.4 สรุปผลการทดสอบ                                                            | 65        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลโครงการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>                                | <b>67</b> |
| 5.1 สรุปผลโครงการวิจัย                                                        | 67        |
| 5.2 ปัญหาในการดำเนินการวิจัย                                                  | 68        |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ                                                                | 69        |
| เอกสารอ้างอิง                                                                 | 71        |
| ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดสอบ                                                    | 73        |
| ภาคผนวก ข. ส่วนแสดงผลวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสิร์จ                     | 87        |
| ภาคผนวก ค. รูปภาพการวัดค่ากระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ | 89        |
| ภาคผนวก ง. ข้อมูลทางเทคนิค                                                    | 96        |
| ประวัติคณะผู้วิจัย                                                            | 112       |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                                                                     | หน้า |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1      | สรุปภาพรวมคุณลักษณะของการวัดกระแสน้ำไหลด้วยวิธีการวัดภาคสนามแบบต่างๆ ในด้านประสิทธิผลการนำไปใช้งาน และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลการวัด | 25   |
| 3.1      | ขนาดพิคคของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ใช้ในการศึกษา                                                                                     | 41   |
| 4.1      | กับดักเสิร์จตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ                                                                                                | 50   |

# สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                                                                                                                    | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 แสดงปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบนระบบส่งกำลังไฟฟ้า                                                                                                                                    | 1    |
| 1.2 กัปดักเสิร์จที่ใช้ในในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า                                                                                                                                           | 2    |
| 1.3 ลักษณะการติดตั้งใช้งานของกัปดักเสิร์จ                                                                                                                                                 | 3    |
| 2.1 กราฟแสดงขนาดของแรงดันเกินในย่านต่างๆ                                                                                                                                                  | 9    |
| 2.2 แสดงภาพตัดของดักเสิร์จชนิด ZnO สำหรับแรงดันระบบจำหน่ายโครงสร้างภายนอกทำจากโพลีเมอร์                                                                                                   | 9    |
| 2.3 ภาพขยายจากกล้องอิเล็กตรอนแสดงส่วนประกอบโครงสร้างของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO                                                                                                               | 11   |
| 2.4 ลักษณะเฉพาะทางแรงดันและกระแสของอิลิเมนต์ ZnO                                                                                                                                          | 11   |
| 2.5 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของอิลิเมนต์ ZnO                                                                                                                                                | 13   |
| 2.6 วงจรเทียบเคียงอย่างง่ายของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO                                                                                                                                        | 14   |
| 2.7 แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของ $I_L$ , $I_C$ , $I_r$ และแรงดันอ้างอิง                                                                                                                        | 14   |
| 2.8 สภาพความเสียหายของบล็อก ZnO ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในกัปดักเสิร์จ                                                                                                                          | 15   |
| 2.9 ภาพขยายแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของบล็อก ZnO ก่อนใช้งานและหลังจากมีกระแสจากพัลส์แรงดันไหลผ่าน                                                                                 | 16   |
| 2.10 สภาพความเสียหายของกัปดักเสิร์จจากการใช้งาน                                                                                                                                           | 16   |
| 2.11 สภาพความเสียหายของกัปดักเสิร์จแบบที่มีเปลือกโครงสร้างทำจากโพลีเมอร์                                                                                                                  | 17   |
| 2.12 สภาพความเสียหายของกัปดักเสิร์จแบบที่มีเปลือกโครงสร้างทำจากโพลีเมอร์                                                                                                                  | 17   |
| 2.13 ออสซิลโลแกรมของกระแสรั่วความต้านทาน ( $I_r$ ) กระแสรั่วคาปาซิทีฟ ( $I_C$ ) และกระแสรั่วไหลรวม ( $I_L$ ) ของกัปดักเสิร์จ                                                              | 18   |
| 2.14 การหากระแสรั่วความต้านทานจากกระแสรั่วไหลรวม ที่ค่ายอดของแรงดัน                                                                                                                       | 20   |
| 2.15 กระแสเหลือหลังจากการชดเชยกระแสคาปาซิทีฟ                                                                                                                                              | 21   |
| 2.16 แสดงย่านความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้จากการวัดกระแสรั่วความต้านทานที่ได้จากการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เมื่อมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันที่ขนาดและมุมเฟสค่าต่างๆ | 23   |
| 3.1 แสดงสัญลักษณ์ของ Surge Arrester Block ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK                                                                                                                       | 27   |
| 3.2 เส้นแสดงลักษณะเฉพาะ V-I characteristic ของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO                                                                                                                        | 27   |
| 3.3 แบบจำลองกัปดักเสิร์จที่ใช้ในการวิเคราะห์                                                                                                                                              | 28   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                                                                                                                                      |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4    | แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสรั่วไหล                                                                                                                        | 29 |
| 3.5    | รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสจากการจำลองใน MATLAB/SIMULINK                                                                                                                                | 30 |
| 3.6    | กระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จที่ได้จากการการจำลองในโปรแกรม MATLAB                                                                                                                        | 31 |
| 3.7    | ฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสรั่วความต้านทานที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT                                                                                                                         | 31 |
| 3.8    | ฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT                                                                                                                              | 32 |
| 3.9    | แสดงคุณลักษณะทาง กระแส-แรงดัน ของกับดักเสิร์จชนิด ZnO ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB                                                                                                   | 32 |
| 3.10   | คุณลักษณะทาง กระแส-แรงดันของกับดักเสิร์จชนิด ZnO แสดงความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลรวม กระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT ในโปรแกรม MATLAB | 33 |
| 3.11   | แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ขึ้นต่ออุณหภูมิ                                                                                          | 34 |
| 3.12   | ผลทดสอบโดยการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสรั่วความต้านทานที่ขึ้นต่อค่าแรงดันใช้งาน                                                                               | 35 |
| 3.13   | ผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทานที่ขึ้นต่อค่าแรงดันใช้งาน                                                         | 35 |
| 3.14   | แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทาน ต่อค่าแรงดันใช้งาน จากผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB                                       | 36 |
| 3.15   | ผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB แสดงให้เห็นว่ากระแสรั่วไหลรวม ( $I_T$ ) ของกับดักเสิร์จมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ในแรงดันระบบ                                 | 36 |
| 3.16   | แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสคาปาซิทีฟ และกระแสความต้านทาน เมื่อไม่มีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง                                                 | 37 |
| 3.17   | แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสความต้านทานเมื่อไม่มีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง                                                                                             | 37 |
| 3.18   | แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสคาปาซิทีฟ และกระแสความต้านทาน เมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันอ้างอิง เท่ากับ 3 %                             | 38 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                                                              | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.19 แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสความต้านทานเมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง 3 %                                                                                 | 38   |
| 3.20 แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสคาปาซิทีฟ และกระแสความต้านทาน เมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันอ้างอิง เท่ากับ 5 %                  | 39   |
| 3.21 แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสความต้านทานเมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง 5 %                                                                                 | 39   |
| 3.22 ผลจากการจำลองหาความคลาดเคลื่อนที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในการวิเคราะห์หากระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จ เมื่อมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 อยู่ในแรงดันระบบ ที่ขนาดและมุมเฟสต่างๆ กัน | 40   |
| 3.23 แสดงการต่อวงจรวัดค่ากระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ                                                                                                                | 41   |
| 3.24 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ NEW-1                                                                                                    | 42   |
| 3.25 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ NEW-2                                                                                                    | 42   |
| 3.26 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบที่ OLD-1                                                                                                 | 43   |
| 3.27 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ OLD-2                                                                                                    | 43   |
| 3.28 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ OLD-3                                                                                                    | 43   |
| 3.29 แสดงการต่อวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จ                                                                                                                                 | 45   |
| 3.30 หน้าจอแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จตามที่ออกแบบไว้                                                                                                                          | 45   |
| 3.31 ไฟล์ชาร์ตการทำงานบนโปรแกรม LabVIEW                                                                                                                                             | 46   |
| 3.32 แสดงบล็อกไดอะแกรมบนโปรแกรม LabVIEW ส่วนรับข้อมูลจาก NI-6009 DAQ                                                                                                                | 47   |
| 3.33 แสดงบล็อกไดอะแกรมบนโปรแกรม LabVIEW ส่วนแสดงค่าแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จ                                                                                                        | 47   |
| 3.34 แสดงบล็อกไดอะแกรมบนโปรแกรม LabVIEW ส่วนแสดงค่ากระแสรั่วไหลรวมผ่านกับดักเสิร์จ                                                                                                  | 48   |
| 3.35 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรม LabVIEW ส่วนวิเคราะห์และคำนวณค่ากระแสรั่วความต้านทาน                                                                                               | 48   |
| 3.36 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรแสดงสถานะของกับดักเสิร์จบนโปรแกรม LabVIEW                                                                                                                 | 49   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ |                                                                                                                                                 | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1    | แสดงการต่อวงจรทดสอบกับดักเสียงตัวอย่าง เพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลอ้างอิง                                                                            | 51   |
| 4.2    | แสดงการหาค่ากระแสรั่วความต้านทาน โดยใช้แรงดันเป็นสัญญาณค่าอ้างอิง และอ่านค่าจากออสซิลโลสโคป                                                     | 51   |
| 4.3    | ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกับดักเสียงในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-1 แสดงกระแสรั่วไหลรวมค่า peak และค่า rms และกระแสรั่วความต้านทานค่า peak | 52   |
| 4.4    | ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกับดักเสียงในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-2 แสดงกระแสรั่วไหลรวมค่า peak และค่า rms และกระแสรั่วความต้านทานค่า peak | 53   |
| 4.5    | ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกับดักเสียงในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-1 แสดงกระแสรั่วไหลรวมค่า peak และค่า rms และกระแสรั่วความต้านทานค่า peak | 53   |
| 4.6    | ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกับดักเสียงในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-2 แสดงกระแสรั่วไหลรวมค่า peak และค่า rms และกระแสรั่วความต้านทานค่า peak | 54   |
| 4.7    | ผลการทดสอบกระแสรั่วไหลของกับดักเสียงในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-3 แสดงกระแสรั่วไหลรวมค่า peak และค่า rms และกระแสรั่วความต้านทานค่า peak | 54   |
| 4.8    | แสดงการทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสียงต้นแบบ                                                                                           | 55   |
| 4.9    | การแสดงผลของวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสียง เมื่อทำการทดสอบวัดค่ากระแสรั่วไหล                                                               | 56   |
| 4.10   | แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของแรงดันทดสอบ ซึ่งใช้เป็นแรงดันอ้างอิงของกับดักเสียง                                                                      | 57   |
| 4.11   | แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสียง ตัวอย่างทดสอบ NEW-1                                                                      | 57   |
| 4.12   | ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสียงในงานวิจัย เทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการตัวอย่างทดสอบ NEW-1             | 58   |
| 4.13   | ค่าความคลาดเคลื่อนกระแสรั่วความต้านทานค่า peak ของกับดักเสียง เทียบกับผลการทดสอบกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-1                | 58   |
| 4.14   | แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสียง ตัวอย่างทดสอบ NEW-2                                                                      | 59   |
| 4.15   | ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสียงในงานวิจัย เทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการตัวอย่างทดสอบ NEW-2             | 59   |
| 4.16   | ค่าความคลาดเคลื่อนกระแสรั่วความต้านทานค่า peak ของกับดักเสียง เทียบกับผลการทดสอบกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ NEW-2                | 60   |



สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                   | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.17 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสริม ตัวอย่างทดสอบ OLD-1                                                          | 60   |
| 4.18 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริมในงานวิจัย เทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการตัวอย่างทดสอบ OLD-1 | 61   |
| 4.19 ค่าความคลาดเคลื่อนกระแสรั่วความต้านทานค่า peak ของกับดักเสริม เทียบกับผลทดสอบกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-1       | 61   |
| 4.20 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสริม ตัวอย่างทดสอบ OLD-2                                                          | 62   |
| 4.21 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริมในงานวิจัย เทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการตัวอย่างทดสอบ OLD-2 | 62   |
| 4.22 ค่าความคลาดเคลื่อนกระแสรั่วความต้านทานค่า peak ของกับดักเสริม เทียบกับผลทดสอบกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-2       | 63   |
| 4.23 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสริม ตัวอย่างทดสอบ OLD-3                                                          | 63   |
| 4.24 ผลการทดสอบกระแสรั่วความต้านทาน ด้วยวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริมในงานวิจัย เทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการตัวอย่างทดสอบ OLD-3 | 64   |
| 4.25 ค่าความคลาดเคลื่อนกระแสรั่วความต้านทานค่า peak ของกับดักเสริม เทียบกับผลทดสอบกระแสรั่วไหลในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างทดสอบ OLD-3       | 64   |
| 4.26 การแสดงผลการทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริม เมื่อวัดค่ากระแสรั่วไหลความต้านทานได้สูงกว่าค่าปรับตั้งของสัญญาณเตือน          | 66   |
| 5.1 แสดงการติดตั้งและเชื่อมต่อสัญญาณโพรบวัดสนามไฟฟ้า เข้ากับวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริม                                          | 69   |
| 5.2 แสดงการติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิ เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวารีเตอร์บล็อกภายในกับดักเสริม                 | 70   |