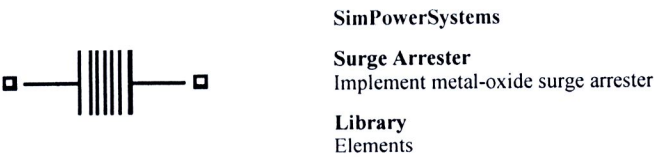


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองของกัปดักเล็รจแบบ ZnO บนพื้นฐานการวัดกระแสรั่วไหล

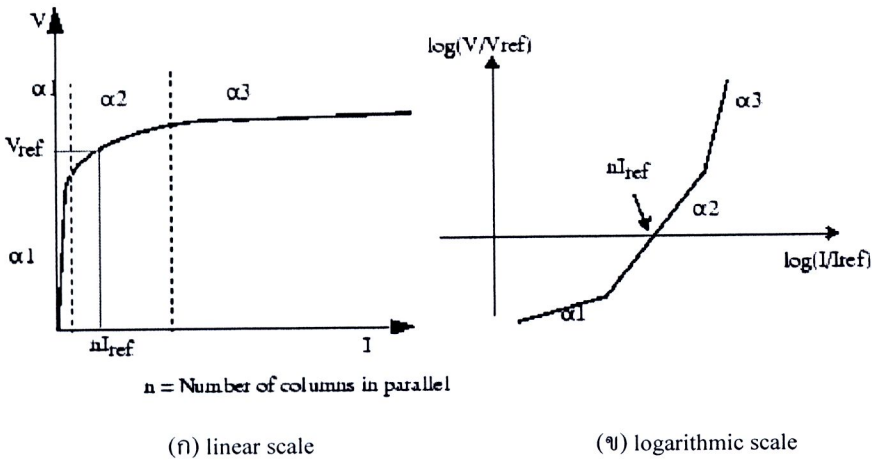


รูปที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์ของ Surge Arrester Block ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

Surge Arrester Block ในโปรแกรม MATLAB ใช้แทนความต้านทานที่มีลักษณะเฉพาะความไม่เป็นเชิงเส้นตรงสูง (highly nonlinear resistor) ซึ่งประกอบด้วยแวลิสเตอร์บล็อก (varister block) จำนวนหลายแท่งอัดซ้อนกัน จำนวนแท่งแวลิสเตอร์บล็อกที่มาอนุกรมกันจะขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันของกัปดักเล็รจ โดยที่ขนาดกระแสจะขึ้นอยู่กับจำนวนแท่งแวลิสเตอร์บล็อกที่มาต่อขนานกัน ค่า V-I characteristic ของกัปดักเล็รจแต่ละตัวจะจำลองด้วยรูป ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล (exponential function) จำนวน 3 ฟังก์ชันรวมกัน ตามสมการที่ 3.1 โดยแสดงเส้นคุณลักษณะเฉพาะทาง กระแสและแรงดัน (V-I characteristic) ตามรูปที่ 3.2

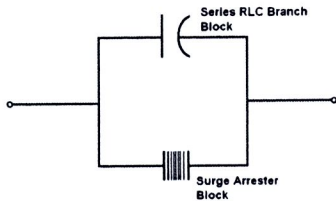
$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i}$$

(3.1)



รูปที่ 3.2 เส้นแสดงคุณลักษณะเฉพาะทาง กระแสและแรงดัน ของกัปดักเล็รจชนิด ZnO

แบบจำลองกับดักเสิร์จที่ใช้วิเคราะห์ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการศึกษาวิจัยนี้ จะประกอบด้วยความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Surge Arrester Block) ต่อขนานกับสเตรย์คาปาซิเตอร์ (Series RLC Branch Block) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



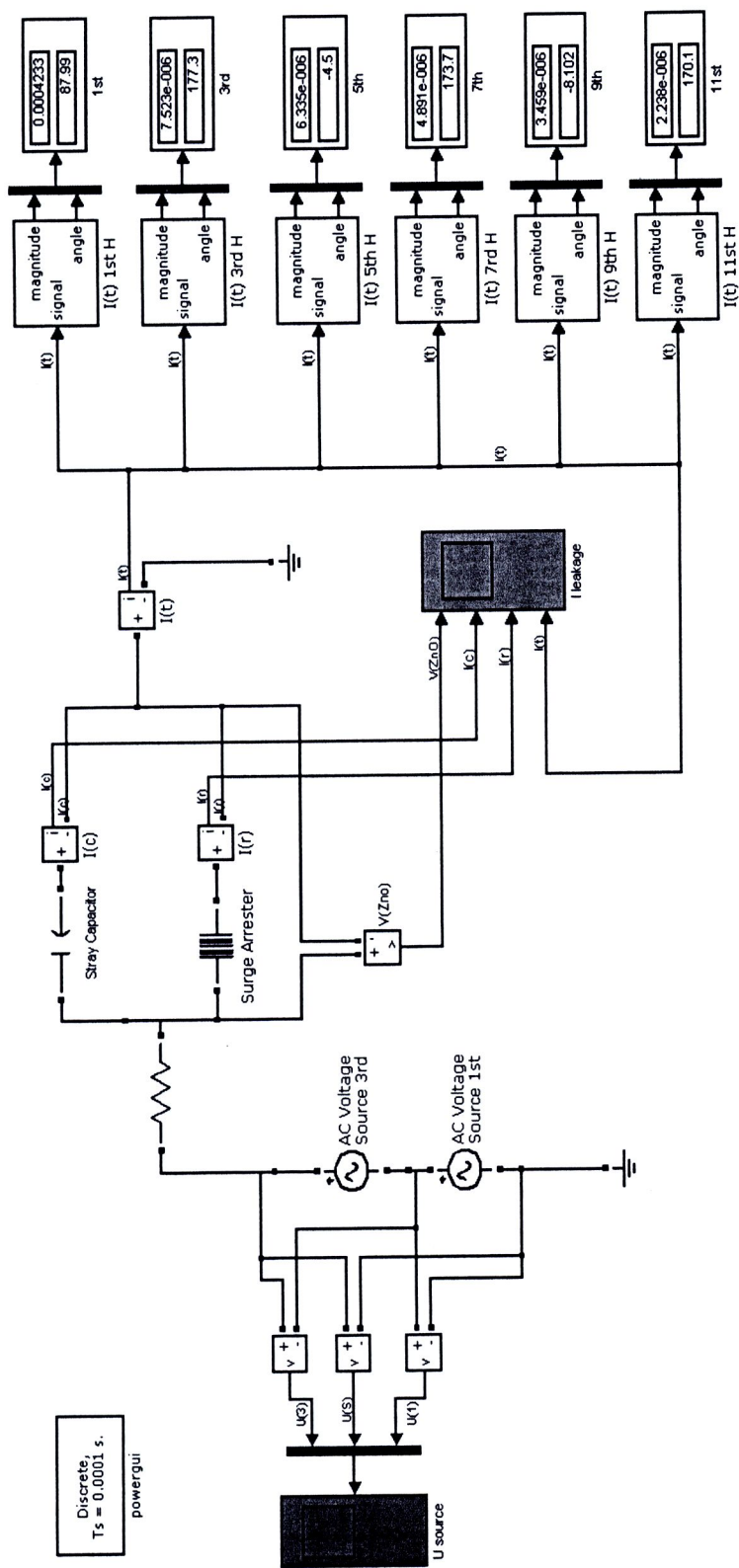
รูปที่ 3.3 แบบจำลองกับดักเสิร์จที่ใช้วิเคราะห์

จากตัวอย่างกับดักเสิร์จของระบบแรงดันใช้งาน 22 kV (nominal system voltage) ซึ่งเป็นแรงดันระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ที่ใช้ในการศึกษา มีขนาดพิกัด System voltages $U_c = 17$ kV, Rated voltages $U_r = 21$ kV และ Nominal discharge current (IEC 60099-4) $I_r = 5$ kApeak ในที่นี้จะกำหนดค่าคงที่ สำหรับแบบจำลองกับดักเสิร์จในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อใช้สำหรับการศึกษาวิเคราะห์ ดังนี้

Protection voltage Vref	: $21 \times 10^3 \times \sqrt{2}$ V
Number of columns	: 1
Reference current per column Iref	: 5000 A
Segment 1 characteristics	: $k_1 = 0.955$, $\alpha_1 = 46.0$
Segment 2 characteristics	: $k_2 = 1.0$, $\alpha_2 = 25.0$
Segment 3 characteristics	: $k_3 = 0.9915$, $\alpha_3 = 16.5$
Measurements	: Branch voltage and current

3.2 การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลโดยใช้แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

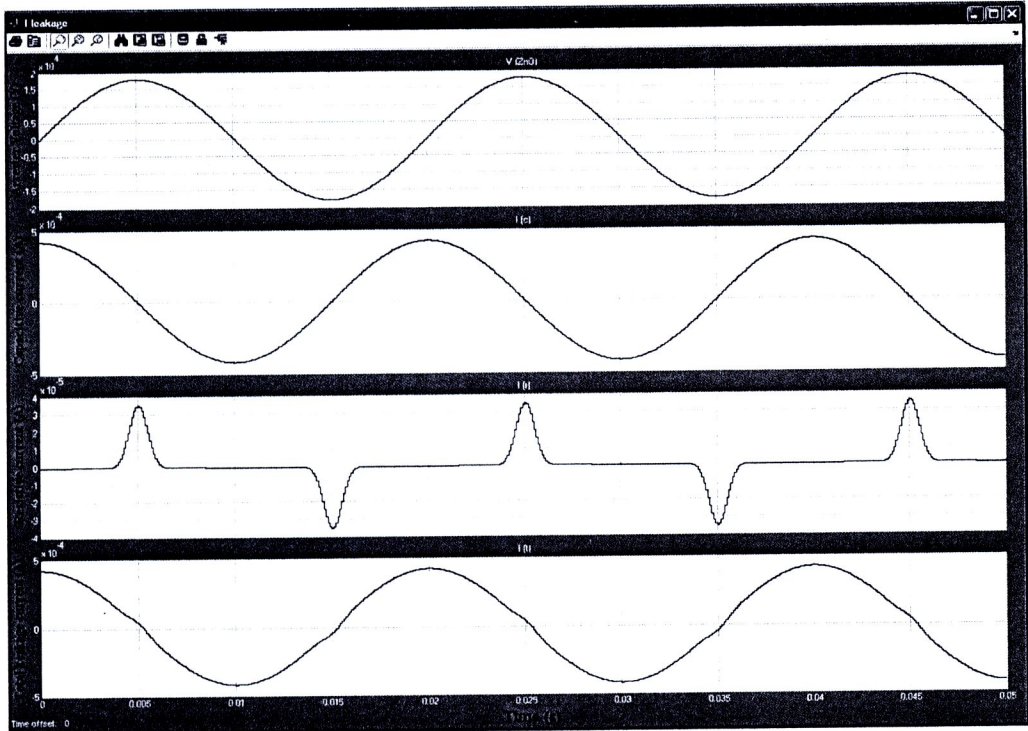
แบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังแสดงตาม รูปที่ 3.4 ได้นำมาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์กระแสรั่วจากความต้านทานของ แวริสเตอร์บล็อกในกับดักเสิร์จ โดยการหาส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทาน ในสภาพเงื่อนไขระดับแรงดันใช้งานของระบบที่ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 10 – 120 % และส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ตั้งแต่ 0 – 5 % ของพิกัดแรงดันใช้งานของระบบ โดยได้ผลจากการศึกษาในเงื่อนไขต่างๆ ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 3.4 แบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระแสสลับไหล

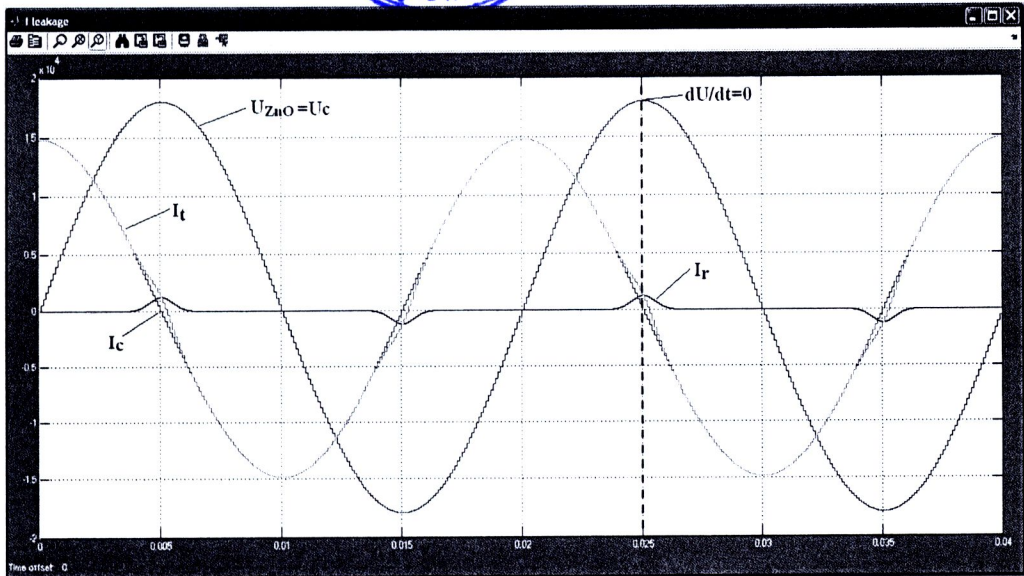
3.2.1 กระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระดับแรงดันใช้งาน

ผลการศึกษา กระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จ จากแบบจำลอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันใช้งานของระบบ ตั้งแต่ 10 – 120 % ของระดับแรงดันพิกัดใช้งานของระบบ (22 kV) เมื่อไม่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันของระบบ แสดงตาม รูปที่ 3.5 – 3.9



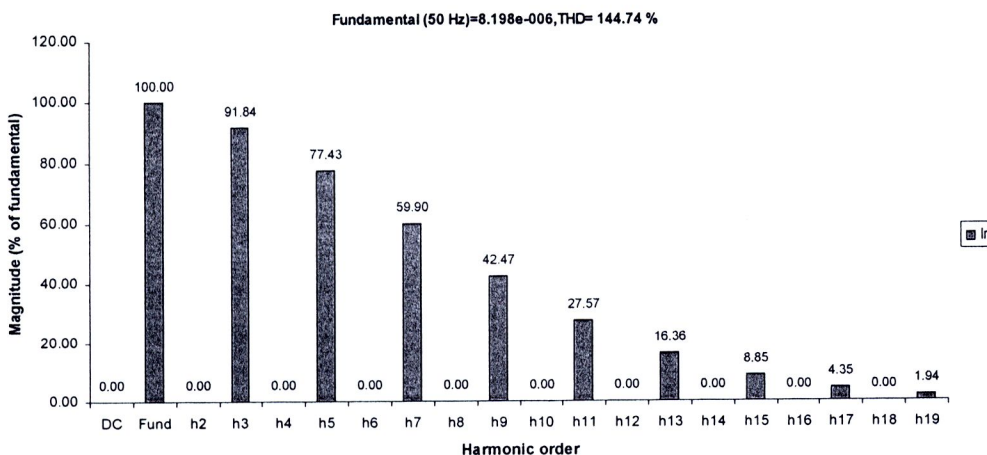
รูปที่ 3.5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน และกระแสจากการจำลองใน MATLAB/SIMULINK
(ก) แรงดันคร่อมกัปดักเสิร์จ (ข) กระแสรั่วคาปาซิทีฟ (ค) กระแสรั่วความ
ต้านทาน (ง) กระแสรั่วไหลรวมของกัปดักเสิร์จ

รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จ เทียบกับสัญญาณแรงดันอ้างอิง จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ที่ระดับแรงดันพิกัด 22 kV จะเห็นว่าส่วนประกอบกระแสของความต้านทานมีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากคุณลักษณะ V-I characteristics ของกัปดักเสิร์จแบบ ZnO ไม่เป็นเชิงเส้นตรง และมีมุมร่วมเฟสกับแรงดันคร่อมกัปดักเสิร์จ ในขณะที่ส่วนประกอบกระแสคาปาซิทีฟซึ่งเป็นกระแสส่วนใหญ่ของกระแสรั่วไหลรวม มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่มีมุมนำหน้าแรงดันคร่อมกัปดักเสิร์จ 90° เมื่อมีการวัดกระแสรั่วไหลรวม แล้วนำมาวิเคราะห์แยกส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสจากความต้านทานออกมา ก็จะได้ตัวบ่งชี้ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวินิจฉัย สภาพของกัปดักเสิร์จ ที่ติดตั้งใช้งานอยู่ในระบบ

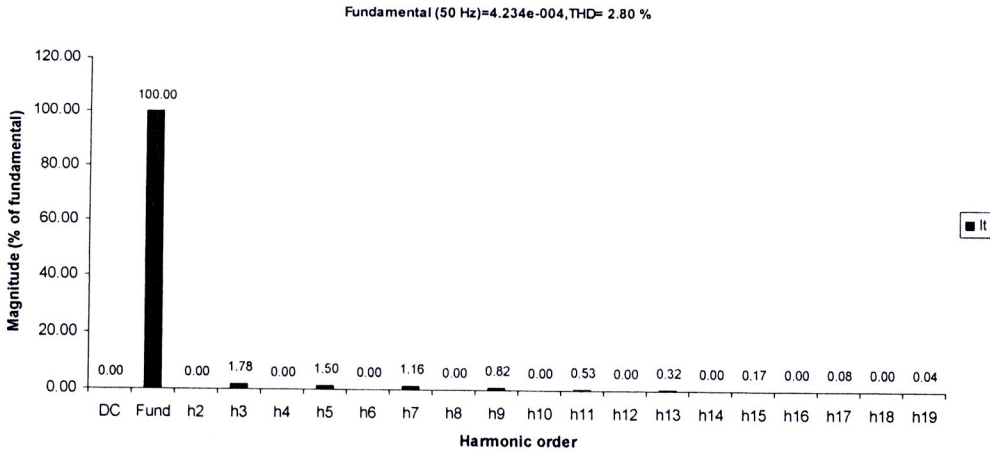


รูปที่ 3.6 กระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB

รูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จ เทียบกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB ที่ระดับแรงดันพิกัด 22 kV โดยที่ส่วนประกอบกระแสคาปาซิทีฟมีมุนำหน้าแรงดันคร่อมกับดักเสิร์จ 90° ดังนั้น ถ้าไม่มีส่วนประกอบกระแสความต้านทาน เมื่อแรงดันคร่อมกับดักเสิร์จมีค่าสูงสุด ($dV/dt = 0$) กระแสคาปาซิทีฟจะมีค่าเป็นศูนย์ จากรูปจะเห็นว่าที่ค่าแรงดันสูงสุด รูปคลื่นสัญญาณกระแสรั่วไหลรวม ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกระแสคาปาซิทีฟ มีค่าไม่เป็นศูนย์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากกระแสความต้านทาน ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้ของรูปคลื่นสัญญาณกระแสรั่วไหล ก็คือค่ายอด (peak) ของกระแสความต้านทานของกับดักเสิร์จ

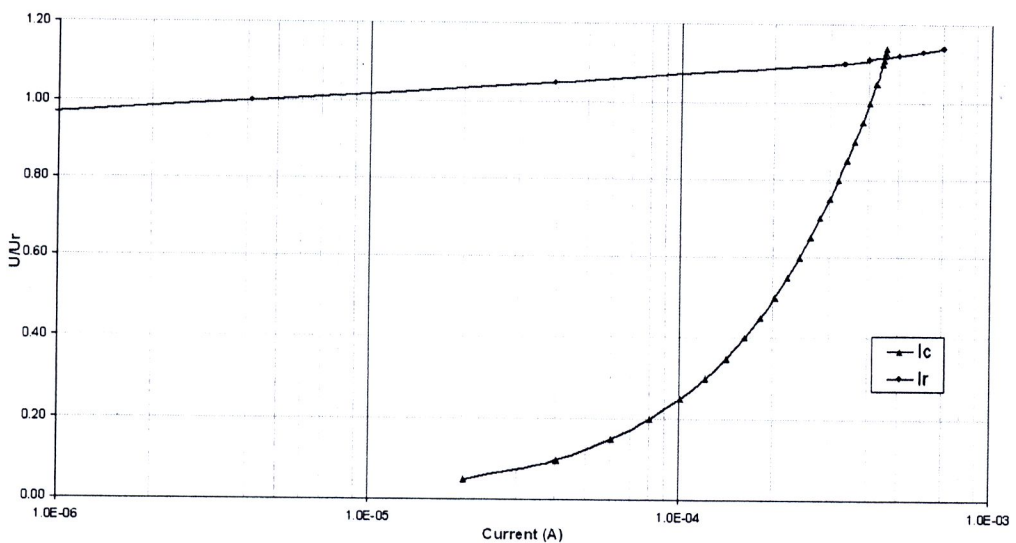


รูปที่ 3.7 ฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสรั่วความต้านทานที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT



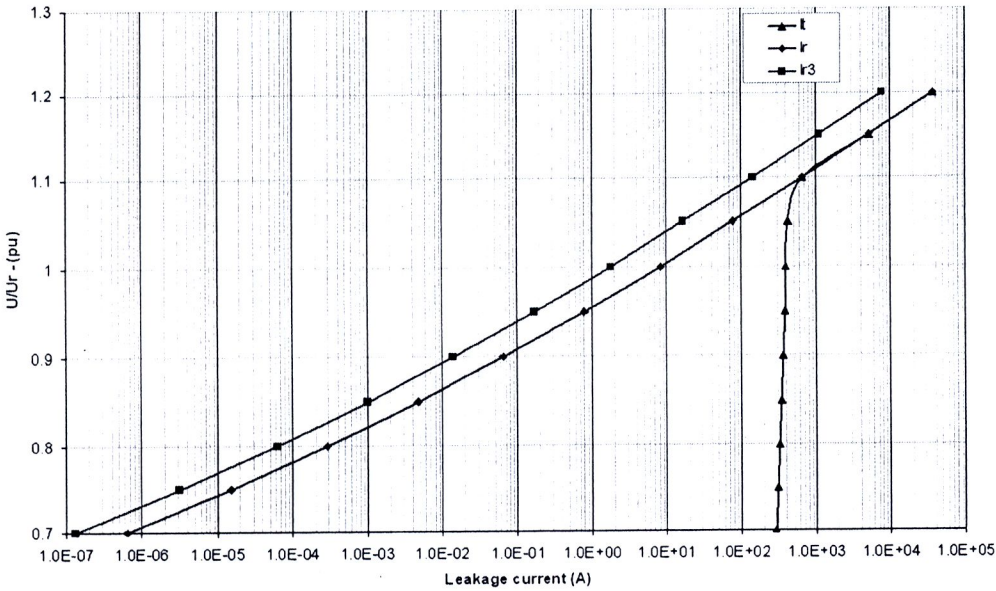
รูปที่ 3.8 ฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสรั่วไหลรวมที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT

รูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8 แสดงผลวิเคราะห์หาค่ากระแสฮาร์โมนิก ของกระแสรั่วความต้านทาน และกระแสรั่วไหลรวม (ไม่มีส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันอ้างอิง) โดยใช้การวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform Analysis) ใน MATLAB จาก รูปที่ 3.7 จะเห็นว่ากระแสรั่วความต้านทาน มีขนาดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ถึง 91.84 % ของกระแสองค์ประกอบพื้นฐาน (fundamental) ซึ่งมีขนาดค่าสูงสุดอยู่ที่ 8.918 μA แต่เมื่อเทียบกับองค์ประกอบพื้นฐานของกระแสรั่วไหลรวม ตาม รูปที่ 3.8 จะมีขนาดเพียง 1.78 % ซึ่งถือว่าต่ำมาก ดังนั้นหากมีการรบกวนจากฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสคาปาซิทีฟ จากส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันระบบ ก็จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนในการวัดอย่างมาก



รูปที่ 3.9 แสดงคุณลักษณะทาง กระแส-แรงดัน ของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB (ผลการทดสอบตารางที่ ก.1 ของภาคผนวก ก.)

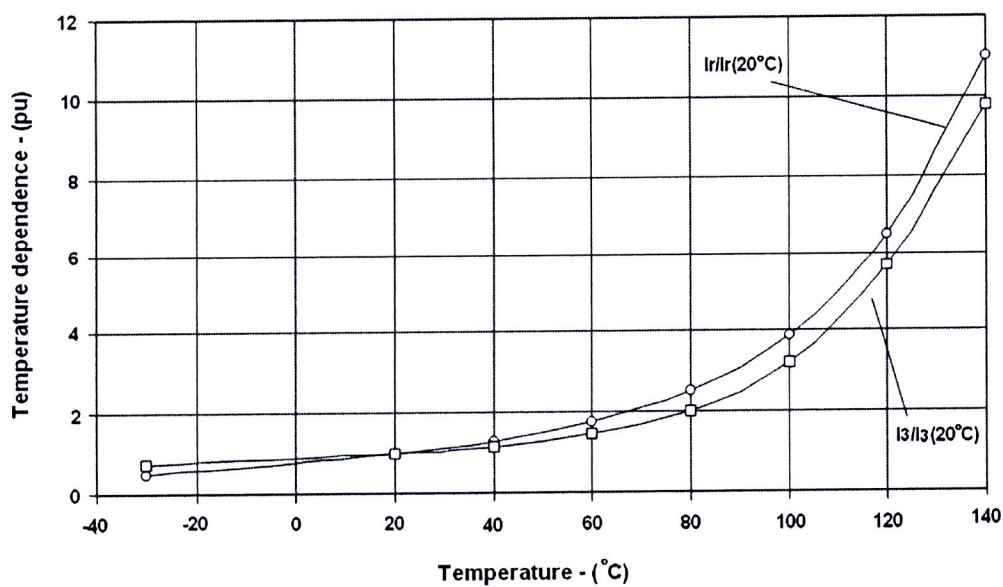
รูปที่ 3.9 ได้จากการวิเคราะห์ FFT ในโปรแกรม MATLAB แสดงคุณลักษณะทางกระแสและแรงดัน ของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตรง จากรูปจะเห็นว่าที่ค่าแรงดันต่ำๆ จะมีกระแสรั่วความต้านทานน้อยมาก ในขณะที่กระแสรั่วค่าปาสิตีฟมีขนาดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดัน ซึ่งหมายความว่า ถ้ามีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 อยู่ในแรงดันของระบบ ก็จะทำให้มีส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ในกระแสรั่วไหลรวมด้วย และกระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามค่าแรงดันของระบบ เช่นเดียวกัน ดังนั้นการวัดค่ากระแสรั่วความต้านทานโดยการวิเคราะห์แยกกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จากกระแสรั่วไหลรวม จึงต้องมีการชดเชยความคลาดเคลื่อนจากกระแสฮาร์โมนิกของแรงดันระบบด้วย



รูปที่ 3.10 คุณลักษณะทาง กระแส-แรงดันของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO แสดงความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลรวม กระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ FFT ในโปรแกรม MATLAB (ผลการทดสอบตารางที่ ก.2 ของภาคผนวก ก.)

รูปที่ 3.10 ได้จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB จะเห็นว่าอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ที่มีต่อกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสรั่วไหล และกระแสรั่วความต้านทาน มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก จากรูปช่วยให้คำอธิบายว่า ทำไมกระแสรั่วฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จึงสามารถนำมาใช้หาค่ากระแสรั่วความต้านทานได้ อย่างไรก็ตามขนาดของกระแสที่ต้องการวัดมีค่าต่ำมาก จากการจำลองจะเห็นว่า ในขณะที่กระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จขณะติดตั้งอยู่ที่ระดับแรงดันใช้งาน มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 425 μA และกระแสรั่วความต้านทานมีขนาดประมาณ 78 μA จะมีกระแสรั่วฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เพียง 16 μA ซึ่งจะเห็นว่ามีขนาดเพียง 3.7% ของกระแสรั่วไหลทั้งหมด

เพื่อที่จะชดเชยความคลาดเคลื่อนของการวัด เนื่องจากผลของอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้า ของกัปดักเสิร์จ และแปลงค่าไปเป็นค่ากระแสรั่วความต้านทานที่ต้องสมบูรณ์ (absolute value) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบความสัมพันธ์ของกระแสรั่วความต้านทาน ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้างกล่าวข้างต้น รวมถึงอัตราส่วนระหว่างส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 กับกระแสรั่วความต้านทาน ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นแสดงไว้ใน รูปที่ 3.11 ถึง รูปที่ 3.14

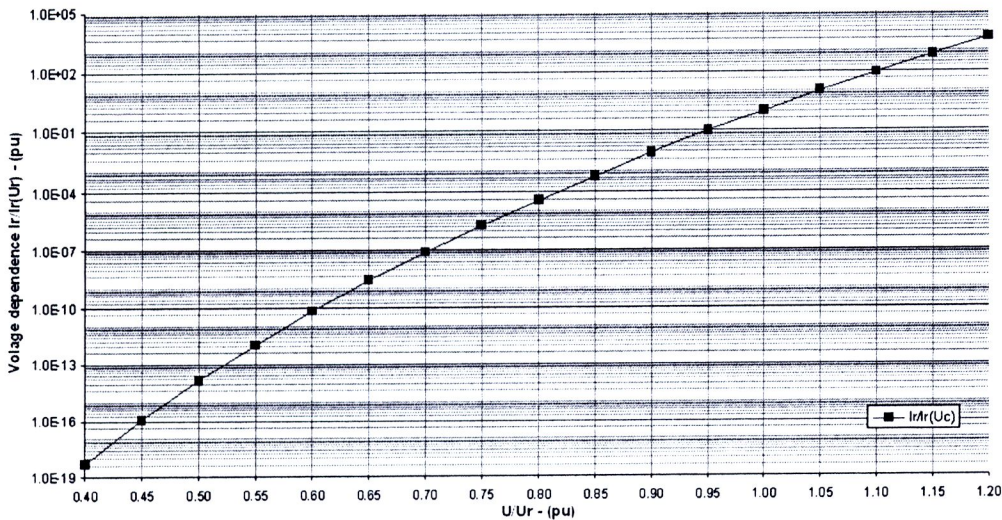


รูปที่ 3.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ที่ขึ้นต่ออุณหภูมิ [32]

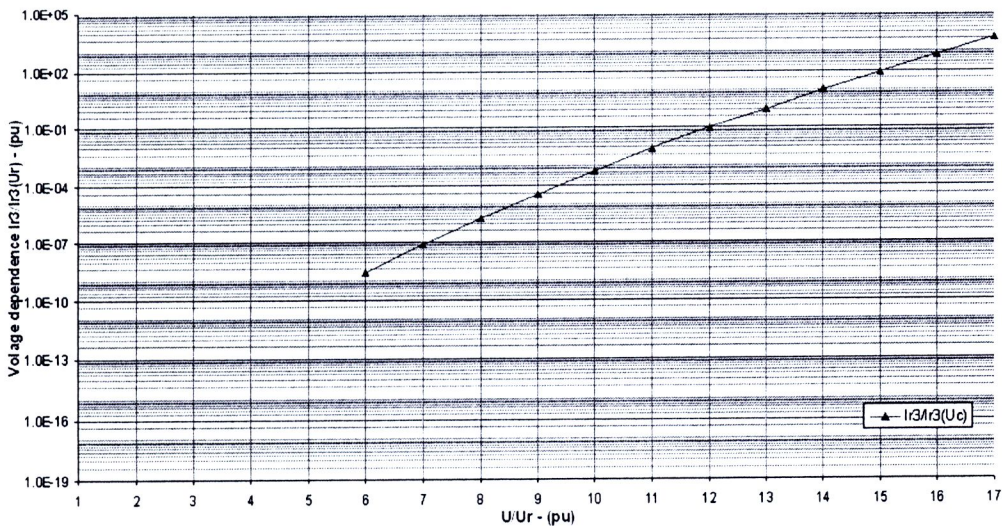
เนื่องจากขณะทำการวัดกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO เราไม่สามารถทราบค่าอุณหภูมิที่แท้จริงของตัวต้านทาน เราจึงทำได้เพียงประเมินค่าจากอุณหภูมิแวดล้อม ปกติอุณหภูมิการทำงานอย่างต่อเนื่องของกัปดักเสิร์จ เนื่องความร้อนจากพลังงานสูญเสียในตัวต้านทานจะสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเพียงไม่กี่องศา แต่เมื่อพิจารณาความร้อนจากรังสีของดวงอาทิตย์ และการดิสชาร์จบนผิวฉนวน เนื่องจากการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิของกัปดักเสิร์จจะเพิ่มมากขึ้นกว่าผลจากการทำงานตามปกติมาก ด้วยเหตุนี้การทดสอบการทำงานของกัปดักเสิร์จ (operating duty test) ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 จึงเริ่มทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C โดยได้นำอิทธิพลของการรบกวนดังกล่าวมาพิจารณาร่วมด้วย

จาก รูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20°C เป็น 60°C จะทำให้ส่วนประกอบกระแสรั่วต้านทานเพิ่มขึ้น 70% โดยประมาณ และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เพิ่มขึ้นโดยประมาณ 50% การเปลี่ยนแปลงนี้นำไปสู่ความไม่แน่นอนในการวัด

ค่ากระแสรั่วไหล โดยใช้หลักการวิเคราะห์กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทราบค่าอัตราส่วนที่แน่นอนระหว่างกระแสรั่วไหลรวม และกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แท้จริงของกับดักเสิร์จ



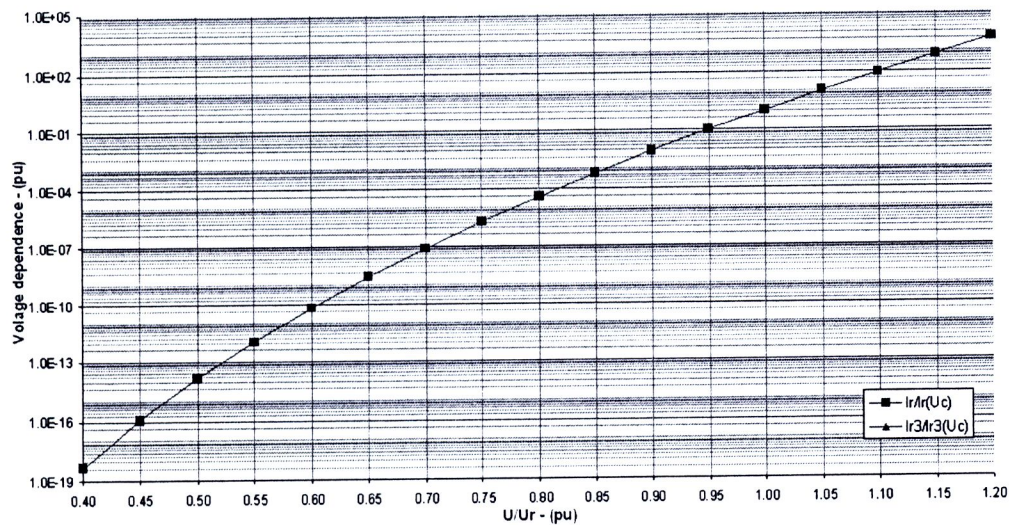
รูปที่ 3.12 ผลทดสอบโดยการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสรั่วความต้านทานที่ขึ้นต่อค่าแรงดันใช้งาน (ผลการทดสอบตารางที่ ก.3 ของภาคผนวก ก.)



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทานที่ขึ้นต่อค่าแรงดันใช้งาน (ผลการทดสอบตารางที่ ก.4 ของภาคผนวก ก.)

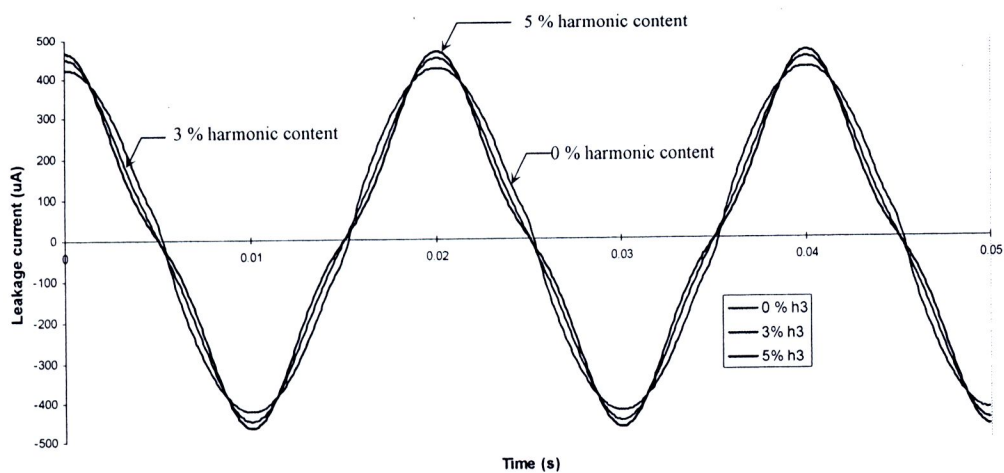
รูปที่ 3.12 ถึง รูปที่ 3.14 ได้จากผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสรั่วความต้านทาน และการเปลี่ยนแปลงค่าส่วนประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ของ

กระแสรั่วความต้านทาน ต่อค่าแรงดันใช้งาน จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ที่มีต่อกระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทาน เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้น ในกรณีที่ไม่มีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ในแรงดันระบบ จึงสามารถนำกระแสรั่วฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 มาใช้หาค่ากระแสรั่วความต้านทานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



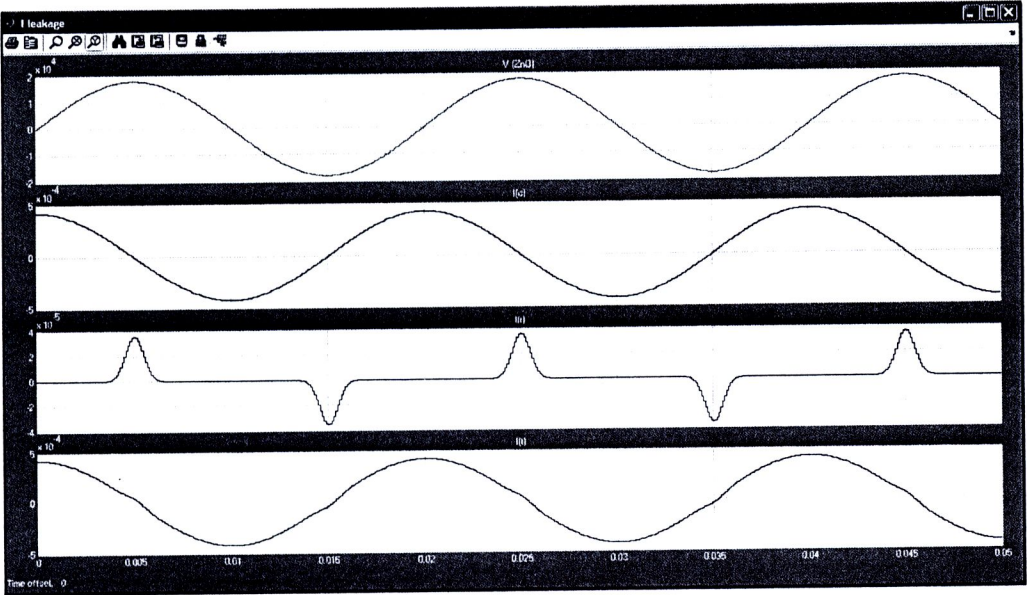
รูปที่ 3.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสรั่วความต้านทาน และส่วนประกอบกระแสฮาร์โมนิกที่ 3 ของกระแสรั่วความต้านทาน ต่อค่าแรงดันใช้งาน จากผลการจำลองในโปรแกรม MATLAB (ผลการทดสอบตารางที่ ก.3-ก.4 ของภาคผนวก ก.)

3.2.2 กระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จเมื่อมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกในแรงดันใช้งาน

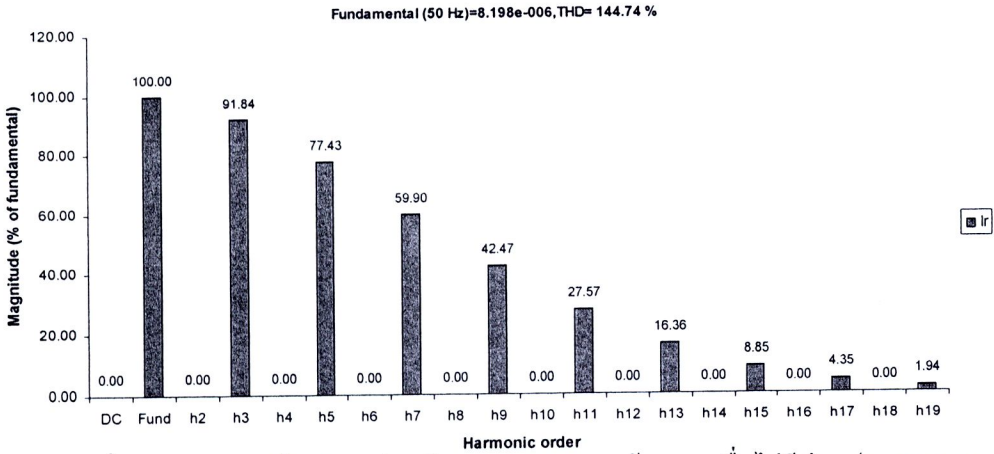


รูปที่ 3.15 ผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB แสดงให้เห็นว่ากระแสรั่วรวม (I_T) ของกัปดักเสิร์จมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ในแรงดันระบบ

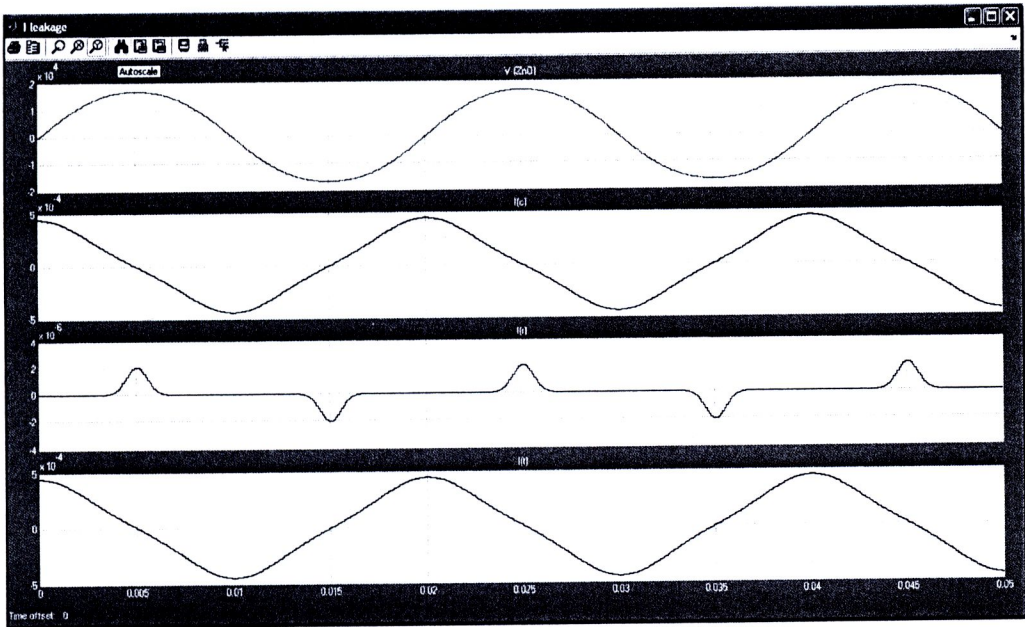
ผลการศึกษา กระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จ จากแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เมื่อมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ตั้งแต่ 0 – 5 % ของพิกัดแรงดันใช้งานของระบบ จากรูปที่ 3.15 แสดงกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จที่ได้จากการการจำลองในโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบที่ระดับแรงดันเท่ากัน ระหว่างมีและไม่มี ส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดัน จากรูปแสดงให้เห็นว่า ถ้ามีส่วนประกอบแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่ในแรงดันระบบเพียง 3 % ก็จะทำให้มีกระแสรั่วไหลรวมเพิ่มขึ้นได้ แม้ระดับแรงดันของระบบจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงเลยก็ตาม เนื่องมาจากค่า X_C จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น



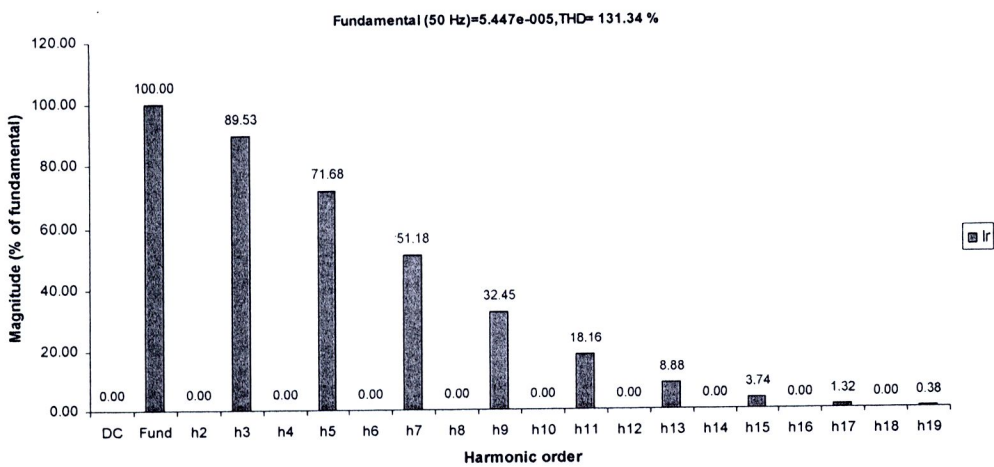
รูปที่ 3.16 แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสคาปาซิทีฟ และ กระแสความต้านทาน เมื่อไม่มีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง



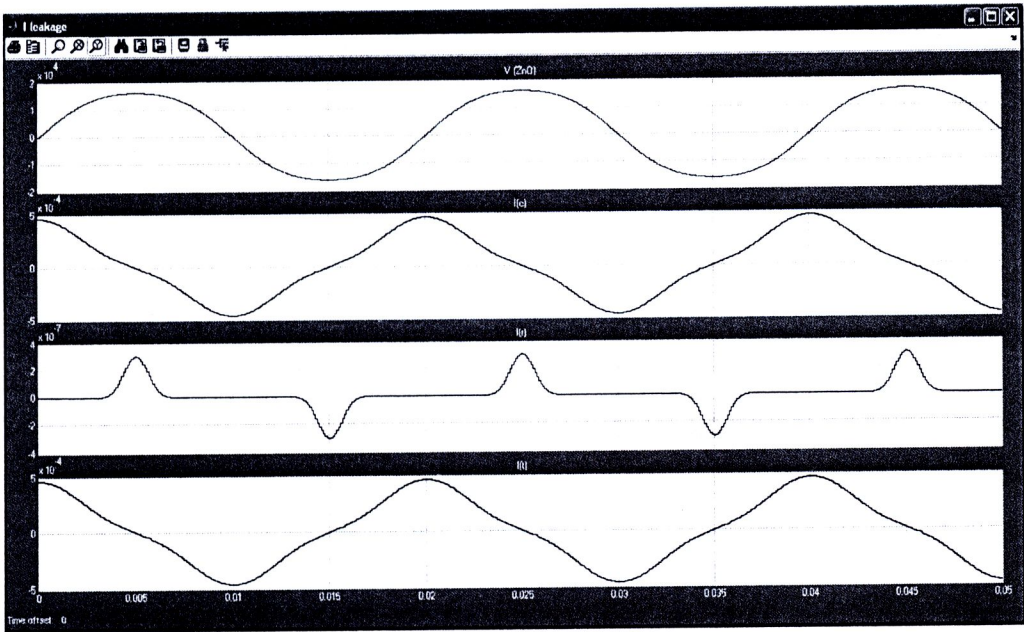
รูปที่ 3.17 แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสความต้านทานเมื่อไม่มีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง



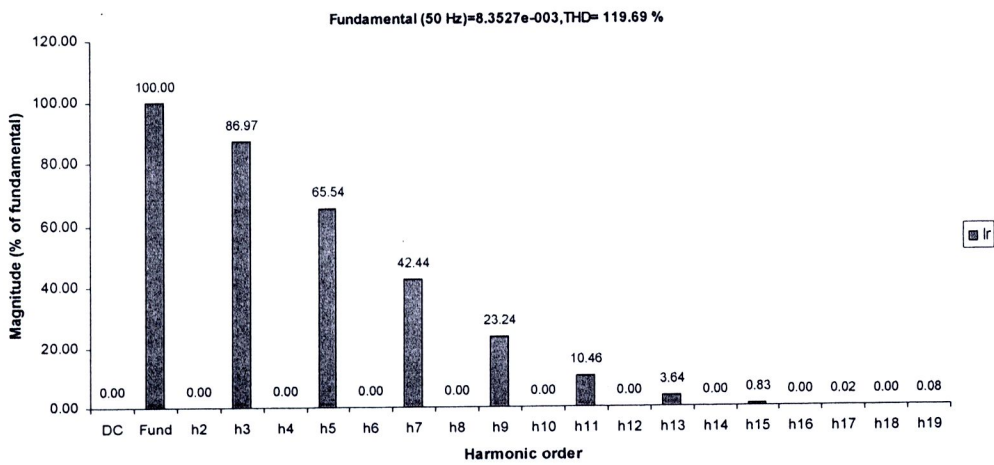
รูปที่ 3.18 แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสคาปาซิทีฟ และกระแสความต้านทาน เมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันอ้างอิง เท่ากับ 3 % ที่มุมเฟส 0°



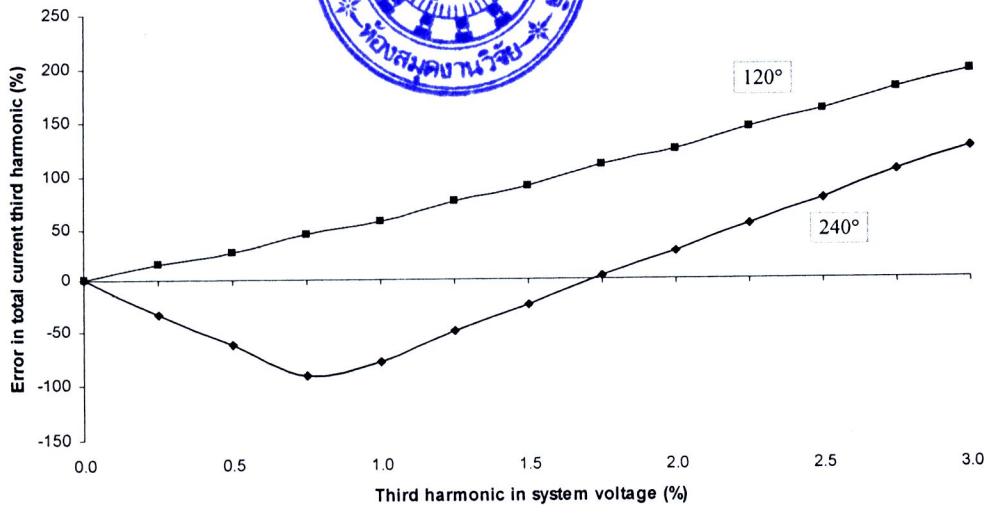
รูปที่ 3.19 แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสความต้านทานเมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง 3 % ที่มุมเฟส 0°



รูปที่ 3.20 แสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสคาปาซิทีฟ และกระแสความต้านทาน เมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันอ้างอิง เท่ากับ 5 % ที่มุมเฟส 0°



รูปที่ 3.21 แสดงฮาร์โมนิกสเปกตรัมของกระแสความต้านทานเมื่อมีส่วนประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกในแรงดันอ้างอิง 5 % ที่มุมเฟส 0°



รูปที่ 3.22 ผลจากการจำลองหาความคลาดเคลื่อนที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในการวิเคราะห์หากระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จ เมื่อมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 อยู่ในแรงดันระบบ ที่ขนาดและมุมเฟสต่างๆ กัน

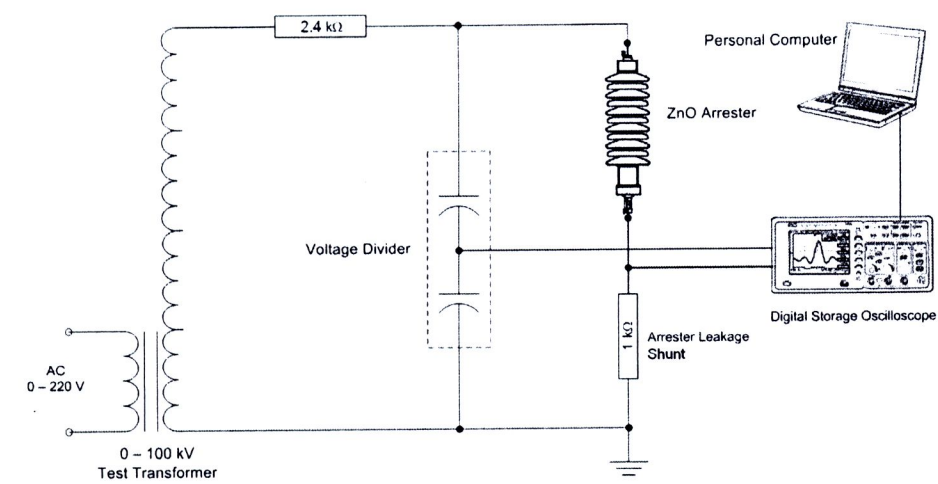
รูปที่ 3.22 แสดงผลศึกษาโดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนประกอบฮาร์โมนิกที่ 3 ในแรงดันของระบบ โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกที่ 3 ตั้งแต่ 0 ถึง 3% ที่มุมเฟสจาก 0° ถึง 360° เทียบกับแรงดันที่จ่ายให้กับกัปดักเสิร์จจากการวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier analysis) ของกระแสรั่วไหลรวมด้วย FFT พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส ฮาร์โมนิกที่ 3 จะมีค่าสูงสุดที่มุมเฟส 120° และ 270°

โดยสรุปแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนในการวัด เมื่อมีการวัดกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จ โดยใช้หลักการวิเคราะห์ส่วนประกอบฮาร์โมนิก คืออิทธิพลของฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันไฟฟ้าของระบบ และอุณหภูมิของกัปดักเสิร์จ ซึ่งเรายังไม่ทราบค่าอุณหภูมิทำงานที่แท้จริงของกัปดักเสิร์จ ดังนั้นในการศึกษาวิจัย จะใช้ผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 3.22 เป็นข้อมูลในการชดเชยความคลาดเคลื่อน เนื่องจากส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ในแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้า และใช้ข้อมูลตามรูปที่ 3.11 ในการชดเชยความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใช้งานของกัปดักเสิร์จ

3.3 การวัดและศึกษาค่ากระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ในการวัดกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จที่ติดตั้งใช้งานอยู่ ในทางปฏิบัติจะสามารถวัดได้เฉพาะกระแสรั่วไหลรวม ซึ่งประกอบด้วยกระแสรั่วคาปาซิทีฟ และกระแสรั่วความต้านทาน การวัดเฉพาะกระแสรั่วความต้านทานโดยตรงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากกระแสรั่วความต้านทานมี

สัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสรั่วคาปาซิทีฟ นอกจากนี้ยังมีมุมเฟสต่างจากกระแสรั่วคาปาซิทีฟอยู่ 90° ดังนั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสรั่วความต้านทานอย่างมาก จึงจะส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลรวมได้ อีกทั้งกระแสรั่วไหลรวมยังมีความไวต่อลักษณะการติดตั้งกับดักเสิร์จ เนื่องจากกระแสรั่วคาปาซิทีฟขึ้นอยู่กับการค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ (stray capacitance) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการติดตั้งของกับดักเสิร์จ การวัดและศึกษาค่ากระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลอ้างอิง จึงมีความจำเป็นสำหรับการออกแบบและทดสอบ วงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสิร์จ ที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้



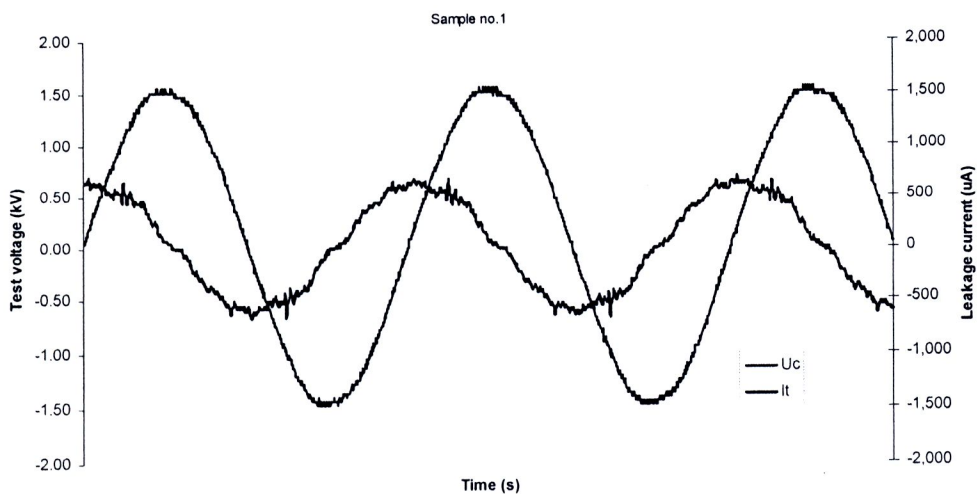
รูปที่ 3.23 แสดงการต่อวงจรวัดค่ากระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จในห้องปฏิบัติการ

ในการศึกษาจะใช้กับดักเสิร์จตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง มีขนาดพิกัดแรงดันใช้งาน และกระแสคิสราร์จ (discharge current) เท่ากัน โดยเป็นกับดักเสิร์จของใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งานจำนวน 2 ตัวอย่าง และกับดักเสิร์จที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจำนวน 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

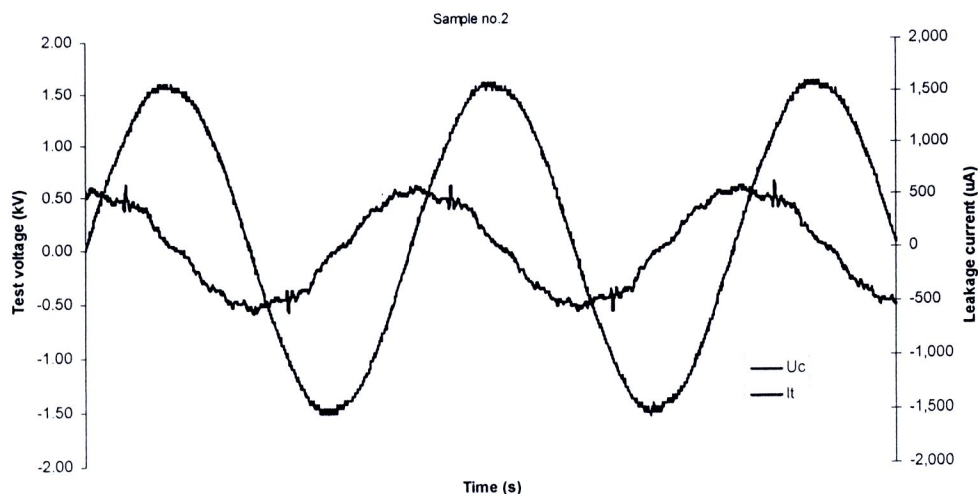
ตารางที่ 3.1 ขนาดพิกัดของตัวอย่างกับดักเสิร์จที่ใช้ในการศึกษา

According to IEC 60099-4			
Sample	ZnO Rated Voltage (kV)		Rated Current (kA)
	U_r	U_c	
NEW-1	21	17	5
NEW-2	21	17	5
OLD-1	21	17	5
OLD-2	21	17	5
OLD-3	21	17	5

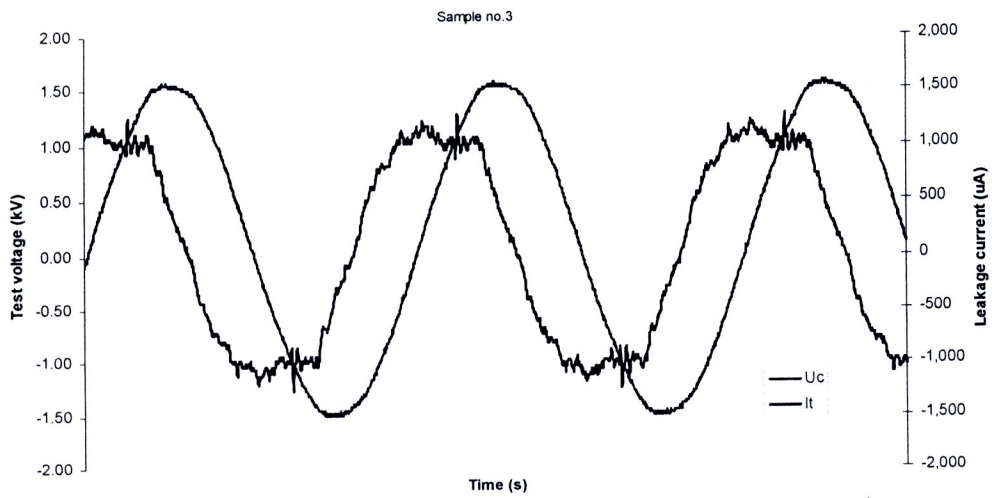
ในการทดสอบจะใช้หม้อแปลงทดสอบ ขนาดพิกัดแรงดัน 240/100 kV เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน ป้อนแรงดันทดสอบที่ระดับ 12.7rms kV (22 kV line-to-neutral system voltage) วัดค่าแรงดันทดสอบ ผ่านคาปาซิทีฟโวลเตจดิไวดอร์ (capacitive voltage divider) ขนาดอัตราส่วนแรงดัน 501 : 1 และวัดค่ากระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จด้วยความต้านทานชั้นที่ (shunt resistor) เก็บผลข้อมูลการทดสอบด้วยดิจิตอลสโตเรจโคป โดยมีรูปคลื่นสัญญาณของแรงดัน และกระแสรั่วไหลรวมของกับดักเสิร์จดังแสดงตามรูปที่ 3.24 ถึง รูปที่ 3.29



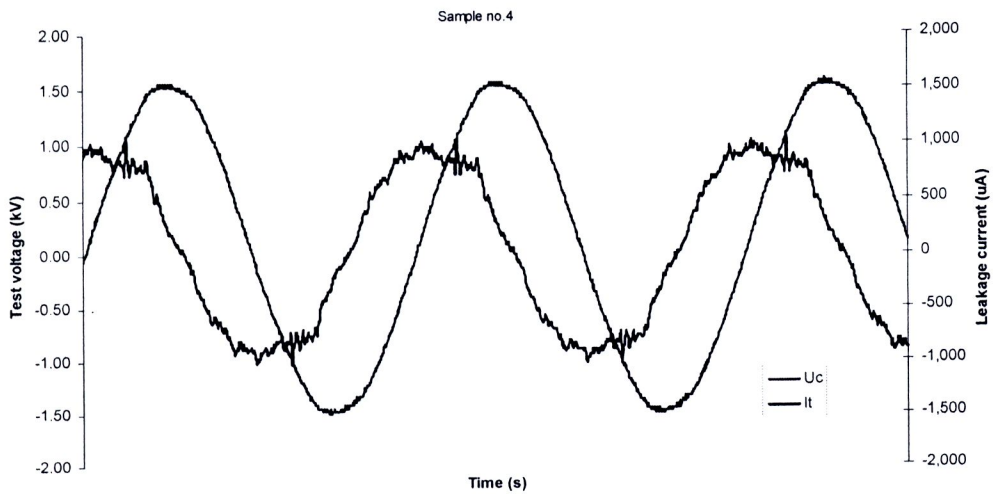
รูปที่ 3.24 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ NEW-1



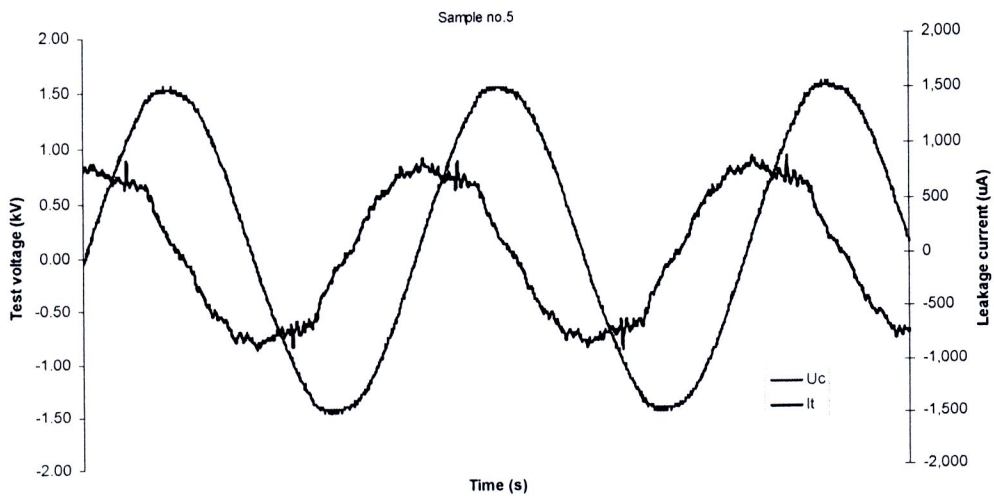
รูปที่ 3.25 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ NEW-2



รูปที่ 3.26 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบที่ OLD-1



รูปที่ 3.27 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ OLD-2



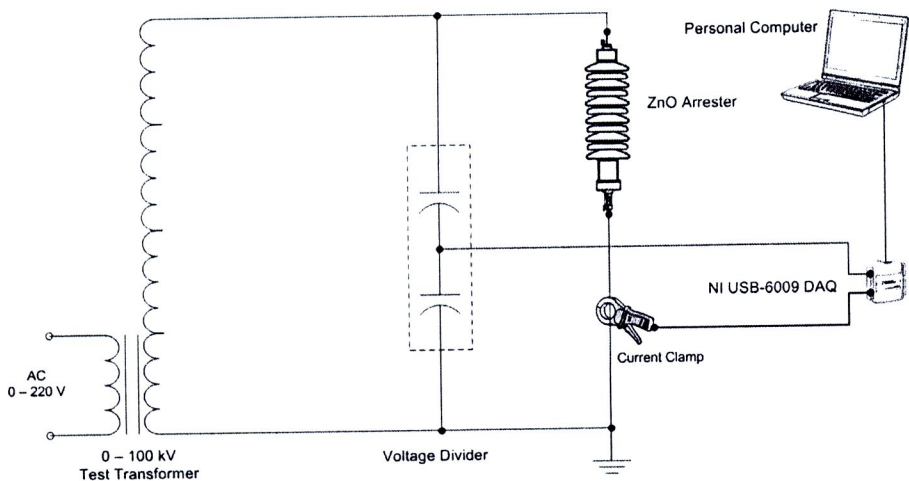
รูปที่ 3.28 แสดงกระแสรั่วไหลรวมเทียบกับแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จ ตัวอย่างทดสอบ OLD-3

ในการทดสอบจะควบคุมแรงดันทดสอบระหว่างขั้วของกับดักเสริม ให้มีค่าขอยอดอยู่ที่ 29.7b kV (peak voltage) เพื่อไม่ให้เกินค่าระดับแรงดันอ้างอิง U_r (21 kVrms) เนื่องจากเมื่อกับดักเสริมได้รับแรงดันปกติของระบบไฟฟ้า จะมีกระแสรั่วความต้านทานไหลน้อยมาก เมื่อเทียบกับกระแสรั่วคาปาซิทีฟ แต่เมื่อกับดักเสริมได้รับแรงดันสูงขึ้นจนถึงระดับแรงดันอ้างอิง ซึ่งเป็นบริเวณที่กับดักเสริมเริ่มที่จะทำงาน คือเริ่มนำกระแส จึงมีกระแสรั่วความต้านทานไหลเพิ่มมากขึ้น จนมีขนาดสูงกว่ากระแสรั่วคาปาซิทีฟ ดังนั้นการทดสอบจึงจำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวังและรวดเร็ว เพื่อไม่ให้กับดักเสริมได้รับความเสียหายเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น

จากการทดสอบพบว่า ค่ากระแสรั่วไหลรวมที่ไหลผ่านกับดักเสริมที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (NEW-1, NEW-2) มีค่าขอยอดประมาณ 500 μA – 600 μA และกับดักเสริมที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว (OLD-1, OLD-2, OLD-3) มีค่าขอยอดประมาณ 800 μA – 1,200 μA ค่าที่ได้นี้จะใช้เป็นค่าอ้างอิง ในการทดสอบวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริมที่สร้างขึ้น

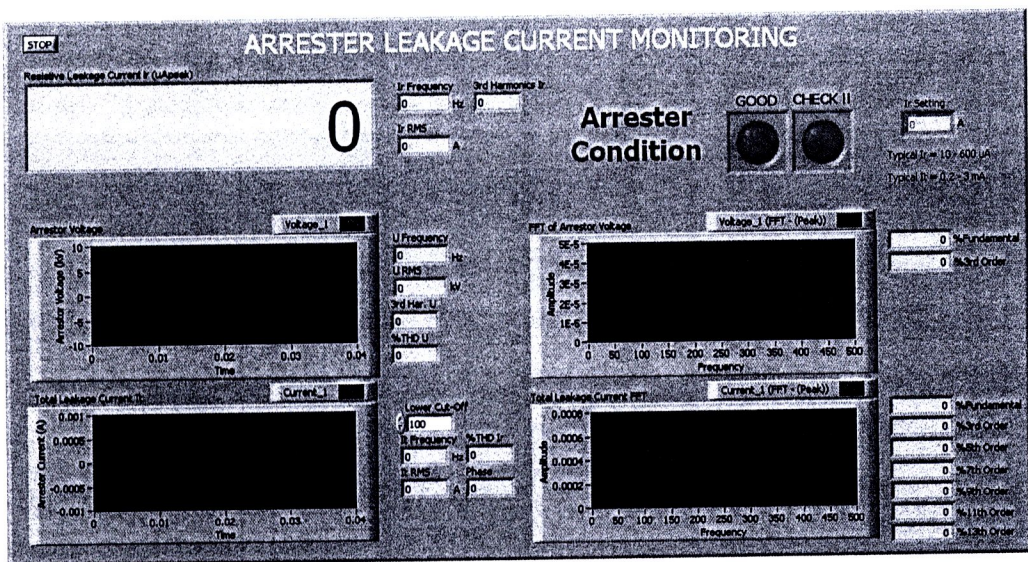
3.4 การออกแบบและสร้างวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริมโดยใช้โปรแกรม LabVIEW

หลักการวัดค่ากระแสรั่วไหล ของวงจรแสดงสถานะการทำงานของกับดักเสริม แสดงในรูปที่ 3.29 จากรูปสัญญาณกระแสรั่วไหลรวมผ่านกับดักเสริมจากแคลมป์วัดกระแส (current clamp) และสัญญาณแรงดันอ้างอิงของระบบจากโวลเตจดีไวเซอร์ จะเชื่อมต่อเข้าคอมพิวเตอร์ผ่านทางวงจรรับข้อมูล (data acquisition) NI USB-6009 DAQ ข้อมูลของกระแสและแรงดันที่ได้ จะนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อหาค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสรั่วความต้านทาน จากนั้นนำค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปคำนวณปรับสัดส่วน (rescale) โดยมีการชดเชยความคลาดเคลื่อนจากส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ของแรงดันด้วย เพื่อให้ได้ค่ากระแสรั่วความต้านทานที่ถูกต้อง นำค่าที่ได้จากการวัดและการวิเคราะห์ไปแสดงผล เพื่อแสดงสถานะของกับดักเสริม โดยในโปรแกรมที่ออกแบบไว้นี้ สามารถกำหนดจุดอ้างอิง (set point) ของกระแสรั่วไหลสูงสุดที่ยอมรับได้ เพื่อให้มีการแจ้งเตือน (alarm) เมื่อกระแสรั่วความต้านทานของกับดักเสริม มีค่าสูงกว่าจุดอ้างอิงที่กำหนดไว้

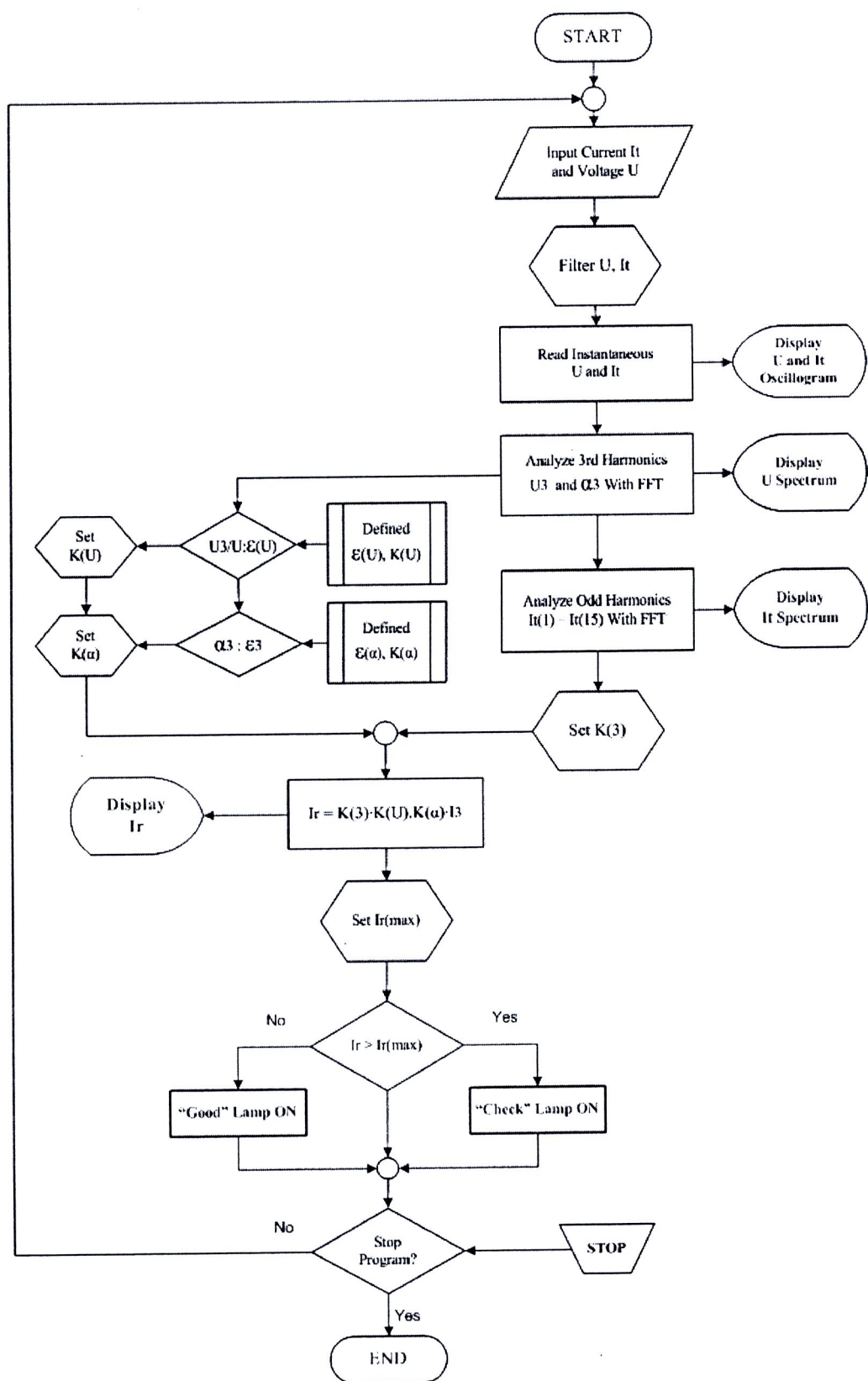


รูปที่ 3.29 แสดงการต่อวงจรแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสิร์จ

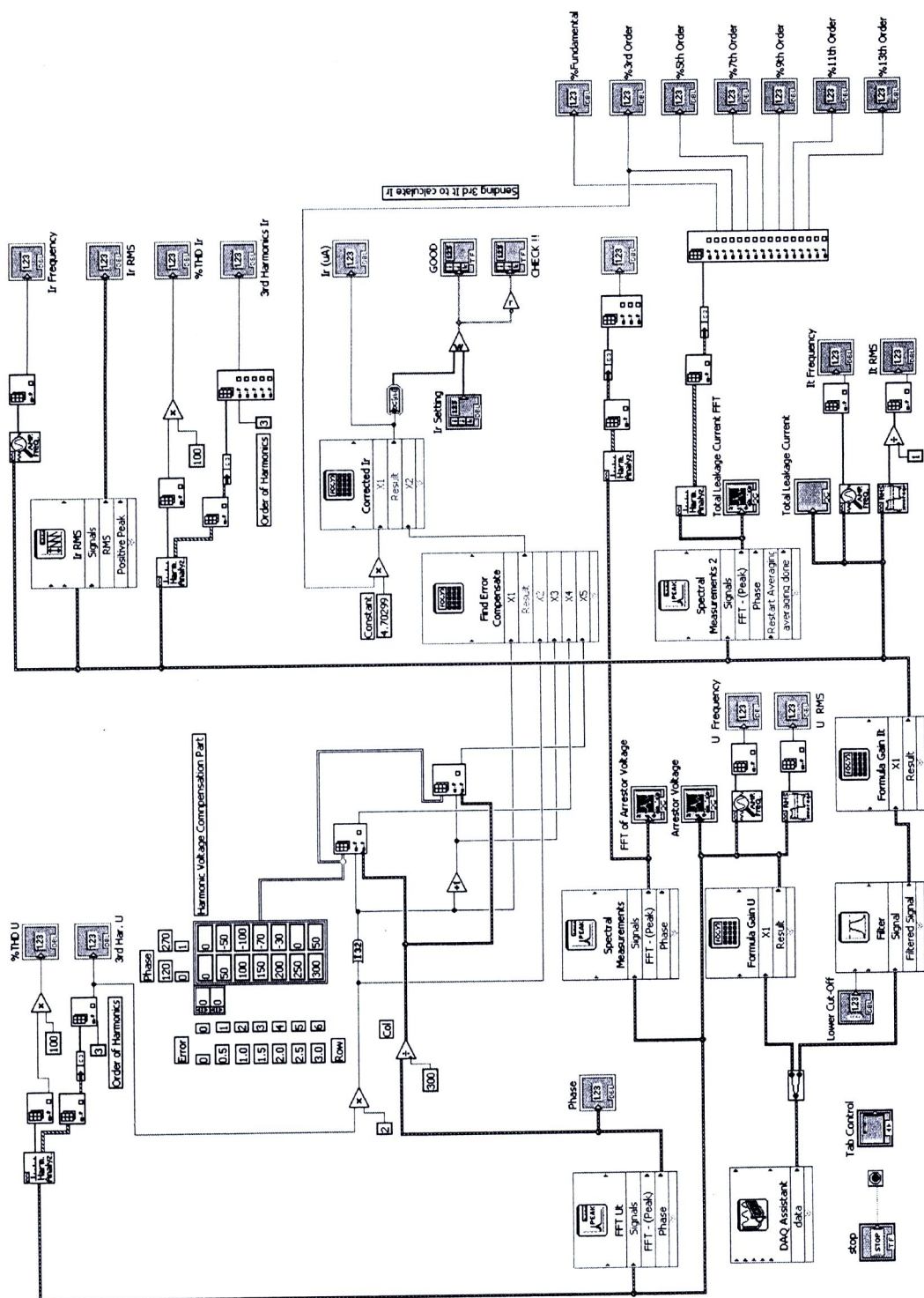
รูปที่ 3.30 แสดงหน้าจอแสดงผลของการแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสิร์จ โดยจะแสดงออสซิลโลแกรมของแรงดันอ้างอิง กระแสรั่วไหลรวม กระแสรั่วคาปาซิทีฟ กระแสรั่วความต้านทานพร้อมค่าฮาร์โมนิกสเปกตรัม (harmonics spectrum) และส่วนประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 พร้อมค่ามมเฟสชิฟท์ของแรงดันระบบ รูปที่ 3.31 แสดงพล็อตชาร์ตการทำงานบนโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้เพื่อออกแบบและแสดงผลตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.30 หน้าจอแสดงสถานะการทำงานของกัปดักเสิร์จตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.31 โฟลว์ชาร์ตการทำงานบนโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3.36 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรแสดงสถานะของกับดักเสิร์จบนโปรแกรม LabVIEW