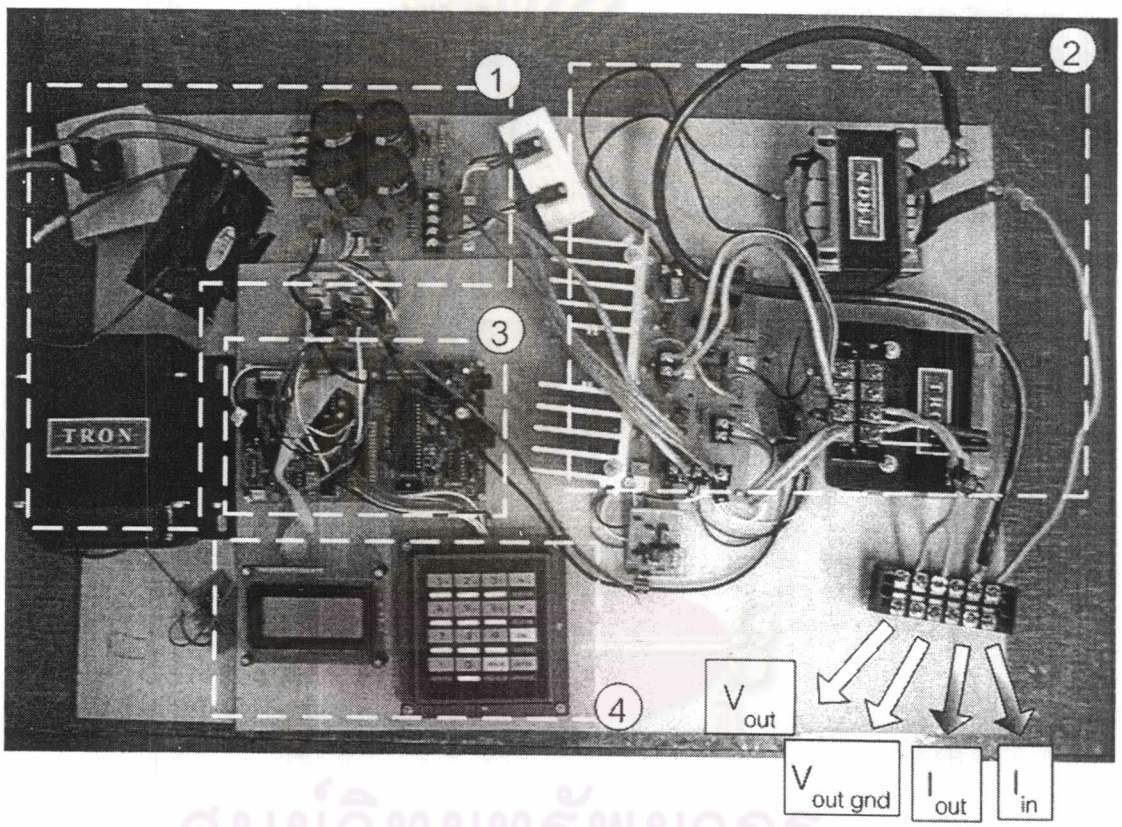
บทที่ 5

การทดสอบ และสรุปผล

5.1 วงจรที่ออกแบบ

เมื่อต่อวงจรขยายสัญญาณตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และนำมาประกอบกับส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบจะได้วงจรที่มีลักษณะตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันและกระแสที่ออกแบบ

จากรูปวงจรจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนด้วยกันดังหมายเลขที่แสดง ดังนี้

- วงจรหมายเลข 1 เป็นวงจรจ่ายไฟเลี้ยงให้ระบบ โดยส่วนนี้จะรับสัญญาณเข้าเป็นไฟสลับขนาด 220 V_{rms} และสร้างเป็นสัญญาณออกไฟตรงขนาด ± 15 V และ ± 35 V จ่ายให้กับวงจรทั้งหมด

- วงจรหมายเลข 2 เป็นวงจรขยายแรงดันและวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

- วงจรหมายเลข 3 เป็นวงจรควบคุมและสร้างสัญญาณต้นแบบ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ และตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

- วงจรหมายเลข 4 เป็นส่วนแสดงผลและแป้นพิมพ์สำหรับให้ผู้ใช้สั่งงานเครื่องจ่ายพลังงาน ส่วนนี้จะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

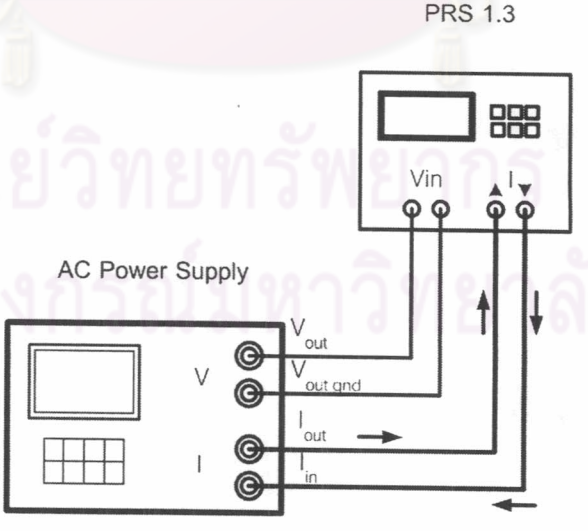
สำหรับช่องสัญญาณออกของวงจรจะแยกได้เป็นสองส่วนคือ สัญญาณแรงดันออก ซึ่งประกอบไปด้วย V_{out} และ $V_{out\,gnd}$ ในรูป และช่องสัญญาณกระแสซึ่งประกอบด้วย I_{out} และ I_{in} โดยเมื่อต่อโหลด กระแสออกจะไหลจากขา I_{out} ผ่านโหลดและกลับเข้าวงจรที่ขา I_{in}

5.2 ผลการทดสอบการสร้างสัญญาณ

การทดสอบการสร้างสัญญาณของแหล่งจ่ายพลังงานที่ได้ออกแบบทำโดยให้วงจรจ่ายพลังงานที่ออกแบบจ่ายพลังงานให้เครื่องทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นของบริษัท EMH Energie Messtechnik GmbH รุ่น PRS 1.3 ซึ่งมีสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบดังนี้

1. ช่วงค่าแรงดันที่วัดได้คือ 30 V_{rms} ถึง 480 V_{rms} ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 0.05 %-ของค่าที่วัดได้
2. ช่วงค่ากระแสที่วัดได้คือ 1 mA_{rms} ถึง 120 A_{rms} ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 0.05 % ของค่าที่วัดได้
3. ช่วงค่าของเฟสที่วัดได้คือ 0 –360 องศา ความผิดพลาดในการวัดไม่เกิน 0.05 % ของค่าเต็มพิกัด (คิดเป็น 0.18 องศา)
4. ความผิดพลาดในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 0.05 %

การทดสอบสมบัติของวงจรที่ออกแบบจะทำโดยต่อวงจรดังรูป



รูปที่ 5.2 การต่อวงจรเพื่อทดสอบวงจรจ่ายพลังงานที่ออกแบบ

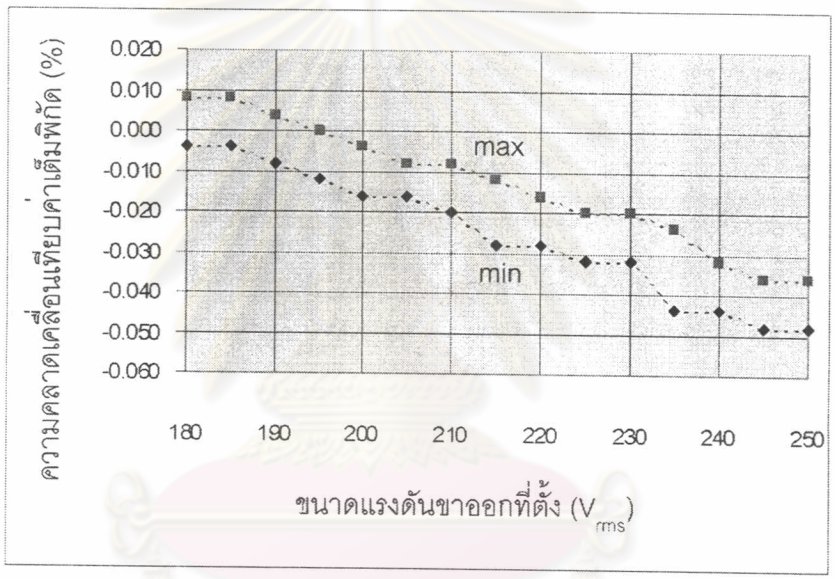
การทดสอบนั้นจะทำในหัวข้อต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดเป็นดังนี้

5.2.1 <u>ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณแรงดัน</u>

การทดสอบทำโดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 ตั้งค่าแรงดันค่าต่าง ๆ ที่ต้องการทดสอบที่วงจรจ่ายพลังงานที่ออกแบบและให้เครื่อง PRS 1.3 วัดค่าแรงดันที่ได้ จากนั้นคำนวณเป็นความผิดพลาดในการสร้างสัญญาณแรงดันเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าเต็มพิกัด (Voltage error) ตามสมการดังนี้

$$\text{Voltage error}(\%) = \frac{\text{Measured value} - \text{Set value}}{\text{Full scale value}} * 100 \quad \text{.....สมการที่ 5.1}$$

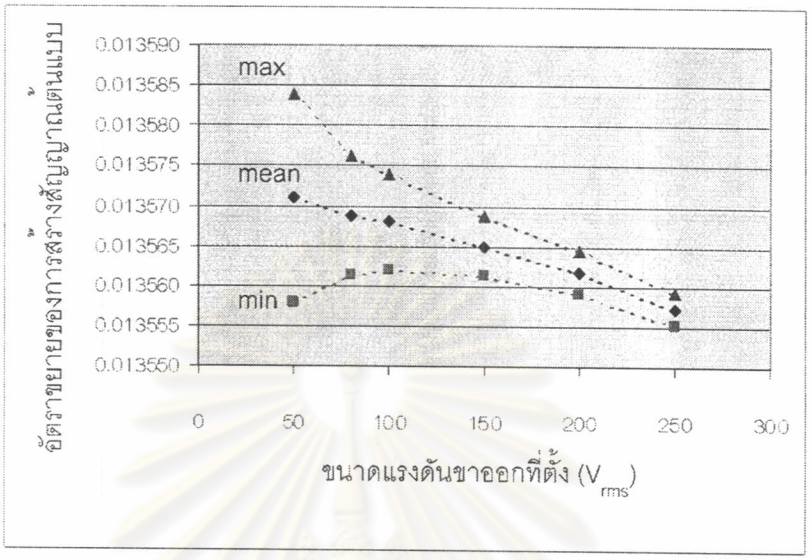
จากสมการ Measured value คือ ค่าแรงดันที่วัดได้จากเครื่อง PRS 1.3 Set value คือค่าที่ตั้งจากวงจรจ่ายพลังงาน Full scale value คือค่าเต็มพิกัดของขนาดสัญญาณแรงดันที่สร้างได้ซึ่งในที่นี้มีค่าเป็น 250 V_{rms} โดยการวัดจะทำในช่วงค่าแรงดันออกตั้งแต่ 180 – 250 V_{rms} (ไม่จ่ายกระแส) เมื่อวงจรไม่จ่ายโหลด (ไม่ถือว่าวงจรวัดเป็นโหลด) ได้ผลเป็นดังนี้



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างสัญญาณแรงดันออก

จากกราฟ ตำแหน่งที่เป็นจุดคือจุดที่ทำการวัดค่า ส่วนที่เป็นเส้นประคือการลากเส้นให้เห็นแนวโน้มของกราฟ โดยเนื่องจากสัญญาณออกของวงจรจะมีขนาดเปลี่ยนไปมาอย่างช้า ๆ ในช่วงค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงแสดงค่าสูงสุดของการเปลี่ยนค่าเป็นดังกราฟเส้นบน และค่าต่ำสุดของการเปลี่ยนค่าเป็นดังกราฟเส้นล่าง ซึ่งจะเห็นว่าวงจรมีความแม่นยำในการสร้างสัญญาณแรงดันออกที่ดี โดยการเปลี่ยนค่าของสัญญาณออกจะอยู่ในช่วงค่าแคบ ๆ เท่านั้น สำหรับสาเหตุของการแกว่งของสัญญาณออกนั้น น่าจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิของอุปกรณ์บางตัว เช่น ออปแอมป์กำลังสูง หรือตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง (จากคู่มือของอุปกรณ์ ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่ใช้กินกำลังงาน 625 mW ซึ่งถือว่ากินกำลังงานสูงและน่าจะเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนได้) รวมไปถึงเรื่องสัญญาณรบกวนที่อาจมีผลต่อการสร้างสัญญาณต้นแบบได้ และสำหรับการที่แรงดันขาออกตกเมื่อเพิ่มค่าที่ตั้งไว้ให้สูงขึ้น น่าจะเป็นผลมาจากตัวแปลงดิจิทัลเป็น

แอนะล็อก โดยเมื่อทดลองวัดค่าแรงดันออกจากวงจรสร้างสัญญาณต้นแบบ (แรงดันออกจากวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ) เทียบกับค่าแรงดันที่ตั้งให้วงจรสร้างสัญญาณ (ตั้งค่าตั้งแต่ 50 V_{rms}– 250 V_{rms}) วัดโดยใช้ Fluke 189 True RMS Multimeter ซึ่งมีความแม่นยำ ± 0.4 % ได้ผลเป็นดังนี้



รูปที่ 5.4 อัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบ

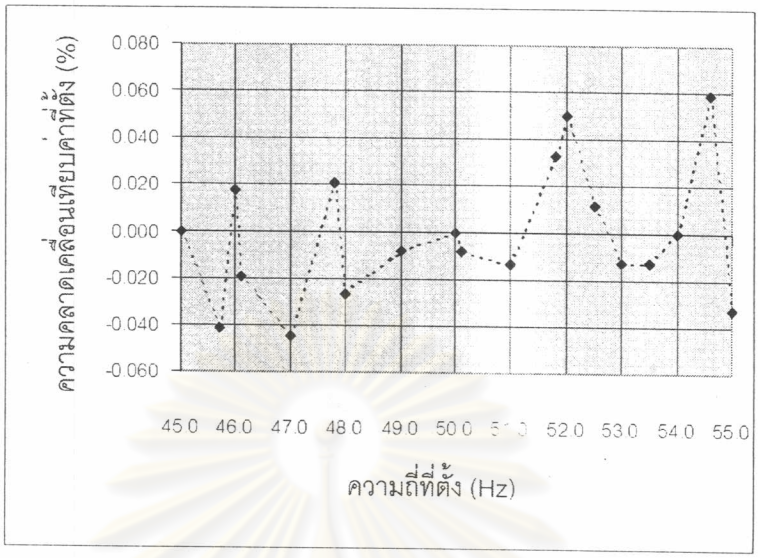
จากรูป อัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบคือ อัตราส่วนระหว่างขนาดสัญญาณออกของวงจรสร้างสัญญาณต้นแบบต่อขนาดแรงดันขาออกที่ตั้งไว้ กราฟเส้นบนและเส้นล่างเป็นค่าที่วัดได้จริงเนื่องจากสัญญาณออกมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปมา ส่วนกราฟเส้นกลางเป็นค่าเฉลี่ยของกราฟทั้งสองเส้น จะเห็นว่าที่ค่าแรงดันที่ตั้งสูง ๆ อัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบมีแนวโน้มที่จะลดลงซึ่งจะไปมีผลทำให้สัญญาณแรงดันออกของวงจรขยายตกลงไปด้วยดังกราฟในรูปที่ 5.3 สาเหตุของการตกของสัญญาณออกนี้น่าจะเนื่องมาจากสมบัติด้านความผิดพลาดของภาวะเชิงเส้น (Linearity error) ของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกซึ่งระบุไว้ในคู่มือว่ามีค่าไม่เกิน ± 4 LSB ซึ่งเมื่อคิดเทียบกับค่าเต็มพิกัด (32767 ขั้น) จะได้เป็น ± 0.012 % รวมไปถึงสมบัติด้านความผิดพลาดของภาวะเชิงเส้นของผลต่าง (Differential linearity error) ซึ่งมีค่าเป็น ± 4 LSB ด้วย

5.2.2 <u>ความแม่นยำในการตั้งค่าความถี่ของสัญญาณ</u>

การทดสอบทำโดยต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 ตั้งค่าแรงดันไว้คงที่ที่ 220 V_{rms} แล้วปรับค่าความถี่เป็นค่าต่าง ๆ ภายในช่วง 45 Hz ถึง 55 Hz แล้วคำนวณความคลาดเคลื่อนในการสร้างความถี่ (Frequency error) จากสมการ

$$\text{Frequency error}(\%) = \frac{\text{Measured value} - \text{Set value}}{\text{Set value}} * 100 \quad \text{.....สมการที่ 5.2}$$

ค่า Measured value คือค่าความถี่ที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ PRS 1.3 Set value คือ ค่าความถี่ที่ตั้ง ผลที่ได้เป็นดังนี้

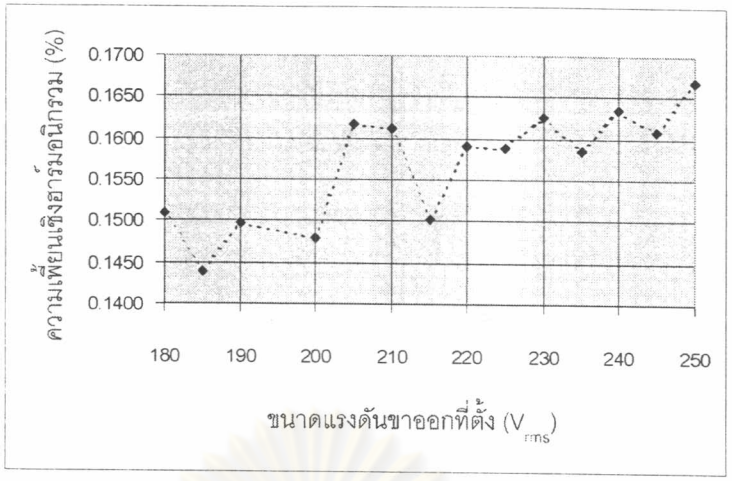


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการสร้างความถี่

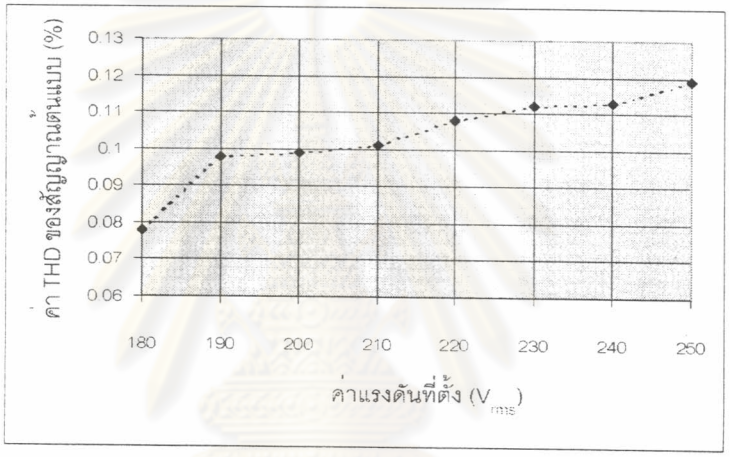
จากกราฟ จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนของการตั้งค่าความถี่ มีค่าไม่เกิน 0.1 % ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากการเลือกค่าที่ใช้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นว่าที่บางความถี่เราไม่สามารถเลือกค่าที่จะใส่ให้ตัวจับเวลานับเพื่อให้ได้ความถี่ที่พอดีได้เนื่องจากความถี่ที่เป็นฐานเวลาให้ตัวจับเวลานับไม่สูงพอ และสำหรับความถี่ที่ไม่ได้ระบุไว้ในตาราง ค่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นผลมาจากวิธีประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นที่นำมาใช้นั่นเอง

5.2.3 <u>ความเพี้ยนของสัญญาณแรงดันด้านออก</u>

การวัดความเพี้ยนของสัญญาณออกในที่นี้หมายถึง ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (Total harmonic distortion; THD) ซึ่งมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อต่อวงจรตามรูปที่ 5.2 แล้ววัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ค่าแรงดันค่าต่าง ๆ ได้ผลเป็นดังรูปที่ 5.6 และเมื่อวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบที่ค่าแรงดันที่ตั้งค่าต่าง ๆ โดยใช้ Dynamic signal analyzer รุ่น 35670A ของบริษัท Agilent [12] จะได้ผลดังรูปที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นว่าวงจรขยายแรงดันทำให้สัญญาณมีความเพี้ยนเพิ่มขึ้นจากสัญญาณต้นแบบเล็กน้อย โดยสัญญาณออกที่ได้มีค่าไม่เกิน 0.17 % ผ่านขอบเขตที่กำหนด ส่วนการที่ค่าสัญญาณมีความเพี้ยนมากขึ้นที่สัญญาณขนาดใหญ่ขึ้นนั้นน่าจะเป็นผลมาจากการสร้างสัญญาณต้นแบบจากตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกโดยที่ค่าสัญญาณออกใหญ่ขึ้น สัญญาณจากตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกจะมีการเปลี่ยนแรงดันมากขึ้นในการเปลี่ยนไปเป็นค่าต่อไปในตารางซึ่งจุดนี้น่าจะทำให้สัญญาณต้นแบบมีความเพี้ยนเพิ่มขึ้นได้



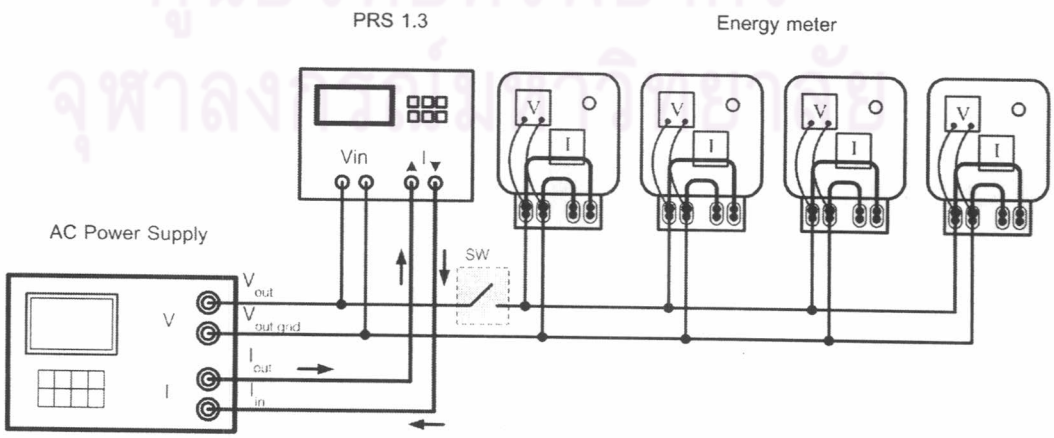
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของแรงดันออกที่ค่าขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 5.7 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบที่ค่าแรงดันที่ตั้งต่าง ๆ

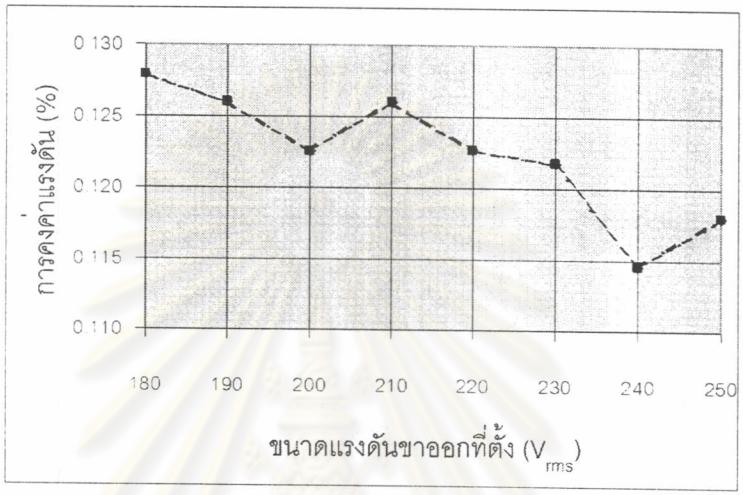
5.2.4 <u>การคงค่าแรงดัน</u>

ในการวัดการคงค่าแรงดันของวงจร จะใช้โหลดของวงจรเป็นมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าจริง ๆ จำนวน 4 ตัว โดยต่อวงจรตามรูป



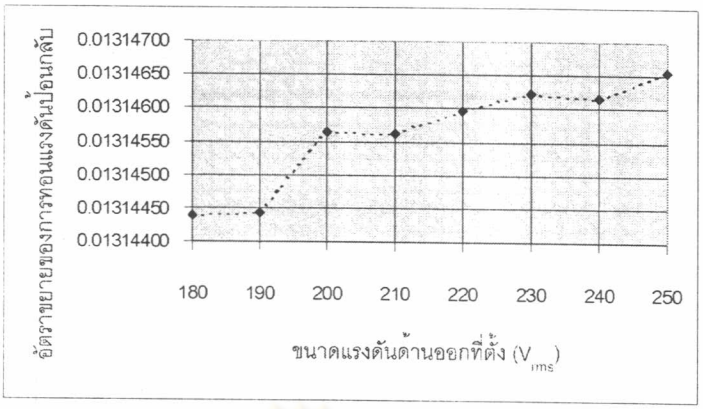
รูปที่ 5.8 การต่อวงจรเพื่อวัดการคงค่าแรงดันของวงจรจ่ายแรงดัน

จากนั้นวัดแรงดันที่ตกไปเมื่อสับสวิตช์ SW แล้วคำนวณค่าการคงค่าแรงดัน (Voltage regulation;VR) ตามสมการที่ 4.10 โดยให้กรณีที่จ่ายเครื่องทดสอบ PRS 1.3 เป็นกรณีไม่มีโหลด และกรณีที่สับสวิตช์เป็นกรณีมีโหลด (มิเตอร์ทั้ง 4 ตัวกินกระแสรวมกัน 26 mA ซึ่งคิดเป็น 5.72 W ที่ 220 V_{rms}) ซึ่งจะทำที่ค่าแรงดันต่าง ๆ กัน (วงจรสร้างกระแสไม่จ่ายกระแส) ได้ผลดังรูปที่ 5.9 โดยจากค่าที่ได้จะพบว่าวงจรมีการคงค่าแรงดันมากกว่า 0.1 % ซึ่งเกินค่าที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้ก็น่าจะเนื่องมาจากค่าความต้านทานสมมูลของวงจรหม้อแปลงมีค่ามากกว่าที่คำนวณแบบจำลองได้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการคงค่าแรงดันของสัญญาณ

เนื่องจากพารามิเตอร์ตัวนี้มีผลโดยตรงกับความต้านทานขาออก เพราะจะไปรวมกับความต้านทานขาออกของวงจรออปแอมป์เป็น r_o ในสมการที่ 4.12 ทำให้ความต้านทานขาออกของวงจรมีค่าใหญ่ขึ้นซึ่งมีผลให้การคงค่าแรงดันของวงจรแย่ลง สำหรับการแก้ไขสามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราขยายวิถีไปหน้าให้วงจรซึ่งจะมีผลทำให้ความต้านทานขาออกของวงจรลดลง ทั้งนี้ต้องระวังเรื่องเสถียรภาพของวงจรด้วย เพราะการปรับอัตราขยายวิถีไปหน้าเพิ่มนั้นมีแนวโน้มจะทำให้เสถียรภาพของวงจรแย่ลง ส่วนแนวโน้มของการคงค่าแรงดันที่ได้เมื่อเปลี่ยนขนาดแรงดันที่ตั้งนั้นน่าจะคงที่เพราะวงจรมีความต้านทานขาออกคงที่ แต่จากกราฟจะเห็นว่าการคงค่าแรงดันมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กลดลงน้อยเมื่อตั้งค่าแรงดันออกสูงขึ้น ทั้งนี้ก็น่าจะเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ (Temperature coefficient) ของตัวต้านทานที่ใช้แบ่งแรงดันเพื่อป้อนกลับทั้งสองตัวไม่เท่ากัน โดยจากการทดลองวัดค่าอัตราขยายป้อนกลับของวงจรขยายแรงดัน (อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกของวงจรทอนแรงดันป้อนกลับต่อแรงดันด้านออกของวงจรขยาย โดยที่แรงดันด้านออกวัดโดยเครื่อง PRS 1.3 ส่วนแรงดันออกจากวงจรทอนแรงดันวัดโดย Fluke 189 True RMS Multimeter) ได้ผลเป็นดังนี้



รูปที่ 5.10 อัตราขยายของการทอนแรงดันป้อนกลับของวงจรขยายแรงดันที่ค่าแรงดันออกต่าง ๆ

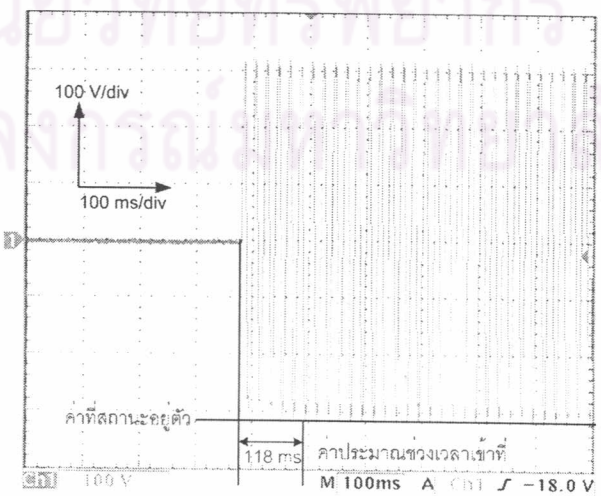
จากกราฟ เราจะพบว่าวงจรมีแนวโน้มที่จะป้อนกลับแรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (เพิ่มขึ้น 0.016 % เทียบกับค่าอัตราขยายที่ 180 V_{rms}) ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้จะไปมีผลต่อค่าความต้านทานขาออกซึ่งจากสมการที่ 4.12 มีค่าเป็น

$$R'_o = \frac{r_o a^2 Z}{Z(1+aA'k)+r_o}$$

จะเห็นว่าค่าอัตราขยายป้อนกลับนี้ก็คือค่า k ในสมการ เมื่อค่า k เพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้ค่าความต้านทานขาออกของวงจรมีค่าลดลงด้วย ซึ่งมีผลทำให้ได้การคงค่าแรงดันตกลงเล็กน้อยตามกราฟในรูปที่ 5.9

5.2.5 <u>ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก</u>

ช่วงเวลาเข้าที่ของวงจรสามารถวัดได้โดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดที่แรงดันขาออกของวงจรแล้วจับภาพตอนเริ่มสร้างสัญญาณ โดยตั้งค่าแรงดันที่ 220 V_{rms} จะได้สัญญาณออกมีลักษณะดังรูปที่ 5.11 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าสัญญาณแรงดันออกเข้าที่ถึงค่าที่สถานะอยู่ตัวในเวลาประมาณ 118 ms ซึ่งน้อยกว่า 0.2 วินาทีตามที่ได้กำหนดไว้



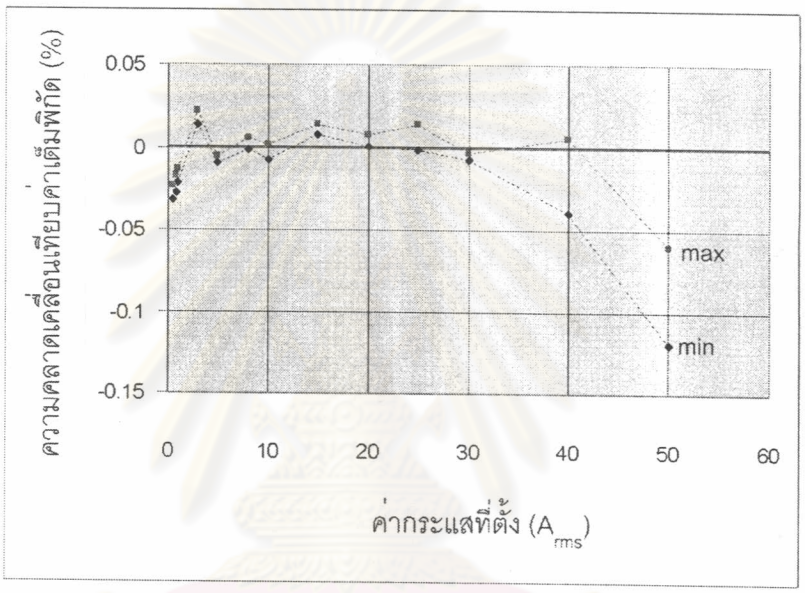
รูปที่ 5.11 ช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณแรงดันออก

5.2.6 <u>ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าสูง)</u>

ต่อวงจรตามรูปที่ 5.2 แล้วจ่ายสัญญาณกระแสที่ค่าต่าง ๆ จากนั้นอ่านค่าที่วัดได้มาคำนวณหาความผิดพลาดในการตั้งค่ากระแสเทียบกับค่าเต็มพิกัด (Current error) ตามสมการ

$$\text{Current error}(\%) = \frac{\text{Measure value} - \text{Set value}}{\text{Full scale value}} * 100 \quad \text{.....สมการที่ 5.3.}$$

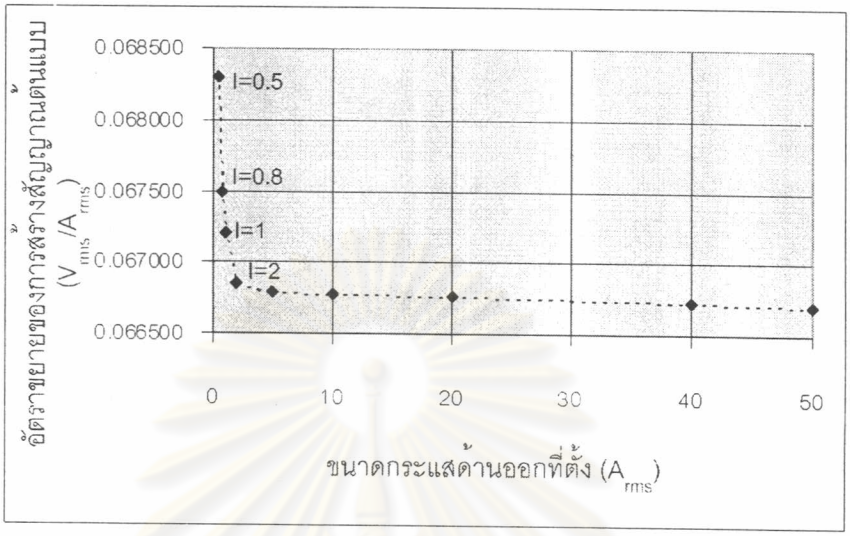
โดยจากสมการ Measured value คือค่ากระแสออกที่เครื่องวัดวัดได้ ส่วน Set value คือค่ากระแสที่ตั้งให้จ่าย Full scale value คือ ค่าเต็มพิกัดของขนาดกระแสที่สร้างได้ซึ่งมีค่าเป็น 50 A_{rms} ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการจ่ายกระแส

ผลการวัดที่แสดงในรูปที่ 5.12 นั้นจะเริ่มวัดค่าความคลาดเคลื่อนในการจ่ายกระแสของวงจรที่ค่ากระแสขาออกเป็น 0.5 A_{rms} ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากที่ค่ากระแสต่ำกว่านี้วงจรจะสร้างสัญญาณที่มีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมเกิน 2 % ซึ่งถือว่าใช้ในการทดสอบความแม่นยำไม่ได้ จึงไม่ได้นำมาพิจารณาด้วยในที่นี้ (รายละเอียดจะอยู่ในหัวข้อถัดไป) จากรูป จะเห็นว่ามีกราฟสองเส้น เนื่องจากค่าสัญญาณกระแสออกที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยอยู่ในช่วงค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงวัดผลมาแสดงทั้งค่าที่เปลี่ยนไปมากสุดและค่าที่เปลี่ยนไปน้อยสุดโดยแสดงเป็นกราฟเส้นบนและเส้นล่างตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าวงจรจะสามารถจ่ายกระแสได้อย่างแม่นยำเทียบกับค่าเต็มพิกัด ยกเว้นที่ค่ากระแสสูงสุดนั่นคือค่าประมาณ 50 A_{rms} โดยสำหรับที่ค่ากระแสสูง (มากกว่า 30 A_{rms}) จะพบว่าไม่สามารถให้วงจรคงการจ่ายกระแสอยู่เป็นเวลานานได้ เนื่องจากอุณหภูมิของอุปกรณ์สูงมากจนวงจรป้องกันภายในตัดการทำงานไป จากกราฟ จะเห็นว่าวงจรมีแนวโน้มที่จะจ่ายสัญญาณกระแสออกได้ลดลงที่ค่ากระแสสูงขึ้น ซึ่งน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากอุณหภูมิของออปแอมป์กำลังสูงที่มีค่าสูงเมื่อจ่ายกระแสค่ามาก ๆ ทำให้สมบัติของอุปกรณ์เปลี่ยนไปและอัตรา

ขยายของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกซึ่งเมื่อวัดอัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบ (มีค่าเท่ากับขนาดแรงดันด้านออกของวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำหน่วยเป็น V_{rms} ต่อขนาดกระแสที่ตั้งหน่วยเป็น A_{rms}) เทียบกับค่ากระแสที่ตั้ง ได้ผลเป็นดังนี้



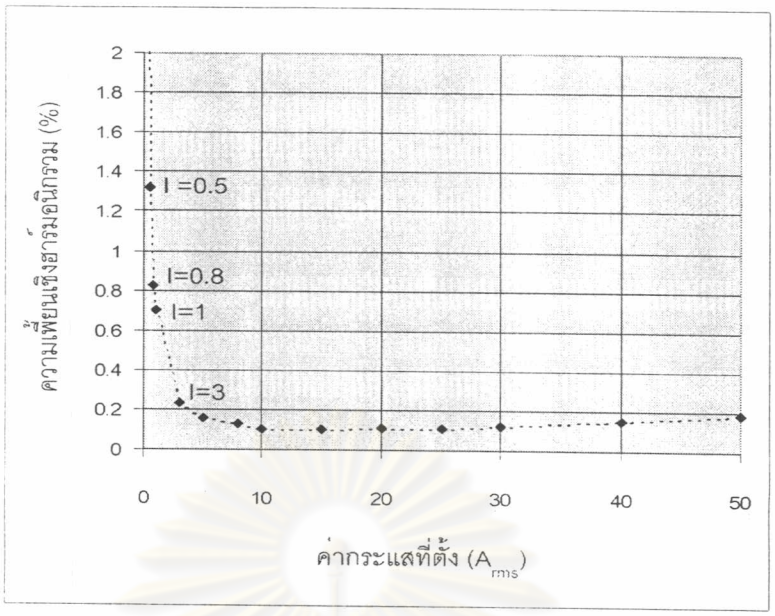
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบกระแส

จากกราฟจะเห็นว่าอัตราขยายของการสร้างสัญญาณต้นแบบมีค่าลดลงเมื่อสั่งให้วงจรสร้างสัญญาณขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสออกจากวงจรขยายต่ำกว่าค่าที่ตั้ง สาเหตุของปรากฏการณ์นี้น่าจะมาจากความผิดพลาดของภาวะเชิงเส้นของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกซึ่งระบุค่าไว้ในคู่มือเป็น ± 4 LSB ร่วมกับสมบัติด้านความผิดพลาดของภาวะเชิงเส้นของผลต่างซึ่งมีค่าเป็น ± 4 LSB เช่นเดียวกับในวงจรสร้างสัญญาณแรงดัน

ส่วนการที่ค่ากระแสต่ำกว่า 5 A_{rms} วงจรจะจ่ายกระแสคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ตั้งมากขึ้นนั้นเป็นผลมาจากที่ค่ากระแสต่ำนี้ความแม่นยำของหม้อแปลงกระแสที่วัดสัญญาณป้อนกลับจะมีค่าลดลง (จากคู่มือของอุปกรณ์ [11] ระบุว่า หม้อแปลงกระแสมีผิดพลาดปกติไม่เกิน 0.2 % ที่ค่ากระแสใกล้ค่าพิกัดซึ่งในที่นี้ใช้ค่ากระแสพิกัดเป็น 70 A_{rms} และที่ค่ากระแสต่ำกว่า 14 A_{rms} (20 % ของค่าพิกัด) ความผิดพลาดจะเพิ่มเป็น 0.35 % ส่วนที่ค่ากระแสต่ำกว่า 3.5 A_{rms} (5 % ของค่าพิกัด) ค่าความผิดพลาดในการวัดกระแสของหม้อแปลงกระแสจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 %) ร่วมกับความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงขับกระแสที่ใช้ในวิถีไปหน้าของวงจรด้วย (รายละเอียดกล่าวถึงในหัวข้อ 5.2.8)

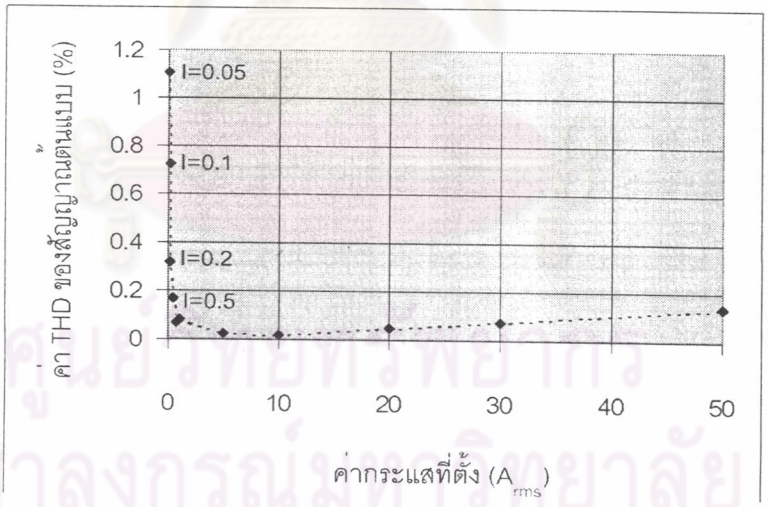
5.2.7 ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าสูง)

จากการต่อวงจรในการทดลองในหัวข้อ 5.2.6 เราจะสามารถวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณกระแสด้านออกของวงจรที่ค่ากระแสต่าง ๆ ได้ผลดังนี้



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ค่ากระแสต่าง ๆ

จากการทดลองจะพบว่าที่ค่ากระแสต่ำกว่า 0.5 A_{rms} นั้น สัญญาณออกจากวงจรจะมีความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมมากกว่า 2 % ซึ่งเมื่อทดลองวัดความเพี้ยนของสัญญาณต้นแบบที่ค่ากระแสออกที่ตั้งค่าต่าง ๆ ต้นแบบ (โดยใช้ Dynamic signal analyzer รุ่น 35670A ของบริษัท Agilent) จะได้ผลเป็นดังนี้



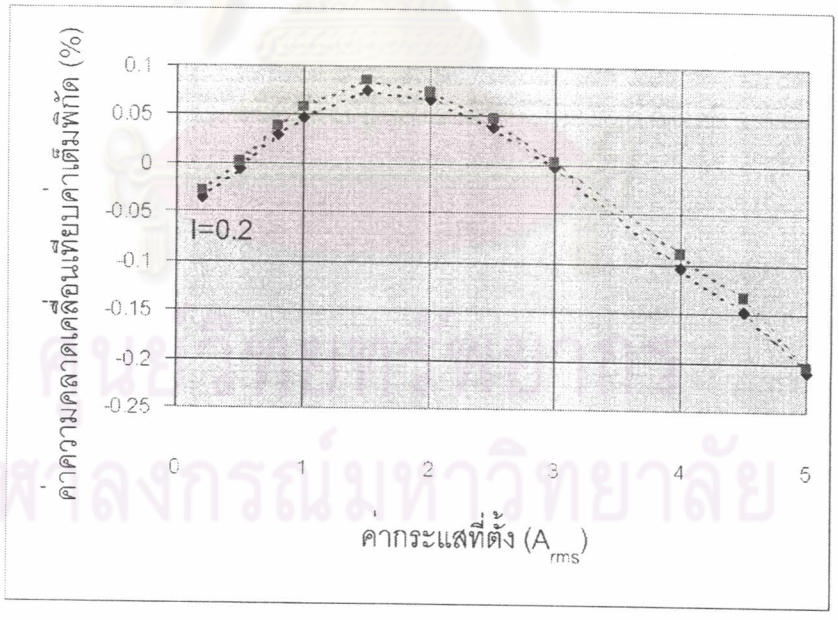
รูปที่ 5.15 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบกระแส

จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณต้นแบบของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสสามารถสร้างได้ต่ำถึง 0.05 A_{rms} โดยที่ยังมีความเพี้ยนไม่ถึง 2 % แสดงว่าวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสจะเป็นตัวทำให้เกิดความเพี้ยนที่สัญญาณออกด้วยโดยเฉพาะที่สัญญาณออกค่าต่ำ ๆ ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในวงจร เช่น ออปแอมป์ หรือ หม้อแปลงที่ทำหน้าที่ขับกระแส เป็นต้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ทำงานที่สัญญาณขนาดเล็กมาก นอกจากนี้จากรูปที่ 5.15 การที่

สัญญาณต้นแบบที่กระแสที่ต้องการขนาดต่ำ ๆ มีความเพี้ยนมากนั้นน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากการปัดเศษในการคำนวณค่าในตารางของไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ที่ค่ากระแสที่ต้องการ 0.5 A_{rms} จะพบว่าสัญญาณออกที่ต้องการสูงสุดในตารางเป็น 308.17 ซึ่งจะต้องปัดไป 0.055 % เพื่อให้ได้ค่า 308 ที่จะส่งให้ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ซึ่งเมื่อเทียบกับที่ 50 A_{rms} ซึ่งคำนวณได้ค่า 30817.196 จะพบว่าการปัดค่าลงไป 0.196 จะคิดเป็นเพียง $6.36*10^{-4}$ % เท่านั้น ดังนั้นการปัดเศษที่ต้องทำมากขึ้นที่ขนาดสัญญาณต้นแบบต่ำลงน่าจะทำให้เกิดความเพี้ยนที่สัญญาณต้นแบบมากขึ้น

5.2.8 <u>ความแม่นยำในการจ่ายสัญญาณกระแส (ช่วงค่าต่ำ)</u>

สำหรับในช่วงการจ่ายกระแสค่าต่ำ เราสามารถใช้วิธีการลดทอนแรงดันสัญญาณต้นแบบให้มีขนาดเล็กลงก่อนที่จะจ่ายให้วงจรขยายได้ วิธีนี้จะช่วยให้ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสออกที่ค่ากระแสออกต่ำ ๆ ดีขึ้นเนื่องจากสัญญาณต้นแบบมีรายละเอียดมากขึ้นถึงแม้จะมีขนาดเล็กก็ตาม ซึ่งจากการทดลองต่อวงจรลดทอนแรงดันลง 10 เท่า (ใช้ความต้านทานแบ่งแรงดัน) นำมาลดทอนสัญญาณแรงดันต้นแบบที่ออกจากวงจรกรอง แล้วจ่ายให้วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส จากนั้นวัดค่าที่ได้มาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าเต็มพิกัดตามสมการที่ 5.3 โดยเปลี่ยนค่ากระแสสูงสุดเป็น 5 A_{rms} ผลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความแม่นยำในการจ่ายกระแสเมื่อใช้การลดทอนสัญญาณเข้าของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส

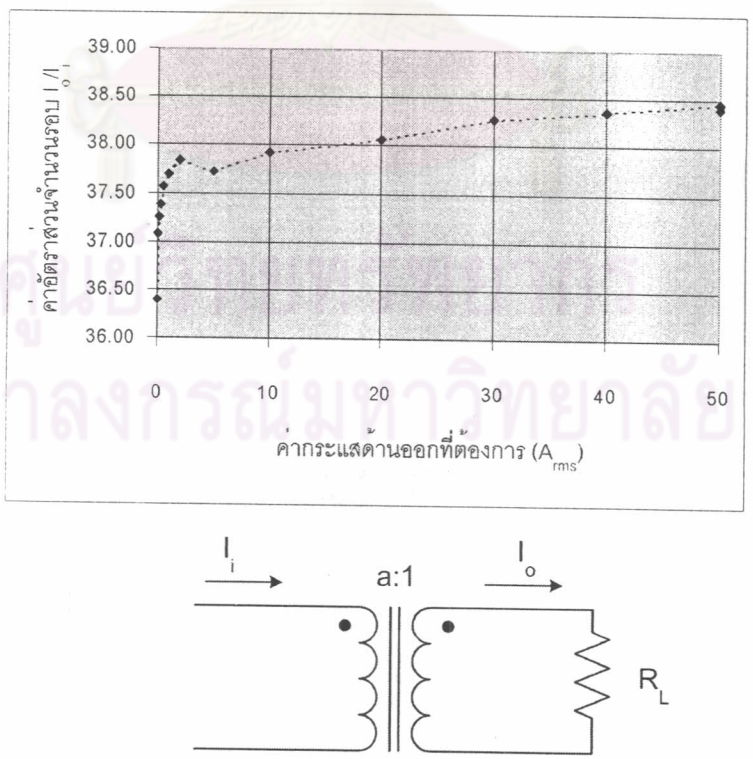
จากการทดลองจะพบว่าวิธีนี้ทำให้วงจรสามารถสร้างกระแสได้ต่ำถึง 0.2 A_{rms} โดยที่ยังมีความเพี้ยนไม่เกิน 2 % จากกราฟจะเห็นว่าช่วงที่สัญญาณเปลี่ยนค่าจะแคบลงแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนค่าน่าจะเป็นผลมาจากวงจรสร้างสัญญาณต้นแบบ ไม่ได้มาจากวงจรขยาย ส่วนขนาด

สัญญาณออกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นก่อนที่จะลดลงเมื่อปรับค่ากระแสมากขึ้น ส่วนหนึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราขยายของการแปลงค่าของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (ตามรูปที่ 5.13) ร่วมกับผลของหม้อแปลงกระแสป้อนกลับ และหม้อแปลงกระแสที่ทำหน้าที่ขยายกระแสในวิถีไปหน้าของวงจรซึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่ขนาดกระแสต่ำ ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ที่ค่ากระแสต่ำกว่าค่าพิกัดมาก ๆ หม้อแปลงกระแสจะมีความสามารถในการแปลงพลังงานเพื่อสร้างกระแสขาออกได้ลดลง เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของสมบัติภายในแกนนำฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้หม้อแปลงเสมือนมีอัตราส่วนจำนวนรอบลดลงดังผลจากการทดลองวัดค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงที่ทำหน้าที่ขยายกระแสในวิถีไปหน้าของวงจรดังรูปที่ 5.17 การวัดทำโดยตั้งค่ากระแสด้านเข้าเพื่อให้ได้กระแสด้านออกที่ต้องการ แล้ววัดค่ากระแสด้านเข้ามาหาอัตราส่วนของกระแสด้านออกต่อกระแสด้านเข้า จากกราฟจะเห็นว่าที่ค่ากระแสออกต่ำ ๆ หม้อแปลงจะเสมือนมีอัตราส่วนจำนวนรอบตกลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีผลต่อวงจรคือทำให้อัตราขยายในวิถีไปหน้าของวงจรลดลง ซึ่งจากสมการในรูปที่ 4.1 ซึ่งกล่าวว่า

$$\text{gain} = \frac{A}{1+\beta A}$$

โดยที่ gain หมายถึงอัตราขยายของระบบวงปิด A คืออัตราขยายในวิถีไปหน้า และ β คืออัตราขยายป้อนกลับ เนื่องจาก A ของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสมีค่าโดยประมาณเท่ากับผลคูณของอัตราขยายของวงจรออปแอมป์หมายเลข 1 (ในรูปที่ 4.18) กับอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง (a) ดังนั้นที่ค่ากระแสออกต่ำ ๆ ค่า a จะต่ำลง ทำให้อัตราขยายของวงจร (gain) ต่ำลง

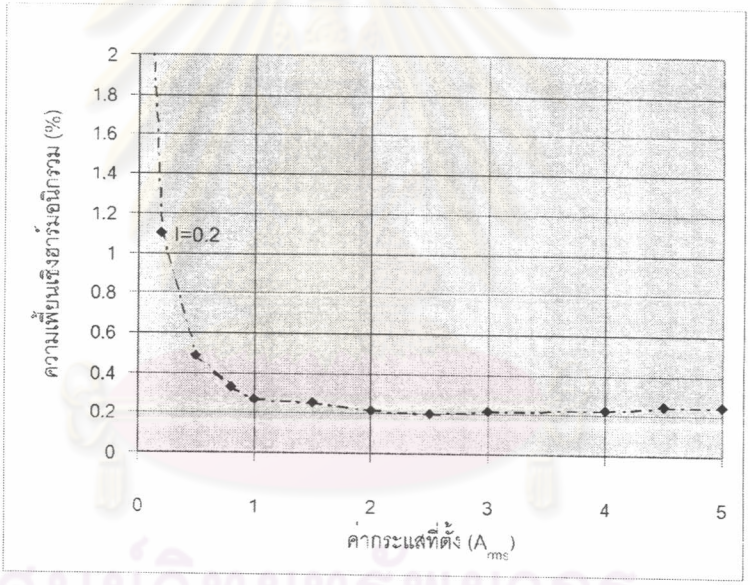


รูปที่ 5.17 วงจรและผลการวัดค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง

ด้วย และที่กระแสด้านออกเพิ่มขึ้น ค่า a จะเพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายของวงจรเพิ่มขึ้น ผลที่ได้เป็นดังส่วนแรกของกราฟในรูปที่ 5.16 หลังจากนั้นค่า a จะสูงพอทำให้ค่า βA มีค่ามากกว่า 1 มากซึ่งสามารถประมาณอัตราขยายเป็น $1/\beta$ ได้ อัตราขยายที่จุดหลังจากนี้น่าจะมีแนวโน้มคงที่ แต่เนื่องจากที่กระแสช่วงนี้หม้อแปลงกระแสสำหรับป้อนกลับจะยังมีความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกันนี้อยู่ โดยเราทราบว่าอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงกระแสป้อนกลับจะแปรผันตรงกับอัตราขยายป้อนกลับ β ดังนั้นในช่วงนี้ค่า β จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสต้องการวัด ผลที่ได้จากสมการด้านบนคือค่าอัตราขยายของวงจร (gain) ตกลงซึ่งจะมีผลร่วมกับอัตราขยายของการแปลงค่าของตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเป็นดังกราฟในช่วงที่อัตราขยายของวงจรลดลง

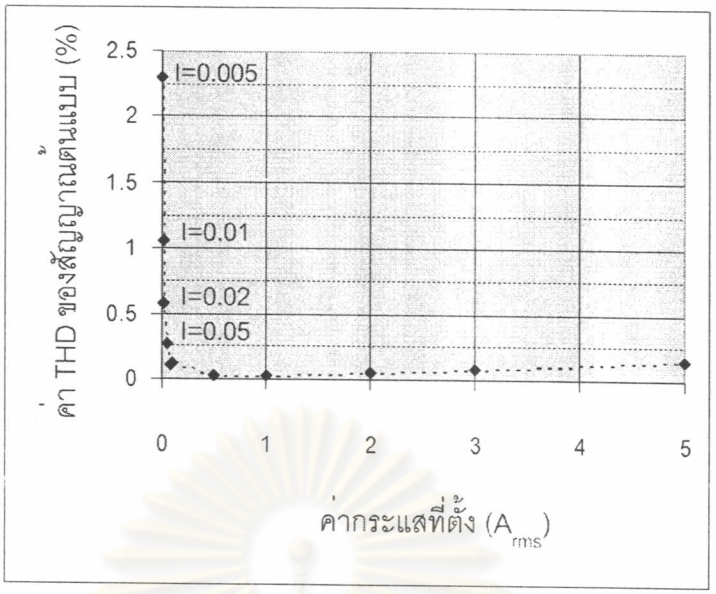
5.2.9 <u>ความเพี้ยนของสัญญาณกระแสด้านออก (ช่วงค่าต่ำ)</u>

จากวงจรในหัวข้อ 5.2.8 เราสามารถวัดค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ค่ากระแสออกต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมที่ค่ากระแสต่าง ๆ สำหรับวงจรจ่ายกระแสช่วงค่าต่ำ

จากกราฟจะเห็นว่าที่ค่ากระแสต่ำกว่า 0.2 A_{rms} ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกของสัญญาณจะสูงเกิน 2 % ซึ่งเมื่อเทียบกับความเพี้ยนของสัญญาณต้นแบบดังรูปที่ 5.19 จะพบว่าวงจรควรจะสร้างสัญญาณได้ถึง 0.01 A_{rms} แต่เนื่องจากวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสจะทำให้เกิดความเพี้ยนให้กับสัญญาณเพิ่มโดยเฉพาะที่สัญญาณขนาดต่ำ ๆ จึงทำให้วงจรสามารถสร้างสัญญาณกระแสออกได้เพียง 0.2 A_{rms} เท่านั้น



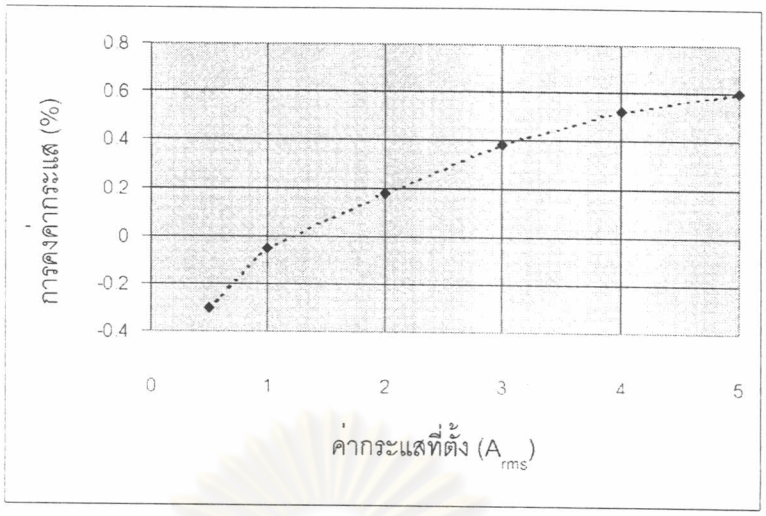
รูปที่ 5.19 ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของสัญญาณต้นแบบของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสในช่วงค่าต่ำ

5.2.10 <u>การคงค่ากระแสด้านออก</u>

การวัดการคงค่ากระแสด้านออกจะวัดโดยใช้วงจรจ่ายกระแสช่วงค่าสูง จะวัดที่ 2 กรณีเทียบกัน คือ กรณีโหลดค่าต่ำ และ กรณีโหลดค่าสูง โดยโหลดในที่นี้จะหมายถึงความต้านทานของสายไฟที่ใช้เป็นตัวนำกระแส (ซึ่งขึ้นกับขนาดและความยาวของสายไฟ) จากการวัดค่าความต้านทานจะได้ลักษณะของโหลดทั้งสองกรณีเป็นดังนี้

5. โหลดค่าต่ำ เป็นสายไฟขนาดใหญ่สำหรับทดสอบมิเตอร์ที่ค่ากระแสสูง โหลดชนิดนี้สามารถหาค่าความต้านทาน (โดยการจ่ายกระแส แล้ววัดค่าแรงดัน) ได้เป็น 6.04 mΩ ที่โหลดค่านี้ วงจรสามารถจ่ายกระแสได้เต็มช่วง 0-50 A_{rms}
6. โหลดค่าสูง เป็นสายไฟขนาดเล็กสำหรับทดสอบมิเตอร์ที่ค่ากระแสต่ำ สามารถหาความต้านทานได้เป็น 42.9 mΩ สำหรับที่โหลดค่านี้ วงจรที่ออกแบบจะสามารถจ่ายกระแสได้ในช่วง 0-11 A_{rms} เท่านั้นเนื่องจากช่วงค่าแรงดันที่ออปแอมป์ขับกระแสจ่ายได้มีค่าจำกัด

เมื่อทำการจ่ายกระแสโดยตั้งค่าที่ค่าเดียวกันจะวัดกระแสด้านออกของโหลดทั้งสองกรณีได้ และนำมาคำนวณการคงค่ากระแสตามสมการ 4.23 โดยให้ I_{nl} เป็นกระแสกรณีโหลดค่าต่ำ และ I_{fl} เป็นกระแสกรณีโหลดค่าสูง ผลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการคงค่ากระแสของวงจรจ่ายกระแส

จากกราฟ จะเห็นว่าการคงค่ากระแสของวงจรเมื่อโหลดเปลี่ยนจาก 6.04 mΩ ไปเป็น 42.9 mΩ มีค่าไม่เกิน 0.8 % ที่ค่ากระแสเพียง 5 A_{rms} ซึ่งจะเห็นว่าวงจรมีการคงค่ากระแสที่ไม่ดี ทั้งนี้เนื่องจากโหลดที่นำมาเป็นกรณีโหลดค่าสูงนั้นมีความต้านทานเกินค่าที่ออกแบบไว้ทำให้วงจรมีการคงค่าแรงดันสูง โดยเมื่อนำค่าโหลดทั้งสองค่านี้ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Orcad Pspice พบว่า วงจรมีการคงค่ากระแสเป็น 0.4233 % สำหรับแนวโน้มในการคงค่ากระแสนั้นควรจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่ากระแสที่ตั้งเนื่องจากค่าความต้านทานขาออกของวงจรมีค่าคงที่ แต่ผลการทดลองที่ได้พบว่าวงจรมีการคงค่ากระแสแย่ลงเมื่อเพิ่มค่ากระแสที่ตั้ง สาเหตุน่าจะมาจากอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงขยายกระแสที่มีค่าลดลงเมื่อทำงานที่กระแสต่ำลง (รายละเอียดในหัวข้อ 5.2.8) โดยจากสมการของความต้านทานขาออกของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสคือ

$$R_o^{'} = \frac{Z(1+aA'k)}{a^2}$$

จากหัวข้อ 5.2.8 เราทราบว่าที่ค่ากระแสต่ำมาก ๆ ค่า a จะต่ำและเมื่อเพิ่มกระแสที่ทำงานขึ้นค่า a จะสูงขึ้นซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานขาออกมีค่าลดลง โดยจากสมการที่ 4.24 นั่นคือ

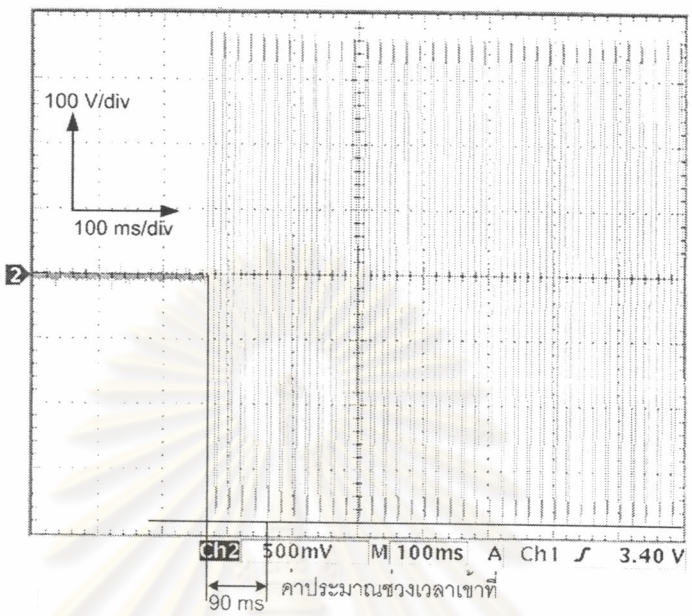
$$CR(\%) = \frac{R_L}{R_o} * 100$$

จะเห็นว่าเมื่อความต้านทานขาออก (R_o) ลดลง การคงค่าแรงดันของวงจรก็จะแย่ลง (มีค่ามากขึ้น) ดังเห็นผลในรูปที่ 5.20

5.2.11 <u>ช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออก</u>

การวัดช่วงเวลาเข้าที่ของกระแสด้านออกเมื่อสร้างสัญญาณจะต่อวงจรดังรูปที่ 5.2 แล้วจ่ายกระแสด้านออกขนาดพิกัดคือ 50 A_{rms} การวัดช่วงเวลาเข้าที่จะวัดแรงดันที่ตกคร่อม R_{cs} .ในรูปที่ 4.32 เนื่องจากค่าแรงดันนี้สามารถประมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสขาออกได้ดังที่ได้กล่าว

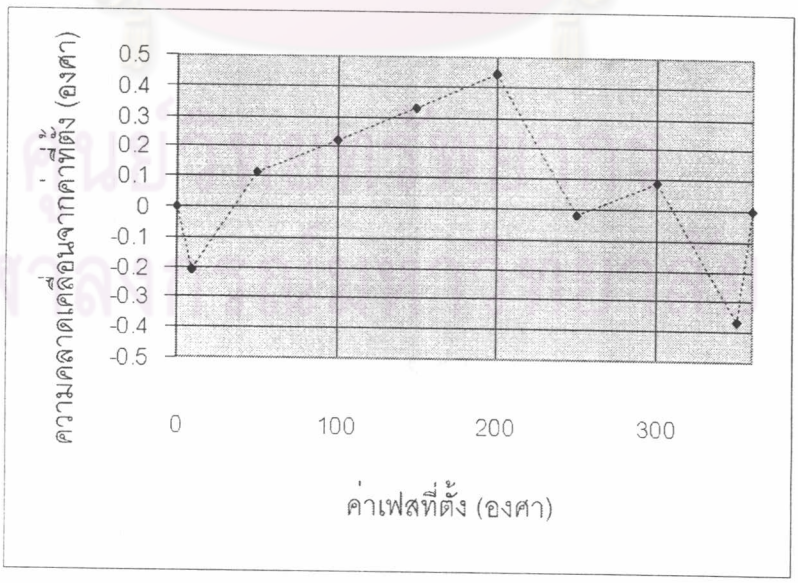
มาแล้วในบทที่ผ่านมา ผลการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นดังรูปที่ 5.21 โดยจากภาพจะเห็นว่าสัญญาณมีช่วงเวลาเข้าที่ถึงค่าที่สถานะอยู่ตัวเป็นเวลาประมาณ 90 ms



รูปที่ 5.21 ภาพแสดงช่วงเวลาเข้าที่ของสัญญาณกระแสด้านออก

5.2.12 <u>ความต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสด้านออก</u>

ต่อวงจรตามรูปที่ 5.2 แล้วสั่งให้วงจรที่ออกแบบสร้างสัญญาณแรงดันที่ขนาด 220 V_{rms} และกระแสที่ขนาด 10 A_{rms} แล้วปรับให้สร้างความต่างเฟสต่าง ๆ กันในช่วง 0 –360 องศา จากนั้นวัดผลที่ได้เทียบกับค่าที่ตั้ง



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความคลาดเคลื่อนของการตั้งค่าความต่างเฟสของสัญญาณออก

ค่าที่แสดงในกราฟเป็นค่าที่ชดเชยเฟสของวงจรแล้ว ซึ่งในโปรแกรมได้ชดเชยโดยนำค่าเฟสที่ผู้ใช้งานโปรแกรมเข้ามาบวก 3 องศาก่อนที่จะให้วงจรสร้างสัญญาณ ทั้งนี้เนื่องมาจากการวัดผลโดยได้ทดลองจ่ายแรงดันและกระแสโดยตั้งค่าความต่างเฟสให้เป็นศูนย์ ปรากฏว่าสัญญาณกระแสออกมีเฟสนำสัญญาณแรงดันอยู่ 3 องศา ดังนั้นจึงทำการชดเชยดังกล่าว (วงจรรับค่าเฟสของสัญญาณเข้าเป็นมุมเฟสที่สัญญาณแรงดันออกนำสัญญาณกระแสออก) โดยสำหรับการที่เฟสของสัญญาณกระแสออกนำสัญญาณแรงดันออกดังกล่าวนั้น มีสาเหตุมาจากการที่วงจรกระแสได้ถูกออกแบบโดยละเลยข้อกำหนดเรื่องเฟสไป ดังนั้นจากผลการจำลองการทำงานท้ายหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 จะได้ว่าสัญญาณกระแสออกมีเฟสนำสัญญาณแรงดันต้นแบบอยู่ 1.8104 องศา (ที่ 50 Hz) และสัญญาณแรงดันออกมีเฟสตามสัญญาณแรงดันต้นแบบของแรงดันอยู่ 0.1048 องศา (ที่ 50 Hz) จะเห็นว่าสัญญาณแรงดันออกจะมีเฟสตามหลังกระแสออกอยู่ 1.9152 องศา ซึ่งค่านี้ก็เป็นเพียงค่าที่ทำการจำลองการทำงานเท่านั้น ค่าจริงอาจคลาดเคลื่อนไปได้ นอกจากนี้ สาเหตุอีกส่วนหนึ่งของความต่างเฟสที่พบน่าจะมาจากวงจรอีกส่วนคือวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำที่ใช้ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วว่าอาจมีการคลาดเคลื่อนของเฟสระหว่างสัญญาณต้นแบบได้ถ้าวงจรมีลักษณะไม่เหมือนกันทุกประการ จากกราฟ จะเห็นว่าความต่างเฟสของสัญญาณออกที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน ± 0.5 จากค่าที่ตั้ง

5.3 สรุป

แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟสลับสำหรับทดสอบความแม่นยำของมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้การสร้างสัญญาณต้นแบบและการขยายสัญญาณ สัญญาณต้นแบบถูกสร้างโดยไมโครคอนโทรลเลอร์, ตัวแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกขนาด 16 บิต และวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ โดยจะสร้างสัญญาณต้นแบบ 2 สัญญาณสำหรับสัญญาณออกแรงดันและสัญญาณออกกระแส ส่วนวงจรขยายจะถูกแยกเป็นวงจรขยายแรงดันและวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส วงจรขยายนี้ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างแบบป้อนกลับเพื่อคงคุณภาพของสัญญาณเข้าและขยายขนาดของสัญญาณ ในการทดลองต่อวงจรจริงพบว่ามีผลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรที่ได้ละเลยไปหรือมองข้ามไปทำให้วงจรที่ได้ขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงจะเป็นต้องมีการชดเชยเสถียรภาพทั้งวงจรขยายแรงดันและวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสามารถปรับเทียบที่ส่วนสร้างสัญญาณต้นแบบให้สัญญาณออกมีความแม่นยำได้ แต่ยังมีสมบัติบางอย่างที่ยังไม่น่าพอใจเช่นการคงค่าแรงดันของวงจรแรงดัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากสมบัติภายในบางประการของอุปกรณ์ที่เราไม่สามารถกำหนดได้ เช่น ความต้านทานภายในขดลวดของหม้อแปลง หรือความต้านทานขาออกของออปแอมป์ เป็นต้น ส่วนการคงค่ากระแสของสัญญาณออกก็ยังมีค่าสูงเนื่องมาจากจุดทดสอบที่ใช้ยังขัดกับการออกแบบ นอกจากนี้วงจรที่ออกแบบยังมีข้อ

จำกัดในเรื่องการระบายความร้อนทำให้วงจรไม่สามารถนำไปใช้งานจริงในบางค่าสัญญาณออกได้ เช่น ที่ค่ากระแสออกสูง ๆ เป็นต้น

การพัฒนาแหล่งกำเนิดสัญญาณสำหรับทดสอบมิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า น่าจะช่วยกระตุ้นและเป็นแนวทางให้เกิดการตื่นตัวและเห็นความเป็นไปได้ในการพัฒนาอุปกรณ์นี้ขึ้นมาใช้เองสำหรับในกลุ่มผู้ผลิตมิเตอร์ในประเทศ ทั้งนี้ก็เพื่อลดต้นทุนในการนำเข้าอุปกรณ์ซึ่งมีราคาสูงจากต่างประเทศ

5.4 ข้อเสนอแนะ

7. ติดตั้งวงจรป้องกันสำหรับวงจรจ่ายแรงดันและกระแสทั้งนี้เนื่องจากวงจรนี้ต้องการต่อโหลดโดยผู้ใช้ ซึ่งอาจมีความผิดพลาด เช่น ต่อสายสัญญาณออกแรงดันลัดวงจร ไม่ได้ต่อสายกระแสครบวง หรือต่อโหลดที่มีความต้านทานเกินกำหนดทำให้ไม่สามารถจ่ายกระแสบางค่าได้ เป็นต้น ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรชำรุดเสียหายด้วย
8. ควรจะมีโปรแกรมสื่อสารกับคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถดึงข้อมูลจากอุปกรณ์หรือสั่งงานอุปกรณ์โดยอัตโนมัติได้
9. พัฒนาให้วงจรมีสมบัติความกว้างแถบ (Bandwidth) กว้างเพื่อให้สามารถสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกได้
10. พัฒนาการระบายความร้อนให้ออปแอมป์หรือเลือกใช้ออปแอมป์ตัวอื่นที่เหมาะสมเพื่อให้วงจรสามารถใช้งานได้ในระบบจริงที่ทุกค่ากระแส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย