



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์

โดย นายรัฐพล ค่อยประเสริฐ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงษ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิทวัส ผ่องญาติ)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ธีรธรรม มุณชะกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.เชิดชัย ประภาณวัฒน์)

การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์

นายณัฐพล ค่อยประเสริฐ

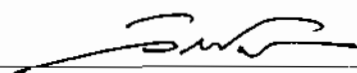
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายณัฐพล ค่อยประเสริฐ
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ ผ่องญาติ
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ เป็นการหาพารามิเตอร์ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ ของโหลดความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับวงจรสนามของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และวงจรอาร์เมเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงในขณะหยุดนิ่ง การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ใช้ตัวคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน จ่ายแรงดันไฟฟ้าขับเข้าสู่อะไหล่โหลด แล้วสุ่มค่า (Sampling) แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลมาประมวลผลร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโหลด ขณะถูกป้อนด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมเฟส โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่แบบจำลองต้องการ แล้วทำการแก้แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จะได้ค่าพารามิเตอร์ค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำตามต้องการ การคำนวณทั้งหมดทำโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ตัวเดียวกับที่ใช้ในการขับเคลื่อน ทำให้การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีนี้มีความสะดวกและพัฒนาไปสู่ระบบตั้งค่าตัวควบคุมอัตโนมัติ (Auto Tuning) หรือระบบควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Control) ได้ วงจรอาร์เมเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 กิโลวัตต์ ซึ่งจ่ายกำลังด้วยคอนเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบ 1 เฟส 2 พัลส์ เป็นตัวอย่างทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ตามวิธีที่นำเสนอ ผลการทดสอบเป็นไปตามทฤษฎี และได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีความน่าเชื่อถือกว่าวิธีหาค่าพารามิเตอร์จากผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น (วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 95 หน้า)

คำสำคัญ : การหาค่าพารามิเตอร์, ออนไลน์, ไมโครคอนโทรลเลอร์

..... 

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr. Nuttapol Koiprasert
Thesis Title : Microcontroller based Online Parameter Identification
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Dr. Witthawas Pongyart
Academic Year : 2006

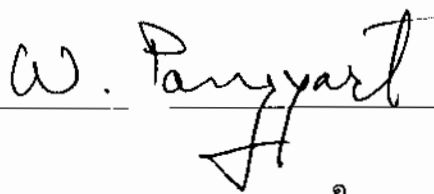
Abstract

Online parameter identification with microcontroller based is developed to identify resistance and inductance of load combining with resistance and inductance in series. This kind of load is similar to field circuit in electrical machines and armature circuit of DC machines which are standing still. This operating concept is to use the existing phase-control converter to inject voltage for a moment during this time voltage and current are captured to analyze by a microcontroller. Sampled voltage and current are sent for calculation with mathematic load model. The analyzing process is done by numerical method to identify the parameters.

By integrating the drive converter with a microcontroller, auto tuning or adaptive control can be achieved. This online parameter identification are tested with the armature circuit of 1kW DC machine which is fed by a single-phase 2-pulse converter. The experimental results agreed with concerning theory and taken parameters are more reliable than method of step response parameter identification.

(Total 95 pages)

Keywords : Parameter Identification, Online, Microcontroller



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์อรรถกรกริช ยิ่งวัฒนา และอาจารย์ ดร.วิทวัส ผ่องญาติ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่อง จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชีรพล เค.โซเกียรติวัฒน์ ที่ให้ความกรุณาแนะนำให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณประเสริฐ ควาลอย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง และอุปกรณ์ในการทำวิจัยและทดสอบ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และเพื่อนๆ ในห้องวิจัยระบบควบคุมและไฟฟ้ากำลัง ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู ให้โอกาสทางการศึกษาและสนับสนุนในทุกด้าน จนประสบความสำเร็จในการศึกษา

นัฐพล ก่อยประเสริฐ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ของผลการวิจัย	3
บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ และการประมาณคำตอบของแบบจำลอง	5
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไหลของคอนเวอเตอร์ ชนิดควบคุมเฟสเมื่อไหลเป็นความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ	5
2.2 เงื่อนไขการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไหลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์	11
2.3 การหารากของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	12
2.4 การหาลักษณะกราฟของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	13
2.5 การหาค่ารากของสมการด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบวางตัวผิดที่ (false-position method)	17
บทที่ 3 การหาค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าคำตอบของแบบจำลอง	21
3.1 การหาค่าความถี่อินพุตของคอนเวอเตอร์	22
3.2 การหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์	25
3.3 การหาค่าแรงดันอาร์เมเจอร์	27
3.4 การหาค่ามุมจุดชนวน	30
3.5 การหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์	36
3.6 การหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่เวลา t	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองหาค่าตัวแปรอิสระที่จำเป็นสำหรับการแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
และการทดลองประมาณค่าพารามิเตอร์	41
4.1 การทดสอบ การหาค่าความถี่สัญญาณแรงดันต่ำ	41
4.2 การทดสอบ การหาค่าความถี่สัญญาณแรงดันสูง	44
4.3 การทดสอบ การหาค่าแรงดันประสิทธิภาพ	47
4.4 การทดสอบ การหาค่าแรงดันเฉลี่ย (Average Voltage)	51
4.5 การทดสอบ การหาค่ามุมจุดชนวน	55
4.6 การทดสอบ การหาค่ากระแสเฉลี่ย (Average Current)	66
4.7 การทดสอบ การหาค่ากระแสช่วงเวลาที่เวลา 9 มิลลิวินาทีหลังจุดชนวนไทรสเตอร์	
($i_{t=9\text{ ms}}$)	68
4.8 การทดสอบ การหาความเหนี่ยวนำจากการแก้แบบจำลองโดยอาศัย	
ไมโครคอนโทรลเลอร์	75
4.9 การทดสอบ การหาทดสอบระบบรวมในสถานะการใช้งานจริง	78
4.10 การทดสอบเทียบผลการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีออนไลน์โดยอาศัย	
ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น	85
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผล	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก	90
ประวัติผู้วิจัย	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4-1 ผลการทดสอบหาค่าความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันต่ำ	43
4-2 ผลการทดสอบหาค่าความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันสูง (ไม่จุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์ ขณะทดสอบ)	45
4-3 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันประสิทธิผล	50
4-4 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันเฉลี่ย	53
4-5 ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ามุมจุดชนวนที่ไม่โครคอนโทลเลอร์คำนวณได้ เทียบกับค่าที่สังเกตจากรูปคลื่น u_d	66
4-6 ผลการทดสอบหาค่ากระแสเฉลี่ย	68
4-7 ผลการทดสอบหาค่ากระแส i_{L-9ms}	75
4-8 ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการตามงานวิจัย และค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอื่น เมื่อคอนเวอเตอร์ที่ขับเร้าจุดชนวนที่ 90°	81
4-9 ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการตามงานวิจัย และค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอื่น เมื่อคอนเวอเตอร์ที่ขับเร้าจุดชนวนที่ 115°	82
4-10 ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง และ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการตามงานวิจัย และค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอื่น เมื่อคอนเวอเตอร์ที่ขับเร้าจุดชนวนที่ 140°	83
4-11 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวอย่างด้วยวิธีออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทลเลอร์ และวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น (ทั้งสองวิธีทดสอบที่กระแส 3 แอมแปร์)	85

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 คอนเวเตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบ 1 เฟส เต็มคลื่น เมื่อมีโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ	7
2-2 การบวกฟังก์ชันไซน์กับฟังก์ชันโคไซน์โดยอาศัยเวกเตอร์	8
2-3 การแยก $\sin\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d}\right)$ ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์บวกกับฟังก์ชันโคไซน์โดยใช้เวกเตอร์	8
2-4 รูปคลื่นจากการจำลองวงจรภาพที่ 2-1 (ก) ในโหมดกระแสโหลดต่อเนื่อง	11
2-5 บล็อกจำลองการทำงานของคอนเวเตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบ 2 พัลส์ ฟูลคอนโทรล ที่มีโหลดความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ	14
2-6 รูปคลื่นแรงดัน U_s และกระแส i_d จากการจำลอง	14
2-7 ลักษณะฟังก์ชันของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (2-30)	15
2-8 การเข้าสู่สภาวะจริง และการไม่เข้าสู่สภาวะจริง ของระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อใช้ค่าประมาณเริ่มต้นที่แตกต่างกัน	16
2-9 การประมาณค่ารากของสมการ $f(x) = 0$ ด้วยระเบียบวิธีการวางตัวผิที่	18
2-10 การเข้าสู่ค่ารากที่แท้จริง โดยการประมาณด้วยระเบียบวิธีวางตัวผิที่	19
3-1 ส่วนฮาร์ดแวร์ของการหาค่า L_d และ R_d แบบออนไลน์	21
3-2 ส่วนซอฟต์แวร์ของการหาค่า L_d และ R_d แบบออนไลน์	21
3-3 วงจรในส่วนของการหาค่าความถี่อินพุตของคอนเวเตอร์ (ภายในเส้นประ) และวงจรหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์	22
3-4 ฟังก์ชันโปรแกรมคำนวณค่าความถี่อินพุตของคอนเวเตอร์	24
3-5 การแกว่งของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์บริเวณที่สัญญาณแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์ผ่านศูนย์ และสัญญาณรบกวนที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์อาจมองเป็นขอบข่ายขึ้นของสัญญาณซิงโครไนซ์ของแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์	25
3-6 วงจรในส่วนของการหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์ (ภายในเส้นประ) และวงจรหาค่าความถี่อินพุตของคอนเวเตอร์	25
3-7 ฟังก์ชันโปรแกรมการคำนวณค่าแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์	27
3-8 ฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ (ภายในเส้นประ) และวงจรหาค่ามุมจุดชนวน	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-9 ผังงานโปรแกรมการคำนวณค่าแรงดันอาร์เมเจอร์	29
3-10 ฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่ามุมจุดชนวน (ภายในเส้นประ) และวงจรหาค่าแรงดันอาร์เมเจอร์	30
3-11 คอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟส 1 เฟส 2 พัลส์ เมื่อมีโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ	32
3-12 สัญญาณ u_s และ u_d ก่อนและหลังถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์	33
3-13 ผังงานโปรแกรมการหาค่ามุมจุดชนวน	34
3-14 ฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่ากระแส I_d และ $i_d(t)$	36
3-15 ผังงานโปรแกรมการคำนวณค่ากระแสอาร์เมเจอร์	37
3-16 ผังงานโปรแกรมหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่เวลา 9.3 มิลลิวินาที ($i_{d, t=9ms}$)	40
4-1 วงจรทดสอบการหาค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันต่ำ	42
4-2 วงจรทดสอบการหาค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันสูง	44
4-3 สัญญาณที่ขดขั้วขั้วของหม้อแปลง TR ₁ กับสัญญาณที่อินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อไม่จุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์	46
4-4 สัญญาณที่ขดขั้วขั้วของหม้อแปลง TR ₁ กับสัญญาณที่อินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อจุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์ที่มุม 90 องศา	46
4-5 วงจรทดสอบการหาค่าแรงดันประสิทธิผล	48
4-6 การต่อวงจรเพื่อปรับตั้งค่าอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์	49
4-7 สัญญาณที่อินพุตของวงจรแยกขั้ว และสัญญาณที่แอนะล็อกอินพุตทั้งสองของไมโครคอนโทรลเลอร์	51
4-8 วงจรทดสอบการหาค่าแรงดันเฉลี่ย	52
4-9 สัญญาณที่อินพุตของวงจรแยกขั้ว และสัญญาณที่แอนะล็อกอินพุตทั้งสองของไมโครคอนโทรลเลอร์	55
4-10 วงจรทดสอบการหาค่ามุมจุดชนวน	56
4-11 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 90° ($\alpha' = 90^\circ$ ทดลองครั้งที่ 1)	57
4-12 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 90° ($\alpha' = 90^\circ$ ทดลองครั้งที่ 2)	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-13 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 90° ($\alpha' = 90^\circ$ ทดลองครั้งที่ 3)	59
4-14 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 115° ($\alpha' = 115^\circ$ ทดลองครั้งที่ 1)	60
4-15 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 115° ($\alpha' = 115^\circ$ ทดลองครั้งที่ 2)	61
4-16 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 115° ($\alpha' = 115^\circ$ ทดลองครั้งที่ 3)	62
4-17 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 140° ($\alpha' = 140^\circ$ ทดลองครั้งที่ 1)	63
4-18 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 140° ($\alpha' = 140^\circ$ ทดลองครั้งที่ 2)	64
4-19 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 140° ($\alpha' = 140^\circ$ ทดลองครั้งที่ 3)	65
4-20 วงจรทดสอบการหาค่ากระแสเฉลี่ย	67
4-21 วงจรทดสอบการหาค่ากระแสชั่วขณะ	69
4-22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 1	70
4-23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 2	71
4-24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 3	72
4-25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 4	73
4-26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 5	74
4-27 แบบจำลองระบบตัวอย่างซึ่งสร้างด้วย Simulink	76
4-28 รูปคลื่นแรงดัน u_a และรูปคลื่นกระแส i_a จากการจำลองระบบตัวอย่างด้วย Simulink	77
4-29 วงจรทดสอบระบบการหาค่าพารามิเตอร์ภายใต้สภาวะเดียวกับการใช้งานจริง	79
4-30 ตัวอย่างการหาค่า $i_{d1=9ms}$ และ α' จากรูปคลื่น i_a และรูปคลื่น u_a	80
4-31 การแกว่งของแรงดัน u_a ช่วงที่ไทรสเตอร์หยุดนำกระแส	84
ก-1 วงจรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเลื่อนเฟส และรูปคลื่นกระแสและแรงดัน	93

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คุณสมบัติที่บ่งด้วยรูปแบบของตัวสัญลักษณ์

i_d, u_d, u_s เป็นต้น ปริมาณชั่วขณะ (Instantaneous Value)

I_d, U_d, U_s เป็นต้น ปริมาณเฉลี่ย (Average Value) หรือปริมาณประสิทธิผล (RMS-Values)

คุณสมบัติที่บ่งด้วยตัวเลข

$U_{S1}, U_{S2}, CH0, CH1, ana0, ana1$ เป็นต้น หมายเลขแสดงชื่อเฉพาะ

$x_{r1}, x_{r2}, x_{r(n-1)}, x_{r(n)}, \phi_0, \phi_1$ เป็นต้น หมายเลขแสดงลำดับการเกิดขึ้นก่อน-หลัง ของปริมาณ

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
A	ค่าคงที่	
ADC	ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	
AV	ค่าเฉลี่ย (Average Value)	
A/D	การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	
B	ค่าคงที่	
CH	ช่องสัญญาณ	
Eb	แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back e.m.f.)	โวลต์ (V)
i, I	กระแสไฟฟ้า	แอมแปร์ (A)
K	ค่าคงที่	
L	ความเหนี่ยวนำ	เฮนรี (H)
MS	ค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean Square)	
N	จำนวนรอบ	
P	จำนวนพัลส์	
R	ความต้านทาน	โอห์ม (Ω)
t	เวลา	วินาที (s, sec.)
T	คาบเวลา	วินาที (s, sec.)
u, U	แรงดันไฟฟ้า	โวลต์ (V)
x	ตัวแปรควบคุม	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และคำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
Z	อิมพีแดนซ์	โอห์ม (Ω)
α	มุมจุดชนวน (Firing Angle)	ดีกรี ($^{\circ}$, deg.) หรือเรเดียน (rad.)
β	มุมระหว่างตัวแปรใดๆ	ดีกรี ($^{\circ}$, deg.) หรือเรเดียน (rad.)
δ	มุมระหว่างตัวแปรใดๆ	ดีกรี ($^{\circ}$, deg.) หรือเรเดียน (rad.)
ε	ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error)	
ϕ	มุมระหว่างแรงดันกับกระแส	ดีกรี ($^{\circ}$, deg.) หรือเรเดียน (rad.)
θ	มุมระหว่างตัวแปรใดๆ	ดีกรี ($^{\circ}$, deg.) หรือเรเดียน (rad.)
τ	ค่าคงตัวเวลา (Time Constant)	วินาที (s, sec.)
ω	ความเร็วเชิงมุม	เรเดียน/วินาที

สัญลักษณ์ที่ถูกลบด้วยตัวห้อยหรือตัวยก

AV_n	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลดิบค่าลบ
AV_p	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลดิบค่าบวก
i_d, I_d	กระแสทางฝั่งกระแสตรงของคอนเวอเตอร์
I_0	ค่ากระแสไหลต่ำสุด เมื่อคอนเวอเตอร์ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
L_d	โหลดความเหนี่ยวนำทางฝั่งกระแสตรงของคอนเวอเตอร์
MS_n	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อมูลดิบค่าลบ
MS_p	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของข้อมูลดิบค่าบวก
N_{s1}	จำนวนรอบของชุดพหุคูณมิติที่ 1
N_{s2}	จำนวนรอบของชุดพหุคูณมิติที่ 2
R_d	โหลดความต้านทานทางฝั่งกระแสตรงของคอนเวอเตอร์
R_s	ความต้านทานอนุกรมภายในของแหล่งจ่ายกำลัง
u_p, U_p	แรงดันเฟส
U_{pp}	ค่ายอดของแรงดันเฟส
u_s, U_s	แรงดันแหล่งจ่าย ของคอนเวอเตอร์
U_{sp}	ค่ายอดของแรงดันแหล่งจ่ายของคอนเวอเตอร์
u_d, U_d	แรงดันทางฝั่งกระแสตรงของคอนเวอเตอร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

u_{Ld}, U_{Ld}	แรงดันตกคร่อม L_d
u_{Rd}, U_{Rd}	แรงดันตกคร่อม R_d
x_i	ค่าขอบล่างของการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบกำหนดขอบ
x_r	ค่าผลลัพธ์จากการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
x_t	ค่าที่แท้จริงของราก x
x_u	ค่าขอบบนของการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบกำหนดขอบ
Z_d	อิมพีแดนซ์ของโหลดทางฝั่งกระแสตรงของคอนเวอเตอร์
α'	มุมจุดชนวน ซึ่งเริ่มนับจากตำแหน่งศูนย์ (Zero Transition Point)
α'_c	มุมหยุดนำกระแส ซึ่งเริ่มนับจากตำแหน่งศูนย์
ε_a	ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยประมาณ
ε_s	ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้
ε_t	ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แท้จริง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องของทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีพิกัดด้านกำลังและความถี่การสวิตช์สูงขึ้น ช่วยลดข้อจำกัดในการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้สูงขึ้น แต่ถึงกระนั้นในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็ยังเป็นตัวเลือกในอันดับแรกของงานบางด้านที่ต้องควบคุมความเร็วในย่านที่กว้าง หรือต้องควบคุมแรงบิดอย่างแม่นยำแม้จะเกิดการรบกวน (Disturbances) ที่แหล่งจ่ายกำลัง หรือโหลด การควบคุมดังกล่าวส่วนใหญ่ทำโดยระบบป้อนกลับ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมหรือจำลองการทำงานของระบบรวมจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการควบคุม ซึ่งในที่นี้ก็คือความต้านทานและความเหนี่ยวนำของวงจรอาร์เมเจอร์หรือวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขึ้นอยู่กับว่าต้องการควบคุมมอเตอร์จากด้านวงจรอาร์เมเจอร์หรือจากด้านวงจรสนาม

ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรอาร์เมเจอร์หรือวงจรสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถหาได้หลายวิธี เช่น การป้อนแรงดันไซน์เข้าวงจรอาร์เมเจอร์หรือวงจรสนามที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง แล้ววัดแอมพลิจูดและมุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันที่ป้อน ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลและความเหนี่ยวนำสมมูลได้ หรือใช้การป้อนแรงดันแบบขั้นขณะมอเตอร์หยุดนิ่งแล้ววัดค่าคงตัวเวลาของกระแส และแรงดันในสถานะอยู่ตัว ก็จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลและความเหนี่ยวนำสมมูลได้เช่นกัน แต่วิธีนี้ไม่เหมาะกับวงจรอาร์เมเจอร์ที่มีค่าความต้านทานน้อยๆ เนื่องจากความต้านทานเอาต์พุตของตัวขับเร้าจะมีผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรอาร์เมเจอร์ที่คำนวณจากค่าคงตัวเวลาคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงอย่างมีนัยสำคัญสูงได้ การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีข้างต้นเหล่านี้เป็นวิธีแบบออฟไลน์ คือตัวขับเร้า (Actuator) ที่จ่ายแรงดันขับเร้าระบบที่ต้องการทดสอบเป็นอิสระตัวกับตัวจ่ายแรงดันขับระบบขณะระบบถูกใช้งานจริง วิธีออฟไลน์จึงไม่เหมาะกับระบบอัตโนมัติ เช่น ระบบปรับค่าตัวควบคุมอัตโนมัติ (Auto Tuning Systems) และระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง (Adaptive Control Systems)

การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ในงานวิจัยนี้เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยวิธีการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์จะใช้วิธีที่ไม่ซับซ้อนแต่ยังคงมีความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้สูง ทำให้สามารถจัดทำบนไมโครคอนโทรลเลอร์ระดับกลางซึ่งราคาไม่แพง สามารถใช้ในอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ได้ การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ใช้คอนเวอเตอร์ตัวเดียวกันกับที่ใช้ในการขับเคลื่อนเป็นตัวจ่ายแรงดันขับเร้า โดยขับเร้าวงจรอาร์เมเจอร์หรือวงจรสนามที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ในขณะมอเตอร์หยุดนิ่งแล้วประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งถูกบันทึกไว้ล่วงหน้า ร่วมกับค่าที่จำเป็นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่วงจรอาร์เมเจอร์หรือวงจรสนามซึ่งถูกขับเร้า การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีนี้ไม่จำกัดอยู่เฉพาะค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรง แต่สามารถใช้ได้กับโหลดทางไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีวงจรเทียบเคียงเป็นความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างตัวหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
- 1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยและพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบปรับค่าตัวควบคุมอัตโนมัติ และระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

- 1.3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการทำงานเป็นมอเตอร์กระแสตรงขนาด 1 กิโลวัตต์
- 1.3.2 คอนเวอเตอร์ที่ใช้ขับเร้าเป็นชนิดควบคุมเฟส 1 เฟส 2 พัลส์ ฟูลคอนโทรล ชนิดมีหม้อแปลงแทปกลาง
- 1.3.3 การหาค่าพารามิเตอร์กระทำในขณะมอเตอร์หยุดนิ่ง
- 1.3.4 ออกแบบและสร้างตัวตรวจจับสัญญาณแรงดัน, ตัวปรับปรุงสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสเพื่อให้ให้สัญญาณดังกล่าวมีลักษณะเหมาะสมแก่การนำไปประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์
- 1.3.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือ PIC18F452 ซึ่งทำงานบนบอร์ดทดลอง PIC ของบริษัทไมโครไบตอิเล็กทรอนิกส์ (MicroByte Electronics) รุ่น 2.10

1.3.6 เขียนซอฟต์แวร์หาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ด้วยภาษาซี

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูล

1.4.2 ทดลองเขียนซอฟต์แวร์ประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธี ฟอสซ์โพซิชันบนโปรแกรม MATLAB และตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลอง การด้วยโปรแกรม SIMNON

1.4.3 ออกแบบและเขียนซอฟต์แวร์ด้วยภาษาซี ตามแนวทางของซอฟต์แวร์ในข้อ 1.4.2 เพื่อ ประมวลผลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วตรวจสอบผลการทำงาน

1.4.4 ออกแบบและเขียนซอฟต์แวร์ด้วยภาษาซี ในส่วนของการหาค่าแรงดันเฉลี่ย, ค่าแรงดัน ประสิทธิภาพ, ค่าความถี่สาย, ค่ากระแสเฉลี่ย และค่ากระแสชั่วขณะ แล้วตรวจสอบผลการทำงาน

1.4.5 เชื่อมซอฟต์แวร์ในข้อ 1.4.3 และ 1.4.4 เข้าด้วยกัน แล้วตรวจสอบผลการทำงาน

1.4.6 ออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์ตรวจสอบสัญญาณแรงดัน, ตัวปรับปรุงสัญญาณแรงดันและ สัญญาณกระแสเพื่อให้สัญญาณดังกล่าวมีลักษณะเหมาะสมแก่การนำไปประมวลผลโดย ไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วตรวจสอบผลการทำงาน

1.4.7 ทดสอบการทำงานร่วมกันของซอฟต์แวร์ในข้อ 1.4.5 และฮาร์ดแวร์ในข้อ 1.4.6 กับการ ขับร้อมมอเตอร์จริง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์

1.4.8 ปรับปรุงฟังก์ชันการทำงานของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ให้สะดวกแก่ผู้นำไปใช้งาน

1.4.9 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ของผลการวิจัย

1.5.1 สามารถสร้างตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้

1.5.2 สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยและพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบปรับค่าตัวควบคุม อัตโนมัติ และระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ และการประมาณค่าตอบของแบบจำลอง

พารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ได้ในงานวิจัยนี้ ได้มาจากการแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานและความเหนี่ยวนำนั้น โดยกระแสดังกล่าวเกิดจากการขับเร้าโดยคอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟส การหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลสองส่วน คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการหาคำตอบจากแบบจำลอง ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนแรก คือ ที่มาและเงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ ตลอดจนวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ที่ใช้ในการแก้แบบจำลองดังกล่าว ส่วนการได้มาซึ่งค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการหาคำตอบจากแบบจำลองจะกล่าวถึงในบทถัดไป

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไหลของคอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟส เมื่อโหลดเป็นความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ

วงจรกำลังของคอนเวอเตอร์ขณะขับเร้าโหลดความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำแสดงในภาพที่ 2-1 ซึ่งสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสโหลด $i_d(t)$ ได้ดังนี้ถ้าให้

$$U_p = U_{rp} \sin \omega t$$

$$u_{s1}(t) = U_{s1p} \sin \omega t = -u_{s2}(t)$$

แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่โหลดเท่ากับ

$$u_d = u_{Ld} + u_{Rd} \quad (2-1)$$

ซึ่งขณะ th_1 หรือ th_2 นำกระแส จะได้

$$U_{sp} \sin \omega t = L_d \frac{di_d}{dt} + R_d i_d \quad (2-2)$$

กระแส i_d ในสมการที่ (2-2) ประกอบด้วยกระแสส่วนที่เกิดจากแหล่งจ่าย ($i_{d \text{ force}}$) และกระแสส่วนที่เกิดจากคุณสมบัติทางธรรมชาติของวงจร ($i_{d \text{ natural}}$) ซึ่งเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$i_d = i_{d \text{ force}} + i_{d \text{ natural}} \quad (2-3)$$

เมื่อแหล่งจ่าย U_p เป็นฟังก์ชันไซน์ ดังนั้น $i_{d \text{ force}}$ ต้องเป็นฟังก์ชันไซน์ที่มีความถี่เดียวกับแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงสมมติให้

$$i_{d \text{ force}} = A \sin(\omega t + \theta) \quad (2-4)$$

แทนค่า $i_{d \text{ force}}$ ลงในสมการ KVL จะได้

$$\omega L_d A \cos(\omega t + \theta) + R_d A \sin(\omega t + \theta) = U_{sp} \sin \omega t \quad (2-5)$$

ค่าโคไซน์ของมุมใดๆ จะมีค่าเท่ากับค่าไซน์ของผลบวกระหว่างมุมนั้นๆ กับ 90° ฟังก์ชันโคไซน์ ของมุมใดๆ จึงเสมือนนำหน้าฟังก์ชันไซน์ของมุมนั้นๆ อยู่ 90° ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้เวกเตอร์ในการบวกฟังก์ชันไซน์กับฟังก์ชันโคไซน์ [1] ในสมการที่ (2-5) ได้ดังภาพที่ 2-2

การบวก $\omega L_d A \cos(\omega t + \theta)$ กับ $R_d A \sin(\omega t + \theta)$ โดยอาศัยเวกเตอร์ดังกล่าว จะได้เวกเตอร์ลัพธ์ที่มีขนาด $\sqrt{\omega^2 L_d^2 A^2 + R_d^2 A^2}$ หรือ $A \sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}$ และมีมุมนำหน้า $\sin(\omega t + \theta)$ อยู่ $\tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d}$ ดังนั้นจากสมการที่ (2-5) จะได้

$$A \sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2} \sin \left(\omega t + \theta + \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d} \right) = U_{sp} \sin \omega t \quad (2-6)$$

เทียบสัมประสิทธิ์จะได้

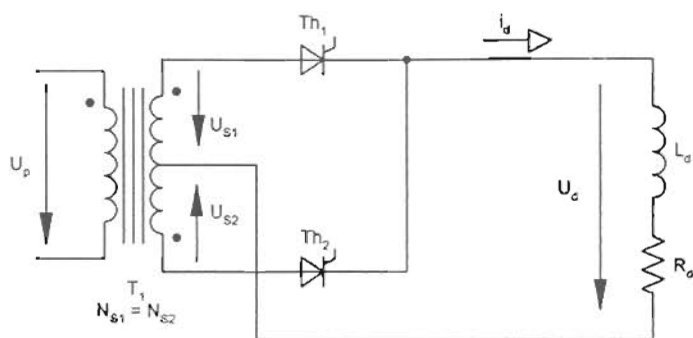
$$\begin{aligned} U_{sp} &= A \sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2} \\ A &= \frac{U_{sp}}{\sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}} \end{aligned} \quad (2-7)$$

และ

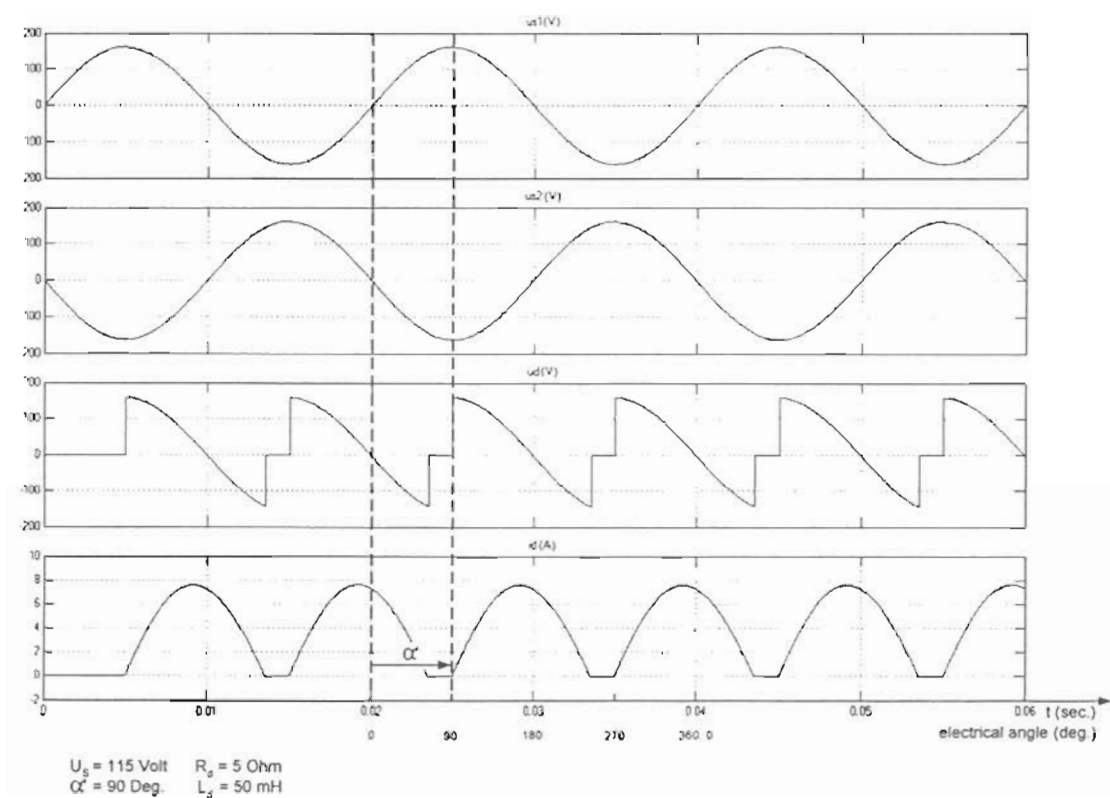
$$\begin{aligned} \sin \left(\omega t + \theta + \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d} \right) &= \sin \omega t \\ \theta &= -\tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d} \end{aligned} \quad (2-8)$$

นั่นคือ

$$i_{d \text{ force}} = \frac{U_{sp}}{\sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}} \sin \left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d} \right) \quad (2-9)$$

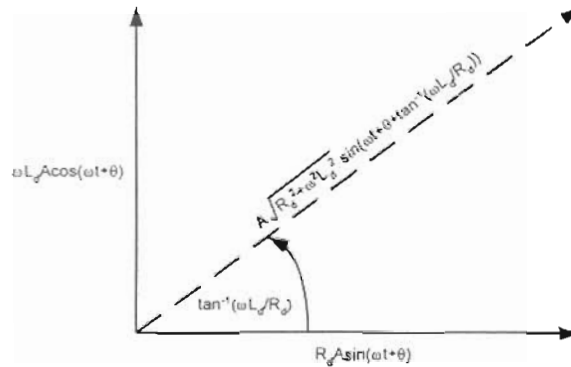


(ก) วงจรภาคกำลัง



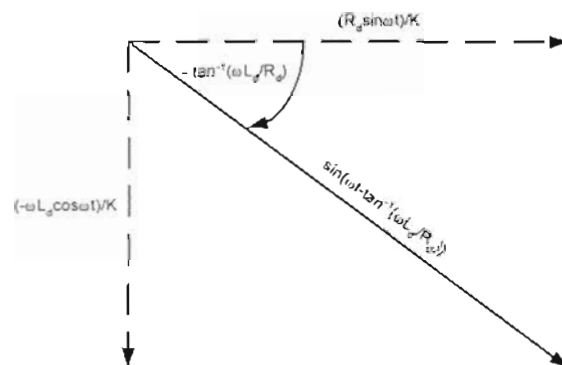
(ข) แรงดันที่โหลด(u_d) และกระแสโหลด(i_d) จากการจำลองในสภาวะกระแสไม่ต่อเนื่อง

ภาพที่ 2-1 คอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบ 1 เฟส เริ่มต้นเมื่อมีโหลดเป็นความต้านทาน
อนุกรมกับความเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2-2 การบวกฟังก์ชันไซน์กับฟังก์ชันโคไซน์โดยอาศัยเวกเตอร์

$\sin\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d}\right)$ ในสมการที่ (2-9) สามารถแตกให้อยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์บวกกับฟังก์ชันโคไซน์โดยใช้เวกเตอร์ได้ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การแตก $\sin\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d}\right)$ ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันไซน์บวกกับฟังก์ชันโคไซน์โดยใช้เวกเตอร์

จากภาพที่ 2-3 จะได้

$$I = \sqrt{\frac{R_d^2}{K^2} + \frac{\omega^2 L_d^2}{K^2}}$$

$$I = \frac{\sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}}{K}$$

$$K = \sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2} \quad (2-10)$$

นั่นคือ

$$\sin\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d}\right) = \frac{1}{\sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}} (R_d \sin \omega t - \omega L_d \cos \omega t) \quad (2-11)$$

ดังนั้น
$$i_{d \text{ force}} = \frac{U_{sp}}{\sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_d^2 + \omega^2 L_d^2}} (R_d \sin \omega t - \omega L_d \cos \omega t)$$

$$i_{d \text{ force}} = \frac{U_{sp}}{R_d^2 + \omega^2 L_d^2} (R_d \sin \omega t - \omega L_d \cos \omega t) \quad (2-12)$$

ส่วน $i_{d \text{ natural}}$ หาได้จากการตัดผลของแหล่งจ่าย นั่นคือ

$$L_d \frac{di_{d \text{ natural}}}{dt} + R_d i_{d \text{ natural}} = 0 \quad (2-13)$$

ซึ่งมีรูปแบบของผลตอบสนองธรรมชาติเป็น

$$i_{d \text{ natural}} = B e^{-t/\tau} ; \tau = \frac{L_d}{R_d} \quad (2-14)$$

เนื่องจาก

$$i_d = i_{d \text{ force}} + i_{d \text{ natural}}$$

ดังนั้นจึงได้

$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d^2 + \omega^2 L_d^2} (R_d \sin \omega t - \omega L_d \cos \omega t) + B e^{-t/\tau} ; U_{sp} = \sqrt{2}U_s \quad (2-15)$$

สมการที่ (2-15) แม้เป็นผลเฉลยสมบูรณ์ของกระแสโพล แต่ยังไม่เหมาะจะใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากติดค่าคงที่ B ค่าคงที่นี้สามารถหาได้จากการแทนสถานะเงื่อนไขลงในสมการที่ (2-15) สถานะเงื่อนไขดังกล่าวมีความแตกต่างกันตามโหมดการนำกระแสของคอนเวอเตอร์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 โหมดหลัก คือ โหมดกระแสโพลไม่ต่อเนื่อง และ โหมดกระแสโพลต่อเนื่อง

2.1.1 กรณีกระแสโพลไม่ต่อเนื่อง กรณีกระแสโพลไม่ต่อเนื่องดังตัวอย่างรูปคลื่นกระแสในภาพที่ 2-1 (ข) จะเห็นว่าเมื่อเริ่มจุดชนวนไทรสเตอร์ที่ ωt ขณะนั้นกระแส i_d มีค่าเท่ากับศูนย์ เราสามารถใช้เหตุการณ์นี้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับกรณีกระแสโพลไม่ต่อเนื่อง เพื่อหาค่าคงที่ B ได้ โดยแทน ωt และ i_d ในสมการที่ (2-15) ด้วย α' และ 0 ตามลำดับ ซึ่งจะได้

$$0 = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d^2 + \omega^2 L_d^2} (R_d \sin \alpha' - \omega L_d \cos \alpha') + B e^{-\alpha'/\omega\tau}$$

$$B = -\frac{\sqrt{2}U_s}{R_d^2 + (\omega L_d)^2} (R_d \sin \alpha' - \omega L_d \cos \alpha') e^{\alpha'/\omega\tau} \quad (2-16)$$

$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d^2 + (\omega L_d)^2} ((R_d \sin \omega t - \omega L_d \cos \omega t) - (R_d \sin \alpha' - \omega L_d \cos \alpha') e^{\alpha'/\omega\tau} e^{-\omega t/\omega\tau}) \quad (2-17)$$

ให้
$$Z_d = \sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2} \quad (2-18)$$

$$R_d = \cos \phi \sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2} \quad (2-19)$$

$$\omega L_d = \sin \phi \sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2} \quad (2-20)$$

และ $\tan \phi = \frac{\omega L_d}{R_d} = \omega \tau \quad (2-21)$

ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\sqrt{2}U_s}{Z_d^2} ((\cos \phi Z_d \sin \omega t - \sin \phi Z_d \cos \omega t) \\ &\quad - (\cos \phi Z_d \sin \alpha' - \sin \phi Z_d \cos \alpha') e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi}) \\ &= \frac{\sqrt{2}U_s}{Z_d} ((\cos \phi \sin \omega t - \sin \phi \cos \omega t) - (\cos \phi \sin \alpha' - \sin \phi \cos \alpha') e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi}) \quad (2-22) \end{aligned}$$

จาก $\sin A \cos B - \cos A \sin B = \sin(A - B) \quad (2-23)$

จะได้ $i_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d} \cos \phi (\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha' - \phi) e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi}) \quad (2-24) [2]$

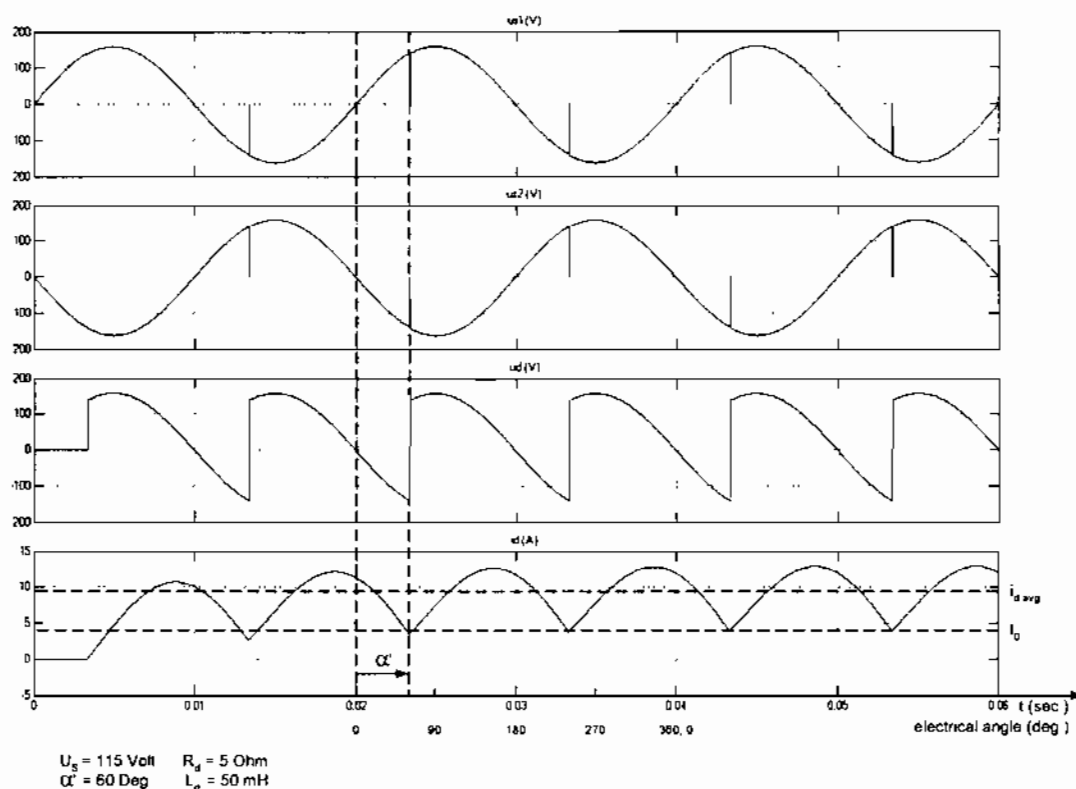
สมการที่ (2-24) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไหลในกรณีกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำได้ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2

2.1.2 กรณีกระแสไหลต่อเนื่อง จากกรณีกระแสไหลไม่ต่อเนื่องถ้าลดมุมเริ่มจุดชนวนไทรสเตอร์ลงขณะที่ไหลยังคงเท่าเดิม จะทำให้มุมการนำกระแสของไทรสเตอร์มากขึ้น ถ้าลดมุมเริ่มจุดชนวนลงต่อไปเรื่อยๆ ในที่สุดมุมการนำกระแสของไทรสเตอร์จะเท่ากับ $2\pi/P$ หรือเกิดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างรูปคลื่นกรณีกระแสไหลต่อเนื่องแสดงในภาพที่ 2-4 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัว ขณะเริ่มจุดชนวนไทรสเตอร์ที่ ωt กระแสไหลจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก I_0 เมื่อใช้เงื่อนไขเหตุการณ์นี้ ($\omega t = \alpha'$ ซึ่งขณะนั้น $i_d = I_0$) แทนลงในสมการ (2-15) เพื่อหาค่าคงที่ B จะได้

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d} \cos \phi (\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha' - \phi) e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi}) + I_0 e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi} \quad (2-25)$$

$$I_0 = \frac{\frac{\sqrt{2}U_s}{R_d} \cos \phi \left(\sin \left(\alpha' + \frac{2\pi}{P} - \phi \right) - \sin(\alpha' - \phi) e^{-\left(\frac{2\pi}{P}\right)/\tan \phi} \right)}{1 - e^{-\left(\frac{2\pi}{P}\right)/\tan \phi}} \quad (2-26) [2]$$

สมการที่ (2-25) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไหลในกรณีกระแสไหลต่อเนื่อง ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำได้ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้



ภาพที่ 2-4 รูปคลื่นจากการจำลองวงจรภาพที่ 2-1 (ก) ในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง

2.2 เงื่อนไขการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไหลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์

สมการที่ (2-24) และสมการที่ (2-25) ต่างสามารถใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำได้ การเลือกใช้สมการใดขึ้นอยู่กับลักษณะกระแสไหลว่าต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง

ถ้าสามารถหาค่าตัวแปรในสมการที่ (2-24) หรือ (2-25) ได้ครบทุกตัวยกเว้นมุมต่างเฟสของไหล (ϕ) สมการดังกล่าวก็จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันหนึ่งตัวแปร ซึ่งสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) หาค่า ϕ ได้ ค่า ϕ ที่ได้สามารถนำไปใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ L_d ได้ ตามสมการที่ (2-21)

ในทางปฏิบัติ การขับเร้าไหลที่เป็นวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงในสภาวะหยุดนิ่ง มักเกิดกระแสไหลค่าสูง เนื่องจากไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Electromotive Force)

ด้านการไหลของกระแสไหลลด ดังนั้นการขับเร็วในโหมดกระแสไหลลดต่อเนื่องซึ่งมีค่ากระแสไหลลดเฉลี่ยสูงจึงอาจเป็นอันตรายกับมอเตอร์ที่ทดสอบได้ ขณะที่การทดสอบกับมอเตอร์ตัวอย่างพบว่าการขับเร็วด้วยโหมดกระแสไหลลดไม่ต่อเนื่องซึ่งให้ค่ากระแสไหลลดเฉลี่ยต่ำกว่าโหมดกระแสไหลลดต่อเนื่อง ยังมีความสามารถเพียงพอที่จะสร้างกระแสขับเร็วที่สูงเท่าค่าพิคคของมอเตอร์ตัวอย่างได้

งานวิจัยนี้จึงใช้การขับเร็วด้วยโหมดกระแสไหลลดไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือแบบจำลองที่ใช้ (สมการที่ 2-24) มีตัวแปรน้อยกว่าแบบจำลองกรณีกระแสไหลลดต่อเนื่อง (สมการที่ 2-25) ทำให้ซอฟต์แวร์ที่ใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์มีความซับซ้อนน้อยกว่าและถึงคำตอบได้เร็วกว่า

สำหรับคอนเวอเตอร์แบบ 2 พัลส์ ที่ขับโหลด R-L จะทำงานในโหมดกระแสไหลลดไม่ต่อเนื่องเสมอ ถ้าจุดชนวนไทรสเตอร์ด้วยมุมไม่ต่ำกว่า 90° องศา

กระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ตามงานวิจัยนี้จึงจุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์เพื่อขับเร็วโหลดด้วยมุมจุดชนวนไม่น้อยกว่า 90° เพื่อให้มั่นใจได้ว่ากระแสไหลลดขณะนั้นไม่ต่อเนื่องแล้วใช้สมการที่ (2-24) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า ϕ ซึ่งจะนำไปสู่ค่าพารามิเตอร์ความเหนี่ยวนำได้ตามสมการที่ (2-21)

2.3 การหารากของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

เมื่อนำค่าตัวแปร U_s , ω , R_d , $i_d(t)$, t และ α' ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการหาค่าเหล่านี้ในบทถัดไป แทนลงในสมการที่ (2-24) จะสามารถจัดสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูป $f(\phi) = 0$ ได้ ดังสมการที่ (2-27)

$$0 = -i_d(t) + \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d} \cos \phi (\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha' - \phi)) e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi} \quad (2-27)$$

สมการดังกล่าวแม้จะมีตัวไม่ทราบค่าคือ ϕ เพียงตัวเดียว แต่ตัวไม่ทราบค่านี้เกี่ยวพันกันเองในลักษณะที่ไม่สามารถเขียนนิพจน์ของ ϕ ออกมาอย่างชัดเจนได้ การหาค่า ϕ จึงต้องทำโดยวิธีประมาณ ซึ่งต่อจากนี้จะขอเรียกค่า ϕ ที่ทำให้ $f(\phi) = 0$ ว่าเป็นรากของสมการ $f(\phi) = 0$

การหารากของสมการอาจแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนคือ

2.3.1 หาลักษณะกราฟของฟังก์ชัน เป็นต้นว่าสมการมีรากกี่ตัว เป็นรากจริงหรือรากเชิงซ้อน รากดังกล่าวมีค่าประมาณเท่าใด กราฟของสมการมีจุดสูงสุดสัมพัทธ์ หรือจุดต่ำสุดสัมพัทธ์บริเวณใด การใช้ทฤษฎีบทค่าระหว่างกลาง (The Intermediate-Value Theorem) ด้วยการทดลองหาค่าของฟังก์ชันที่จุดต่างๆ แล้วดูการเปลี่ยนเครื่องหมายของฟังก์ชันจะช่วยหาช่วงที่มีรากจริงอยู่ได้

นอกจากนี้แล้วบางครั้งข้อมูลเกี่ยวกับเกี่ยวกับฟังก์ชันที่เป็นที่เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอาจช่วยบอกลักษณะกราฟของฟังก์ชันได้

2.3.2 หาค่ารากของสมการที่มีความแม่นยำสูงขึ้น โดยทั่วไปใช้วิธีการประมาณสืบเนื่อง (Successive Approximation) หรือที่เรียกว่ากระบวนการวนวิธการทำซ้ำ (Iterative Process) ซึ่งมีหลายระเบียบวิธีให้เลือกใช้ แต่ละระเบียบวิธีมีข้อจำกัด, ข้อดี และข้อเสียต่างกัน ข้อมูลจากลักษณะกราฟของฟังก์ชัน และข้อจำกัดทางทรัพยากรการคำนวณ เป็นปัจจัยหลักในการเลือกระเบียบวิธีการประมาณค่า เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

รากของสมการที่ (2-27) ได้จากการดำเนินการตามขั้นตอนทั้งสองนี้เช่นกัน

2.4 การหาลักษณะกราฟของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขั้นตอนนี้ของการวิจัย เรายังไม่ทราบค่าตัวแปร U_s , ω , R_d , $i_d(t)$, ϵ และ α' ในสมการที่ (2-27) ลักษณะกราฟของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (2-27) อย่างคร่าวๆ จึงใช้ค่าที่สมมติขึ้นอย่างเป็นทางการเป็นผลสอดคล้องกันตามธรรมชาติของระบบจริงแทนลงในสมการดังกล่าวก่อนนำไปหาค่าและลงจุดกราฟที่ ϕ ค่าต่างๆ

เซตของค่าตัวแปรที่เป็นเหตุเป็นผลสอดคล้องกันอาจได้จากการจำลองระบบขับเคลื่อนที่มีโหลดสมมติค่าหนึ่ง ดังนี้

กำหนดให้ $U_s = 115$ โวลต์, $\omega = 314.16$ เรเดียน/วินาที,

$\alpha' = 90^\circ$, $R_d = 5$ โอห์ม

และ $L_d = 50$ มิลลิเฮนรี่

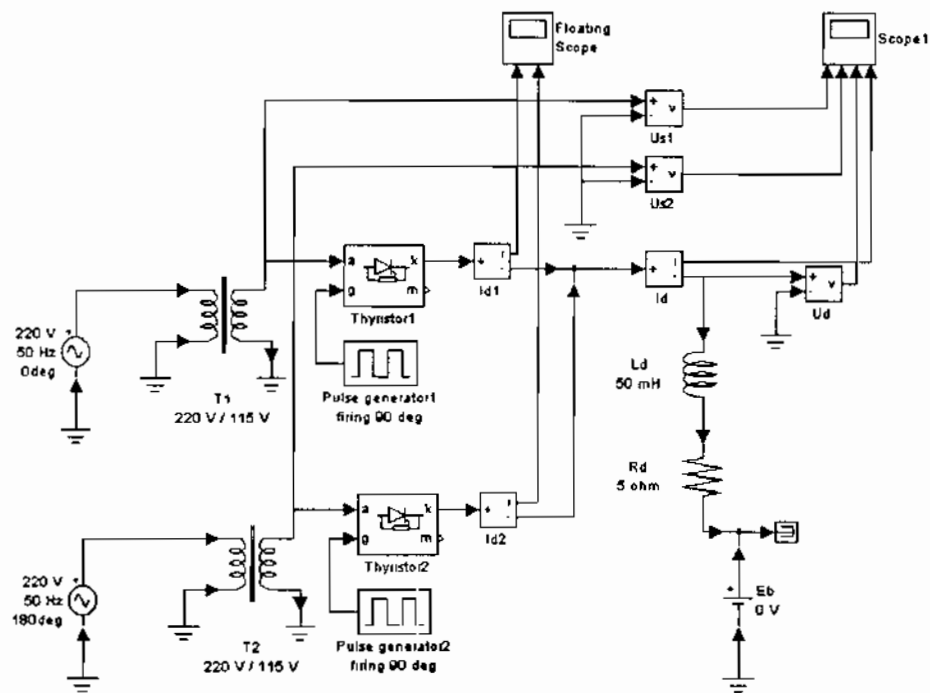
นำค่าเหล่านี้แทนลงในบล็อกจำลองการทำงานของคอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบ 2 พัลส์ ฟูลคอนโทรล ที่มีโหลดความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ ซึ่งสร้างขึ้นด้วย Simulink ของ MATLAB ดังภาพที่ 2-5 ก็จะได้รูปคลื่นกระแส i_d จากการจำลองดังภาพที่ 2-6 รูปคลื่นนี้ทำให้เราสามารถหาค่ากระแสที่เวลาใดๆ ได้ ดังนั้นค่าตัวแปรอิสระ U_s , ω , R_d , $i_d(t)$, ϵ และ α' ในสมการที่ (2-27) ที่เป็นเหตุเป็นผลสอดคล้องกันเซตหนึ่งคือ

$U_s = 115$ โวลต์, $\omega = 314.16$ เรเดียน/วินาที,

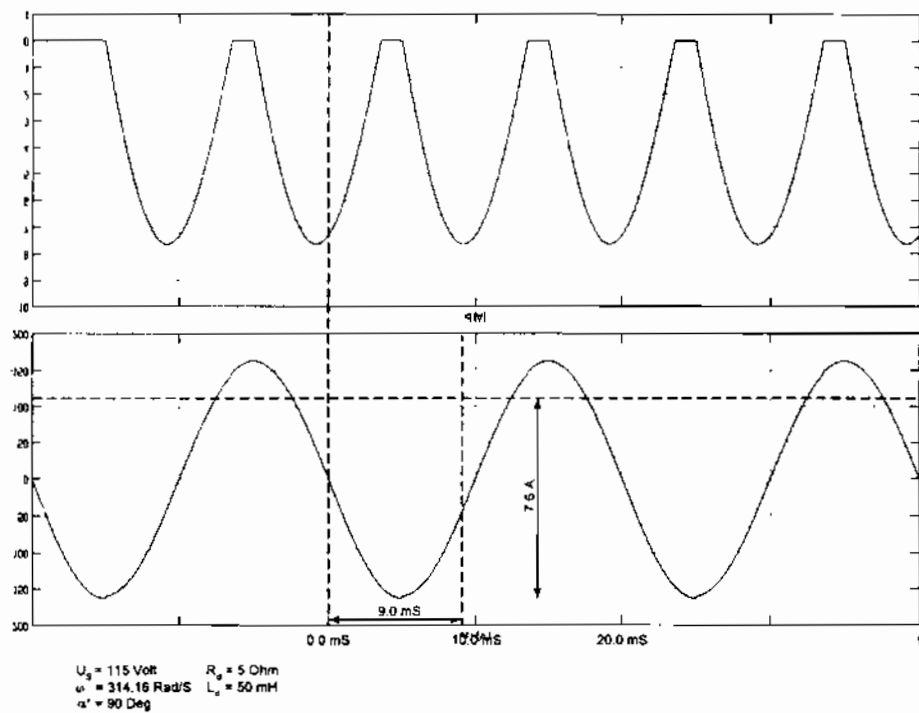
$R_d = 5$ โอห์ม, $\alpha' = 90^\circ$,

$i_{dt=9ms} = 7.6$ แอมแปร์ และ $\epsilon = 9$ มิลลิวินาที

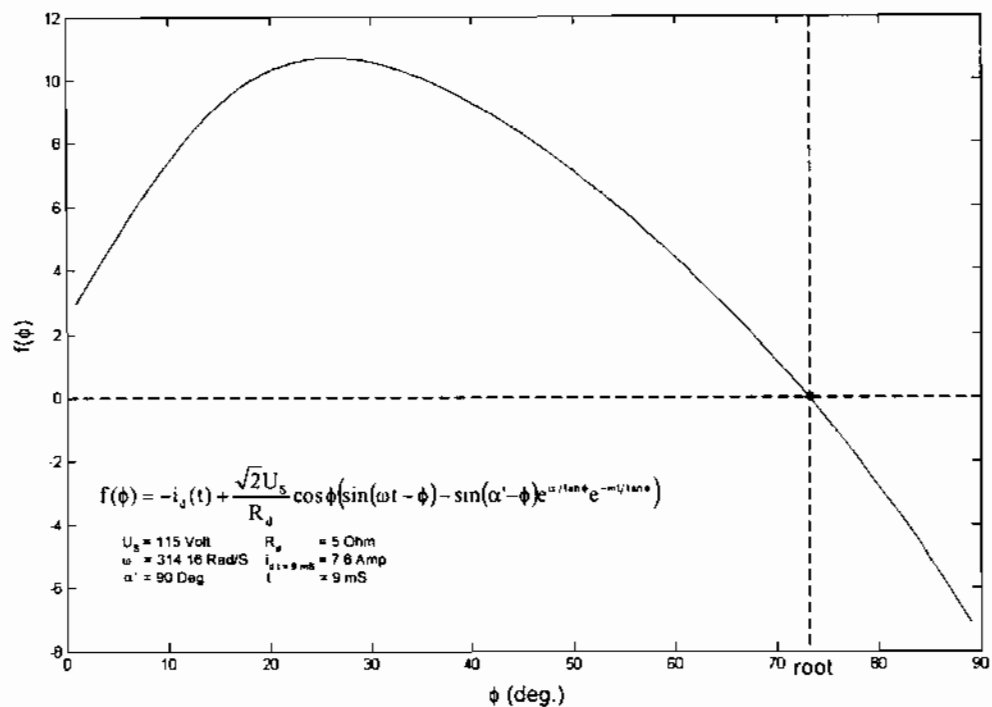
เมื่อนำค่าตัวแปรอิสระเหล่านี้แทนลงในสมการที่ (2-27) สมการดังกล่าวจะกลายเป็นฟังก์ชันหนึ่งตัวแปรในรูป $f(\phi) = 0$ ซึ่งสามารถลงจุดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ϕ กับค่าของ $f(\phi)$ ได้ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-5 บล็อกจำลองการทำงานของคอนเวอร์ชันควบคุมเฟสแบบ 2 พัลส์ฟูลคอนโทรล ที่มีโหลดความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ

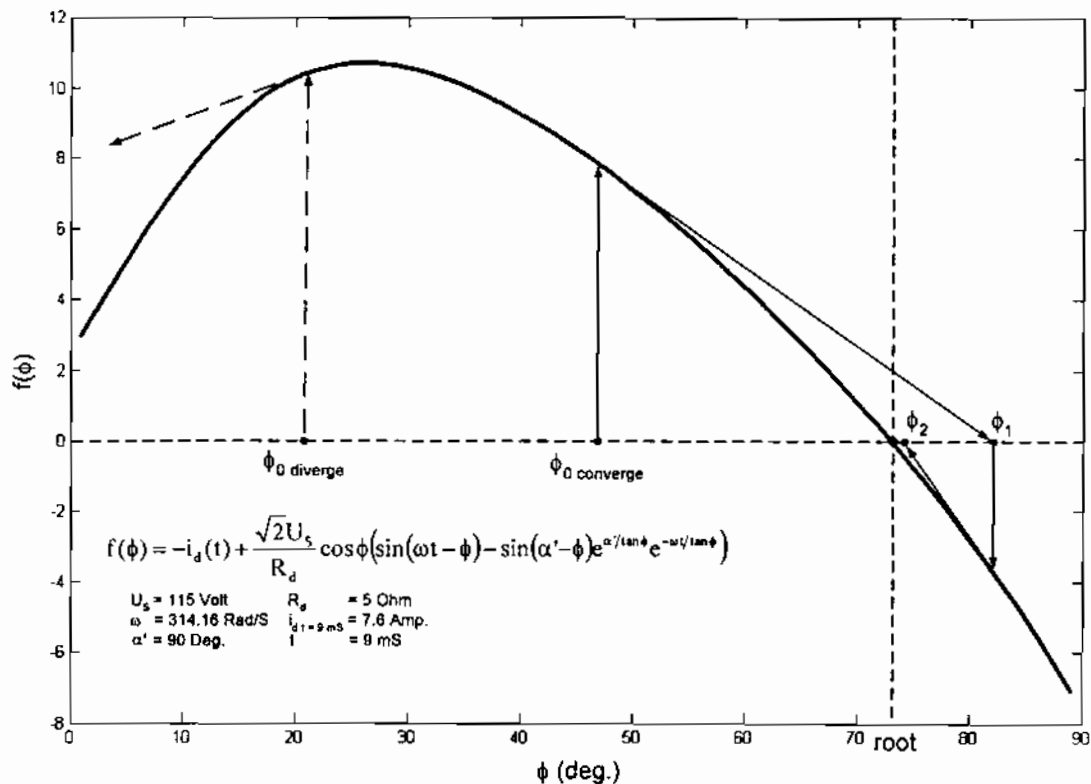


ภาพที่ 2-6 รูปคลื่นแรงดัน U_s และกระแส i_d จากการจำลอง



ภาพที่ 2-7 ลักษณะฟังก์ชันของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (2-27)

จากลักษณะของฟังก์ชันตามภาพที่ 2-7 พบว่าช่วงระหว่าง $0^\circ < \phi < 90^\circ$ ฟังก์ชันมีรากจริง 1 ราก และมีจุดสูงสุดสัมบูรณ์ 1 แห่ง จุดสูงสุดสัมบูรณ์บนช่วงดังกล่าวทำให้การประมาณค่ารากสมการด้วยระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ไม่ลู่เข้าสู่รากจริงเมื่อใช้ค่า ϕ ที่อยู่ทางซ้ายของจุดสูงสุดสัมบูรณ์เป็นค่าประมาณเริ่มต้น แต่ถ้าเลือกค่าประมาณเริ่มต้นที่อยู่ทางขวาของจุดสูงสุดสัมบูรณ์และไม่ไกลจากรากจริงมากนัก รากสมการที่ประมาณในแต่ละรอบการทำซ้ำจะลู่เข้าสู่รากจริงได้ ดังแสดงทั้งสองกรณีในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การลู่เข้าสู่รากจริง และการไม่ลู่เข้าสู่รากจริง ของระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อใช้ค่าประมาณเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

เมื่อตัวแปรต่างๆ ในสมการเปลี่ยนค่าไป การยกตัวและความชันของกราฟก็จะเปลี่ยนไป การระบุขอบเขตค่าประมาณเริ่มต้นที่ทำให้กระบวนการทำซ้ำด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน ลู่เข้าสู่รากจริงทุกๆ กรณี จึงระบุได้ยาก ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ที่ยกขึ้นมานี้เป็นตัวอย่างหนึ่งของระเบียบวิธีในกลุ่มระเบียบวิธีแบบเปิด (Open Method) ซึ่งอาจมีปัญหาลู่เข้าสู่รากจริง ถ้าเลือกค่าประมาณเริ่มต้นสำหรับการหารากของสมการ (2-27) ไม่เหมาะสม ต่างจากระเบียบวิธีในกลุ่มระเบียบวิธีแบบกำหนดขอบ (Bracketing Method) ซึ่งในทางทฤษฎี เมื่อใช้ระเบียบวิธีดังกล่าวกับฟังก์ชันที่มีลักษณะตามภาพ 2-7 จะให้ผลลัพธ์ที่ลู่เข้าสู่รากจริงได้เสมอ ถ้ากำหนดค่าประมาณเริ่มต้นทั้งสองเท่ากับค่าขอบเขตของ ϕ (ระเบียบวิธีในกลุ่มระเบียบวิธีแบบกำหนดขอบต้องการค่าประมาณเริ่มต้นสองค่า)

ด้วยลักษณะกราฟฟังก์ชันของสมการปัญหา และเงื่อนไขการเลือกค่าประมาณเริ่มต้น ระเบียบวิธีแบบกำหนดขอบจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ประมาณค่าตัวไม่ทราบค่า ϕ จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ (2-27)

2.5 การหาคำรากของสมการด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบวางตัวผิดที่ (false-position method)

[3, 4]

ระเบียบวิธีการวางตัวผิดที่ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation Method) เป็นระเบียบวิธีแบบกำหนดขอบระเบียบวิธีหนึ่ง ซึ่งมีหลักการทำนองเดียวกันกับระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Method) จะต่างกันก็เพียงระเบียบวิธีแบ่งครึ่งช่วงจะประมาณว่ารากอยู่ที่จุดกึ่งกลางของช่วง แต่ระเบียบวิธีวางตัวผิดที่ จะประมาณว่ารากในช่วงอยู่ห่างจากจุดปลายทั้งสองของช่วงตามสัดส่วนขนาดของค่าฟังก์ชันที่จุดทั้งสอง นั่นคือ

ถ้ากำหนดให้ f เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องในช่วง (x_l, x_u) และ $f(x_l)f(x_u) < 0$ รากของสมการ $f(x) = 0$ ในช่วง (x_l, x_u) หาได้ด้วยการแทนกราฟของ $y = f(x)$ ด้วยเส้นตรงที่เชื่อมจากจุด $(x_l, f(x_l))$ ไปยังจุด $(x_u, f(x_u))$ ดังภาพที่ 2-9 และถ้าเส้นตรงนี้ตัดแกน X ที่จุด $(x_r, 0)$ จะได้ว่า x_r คือค่าประมาณตัวถัดไปของรากที่แท้จริง โดยค่า x_r หาได้จาก

$$\tan \beta = \tan \delta \quad (2-28)$$

$$\frac{f(x_u)}{x_u - x_r} = \frac{f(x_l)}{x_l - x_r} \quad (2-29)$$

$$x_r = \frac{x_u f(x_l) - x_l f(x_u)}{f(x_l) - f(x_u)} \quad (2-30)$$

สมการที่ (2-30) เป็นรูปแบบหนึ่งของสูตรระเบียบวิธีวางตัวผิดที่ ซึ่งสามารถคำนวณค่าราก x_r ได้จากฟังก์ชันของค่าประมาณเริ่มต้น x_u และ x_l แต่หากจัดรูปสมการ (2-30) เพิ่มเติมจะได้สูตรของระเบียบวิธีวางตัวผิดที่อีกรูปแบบหนึ่งดังนี้
กระจายสมการที่ (2-30) ออกจะได้

$$x_r = \frac{x_u f(x_l)}{f(x_l) - f(x_u)} - \frac{x_l f(x_u)}{f(x_l) - f(x_u)} \quad (2-31)$$

นำ x_u บวกเข้าและลบออก ทางด้านขวาของสมการที่ (2-31)

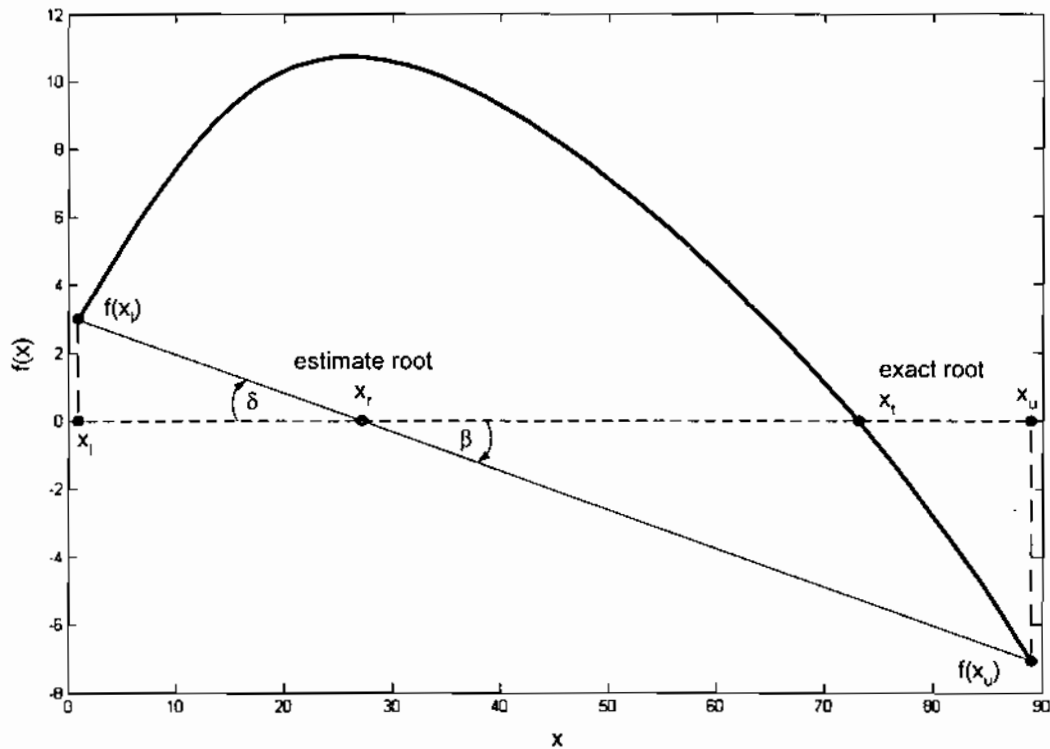
$$x_r = x_u + \frac{x_u f(x_l)}{f(x_l) - f(x_u)} - x_u - \frac{x_l f(x_u)}{f(x_l) - f(x_u)} \quad (2-32)$$

รวมกลุ่มตัวแปรใหม่ จะได้

$$x_r = x_u + \frac{x_u f(x_l)}{f(x_l) - f(x_u)} - \frac{x_l f(x_u)}{f(x_l) - f(x_u)}$$

หรือ
$$x_r = x_u + \frac{f(x_u)(x_l - x_u)}{f(x_l) - f(x_u)} \quad (2-33) [5]$$

สูตรตามสมการที่ (2-33) มีการการคูณน้อยกว่าสูตรตามสมการที่ (2-30) ดังนั้นเมื่อเขียนเป็นซอฟต์แวร์ในกระบวนการทำซ้ำจะมีความเร็วในการคำนวณมากกว่าสูตรตามสมการที่ (2-30)



ภาพที่ 2-9 การประมาณค่ารากของสมการ $f(x) = 0$ ด้วยระเบียบวิธีการวางตัวผิดที่

เราสามารถประมาณค่ารากให้ใกล้เคียงค่ารากที่แท้จริงมากขึ้นด้วยการทำซ้ำโดยบีบช่วงการประมาณระหว่าง x_u และ x_l ให้แคบลง ด้วยการแบ่งช่วงการประมาณเดิมออกเป็น 2 ส่วนคือ (x_l, x_r) และ (x_r, x_u) แล้วทดสอบว่าช่วงย่อยใดมีเครื่องหมายของค่าฟังก์ชันที่ปลายช่วงย่อยต่างกัน ซึ่งแสดงว่าบนช่วงย่อยนั้นมีรากที่แท้จริงอยู่ให้นำช่วงย่อยนั้นไปประมาณค่ารากตามสมการที่ (2-30) หรือสมการที่ (2-33) ก็จะได้ค่า x_r ใหม่ที่มีค่าใกล้รากที่แท้จริงมากขึ้น

ขั้นตอนของกระบวนการทำซ้ำด้วยระเบียบวิธีวางตัวผิดที่ สรุปได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 : เลือกค่าเริ่มต้น x_l และ x_u สำหรับการประมาณค่าราก โดยฟังก์ชัน $f(x)$ จะต้องเปลี่ยนเครื่องหมายในช่วงระหว่าง x_l และ x_u ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จาก $f(x_l) f(x_u) < 0$

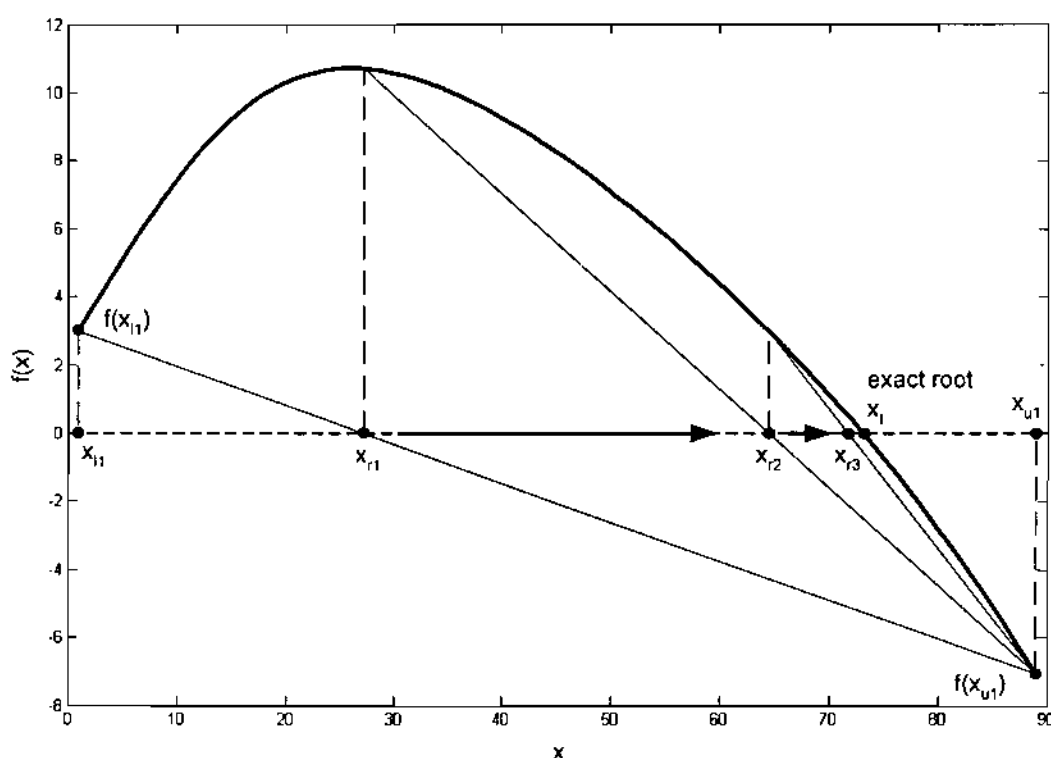
ขั้นที่ 2 : หาค่ารากโดยประมาณ (x_r) จากสมการที่ (2-30) หรือสมการที่ (2-33)

ขั้นที่ 3 : แบ่งช่วงการประมาณเดิมออกเป็น 2 ช่วงย่อย แล้วตรวจสอบว่ารากที่แท้จริงอยู่ในช่วงย่อยใดเพื่อนำช่วงย่อยนั้นไปเป็นช่วงการประมาณของวงรอบการทำซ้ำถัดไป ดังนี้

ถ้า $f(x_p)f(x_r) < 0$ แสดงว่ารากที่แท้จริงอยู่ในช่วงย่อย (x_p, x_r) ให้ใช้ช่วงย่อยนี้เป็นช่วงการประมาณของวงรอบถัดไปโดยใช้ค่า x_r แทนค่า x_u เดิม แล้วกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

ถ้า $f(x_p)f(x_r) > 0$ แสดงว่ารากที่แท้จริงอยู่ในช่วงย่อย (x_r, x_u) ให้ใช้ช่วงย่อยนี้เป็นช่วงการประมาณของวงรอบถัดไปโดยใช้ค่า x_r แทนค่า x_p เดิม แล้วกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

ถ้า $f(x_p)f(x_u) = 0$ แสดงว่า x_p มีค่าเท่ากับรากที่แท้จริงพอดี



ภาพที่ 2-10 การเข้าสู่ค่ารากที่แท้จริง โดยการประมาณด้วยระเบียบวิธีวางตัวผิดที่

การทำซ้ำวงรอบการประมาณอาจทำไปเรื่อยๆ จนรากที่ประมาณได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากรากที่แท้จริงน้อยเพียงพอ แต่โดยทั่วไปเราจะไม่ทราบค่ารากที่แท้จริงก่อนการประมาณ จึงไม่สามารถคำนวณค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แท้จริง (ϵ_r) ได้ ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยประมาณ (ϵ_a) ซึ่งคำนวณได้โดยไม่ต้องทราบค่ารากที่แท้จริง แทนการใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แท้จริง โดย

$$\epsilon_a = \left| \frac{x_{r(n)} - x_{r(n-1)}}{x_{r(n)}} \right| 100\% \quad \text{ถ้า } x_{r(n)} \neq 0 \quad (2-34)$$

เมื่อ $x_{r(n)}$ คือ ค่ารากที่ได้จากการประมาณในวงรอบปัจจุบัน

$x_{r(n-1)}$ คือ ค่ารากที่ได้จากการประมาณในวงรอบก่อนหน้า

และใช้เงื่อนไขตามสมการที่ (2-35) เพื่อหยุดวงรอบการทำซ้ำ

$$\varepsilon_r < \varepsilon_s \quad (2-35)$$

เมื่อ ε_r คือ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้

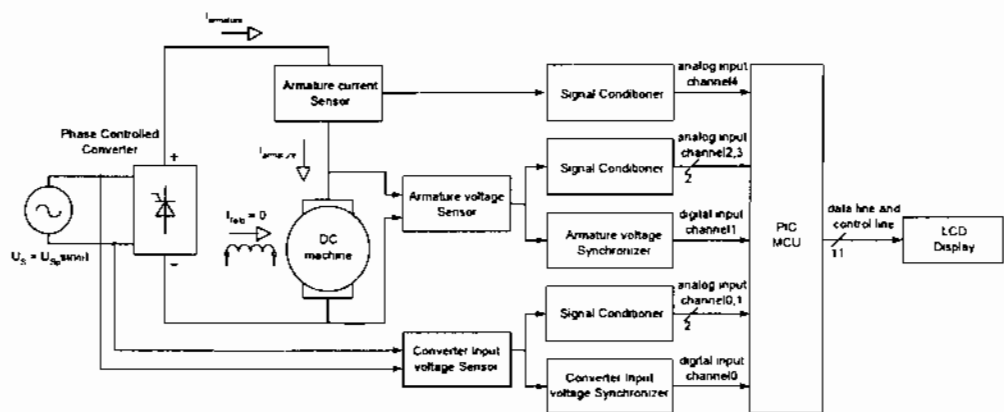
นอกจากเงื่อนไขหยุดวงรอบการทำซ้ำตามสมการที่ (2-38) ซึ่งมีความหมายว่าค่าประมาณที่หาได้จากวงรอบติดกันมีค่าแตกต่างกันน้อยเพียงพอแล้ว ควรจะมีเงื่อนไขให้หยุดการทำซ้ำหลังจากเกิดการซ้ำนานเกินควรด้วย ซึ่งการซ้ำที่นานเกินควรอาจเกิดจากข้อบกพร่องต่างๆ ค่าที่ได้จากการหยุดด้วยเงื่อนไขเกิดการซ้ำนานเกินควรนี้มักไม่ใช่ค่าที่มีความแม่นยำสูง

ถึงตอนนี้เรารู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และมีวิธีประมาณค่าคำตอบจากแบบจำลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงเหลือเพียงการหาค่าตัวแปรอิสระมาเติมลงในแบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองตามสมการที่ (2-27) อยู่ในรูป $f(\phi) = 0$ ซึ่งจะสามารถใช้วิธีเชิงตัวเลขแก้หาค่า ϕ ได้

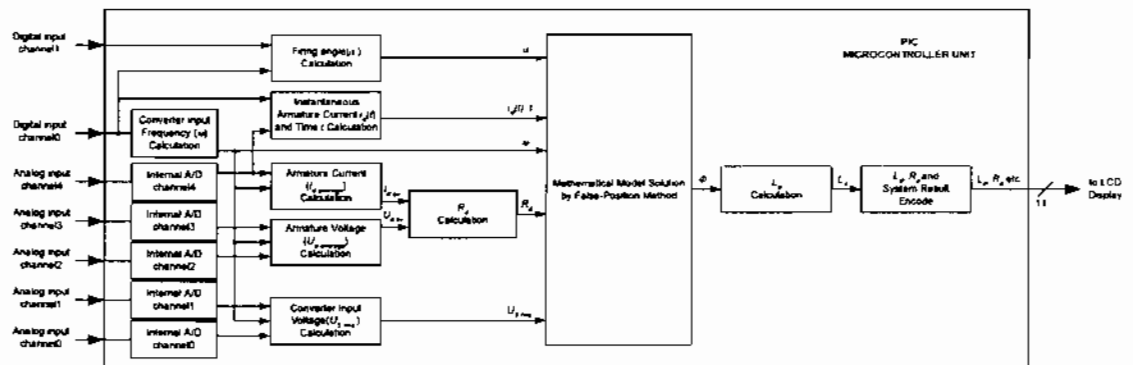
บทที่ 3

การหาค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าคำตอบของแบบจำลอง

ตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าคำตอบของแบบจำลองกระแสไหลตามสมการที่ (2-24) คือ ω , U_s , R_a , $i_a(t)$, t และ α' การได้มาซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้อาศัยทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทำงานร่วมกัน โดยฮาร์ดแวร์ทำหน้าที่ตรวจจับ (Sensing), ปรับปรุง (Conditioning) และสร้างสัญญาณที่จำเป็น ก่อนนำสัญญาณดังกล่าวไปประมวลผลหาค่าตัวแปรด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งอยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังภาพที่ 3-1 และภาพที่ 3-2

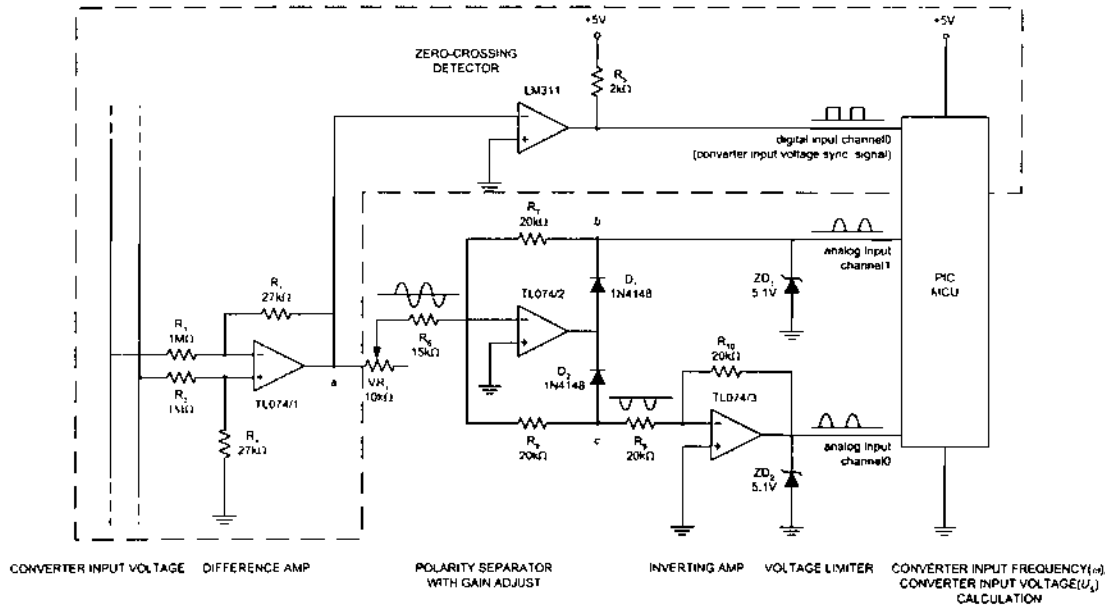


ภาพที่ 3-1 ส่วนฮาร์ดแวร์ของการหาค่า L_a และ R_a แบบออนไลน์



ภาพที่ 3-2 ส่วนซอฟต์แวร์ของการหาค่า L_a และ R_a แบบออนไลน์

3.1 การหาความถี่อินพุตของคอนเวอเตอร์ (Converter Input Frequency ω)

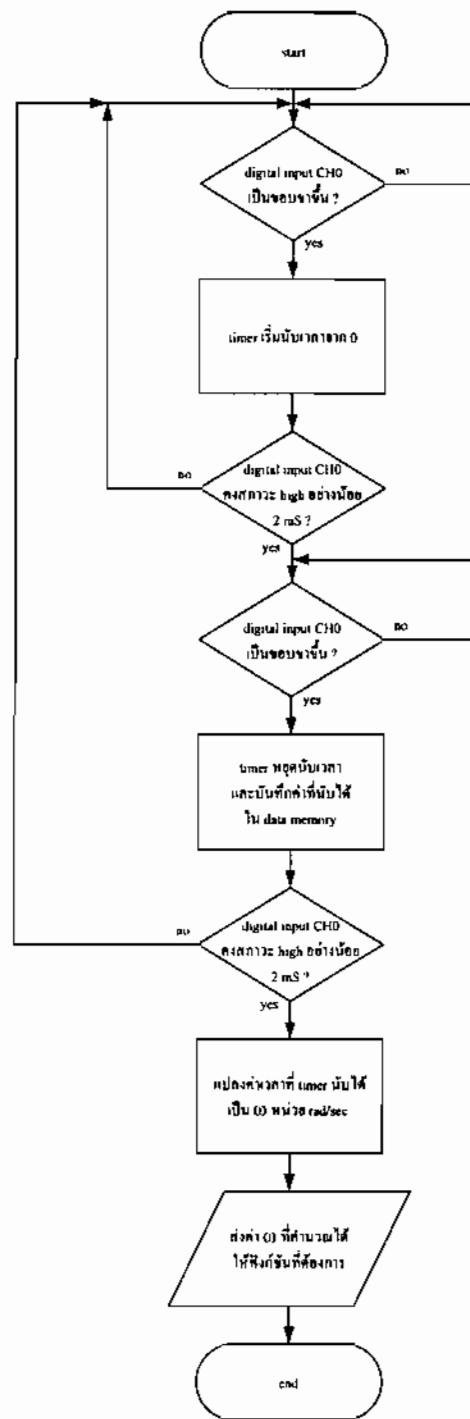


ภาพที่ 3-3 วงจรในส่วนของการหาความถี่อินพุตของคอนเวอเตอร์ (ภายในเส้นประ)

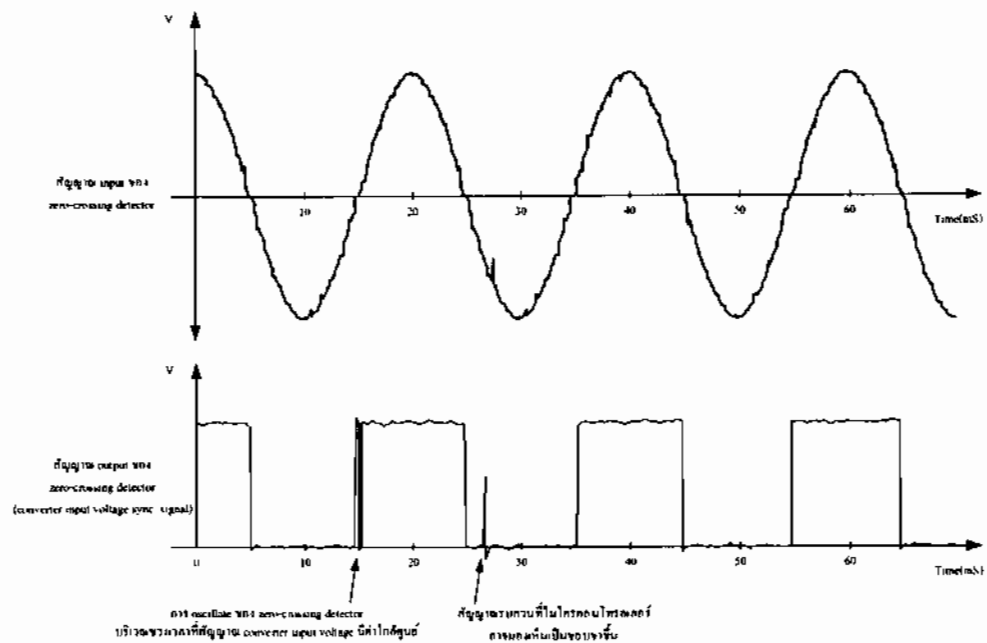
และวงจรหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์

จากภาพที่ 3-3 แรงดันจากอินพุตของคอนเวอเตอร์จะถูกลดระดับลงด้วยวงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Difference Amplifier) ก่อนเข้าสู่วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ (Zero Crossing Detector) เพื่อสร้างสัญญาณดิจิทัลระดับ 0 และ 5 โวลต์ ที่ซิงโครไนซ์กับแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ สัญญาณที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลหาความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่อินพุตของคอนเวอเตอร์ตามผังงานภาพที่ 3-4 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณความถี่สัญญาณซิงโครไนซ์ของแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ที่ดิจิทัลอินพุตช่อง 0 (Digital Input Channel 0) จากคาบของสัญญาณ ซึ่งถูกนับโดยไทเมอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ คาบเวลานี้นับจากขอบขาขึ้นหนึ่ง ถึงขอบขาขึ้นครั้งถัดไปของสัญญาณที่ดิจิทัลอินพุตช่อง 0 ดังนั้นถ้าขอบขาขึ้นที่ไทเมอร์เริ่มหรือสิ้นสุดการนับไม่ใช่ขอบขาขึ้นที่ซิงโครไนซ์กับแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ ความถี่ที่คำนวณได้ก็จะผิดพลาด ขอบขาขึ้นที่ไม่ซิงโครไนซ์เหล่านี้อาจเกิดจากการแกว่ง (Oscillate) ของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์บริเวณช่วงเวลาที่สัญญาณแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์มีค่าใกล้ศูนย์ หรือเกิดจากสัญญาณรบกวน ดังภาพเหตุการณ์จำลองภาพที่ 2-5 วิธีแก้การหาเวลาผิดจากสาเหตุดังกล่าว สามารถทำได้โดยฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ก็ได้ ทางฮาร์ดแวร์ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน กรองสัญญาณที่อินพุตหรือเอาต์พุตของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ การกรองสัญญาณที่อินพุตของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ต้องระวังการเลื่อนเฟสระหว่างสัญญาณซิงโครไนซ์ของแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์กับแรงดัน

อินพุตของคอนเวเตอร์ แต่หากกรองสัญญาณที่ด้านเอาต์พุตของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ ต้องระวังเรื่องความชันของการเปลี่ยนระดับระหว่างลอจิกสูงกับลอจิกต่ำของสัญญาณซึ่งโครโมโซมของแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์กับแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์ ที่จะเข้าดิจิทัลอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนการแก้ไขทางซอฟต์แวร์อาศัยความแตกต่างของความกว้างสัญญาณระดับลอจิกสูงหลังขอบขาขึ้น โดยหลังขอบขาขึ้นจริงที่ซึ่งโครโมโซมกับแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์ จะมีความกว้างของสัญญาณลอจิกสูงประมาณ 10 มิลลิวินาที (เมื่อระบบมีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์) แต่ความกว้างของลอจิกสูงที่เกิดจากสัญญาณรบกวนหรือการแกว่งของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ บริเวณช่วงเวลาที่แรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์มีค่าใกล้ศูนย์ จะยาวไม่เกิน 2 มิลลิวินาที การแยกแยะดังกล่าวทำให้สามารถเลือกนำเฉพาะขอบขาขึ้นจริงที่ซึ่งโครโมโซมกับแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์มาใช้เป็นจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดการนับคาบเวลา ทำให้ได้คาบและความถี่ของแรงดันอินพุตของคอนเวเตอร์ที่ถูกต้อง

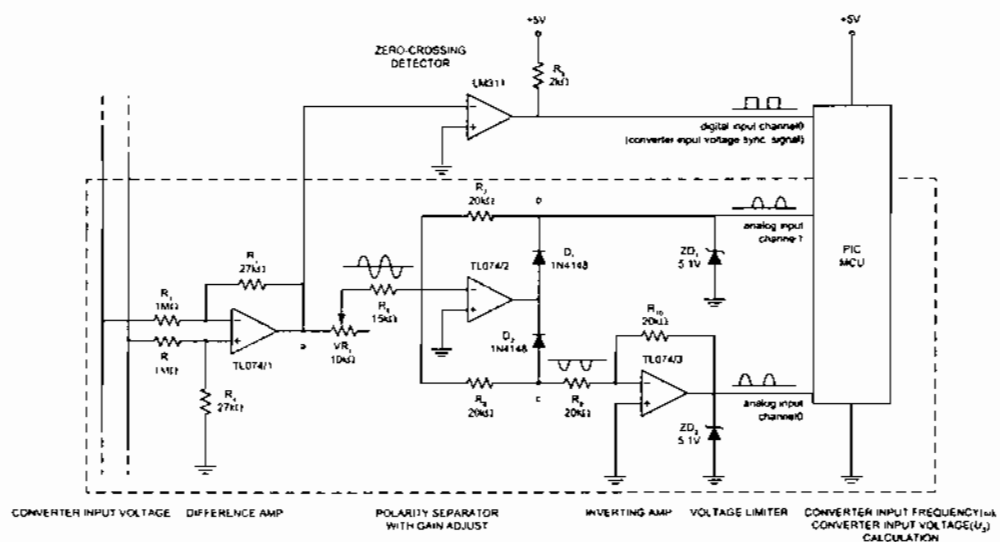


ภาพที่ 3-4 ฟังก์ชันโปรแกรมคำนวณค่าความถี่อินพุตของคอนเวอเตอร์



ภาพที่ 3-5 การแกว่งของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์บริเวณที่สัญญาณแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ผ่านศูนย์ และสัญญาณรบกวนที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์อาจมองเห็นขอบขาขึ้นของสัญญาณซิงโครไนซ์ของแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์

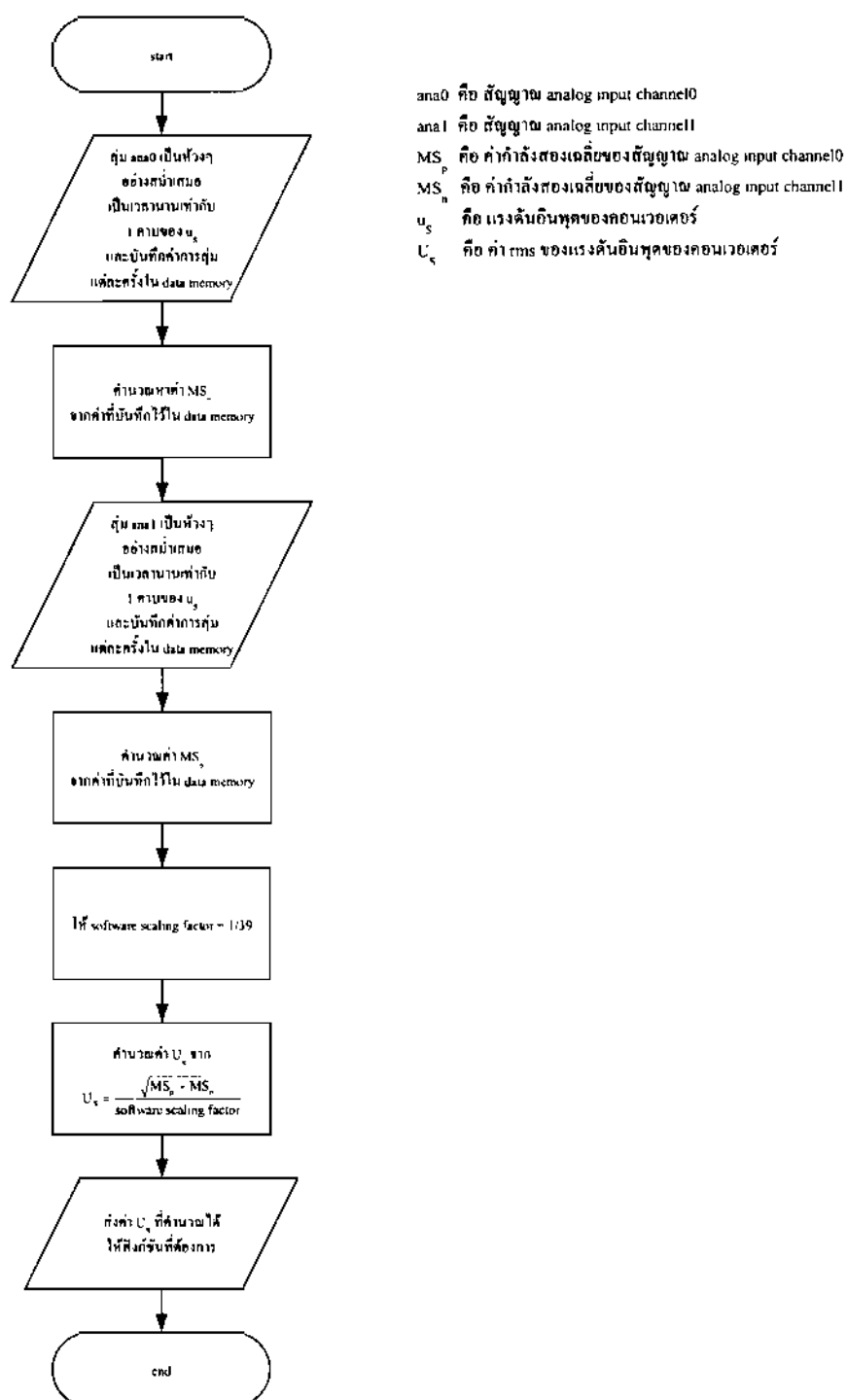
3.2 การหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ (Converter Input Voltage U_d)



ภาพที่ 3-6 วงจรในส่วนของการหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ (ภายในเส้นประ) และวงจรหาค่าความถี่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์

พิจารณาภาพที่ 3-3 อีกครั้ง ในส่วนของวงจรหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ ดังภาพที่ 3-6 หลังจากวงจรขยายสัญญาณผลต่างลดระดับสัญญาณแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ลงแล้ว แต่สัญญาณแรงดันที่ได้ยังเป็นสัญญาณที่มีทั้งค่าบวกและลบ ไม่เหมาะจะป้อนเข้าสู่แอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งรับแรงดันอินพุตได้ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้วงจรแยกสภาวะขั้วที่ปรับอัตราขยายได้ (Polarity Separator with Gain Adjust Circuit) ปรับขนาดและแยกสัญญาณครึ่งบวกและลบออกจากกัน โดยสัญญาณอินพุตที่จุด a จะถูกแยกครึ่งบวกและครึ่งลบออกจากกันแบบกลับเฟสด้วยอัตราขยาย $-R_7/(R_6+VR_1)$ สัญญาณครึ่งลบที่ถูกขยายแบบกลับเฟส (กลายเป็นสัญญาณที่มีค่าบวก) จะออกมาทางเอาต์พุตด้านแคโทดของ D_1 (จุด b) ก่อนป้อนเข้าแอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนสัญญาณครึ่งบวกที่ถูกขยายแบบกลับเฟส (กลายเป็นสัญญาณที่มีค่าลบ) ก็จะออกมาทางเอาต์พุตด้านแอโนดของ D_2 (จุด c) สัญญาณจุดนี้ต้องผ่านวงจรกลับเฟส (Inverting Amplifier with Unity Gain) อีกครั้งก่อนป้อนเข้าแอนะล็อกอินพุตอีกช่องสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ แอนะล็อกอินพุตทั้งสองช่องสัญญาณนี้ต่อกับโมดูลแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลนี้จะทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ที่ออกแบบขึ้น เพื่อคำนวณค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ แล้วส่งต่อค่าแรงดันที่คำนวณได้ให้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชันอื่นที่ต้องการค่านี้ในการประมวลผลส่วนอื่นต่อไป การคำนวณหาค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์นี้ จะถูกต้องตรงกับค่าจริงได้เมื่อค่าตัวประกอบมาตราส่วน (Scaling Factor) ทางฮาร์ดแวร์ หรืออัตราส่วนขนาดแรงดันที่จุด b (ณ เวลาที่ $u_a(t) > 0$) ต่อขนาดแรงดันจริงที่อินพุตของคอนเวอเตอร์ ณ เวลานั้น ตรงกับที่ออกแบบและระบุไว้ในซอฟต์แวร์ ค่าตัวประกอบมาตราส่วนที่ออกแบบไว้ในที่นี้คือ $1/39$ ซึ่งต้องปรับฮาร์ดแวร์ที่ VR_1 ให้ได้แอมป์ลิจูดที่จุด b เท่ากับ 4.8 โวลต์ เมื่อแรงดันที่อินพุตของคอนเวอเตอร์มีแอมป์ลิจูด 187.2 โวลต์

ซอฟต์แวร์คำนวณค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์มีผังงานดังภาพที่ 3-7

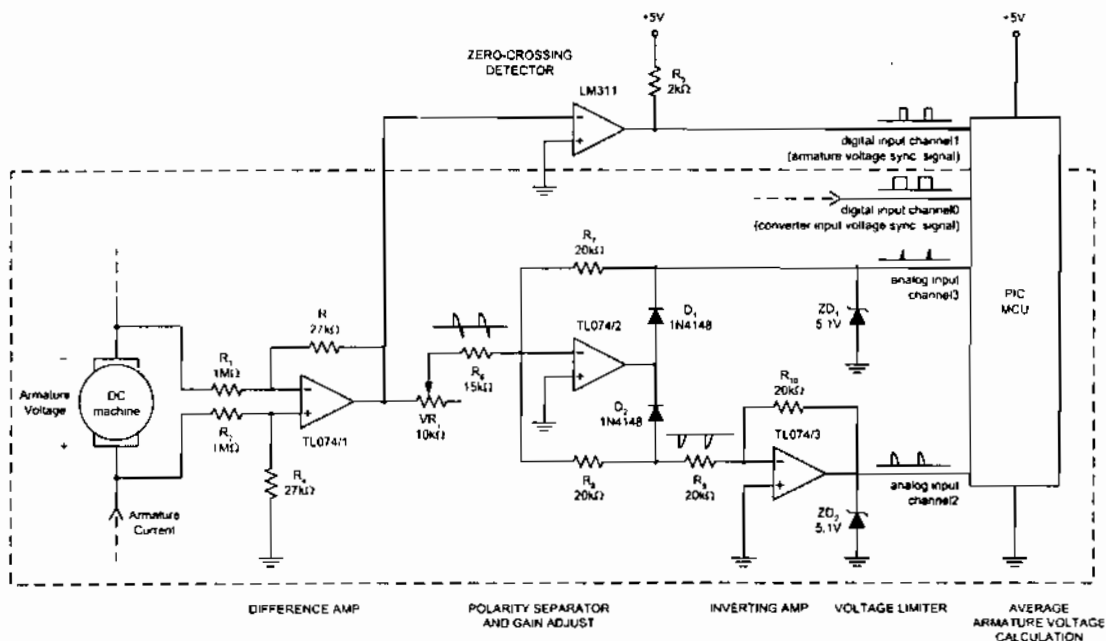


ภาพที่ 3-7 ฟังก์ชันโปรแกรมการคำนวณค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์

3.3 การหาค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ (Armature Voltage U_a)

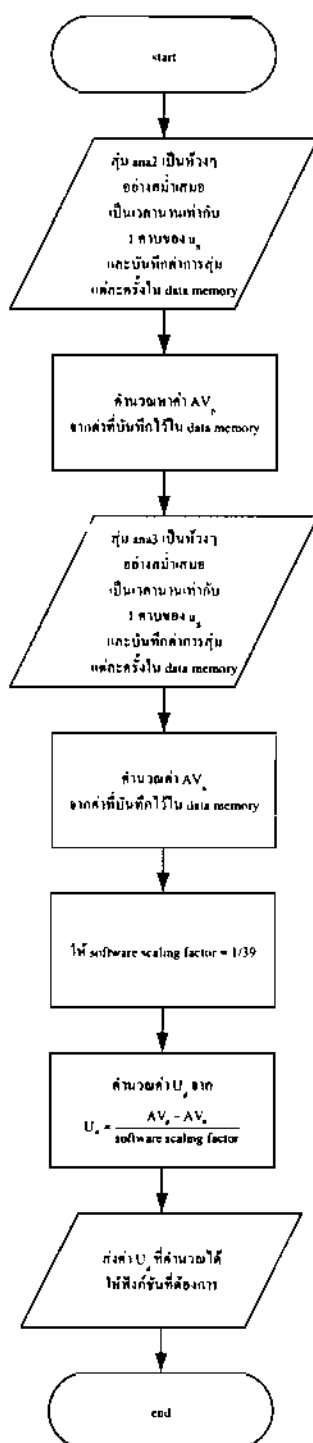
ถ้า R_a กับ L_a ในภาพที่ 2-1(ก) เทียบเคียงได้กับวงจรอาร์เมเจอร์ขณะล่อคโรเตอร์ จะพบว่า แรงดัน u_a ในภาพที่ 2-1(ข) ซึ่งก็คือแรงดันอาร์เมเจอร์ขณะล่อคโรเตอร์ มีทั้งส่วนที่เป็นค่าบวกและส่วนที่เป็นค่าลบ และอาจมีแอมพลิฟายด์เท่ากับแรงดัน u_s ดังนั้นวงจรทางฮาร์ดแวร์ที่ใช้ลดระดับสัญญาณแรงดันอาร์เมเจอร์และจัดการกับสัญญาณแรงดันที่มีค่าลบก่อนนำสัญญาณดังกล่าวไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงเหมือนวงจรที่ใช้ลดระดับและจัดแต่งสัญญาณแรงดัน u_s ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังภาพที่ 3-8 แต่สำหรับกระบวนการคำนวณทางซอฟต์แวร์จะแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากค่า U_a ที่ต้องการเป็นปริมาณเฉลี่ย ไม่ใช่ปริมาณ rms เหมือนในกรณีของค่า U_s

ซอฟต์แวร์คำนวณค่าแรงดันอาร์เมเจอร์มีผังงานดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-8 ฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ (ภายในเส้นประ)

และวงจรหาค่ามอดูล



ana2 คือ สัญญาณ analog input channel2

ana3 คือ สัญญาณ analog input channel3

AV_p คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ analog input channel2

AV_n คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ analog input channel3

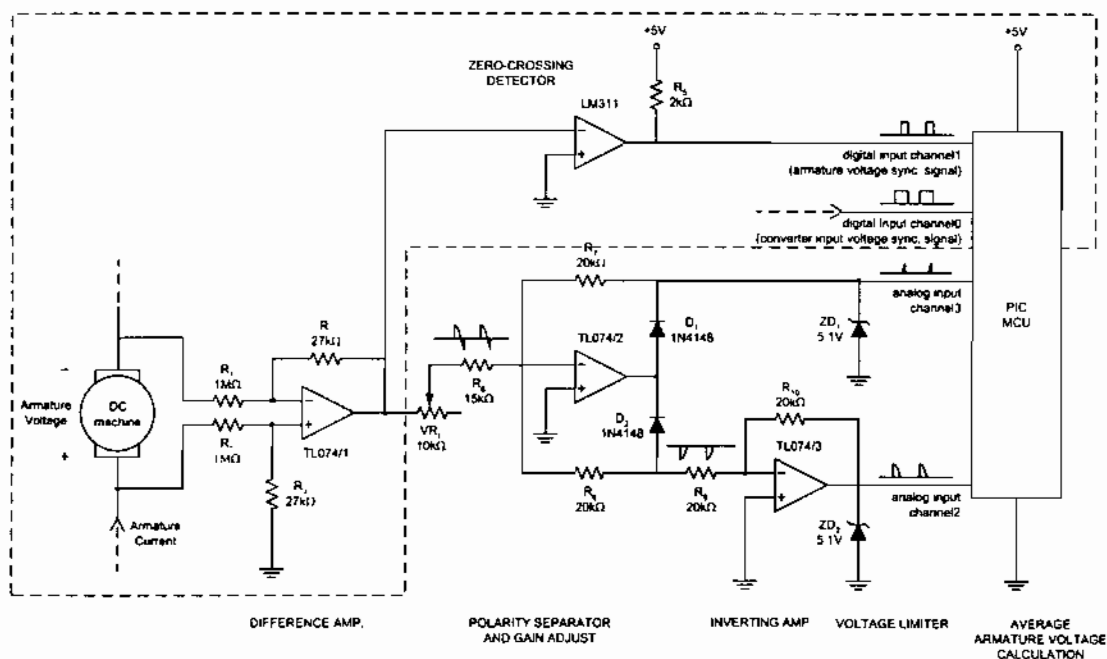
u_s คือ แรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์

U_d คือ ค่าเฉลี่ยของแรงดันอาร์เมเจอร์

ภาพที่ 3-9 ผลงานโปรแกรมการคำนวณค่าแรงดันอาร์เมเจอร์

3.4 การหาค่ามุมจุดชนวน (Firing Angle α')

มุมจุดชนวน α' เป็นมุมทางไฟฟ้า นับจากจุดผ่านศูนย์ทางบวก (Positive Zero Crossing) ของคอนเวอเตอร์ถึงจุดที่เริ่มจุดชนวนไทรสเตอร์ จากภาพที่ 2-1(ข) เราสามารถบอกจุดผ่านศูนย์ทางบวกของคอนเวอเตอร์ได้โดยดูจากการผ่านศูนย์ไปในทางบวกของสัญญาณแรงดันอินพุตของคอนเวอเตอร์ (u_s Signal) และสามารถบอกจุดเริ่มจุดชนวนได้โดยดูจากการเปลี่ยนระดับจากศูนย์ไปเท่ากับ u_s อย่างทันทีทันใดของสัญญาณแรงดันที่โหลด (u_a Signal) การคำนวณหา α' ด้วยซอฟต์แวร์อาศัยการนับเวลาระหว่างจุดสังเกตดังกล่าวบนสัญญาณ u_s และ u_a ซึ่งซอฟต์แวร์ในส่วนของการพิจารณาลักษณะสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งของจุดทั้งสองจะออกแบบได้ง่ายและสั้นถ้าสัญญาณ u_s และ u_a ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์ ตามวงจรภาพที่ 3-3 และภาพที่ 3-10 เสียก่อน

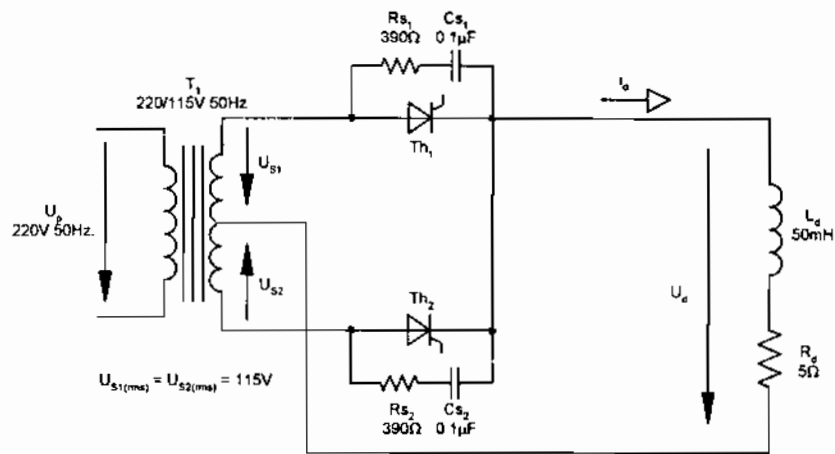


ภาพที่ 3-10 ฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่ามุมจุดชนวน (ภายในเส้นประ)

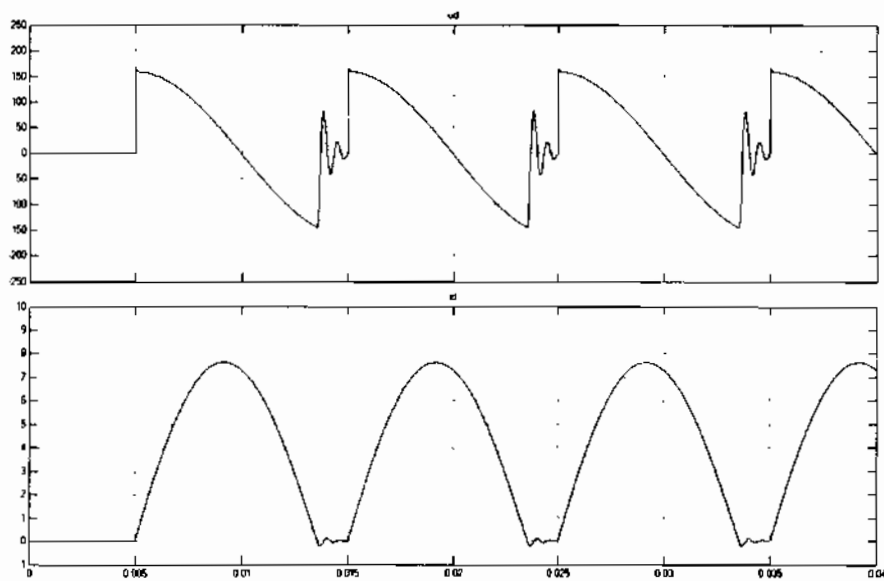
และวงจรหาค่าแรงดันอาร์เมเจอร์

แต่ในทางปฏิบัติภาคกำลังของคอนเวอเตอร์จะมีสแน็บเบอร์ป้องกันไทรสเตอร์จากแรงดัน dv/dt เกินพิกัด ดังวงจรภาพที่ 3-11(ก) สแน็บเบอร์นี้ส่งผลให้แรงดัน u_a เกิดการแกว่งขณะไทรสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส ดังภาพที่ 3-11(ข) การแกว่งดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวกันของวงจรสแน็บเบอร์และโหลดขณะไทรสเตอร์อยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส เกิดเป็นวงจรอันดับสอง ส่งผลให้สัญญาณ

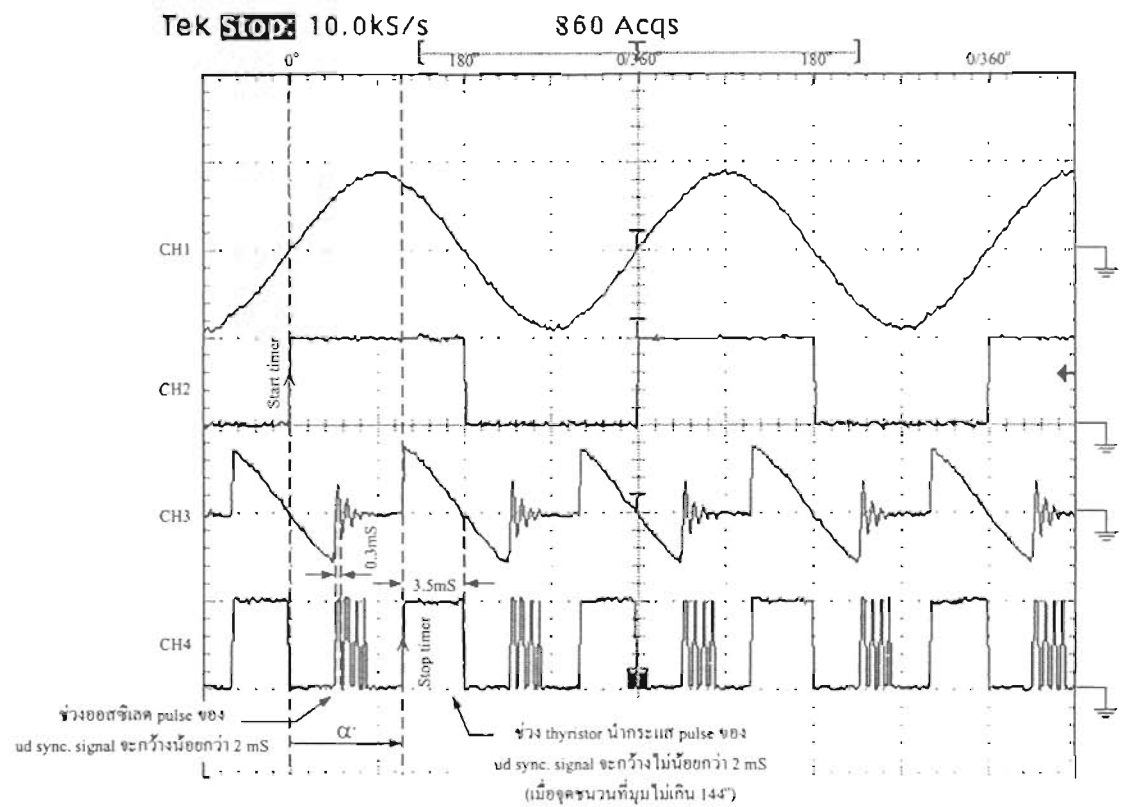
u_s และ u_d ก่อนและหลังถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์ เป็นดังภาพที่ 3-12 จุดที่เริ่มจุดชนวนไทรสเตอร์ สัญญาณ u_d (CH3 ในภาพที่ 3-12) จะเปลี่ยนระดับจากศูนย์ไปเท่ากับสัญญาณ u_s การเปลี่ยนระดับนี้ส่งผลให้สัญญาณ u_d ซิงโครไนซ์เกิดขอบขาขึ้น (CH4 ในภาพที่ 3-12) ซึ่งซอฟต์แวร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะรู้จุดเริ่มจุดชนวนได้จากขอบขาขึ้นนี้ แต่สัญญาณ u_d ซิงโครไนซ์ยังมีขอบขาขึ้นอื่นซึ่งเกิดจากการแกว่งของ u_d ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องแยกแยะและไม่นำขอบขาขึ้นจากการแกว่งมาใช้ระบุจุดเริ่มจุดชนวน การแยกแยะอาศัยความกว้างของระดับลอจิกสูงหลังขอบขาขึ้นนั้นๆ เป็นเงื่อนไข โดยโปรแกรมที่ออกแบบตามผังงานภาพที่ 3-13 จะมอง พัลส์สี่เหลี่ยมที่กว้างน้อยกว่า 2 มิลลิวินาที ว่าเป็นพัลส์ที่เกิดจากการแกว่งของสัญญาณ u_d ดังนั้นขณะออนไลน์หาพารามิเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์นี้ จึงต้องจุดชนวนไทรสเตอร์ด้วยมุมไม่เกิน 144° เพื่อให้ขณะไทรสเตอร์นำกระแส เกิดพัลส์สัญญาณ u_d ซิงโครไนซ์ ที่กว้างไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิวินาที (เมื่อระบบไฟสลับ u_s มีความถี่ 50 เฮิรตซ์)



(ก) วงจรภาคกำลัง

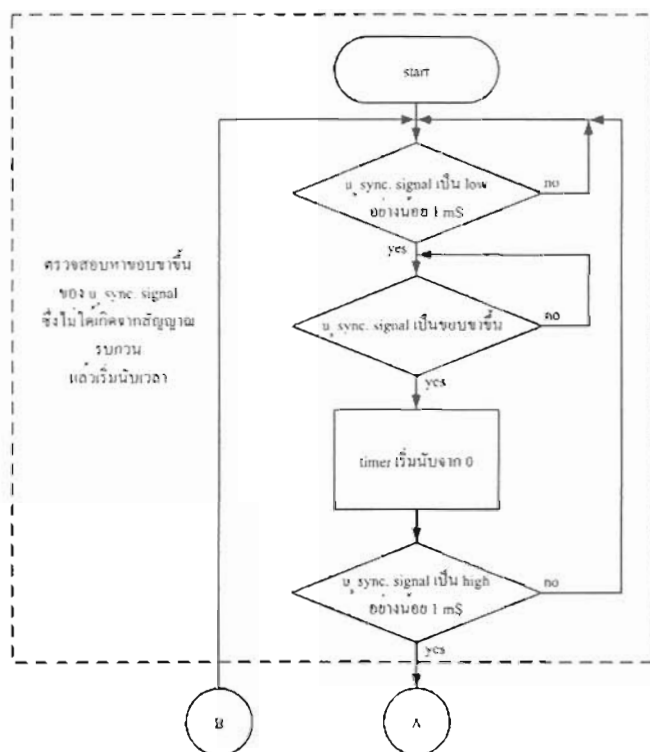
(ข) แรงดันที่โหลด (u_o) และกระแสโหลด (i_o) จากการจำลอง

ภาพที่ 3-11 คอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟส 1 เฟส 2 พัลส์ เมื่อมีโหลดเป็น
ความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ

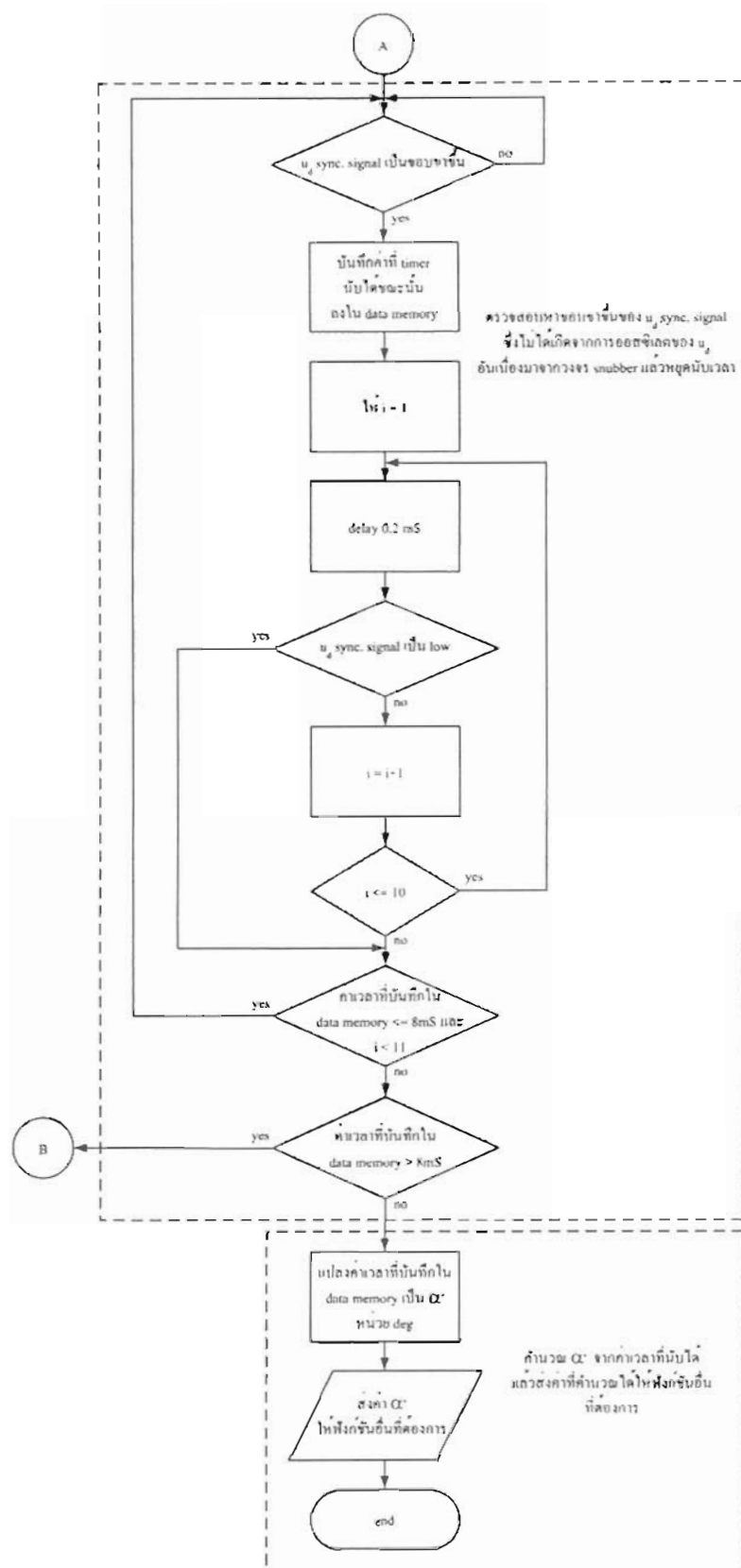


CH1 : u_s signal at zero-crossing detector input, 5V/div.
 CH2 : u_s sync. signal at zero-crossing detector output, 5V/div.
 CH3 : u_s signal at zero-crossing detector input, 5V/div.
 CH4 : u_s sync. signal at zero-crossing detector output, 5V/div.
 time : 5mS/div.

ภาพที่ 3-12 สัญญาณ u_s และ u_d ก่อนและหลังถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล
 ด้วยวงจรตรวจจับการผ่านศูนย์



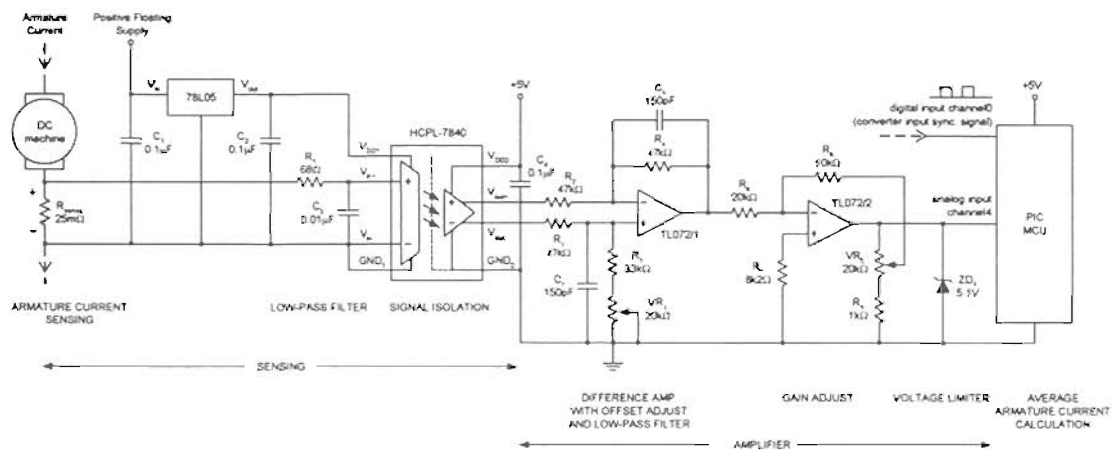
ภาพที่ 3-13 ฟังก์ชันโปรแกรมการหาค่ามุมจุดชนวน



ภาพที่ 3-13 (ต่อ)

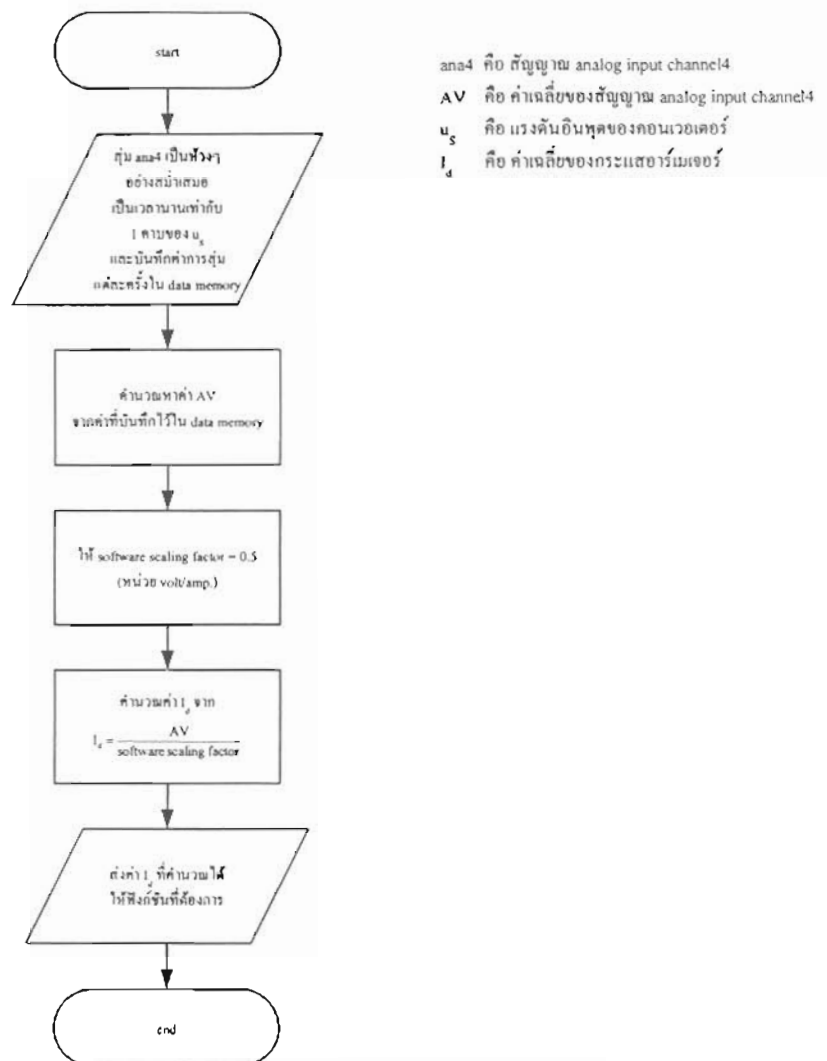
3.5 การหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ (Armature Current I_a)

เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3 ที่ผ่านมา หาก R_a กับ L_a ในภาพที่ 2-1(ก) เทียบเคียงได้กับวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแส i_a ในภาพที่ 2-1(ข) ก็จะเป็นกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ ซึ่งมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นวงจรฮาร์ดแวร์ที่ใช้ปรับสัญญาณกระแสอาร์เมเจอร์ให้เหมาะสมกับการนำไปคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงประกอบด้วยส่วนหลักๆ เพียง 2 ส่วนคือ ส่วนตรวจจับ (Sensing) และส่วนขยายสัญญาณ (Amplifier) ดังภาพที่ 3-14 การที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณค่ากระแสอาร์เมเจอร์ออกมาได้อย่างถูกต้องตรงกับค่าจริงได้นั้น ตัวประกอบมาตราส่วนทางฮาร์ดแวร์ หรืออัตราส่วนของแรงดันชั่วขณะที่แอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อกระแสอาร์เมเจอร์ขณะนั้นต้องตรงกับที่ออกแบบและระบุไว้ในซอฟต์แวร์ โดยค่าตัวประกอบมาตราส่วนที่ออกแบบไว้ในที่นี้คือ 0.5 โวลต์/แอมแปร์ ดังนั้นจึงต้องปรับฮาร์ดแวร์ที่ VR_2 ให้แรงดันที่แอนะล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่า 1 โวลต์เมื่อกระแสอาร์เมเจอร์ขณะนั้นมีค่า 2 แอมแปร์ โมดูลแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงค่าผิดพลาดเมื่อแอนะล็อกอินพุตมีแรงดันสูงกว่าแรงดันอ้างอิง (ในที่นี้โมดูลแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์ของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นระดับแรงดันอ้างอิง) ดังนั้นระบบที่ออกแบบนี้จึงใช้งานได้กับกระแสอาร์เมเจอร์ที่มีแอมพลิจูดไม่เกิน 10 แอมแปร์



ภาพที่ 3-14 ฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่ากระแส I_a และ $i_a(t)$

สำหรับซอฟต์แวร์คำนวณค่ากระแสอาร์เมเจอร์ซึ่งเป็นปริมาณเฉลี่ย มีผังงานดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 ฟังก์ชันโปรแกรมการคำนวณค่ากระแสอาร์เมเจอร์

3.6 การหาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่เวลา t (Instantaneous Armature Current $i_d(t)$)

เนื่องจากกระแสอาร์เมเจอร์ $i_d(t)$ และเวลา t ที่หาค่าได้จะถูกนำไปแทนค่าตัวแปร $i_d(t)$ และ t ในสมการที่ (2-24) ดังนั้นกระแส $i_d(t)$ และ t ที่จะหาค่านี้ ต้องสอดคล้องกับนิยามของ $i_d(t)$ และ t ในสมการที่ (2-24) คือ $i_d(t)$ เป็นกระแสชั่วขณะใด ๆ ที่โหนด ณ เวลา t ใดๆ ซึ่งคอนเวอเตอร์กำลังนำกระแสในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง จากหัวข้อ 2.2 เราทราบว่าเงื่อนไขของมุมจุดชนวนคอนเวอเตอร์ 2 พัลส์ ที่จะทำให้โหนด R-L อนุกรมใดๆ เกิดกระแสไม่ต่อเนื่องคือมุมจุดชนวนที่ไม่ต่ำกว่า 90° และจากข้อจำกัดตามเทคนิคการหาค่ามุมจุดชนวนในหัวข้อ 3.4 ทำให้ต้องจุดชนวนที่มุมไม่เกิน 144° ดังนั้นมุมจุดชนวนที่สามารถใช้ขณะออนไลน์หาค่าพารามิเตอร์จึงมีค่า 90° - 144° หรือที่เวลาตั้งแต่ 5 มิลลิวินาที จนถึง 8 มิลลิวินาที หลังจาก u_s ผ่านศูนย์ นั่นคือกระแส i_d จะเริ่มไหล

อย่างช้าที่สุดที่เวลา 8 มิลลิวินาที (จุดชนวนด้วยมุม 144°) ส่วนเวลาที่กระแสหยุดไหลเร็วที่สุด (เมื่อโหลดมีค่า $L_d \ll R_d$) คือหลังจากเวลา 10 มิลลิวินาที หรือ 180° เล็กน้อย ดังนั้นช่วงที่ i_d ไหลอย่างแน่นนอนคือที่เวลาระหว่าง 8 มิลลิวินาที ถึง 10 มิลลิวินาที (144° - 180°) ซึ่ง t_x ต้องเป็นค่าในช่วงเวลาดังกล่าว ในทางปฏิบัติ t_x ควรเป็นเวลาที่ $i_d(t_x)$ มีค่าสูง เพื่อให้อัตราส่วนสัญญาณรบกวนเทียบกระแสโหลด ($\text{noise}/i_d(t_x)$) มีค่าต่ำ ทำให้ค่าผิดพลาด (Error) ในการตรวจวัด $i_d(t_x)$ มีค่าต่ำ เวลา t ที่เกิด $I_{d\max}$ สามารถหาได้จากอนุพันธ์ของสมการที่ (2-24) ดังนี้

จากสมการที่ (2-24)

$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d} \cos \phi (\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha' - \phi) e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi}) \quad (3-1)$$

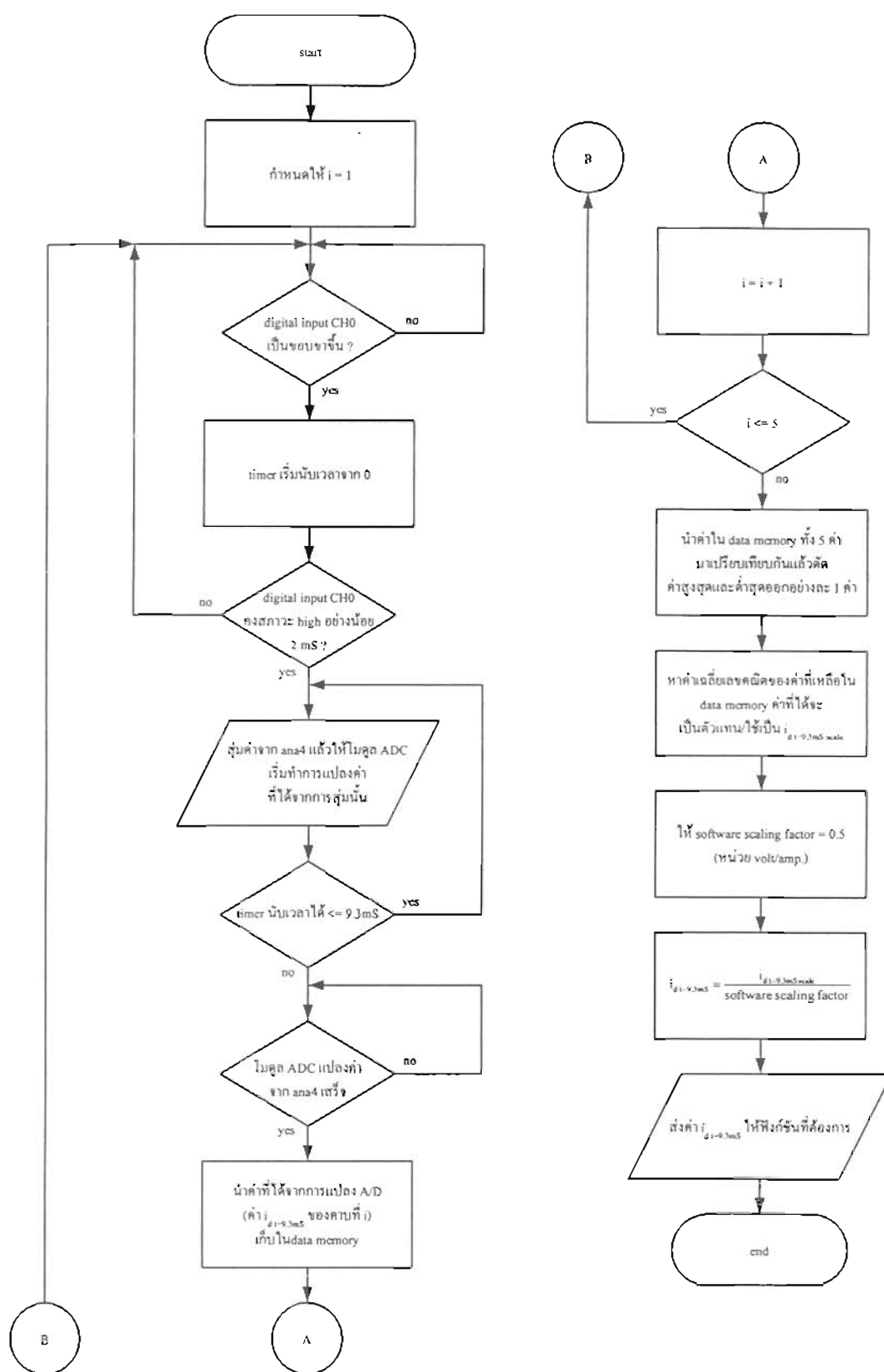
$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\sqrt{2}U_s}{R_d} \cos \phi \left(\omega \cos \phi \cos \omega t + \omega \sin \phi \sin \omega t + \frac{\omega}{\tan \phi} \sin(\alpha' - \phi) e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi} \right) \quad (3-2)$$

ให้ $di_d/dt = 0$ จะได้

$$0 = \omega \cos \phi \cos \omega t + \omega \sin \phi \sin \omega t + \frac{\omega}{\tan \phi} \sin(\alpha' - \phi) e^{\alpha'/\tan \phi} e^{-\omega t/\tan \phi} \quad (3-3)$$

หากแทนค่า ω , ϕ และ α' ลงในสมการที่ (3-1) ก็จะสามารถหาค่าเวลา t ที่เกิด $I_{d\max}$ ได้ ค่า ϕ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงขนาด 1 kW เท่ากับ 74.53° เมื่อ $\omega = 314 \text{ rad/sec}$. (คำนวณจากผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิง ด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น ซึ่งได้ค่า $L_d = 61.33$ มิลลิเฮนรี และ $R_d = 5.33$ โอห์ม) แทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3-1) โดยให้มุม α' เท่ากับ 90° พบว่า $I_{d\max}$ เกิดที่เวลา 9.3 mS และถ้าเพิ่มค่ามุม α' ขึ้น จะทำให้เวลาที่เกิด $I_{d\max}$ ช้าออกไปจากเดิม โดยถ้าเพิ่มมุมจุดชนวนเป็น 144° $I_{d\max}$ จะเกิดที่เวลา 9.85 มิลลิวินาที ในงานวิจัยนี้เราจะทำการออนไลน์หาค่าพารามิเตอร์โดยใช้มุมจุดชนวนประมาณ 90° เนื่องจากพบว่าที่มุมจุดชนวนค่านี้ กระแสอาร์เมเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงจะมีค่าใกล้เคียงพิกัด ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ ณ จุดทำงานใกล้เคียงพิกัด ซึ่งเป็นตัวแทนของพารามิเตอร์ ณ จุดการทำงานทั่วไปได้ดี (กรณีไม่เจาะจงหาพารามิเตอร์ ณ จุดการทำงานที่กระแสค่าหนึ่งค่าใดโดยเฉพาะ) ดังนั้นจึงเลือกใช้ $t_x = 9.3$ มิลลิวินาทีในการสุ่มค่า $i_d(t_x)$ เพื่อใช้ในการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ (2-24) ค่า $t_x = 9.3 \text{ mS}$ นี้เป็นค่าที่เหมาะสมกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าอ้างอิงที่สุด และสามารถใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปพิกัดอื่นๆ ได้ แต่อาจไม่เกิดการสุ่มค่า $i_d(t_x)$ ณ จุดที่ให้สัญญาณรบกวนเทียบกระแสโหลดต่ำที่สุด

สัญญาณ $i_d(t_x)$ จากอาร์เมเจอร์จะเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยช่องทางเดียวกันกับสัญญาณในหัวข้อ 3.5 ตามวงจรภาพที่ 3-14 แต่เป็นแค่ช่วงเวลาการทำงานของโปรแกรมหลัก (Main Software) ถึงแม้วงจรตรวจวัดกระแสที่ใช้จะมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ทั้งภายนอกและภายในชิป IC HCPL-7840 กำจัดสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ออกไปได้ แต่สัญญาณรบกวนส่วนน้อยที่เหลืออยู่ทำให้ค่า $i_d(t_x)$ ที่สุ่มในแต่ละครั้งคลาดเคลื่อนไป แม้จะไม่มาก แต่ก็ทำให้ความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้ไม่ดี เราสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของค่า $i_d(t_x)$ ด้วยการสุ่มและเก็บค่า $i_d(t_x)$ ซ้ำที่เวลา $nT+t_x$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่าทั้งหมด การเฉลี่ยเป็นการทำให้สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) ที่ปนอยู่กับสัญญาณจากการสุ่มแต่ละครั้งเกิดการหักล้างกันเอง ในที่นี้เราทำการสุ่มและเก็บข้อมูลเป็นเวลา $i_d(nT+t_x)$ เมื่อ $n = 0$ ถึง 4 และ $t_x = 9.3$ มิลลิวินาที แล้วตัดข้อมูลที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดซึ่งอาจมีแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน (noise) ค่าสูง ขากแก่การถูกหักล้างด้วยสัญญาณรบกวนแบบสุ่มตัวอื่นออก ก่อนหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เหลือตามผังงานภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-16 ฟังก์ชันโปรแกรมหาค่ากระแสแอมเพอร์ที่เวลา 9.3 มิลลิวินาที ($i_{d=9.3ms}$)

บทที่ 4

การทดสอบหาค่าตัวแปรอิสระที่จำเป็นสำหรับการแก้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์และการทดลองประมาณค่าพารามิเตอร์

การทดลองในบทนี้มีจุดประสงค์เพื่อ ทดสอบการทำงานร่วมกันของระบบทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่สร้างตามสมมติฐาน, ทฤษฎี และการออกแบบในบทก่อนหน้านี้ โดยเน้นที่การหาความแม่นยำ, การกระจายตัว และลักษณะความเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอื่นๆ การทดสอบในขั้นแรกจะแยกทำทีละระบบย่อยที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรแต่ละตัว เพื่อคุณสมบัติการทำงานเฉพาะส่วนย่อยนั้นๆ โดยขณะทดสอบส่วนย่อยหนึ่ง ส่วนย่อยอื่นจะถูกจำกัดการทำงานให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อลดผลกระทบซึ่งอาจมีต่อส่วนย่อยที่กำลังทดสอบให้เหลือน้อยที่สุด ส่วนการทดสอบขั้นสุดท้ายจะเป็นการหาคุณสมบัติของระบบรวม เมื่อทุกระบบย่อยทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่องเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำ

คุณสมบัติความแม่นยำ, การกระจายตัว และลักษณะความเบี่ยงเบนจากค่าอ้างอิง ซึ่งได้จากการทดสอบแต่ละระบบย่อย เป็นข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์สาเหตุของความคลาดเคลื่อนและพิสัยความคลาดเคลื่อนของระบบรวมหรือผลลัพธ์ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ

4.1 การทดสอบ การหาค่าความถี่สัญญาณแรงดันต่ำ

4.1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่าความถี่ที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง ในย่านความถี่ใกล้ความถี่สาย (Line Frequency) โดยใช้ค่าความถี่ที่วัดได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคปเป็นค่าอ้างอิง ในการใช้งานจริงระบบย่อยในส่วนของการหาค่าความถี่นี้จะทำหน้าที่หาค่าความถี่สาย จากแรงดันสายที่ถูกลดทอนระดับลง

4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

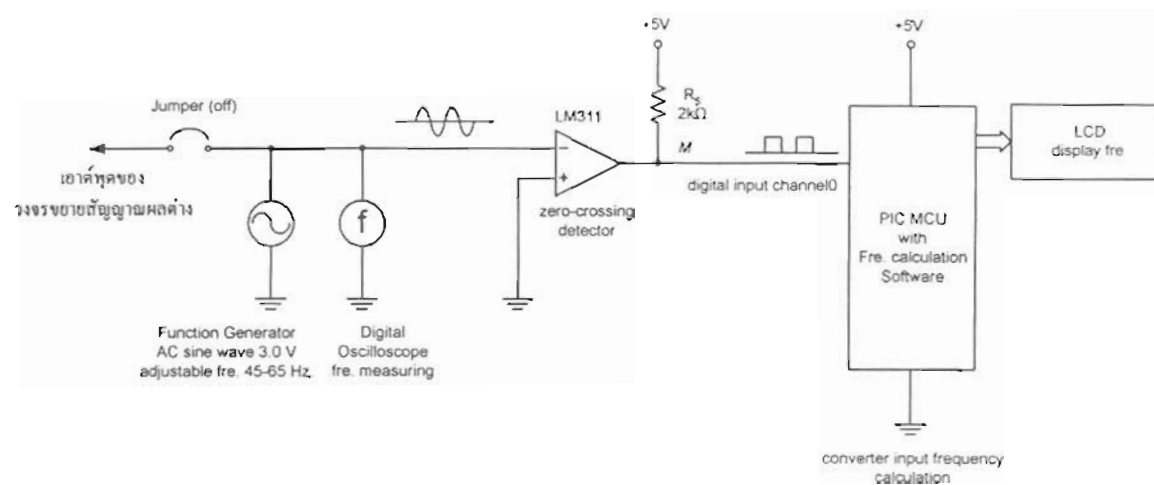
4.1.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC Development Board V2.10)

4.1.2.2 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

4.1.2.3 ตัวกำเนิดฟังก์ชัน (Function Generator WAVETEK 184)

4.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.1.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาความถี่ของสัญญาณแรงดันต่ำ ออกจากส่วนอื่น โดยถอดสายต่อสั้น (Jumper) ที่เชื่อมระหว่างเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณผลต่างกับอินพุตของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ออก และปลดสายสัญญาณแอนะล็อกและดิจิตอลอินพุตทั้งหมดที่เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ออก ยกเว้นสัญญาณซิงโครไนซ์ของสัญญาณที่ต้องการหาความถี่ จะได้วงจรที่ใช้ทดสอบดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 วงจรทดสอบการหาค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันต่ำ

4.1.3.2 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่าความถี่ และส่วนการแสดงผล ออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1.3.3 จำยสัญญาณทดสอบ โดยใช้ตัวกำเนิดฟังก์ชันจ่ายสัญญาณไซน์สมมาตรขนาด 3 โวลต์ ไม่มีออฟเซต เข้าที่อินพุตของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ และต่อดิจิตอลออสซิลโลสโคปวัดความถี่ที่โนดนี้

4.1.3.4 ปรับความถี่ทดสอบ โดยปรับความถี่ของตัวกำเนิดฟังก์ชันเป็นขั้นๆ ขั้นละ 5 เฮิร์ตซ์ ตั้งแต่ 45 เฮิร์ตซ์ จนถึง 65 เฮิร์ตซ์ แล้วบันทึกผลค่าความถี่ที่อ่านได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคป และความถี่ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงทาง LCD

4.1.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบหาค่าความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันต่ำ

Fre _{meter} (Hz.)	Fre _{MCU} (Hz.)	Error (Hz.) $(Fre_{MCU} - Fre_{meter})$	Error (%) $\left(\frac{Fre_{MCU} - Fre_{meter}}{Fre_{meter}} * 100 \right)$
45.0	45.00	0.0	0
45.0	44.98	0.0	0
45.0	44.97	0.0	0
50.0	50.02	0.0	0
50.0	50.01	0.0	0
50.0	50.01	0.0	0
55.0	55.00	0.0	0
55.0	54.98	0.0	0
55.0	55.00	0.0	0
60.0	60.12	0.1	0.17
60.0	60.09	0.1	0.17
60.0	60.07	0.1	0.17
65.0	64.99	0.0	0
65.0	64.97	0.0	0
65.0	64.94	-0.1	-0.15

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่องกำเนิดฟังก์ชันที่ใช้จ่ายความถี่ทดสอบให้สัญญาณที่ค่อนข้างนิ่งแต่ในหลักทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่งหรือ 1 D.P. (Decimal Place) ดังนั้นผลลัพธ์จากการบวกหรือลบเลขกับค่าดังกล่าวจึงมีทศนิยมถูกต้อง 1 ตำแหน่ง

4.1.5 สรุปผลการทดลอง ค่าความถี่ที่ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ของเราได้มีความแม่นยำสูงคลอชิด่านความถี่ทดสอบ ความแม่นยำดังกล่าวอ้างอิงเทียบกับค่าที่วัดด้วยฟังก์ชันวัดความถี่ของออสซิลโลสโคปรุ่นที่ใช้ทดสอบ นอกจากนี้ค่าที่ได้จากการทดสอบแต่ละครั้งมีการกระจายตัวต่ำมาก ระบบการหาความถี่จึงมีความน่าเชื่อถือสูงในสภาวะแวดล้อมตามการทดสอบนี้ แต่ในการใช้งานจริงที่ระบบดังกล่าวต้องทำงานร่วมกับระบบอื่น การรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการรบกวนทางแหล่งจ่ายไฟของวงจร อาจส่งผลให้ความแม่นยำของค่าความถี่ที่ระบบคำนวณได้ ลดลงบ้างเล็กน้อย

4.2 การทดสอบ การหาค่าความถี่สัญญาณแรงดันสูง

4.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่าความถี่ที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง เมื่อทดสอบที่ระดับแรงดันใช้งานจริง (ประมาณ 110-120 โวลต์) โดยใช้ค่าความถี่ที่วัดได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคปเป็นค่าอ้างอิง ในการใช้งานจริงระบบย่อยในส่วนของ การหาค่าความถี่นี้จะทำหน้าที่หาค่าความถี่สาย

4.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC DevelopmentBoard V2.10)

4.2.2.2 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

4.2.2.3 หัววัดสัญญาณผลต่าง (Differential Probe YOKOGAWA 700925)

4.2.2.4 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer 220V/110V 1.6kVA)

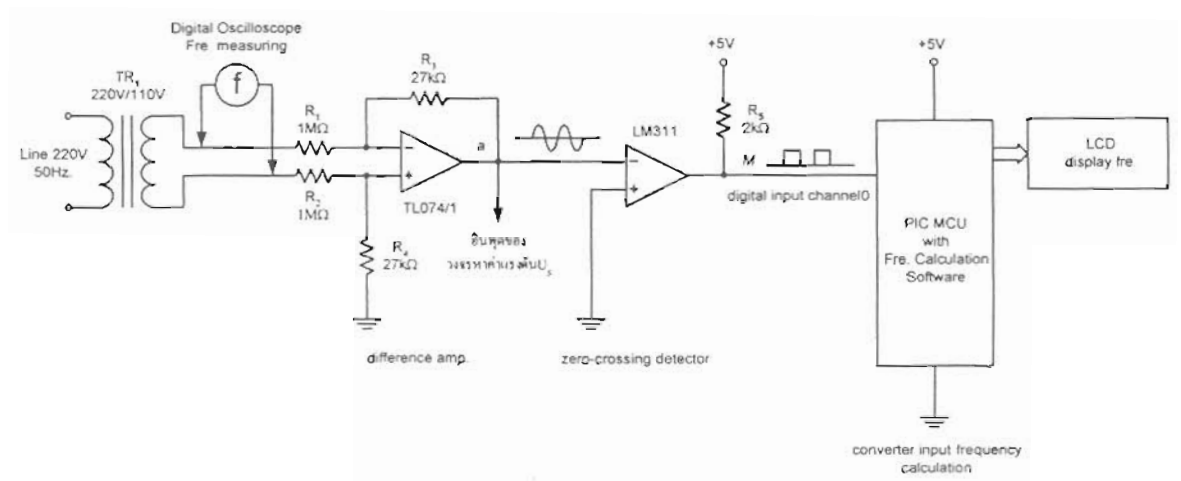
4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.2.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาความถี่ออกจากส่วนอื่นโดยปลดสายสัญญาณแอนะล็อกและดิจิตอลอินพุตทั้งหมดที่เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ออก ยกเว้นสัญญาณซิงโครไนซ์ของสัญญาณที่ต้องการหาความถี่ จะได้วงจรที่ใช้ทดสอบดังภาพที่ 4-2 (โนด a มีสาขาที่ต่อไปยังอินพุตของวงจรหาค่าแรงดัน U_s แต่ไม่จำเป็นต้องปลดสายดังกล่าวออกเนื่องจากอินพุตดังกล่าวมีความต้านทานสูงมาก จนเสมือนว่าเปิดวงจร)

4.2.3.2 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่าความถี่ และส่วนการแสดงผล ออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.2.3.3 จ่ายแรงดันทดสอบ โดยป้อนแรงดันสาย 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ เข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลง TR₁ แล้วบันทึกค่าความถี่ที่อ่านได้จากดิจิตอลออสซิลโลสโคป และค่าความถี่ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงทาง LCD ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4-2 นอกจากนี้ให้ทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณที่ขดทุติยภูมิของหม้อแปลง TR₁ เทียบกับรูปคลื่นสัญญาณอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อตรวจสอบการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณทั้งสอง ทั้งขณะคอนเวอเตอร์ไม่จ่ายโหลด (ไม่จุดชนวนไทรสเตอร์) และขณะคอนเวอเตอร์จ่ายโหลด ซึ่งในกรณีนี้ทดสอบที่กระแสโหลด 4.5 แอมแปร์ (จุดชนวนไทรสเตอร์ที่มุม 90 องศา) รูปคลื่นดังกล่าวแสดงในภาพที่ 4-3 และภาพที่ 4-4 ตามลำดับ

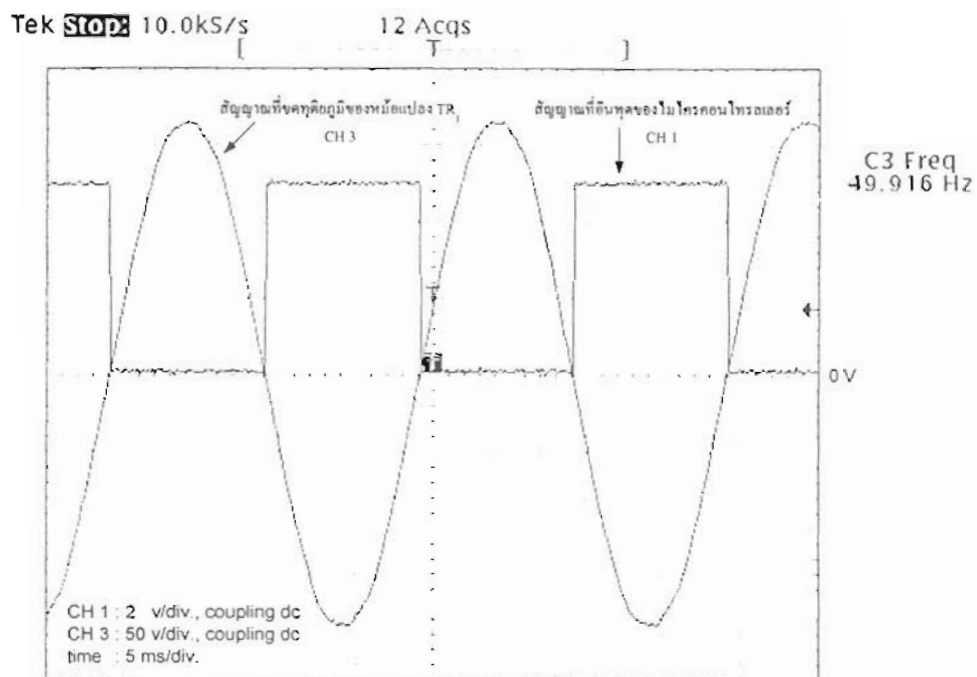
4.2.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 4-2, ภาพที่ 4-3 และภาพที่ 4-4



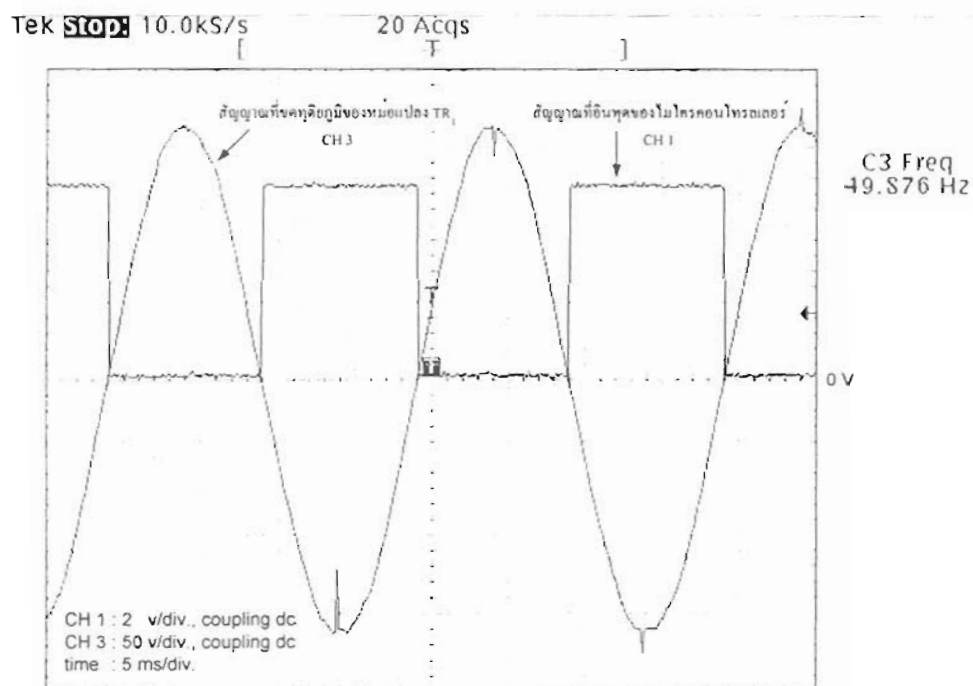
ภาพที่ 4-2 วงจรทดสอบการหาค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันสูง

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบหาค่าความถี่ของสัญญาณทดสอบแรงดันสูง (ไม่จุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์ ขณะทดสอบ)

Fre_{meter} (Hz.)	Fre_{MCU} (Hz.)	Error (Hz.) $(Fre_{MCU} - Fre_{meter})$	Error (%) $\left(\frac{Fre_{MCU} - Fre_{meter}}{Fre_{meter}} \times 100 \right)$
50.0	49.98	0.0	0
50.0	49.99	0.0	0
50.0	49.99	0.0	0
50.0	50.03	0.0	0
50.0	50.05	0.1	0.2
50.0	50.04	0.0	0
50.0	50.06	0.1	0.2
50.0	50.08	0.1	0.2
50.0	49.99	0.0	0
50.0	50.01	0.0	0



ภาพที่ 4-3 สัญญาณที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง TR₁ กับสัญญาณที่อินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อไม่จุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์



ภาพที่ 4-4 สัญญาณที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง TR₁ กับสัญญาณที่อินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อจุดชนวนไทรสเตอร์ของคอนเวอเตอร์ที่มุม 90 องศา

4.2.5 สรุปผลการทดลอง การทดลองนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานจริงมากขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ แต่ค่าที่ได้ยังคงมีความแม่นยำสูงและมีการกระจายตัวต่ำ ระบบจึงมีความน่าเชื่อถือสูงแม้จะใช้งานกับสัญญาณระดับแรงดันสาย สำหรับภาพที่ 4-3 และ ภาพที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบย่อยส่วนอื่นๆ ทำงาน จะเกิดการรบกวนระหว่างระบบ แต่สัญญาณรบกวนดังภาพ 4-4 ไม่เป็นปัญหาต่อความแม่นยำของระบบหาค่าความถี่เนื่องจากการออกแบบป้องกันไว้โดยชิพวงจรรวม LM311 ที่นำมาใช้มีอินพุตเป็นฮิสเตอร์รีซิสช่วยป้องกันผลของสัญญาณรบกวนระดับต่ำๆ ได้ นอกจากนี้การออกแบบซอฟต์แวร์ที่ได้กล่าวในบทที่ 3 มีการตรวจเช็คเพื่อยืนยันขอบข่ายขึ้นแท่งจริง วิธีนี้ช่วยป้องกันผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีแอมพลิจูดสูงได้

4.3 การทดสอบ การหาค่าแรงดันประสิทธิผล

4.3.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่าแรงดันประสิทธิผลที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่าแรงดันที่วัดด้วยโวลต์มิเตอร์เป็นค่าอ้างอิง ในการใช้งานจริงระบบย่อยในส่วนของการหาค่าแรงดันประสิทธิผลนี้จะทำหน้าที่หาค่าแรงดันสาย

4.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.3.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC DevelopmentBoard V2.10)

4.3.2.2 คิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบค่าประสิทธิผลแท่งจริง (True RMS Digital Multimeter HEWLETT PACKARD 973A)

4.3.2.3 คิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter YOKOGAWA 73202)

4.3.2.4 คิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

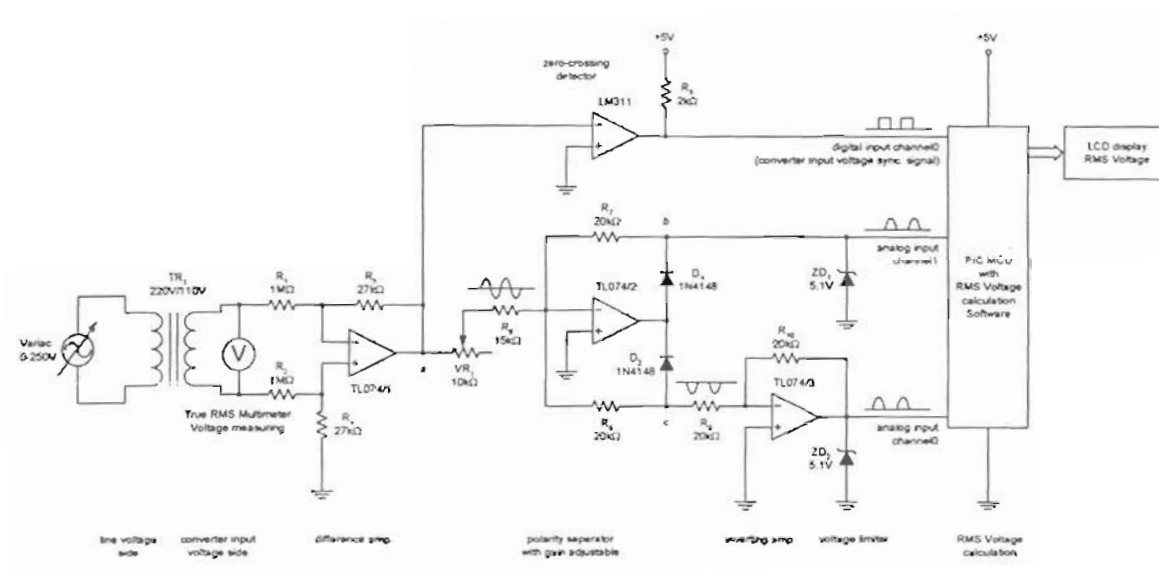
4.3.2.5 หม้อแปลงชนิดปรับค่าได้ (Variable Transformer 0-250V/4A)

4.3.2.6 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer 220V/110V 1.6kVA)

4.3.2.7 บริดจ์เรียงกระแส พร้อมตัวเก็บประจุกรองแรงดัน (Bridge Rectifier with Smoothing Capacitor 250V/1A)

4.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.3.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาแรงดันประสิทธิผลออกจากส่วนอื่น จะได้วงจรที่ใช้ทดสอบดังภาพที่ 4-5



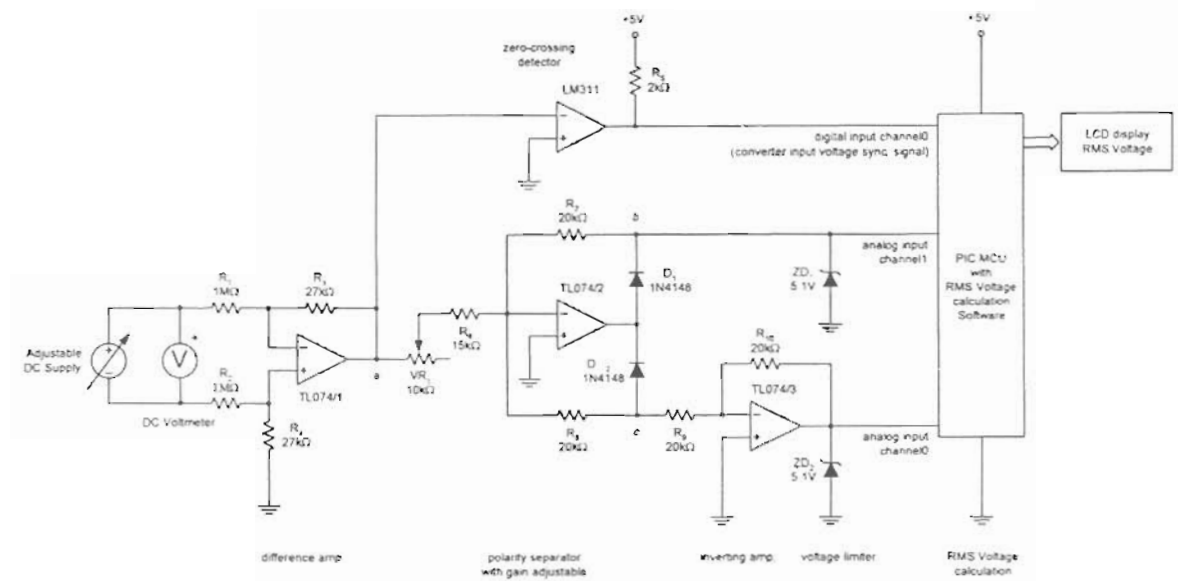
ภาพที่ 4-5 วงจรทดสอบการหาค่าแรงดันประสิทธิผล

4.3.3.2 ปรับอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ให้เท่ากับ $1/39$ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ~ 120 โวลต์ เข้าที่อินพุตของวงจรขยายผลต่าง ดังภาพที่ 4-6 (ก) จากนั้นปรับ VR_1 จนแรงดันไฟฟ้าที่แอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่ 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีค่าเท่ากับ $120/39$ หรือ 3.077 โวลต์

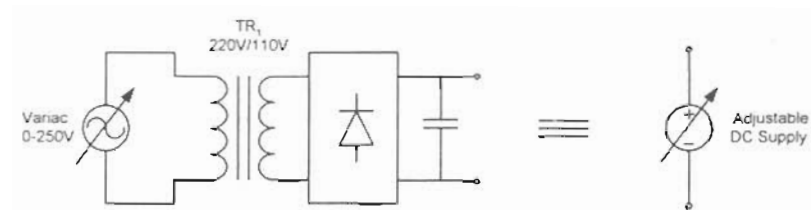
4.3.3.3 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 120 โวลต์ เข้าที่อินพุตของวงจรขยายผลต่าง แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่แอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่ 1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อจะได้ทราบอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ของเส้นทางดังกล่าว

4.3.3.4 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่าแรงดันประสิทธิผล และส่วนการแสดงผลออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.3.3.5 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทดสอบ โดยใช้วงจรตามภาพที่ 4-5 แล้วปรับหม้อแปลงชนิดปรับค่าได้เป็นขั้นๆ ขั้นละ 5 โวลต์ ตั้งแต่ 105 โวลต์ จนถึง 125 โวลต์ แล้วบันทึกผลค่าแรงดันประสิทธิผลที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบค่าประสิทธิผลแท้จริง และค่าแรงดันประสิทธิผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงทาง LCD นอกจากนี้ให้ทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณที่อินพุตของวงจรแยกขั้ว (Polarity Separator) และสัญญาณที่แอนะล็อกอินพุตทั้งสองของไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก) การต่อวงจรเพื่อปรับตั้งค่าอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์



(ข) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้

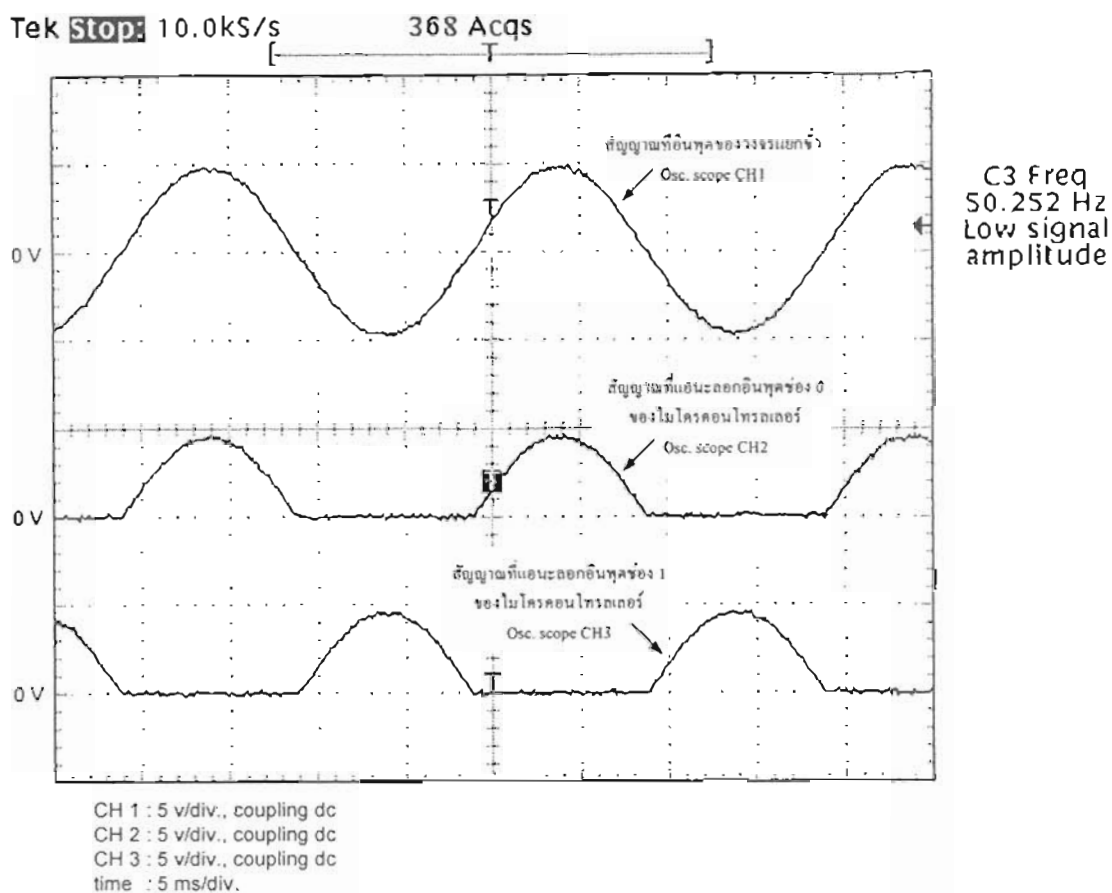
ภาพที่ 4-6 การต่อวงจรเพื่อปรับตั้งค่าอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์

4.3.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 4-3, ภาพที่ 4-7

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันประสิทธิผล

$V_{meter} (V_{RMS})$	$V_{MCU} (V_{RMS})$	Error (V_{RMS}) $(V_{MCU} - V_{meter})$	Error (%) $\left(\frac{V_{MCU} - V_{meter}}{V_{meter}} * 100 \right)$
109.9	109.19	-0.7	-0.64
109.9	109.25	-0.7	-0.64
109.9	109.24	-0.7	-0.64
115.0	114.16	-0.8	-0.70
115.0	114.25	-0.8	-0.70
115.0	114.21	-0.8	-0.70
120.0	119.25	-0.8	-0.67
120.0	119.28	-0.7	-0.58
120.0	119.31	-0.7	-0.58
125.1	124.31	-0.8	-0.64
125.1	124.31	-0.8	-0.64
125.1	124.36	-0.7	-0.56

อัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ของเส้นทางจากอินพุตของวงจรขยายผลต่างถึงแอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่ 0 คือ 3.077 โวลต์ / 120 โวลต์ หรือ 1/39.00 ส่วนอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ของเส้นทางจากอินพุตของวงจรขยายผลต่างถึงแอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่ 1 ซึ่งถูกปรับตั้งค่าอัตราขยายทางอ้อมจากการปรับตั้งค่าอัตราขยายของอีกเส้นทางหนึ่ง มีค่า 3.069 โวลต์ / 120 โวลต์ หรือ 1/39.10



ภาพที่ 4-7 สัญญาณที่อินพุตของวงจรแยกตัว และสัญญาณที่แอนะล็อกอินพุตทั้งสองของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.3.5 สรุปผลการทดลอง แรงดันประสิทธิผลที่ระบบคำนวณได้มีความแม่นยำสูงและมีการกระจายตัวต่ำ แต่มีความเบี่ยงเบนไปในทางลบเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง เนื่องจากอัตราการลดทอนแรงดันของฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบไว้ไม่สามารถปรับให้เท่ากับ 39 ตามที่ระบุไว้ในซอฟต์แวร์ได้พอดี ทั้ง 2 ช่องสัญญาณ โดยในที่นี้มีช่องสัญญาณหนึ่งมีอัตราการลดทอนสูงกว่าอัตราการลดทอนที่ระบุในซอฟต์แวร์ แรงดันที่ถูกลดทอนมากเกินไปจึงทำให้ค่าแรงดันที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

4.4 การทดสอบ การหาค่าแรงดันเฉลี่ย (Average Voltage)

4.4.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่าแรงดันเฉลี่ยที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่าแรงดันที่วัดด้วยโวลต์มิเตอร์เป็นค่าอ้างอิง

4.4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.4.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC

DevelopmentBoard V2.10)

4.4.2.2 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (True RMS Digital Multimeter HEWLETT PACKARD 973A)

4.4.2.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter YOKOGAWA 73202)

4.4.2.4 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

4.4.2.5 หม้อแปลงชนิดปรับค่าได้ (Variable Transformer 0-250V/4A)

4.4.2.6 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer 220V/110V 1.6kVA)

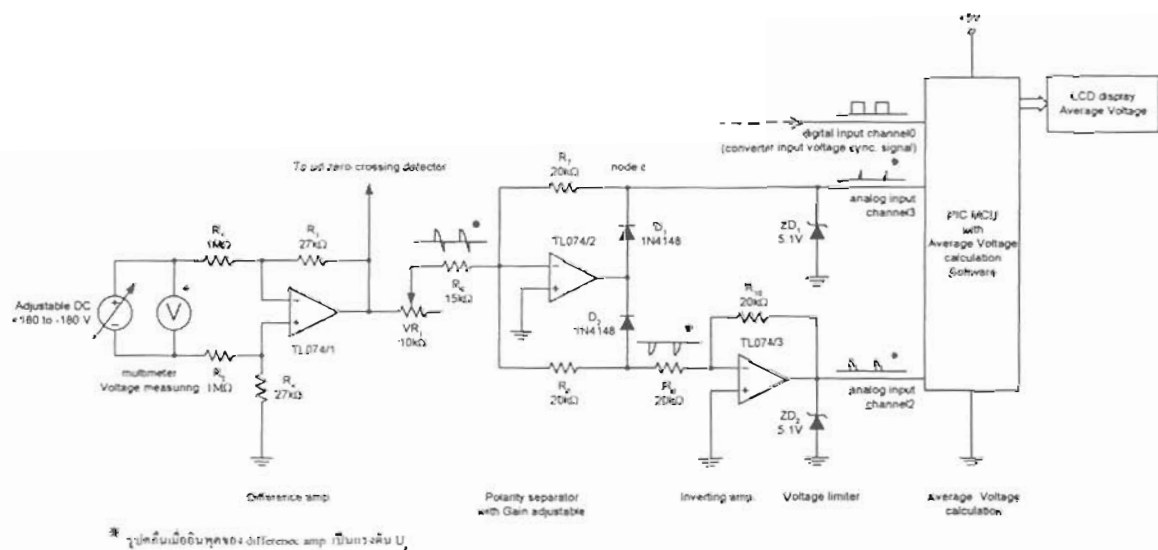
4.4.2.7 บริดจ์เรียงกระแส พร้อมตัวเก็บประจุกรองแรงดัน (Bridge Rectifier with

Smoothing Capacitor 250V/1A)

4.4.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.4.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาแรงดันเฉลี่ยออกจากส่วนอื่น จะได้วงจรที่ใช้

ทดสอบดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 วงจรทดสอบการหาค่าแรงดันเฉลี่ย

4.4.3.2 ปรับอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ให้เท่ากับ $1/39$ โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้จนแรงดันไฟฟ้าที่อินพุตของวงจรขยายผลต่างมีค่า 120 โวลต์ แล้วจึงปรับ VR_1 จนแรงดันไฟฟ้าที่แอมป์ลอคอินพุตช่องสัญญาณที่ 3 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีค่าเท่ากับ $120/39$ หรือ 3.077 โวลต์

4.4.3.3 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -120 โวลต์ เข้าที่อินพุตของวงจรขยายผลต่าง แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่แอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่สองของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อจะได้ทราบอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ของเส้นทางดังกล่าว

4.4.3.4 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่าแรงดันเฉลี่ย และส่วนการแสดงผล ออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4.3.5 จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทดสอบ โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้เป็นขั้นๆ ขั้นละ 90 โวลต์ ตั้งแต่ -180 โวลต์ จนถึง 180 โวลต์ แล้วบันทึกผลค่าแรงดันเฉลี่ยที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ และค่าแรงดันเฉลี่ยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงทาง LCD นอกจากนี้ให้ทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณที่อินพุตและเอาต์พุตทั้งสองของวงจรแยกขั้ว (Polarity Separator)

4.4.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 4-4, ภาพที่ 4-9

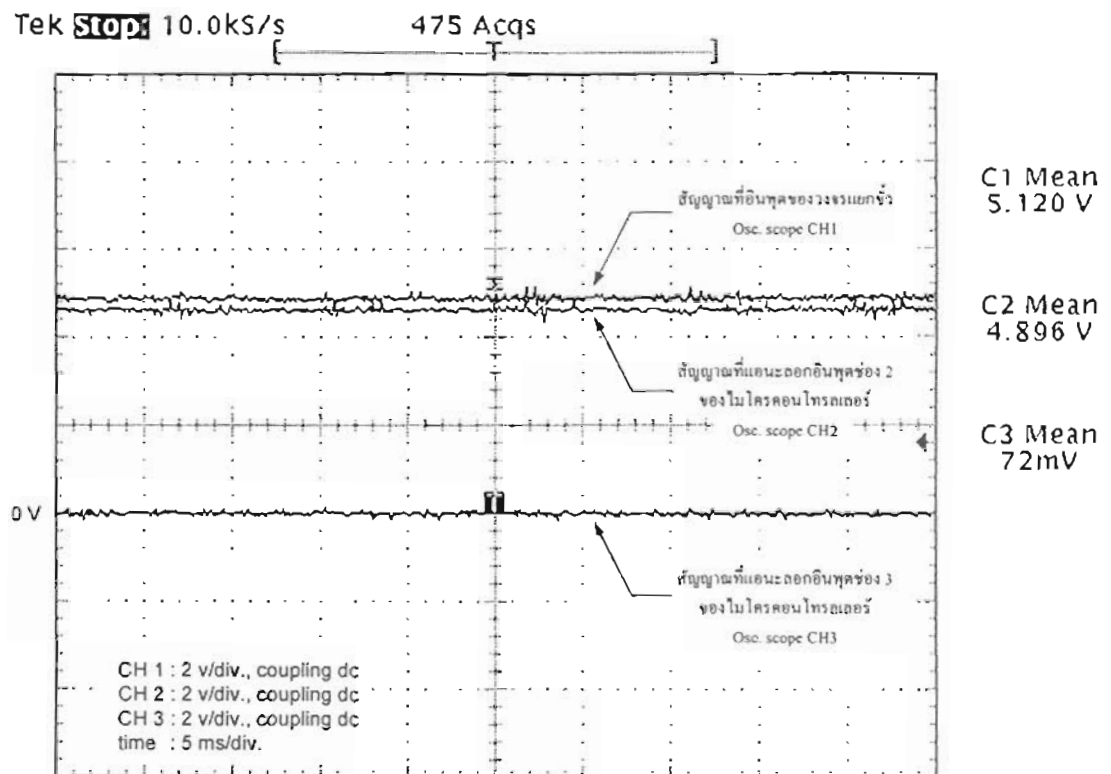
ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบหาค่าแรงดันเฉลี่ย

V_{meter} (V_{AV})	V_{MCU} (V_{AV})	Error (V_{AV}) ($V_{\text{MCU}} - V_{\text{meter}}$)	Error (%) $\left(\frac{V_{\text{MCU}} - V_{\text{meter}}}{V_{\text{meter}}} * 100 \right)$
180.0	177.21	-2.8	-1.56
180.0	180.85	0.9	0.50
180.0	177.65	-2.4	-1.33
179.9	176.67	-3.2	-1.78
180.1	181.19	1.1	0.61
90.0	88.02	-2.0	-2.22
90.0	89.73	-0.3	-0.33
90.0	87.91	-2.1	-2.33
89.9	89.27	-0.6	-0.67
90.1	88.79	-1.3	-1.44
90.1	88.10	-2.0	-2.22
0.001	1.17	-	-

ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

V_{meter} (V_{AV})	V_{MCU} (V_{AV})	Error (V_{AV}) ($V_{MCU} - V_{meter}$)	Error (%) $\left(\frac{V_{MCU} - V_{meter}}{V_{meter}} * 100 \right)$
0.001	2.81	-	-
0.001	0.00	-	-
0.001	-1.17	-	-
0.001	0.27	-	-
0.001	-1.23	-	-
-89.9	-89.01	0.9	-1.00
-89.9	-88.59	1.3	-1.45
-89.8	-89.57	0.2	-0.22
-89.8	-89.79	0.0	0
-89.9	-89.66	0.2	-0.22
-90.0	-89.75	0.3	-0.33
-180.2	-180.41	-0.2	0.11
-180.2	-178.56	1.6	-0.89
-180.2	-180.14	0.1	-0.06
-180.2	-179.46	0.7	-0.39
-180.2	-179.91	0.3	-0.17

อัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ของเส้นทางจากอินพุตของวงจรขยายผลต่างถึงแอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่ 2 คือ 3.039 โวลต์ / 120 โวลต์ หรือ 1/39.49 ส่วนอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ของเส้นทางจากอินพุตของวงจรขยายผลต่างถึงแอนะล็อกอินพุตช่องสัญญาณที่ 3 ซึ่งการทดสอบใช้เส้นทางนี้เป็นเส้นทางอ้างอิงในการปรับตั้งค่าอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ มีค่า 3.077 โวลต์ / 120 โวลต์ หรือ 1/39.00



ภาพที่ 4-9 สัญญาณที่อินพุตของวงจรแยกตัว และสัญญาณที่แอนะล็อกอินพุตทั้งสองของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4.5 สรุปผลการทดลอง การทดสอบพบว่าระบบหาค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าความแม่นยำค่อนข้างสูง คือมีความคลาดเคลื่อนต่ำ จากการทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3% จากค่าอ้างอิง ด้านพิสัยการกระจายของค่าที่คำนวณได้ก็มีค่าต่ำ ดังนั้นระบบนี้จึงมีความน่าเชื่อถือสูง แต่ค่าแรงดันเฉลี่ยที่คำนวณได้แทบทั้งหมดจะเบี่ยงเบนไปในทางลบ เนื่องจากอัตราการลดทอนของสัญญาณครั้งบวกมีค่าสูงกว่าที่ออกแบบและระบุไว้ล่วงหน้าในซอฟต์แวร์

4.5 การทดสอบ การหาค่ามุมจุดชนวน

4.5.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่ามุมจุดชนวนที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่ามุมจุดชนวนที่สังเกตได้จากรูปคลื่นแรงดันเป็นค่าอ้างอิง

4.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.5.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC

DevelopmentBoard V2.10)

4.5.2.2 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

4.5.2.3 หัววัดสัญญาณผลต่าง (Differential Probe YOKOGAWA 700925)

4.5.2.4 คอนเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบเต็มคลื่น

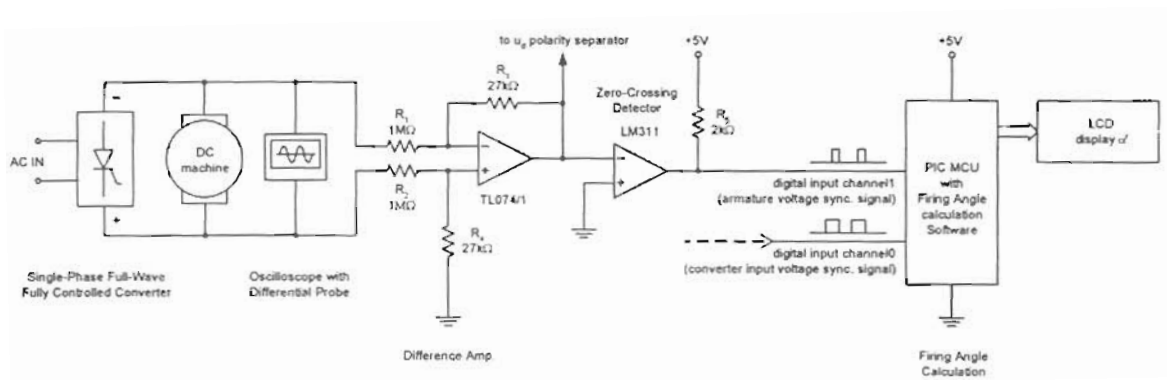
4.5.2.5 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 kW

4.5.2.6 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer 220V/110V 1.6kVA)

4.5.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.5.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหาค่ามุมจุดชนวนออกจากส่วนอื่น จะได้วงจรที่ใช้

ทดสอบดังภาพที่ 4-10

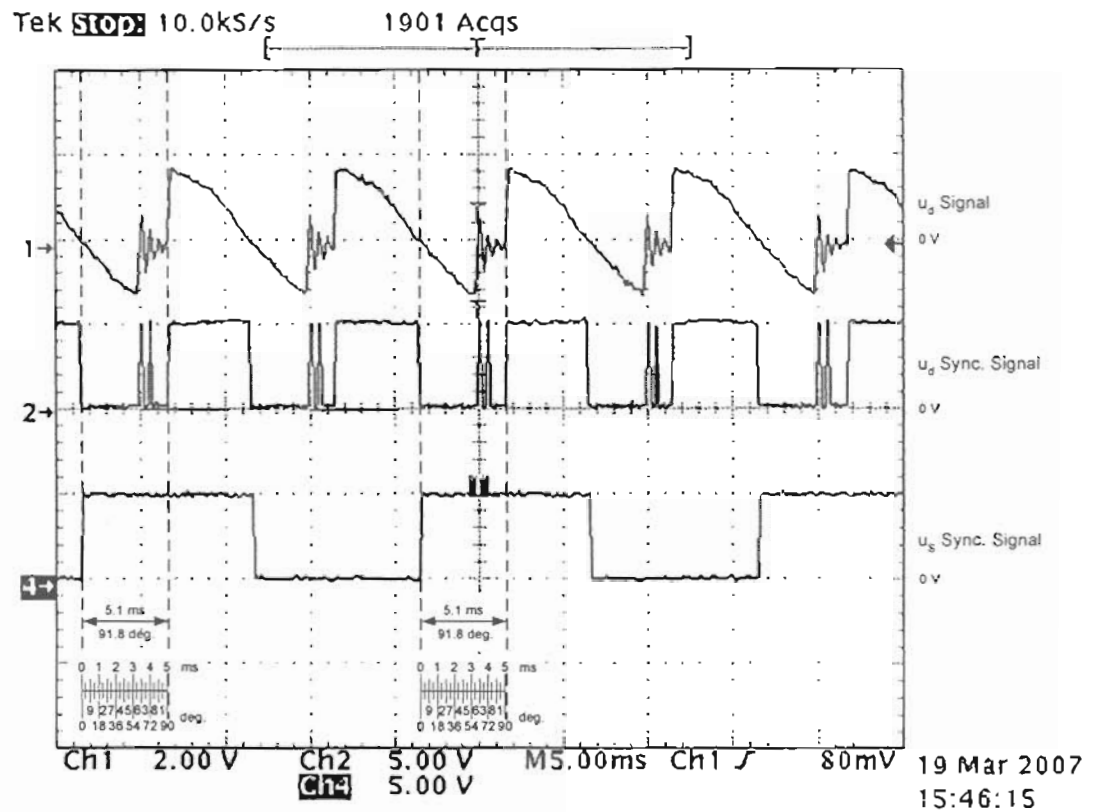


ภาพที่ 4-10 วงจรทดสอบการหาค่ามุมจุดชนวน

4.5.3.2 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่ามุมจุดชนวน และส่วนการแสดงผล ออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.5.3.3 ปรับมุมจุดชนวนของคอนเวอร์เตอร์เป็น 90° , 115° , 140° แล้วบันทึกภาพแรงดันอาร์เมเจอร์จากออสซิลโลสโคป และค่ามุมจุดชนวนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้ จากภาพแรงดันอาร์เมเจอร์ที่บันทึกไว้จะสามารถหาค่ามุมจุดชนวนได้ดังภาพที่ 4-11 ถึงภาพที่ 4-19

4.5.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังภาพที่ 4-11 ถึงภาพที่ 4-19 และตารางที่ 4-5



มุมจุดขนาน : 90°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

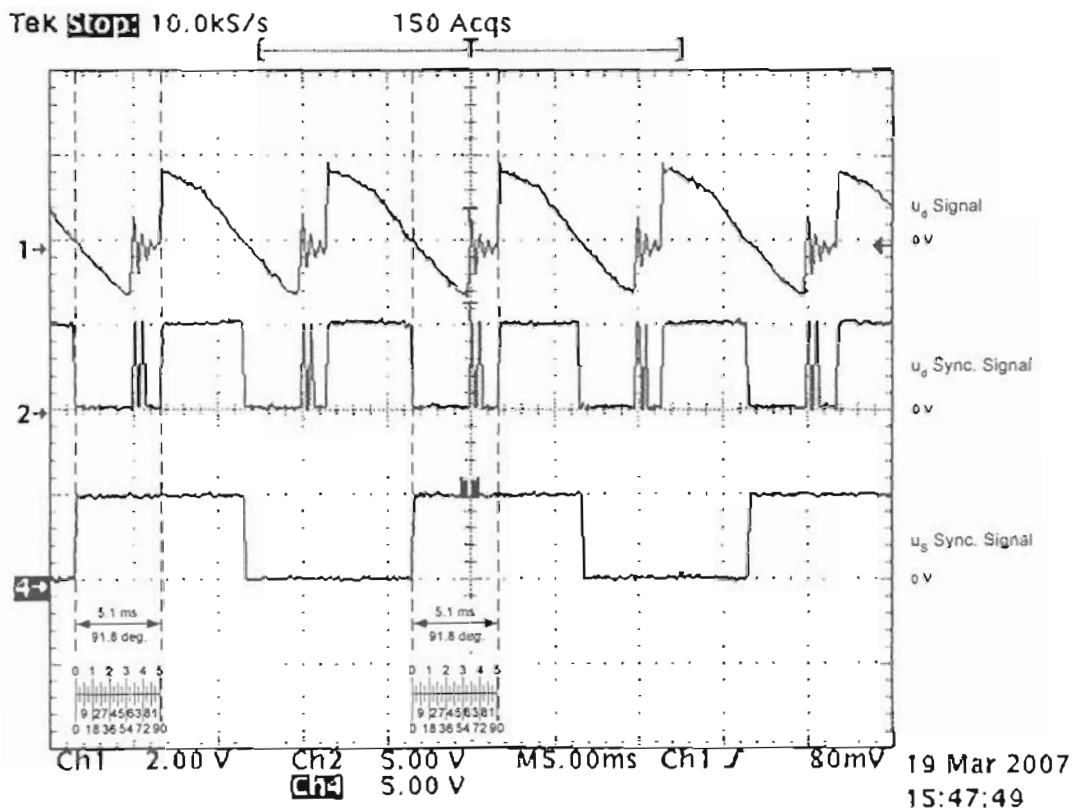
CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดขนานได้เท่ากับ 91.78°

ภาพที่ 4-11 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนานคอนเวเตอร์ที่มุม 90° ($\alpha' = 90^\circ$ ทดลองครั้งที่ 1)



มุมจุดขนวน : 90°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

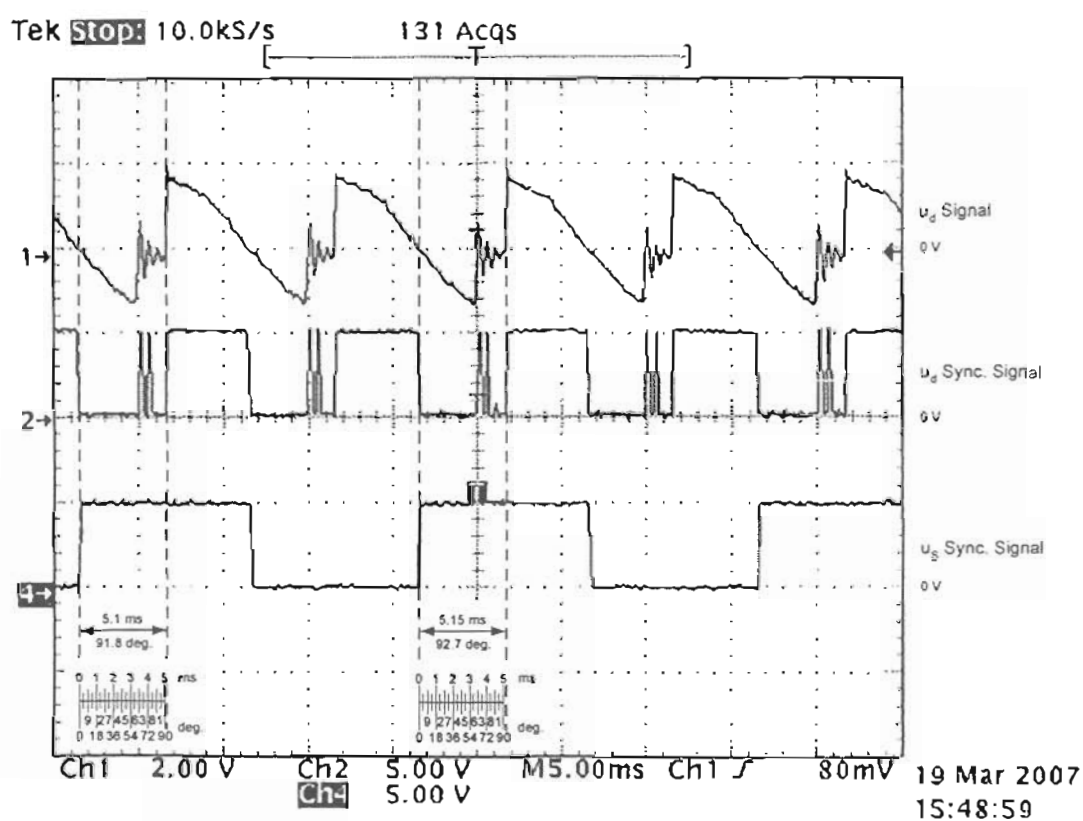
CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดขนวนได้เท่ากับ 93.56°

ภาพที่ 4-12 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดขนวนคอนเวเตอร์ที่มุม 90° ($\alpha' = 90^\circ$ ทดลองครั้งที่ 2)



มุมจุดชนวน : 90°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

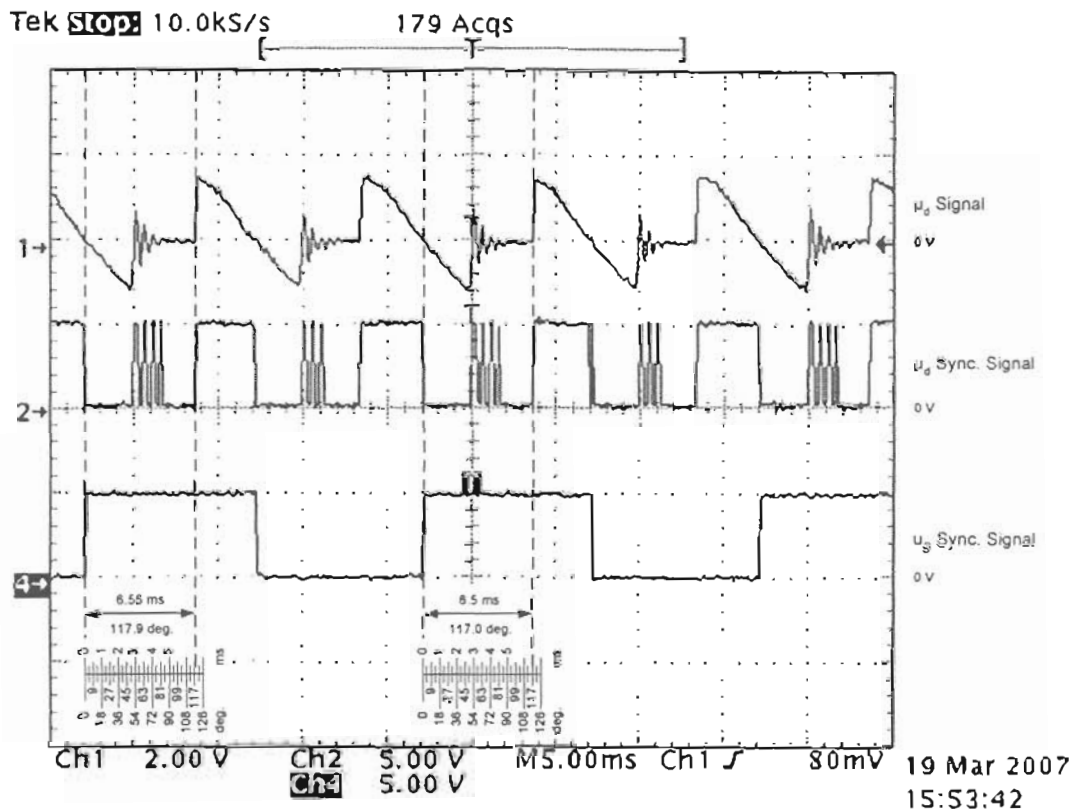
CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 91.43°

ภาพที่ 4-13 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวเตอร์ที่มุม 90° ($\alpha' = 90^\circ$ ทดลองครั้งที่ 3)



มุมจุดชนวน : 115°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

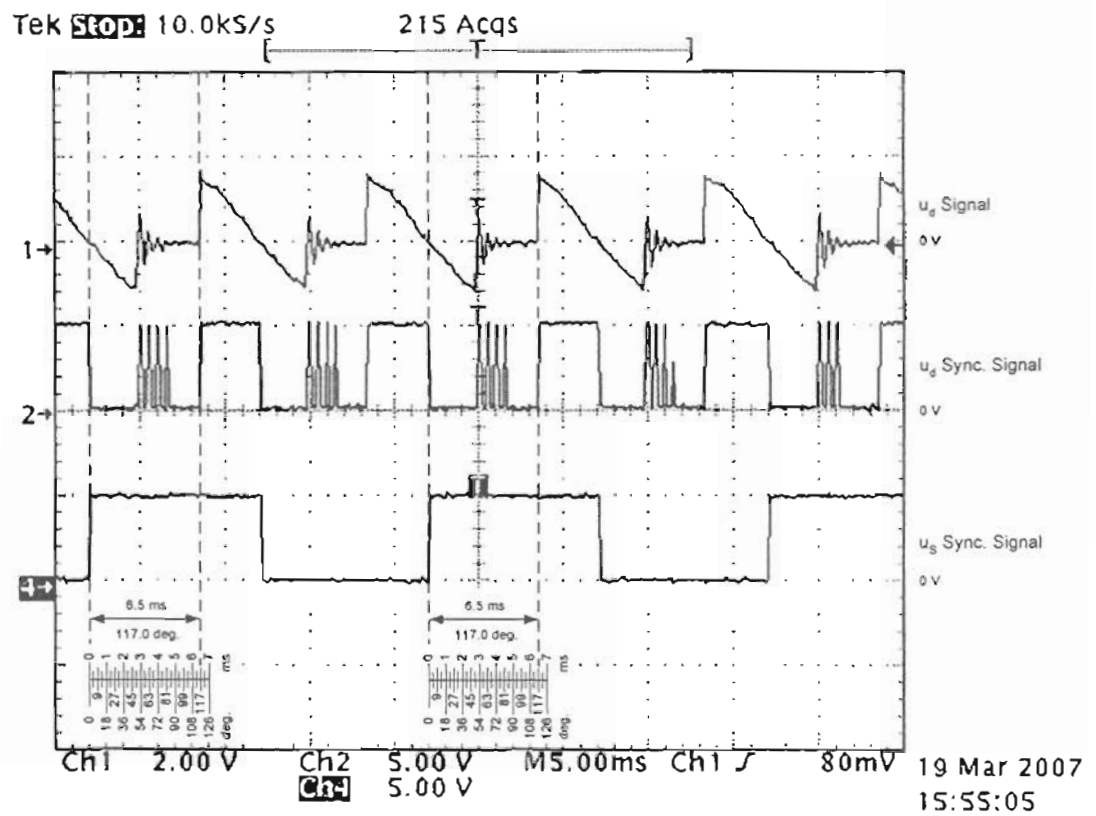
CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 116.32°

ภาพที่ 4-14 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 115° ($\alpha' = 115^\circ$ พดตองครั้งที่ 1)



มุมจุดชนวน : 115°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

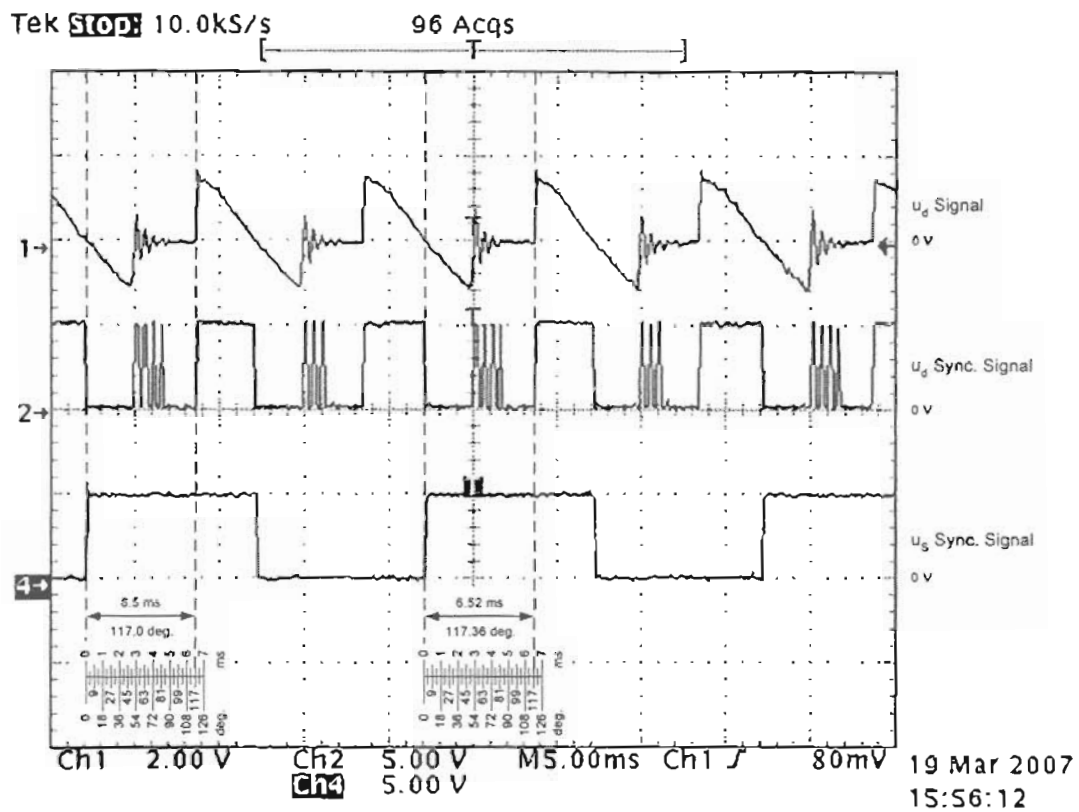
CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 116.77°

ภาพที่ 4-15 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวเตอร์ที่มุม 115° ($\alpha' = 115^\circ$ ทดลองครั้งที่ 2)



มุมจุดชนวน : 90°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

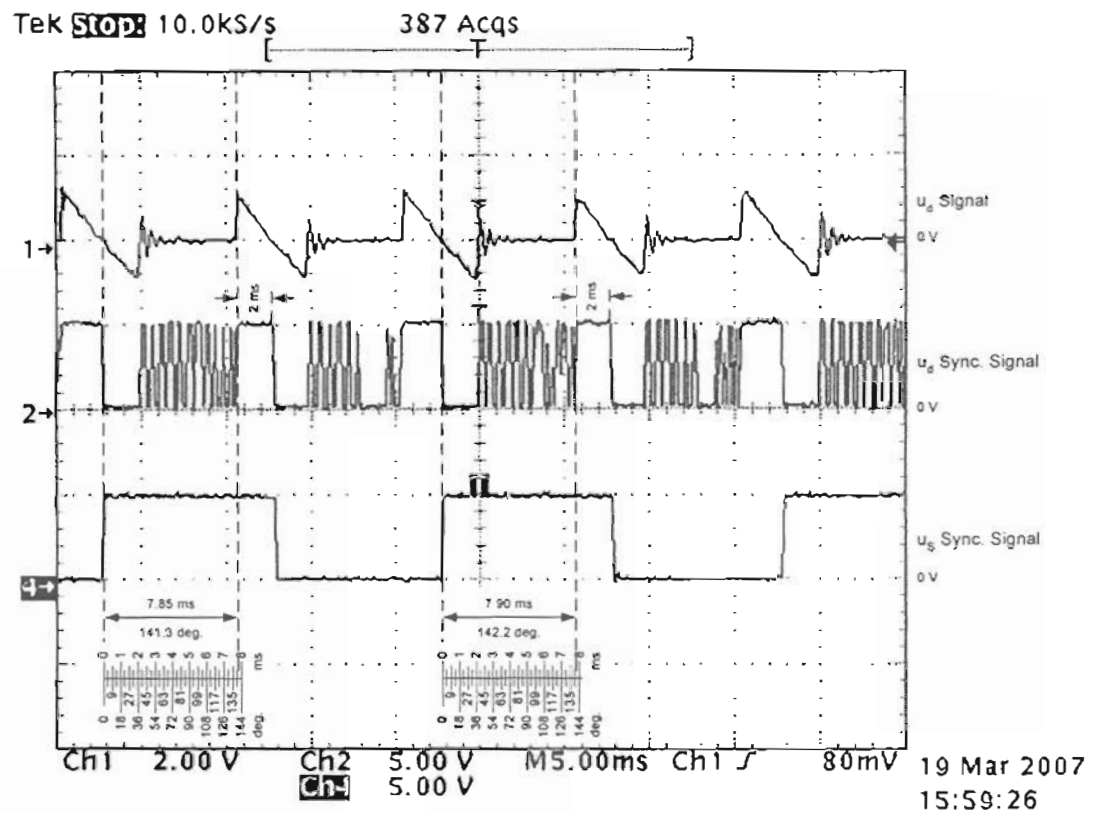
CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 116.53°

ภาพที่ 4-16 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวเตอร์ที่มุม 115° ($\alpha' = 115^\circ$ ทดลองครั้งที่ 3)



มุมจุดชนวน : 140°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

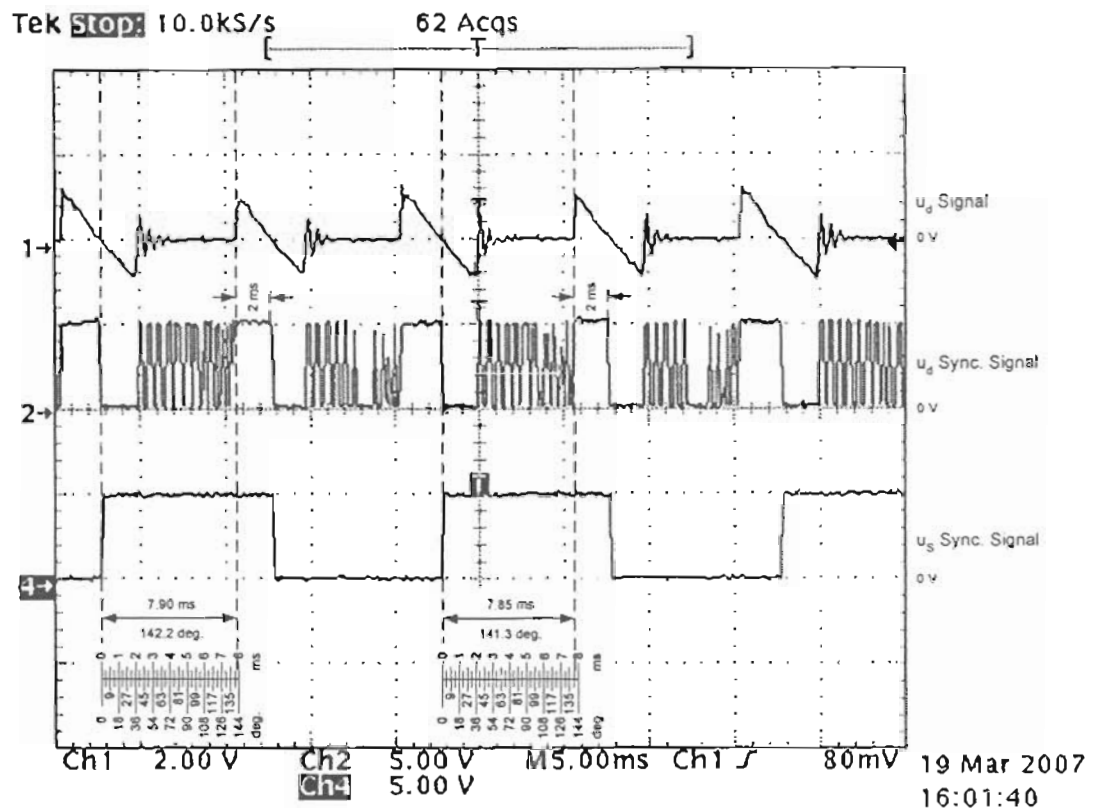
การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 140.09°

ภาพที่ 4-17 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวเตอร์ที่มุม 140° ($\alpha' = 140^\circ$ ทดลองครั้งที่ 1)

CH1 : 200 v/div., coupling dc CH4 : 5 v/div., coupling dc
CH2 : 5 v/div., coupling dc Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 138.51°

ภาพที่ 4-18 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวเตอร์ที่มุม 140° ($\alpha' = 140^\circ$ ทดลองครั้งที่ 2)



มุมจุดชนวน : 140°

CH1 : 200 v/div., coupling dc

CH4 : 5 v/div., coupling dc

CH2 : 5 v/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

การทดลองครั้งนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณค่ามุมจุดชนวนได้เท่ากับ 139.60°

ภาพที่ 4-19 แรงดันอาร์เมเจอร์เมื่อจุดชนวนคอนเวอเตอร์ที่มุม 140° ($\alpha' = 140^\circ$ ทดลองครั้งที่ 3)

ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ามุมจุดชนวนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้ เทียบกับค่าที่สังเกตจากรูปคลื่น u_d ของการทดลองแต่ละครั้งแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ามุมจุดชนวนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้
เทียบกับค่าที่สังเกตจากรูปคลื่น n_d

$\alpha'_{\text{converter}}$ (deg.)	α'_{MCU} (deg.)	α'_{scope} (deg.)	error (deg.) $(\alpha'_{\text{MCU}} - \alpha'_{\text{scope}})$	error (%) $\left(\frac{\alpha'_{\text{MCU}} - \alpha'_{\text{scope}}}{\alpha'_{\text{scope}}} \times 100\right)$
90	91.78	91.8	-0.02	-0.02
		91.8	-0.02	-0.02
	93.56	91.8	1.76	1.92
		91.8	1.76	1.92
	91.43	91.8	-0.37	-0.40
		92.7	-1.27	-1.37
115	116.32	117.9	-1.58	-1.34
		117.0	-0.68	-0.58
	116.77	117.0	-0.23	-0.20
		117.0	-0.23	-0.20
	116.53	117.0	-0.47	-0.40
		117.36	-0.83	-0.71
140	140.09	141.3	-1.21	-0.86
		142.2	-2.11	-1.48
	138.51	141.3	-2.79	-1.97
		140.0	-1.49	-1.06
	139.60	142.2	-2.60	-1.83
		141.3	-1.70	-1.20

4.6 การทดสอบ การหาค่ากระแสเฉลี่ย (Average Current)

4.6.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่ากระแสเฉลี่ยที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่ากระแสที่วัดด้วยแอมป์มิเตอร์เป็นค่าอ้างอิง

4.6.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.6.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC

DevelopmentBoard V2.10)

4.6.2.2 คิวติออลมัลติมิเตอร์ (True RMS Digital Multimeter HEWLETT PACKARD 973A)

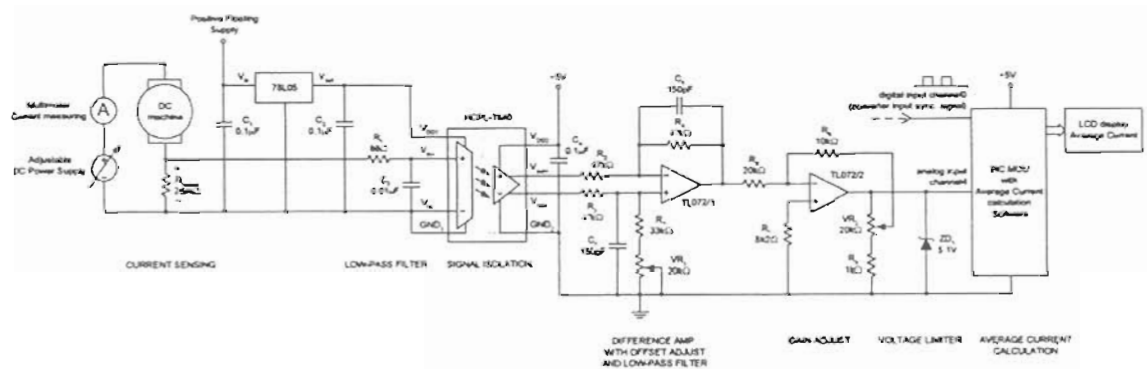
4.6.2.3 คิวติออลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter YOKOGAWA 73202)

4.6.2.4 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply GW GPC-3030D)

4.6.2.5 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 kW

4.6.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.6.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหากระแสเฉลี่ยออกจากส่วนอื่น จะได้วงจรที่ใช้ทดสอบดังภาพที่ 4-20



ภาพที่ 4-20 วงจรทดสอบการหาค่ากระแสเฉลี่ย

4.6.3.2 ปรับออฟเซตของวงจรหาค่ากระแส โดยต้องวงจรตามภาพที่ 4-20 ยกเว้นยังไม่ต้องต่อเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับวงจร จากนั้นลัดวงจรที่ขั้วทั้งสองของ R_{sense} แล้วปรับ VR_1 จนแรงดันที่แอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับศูนย์โวลต์

4.6.3.3 ปรับอัตราขยายทางฮาร์ดแวร์ให้เท่ากับ 0.5 โวลต์/แอมแปร์ โดยต่อเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับวงจรหาค่ากระแส ดังภาพที่ 4-20 จากนั้นปรับแรงดันที่จ่ายโดยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จนมีกระแสไฟฟ้าผ่านแอมป์มิเตอร์ 2 แอมแปร์ แล้วปรับ VR_1 จนแรงดันที่แอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่า 500 มิลลิโวลต์

4.6.3.4 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่ากระแสเฉลี่ย และส่วนการแสดงผล ออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.6.3.5 จำยกระแไฟฟ้ากระแสตรงทดสอบ โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้จนได้ค่ากระแสทดสอบ 1, 2 และ 3 แอมแปร์ แล้วบันทึกผลค่ากระแสเฉลี่ยที่อ่านได้จากแอมป์มิเตอร์ และค่ากระแสเฉลี่ยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงทาง LCD

4.6.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบหาค่ากระแสเฉลี่ย

$I_{meter} (A_{AV})$	$I_{MCU} (A_{AV})$	Error (A_{AV}) $(I_{MCU} - I_{meter})$	Error (%) $\left(\frac{I_{MCU} - I_{meter}}{I_{meter}} * 100 \right)$
2.99	2.96	-0.03	-1.00
2.99	2.99	0.00	0.00
2.99	2.98	-0.01	-0.33
2.00	1.99	-0.01	-0.50
2.00	1.98	-0.02	-1.00
2.00	2.00	0.00	0.00
1.00	0.98	-0.02	-2.00
1.00	0.99	-0.01	-1.00
1.00	1.01	0.01	1.00
0.01	0.01	0.00	-
0.01	0.02	0.01	-
0.01	0.02	0.01	-

4.6.5 สรุปผลการทดลอง ค่ากระแสเฉลี่ยที่ระบบคำนวณได้ในย่านกระแสทดสอบ มีค่าความแม่นยำสูงมากและมีการกระจายต่ำ แต่ได้นำไปหากระแสในย่านอื่นความแม่นยำอาจลดลงบ้างเล็กน้อยเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่แฝงอยู่ของอุปกรณ์วัดกระแส

4.7 การทดสอบ การหาค่ากระแสชั่วขณะเป็นเวลา 3 มิลลิวินาทีหลังจุดชนวนไทรสเตอร์ ($i_{t=3ms}$)

4.7.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของค่ากระแสชั่วขณะที่หาได้จากการทำงานของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ค่ากระแสชั่วขณะที่สังเกตจากรูปคลื่นบนออสซิลโลสโคปเป็นค่าอ้างอิง

4.7.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.7.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC

DevelopmentBoard V2.10)

4.7.2.2 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (True RMS Digital Multimeter HEWLETT PACKARD 973A)

4.7.2.3 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

4.7.2.4 เครื่องขยายสัญญาณหัววัดกระแส (Current Probe Amplifier Tektronix AM503B)

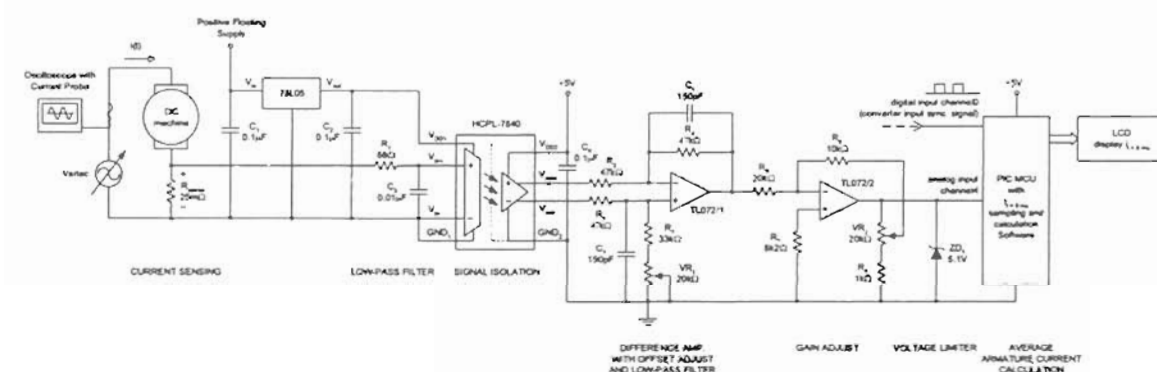
4.7.2.5 หัววัดกระแส (Current Probe Tektronix A603)

4.7.2.6 หม้อแปลงชนิดปรับค่าได้ (Variable Transformer 0-250V/4A)

4.7.2.7 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 kW

4.7.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.7.3.1 แยกฮาร์ดแวร์ส่วนของการหากระแสชั่วขณะออกจากส่วนอื่น จะได้วงจรที่ใช้ทดสอบดังภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 วงจรทดสอบการหาค่ากระแสชั่วขณะ

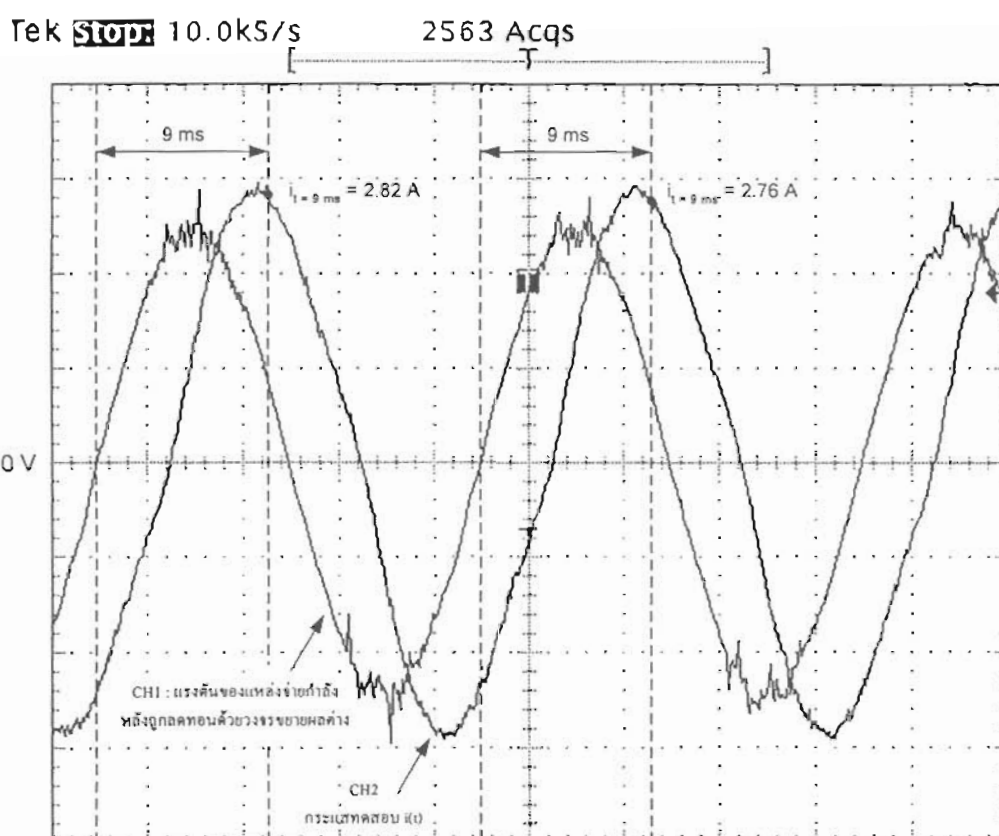
4.7.3.2 ปรับออฟเซตและอัตราขยายของวงจรหาค่ากระแส โดยทำตามวิธีในหัวข้อ 4.6.3.2 และหัวข้อ 4.6.3.3

4.7.3.3 แยกซอฟต์แวร์ส่วนของการหาค่ากระแสชั่วขณะที่เวลา 9 มิลลิวินาทีหลังจุดชนวน ไทริสเตอร์ และส่วนการแสดงผล ออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์

4.7.3.4 ข่ายกระแสไฟฟ้าทดสอบ โดยต้องวงจรตามภาพที่ 4-21 แล้วปรับหม้อแปลงชนิดปรับค่าได้จนเกิดกระแสทดสอบไหลประมาณ 2 แอมแปร์ (การทดลองนี้ สัญญาณซึ่งโครโนสที่เข้า

ดิจิตอลอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้จากการต่อขั้ววัดแรงดันประสิทธิภาพของงานวิจัยเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบซึ่งในที่นี้คือหม้อแปลงชนิดปรับค่าได้ ภาพที่ 4-21 แสดงการแสดงผลนี้ไว้แล้วบันทึกภาพกระแส $i(t)$, รูปคลื่นแรงดันอินพุตของวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของแรงดัน U_s และบันทึกค่ากระแส $i_{t=9\text{ms}}$ ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงทาง LCD

4.7.4 ผลการทดลอง จากการทดลองได้ผลดังภาพที่ 4-22 ถึงภาพที่ 4-26 และตารางที่ 4-7



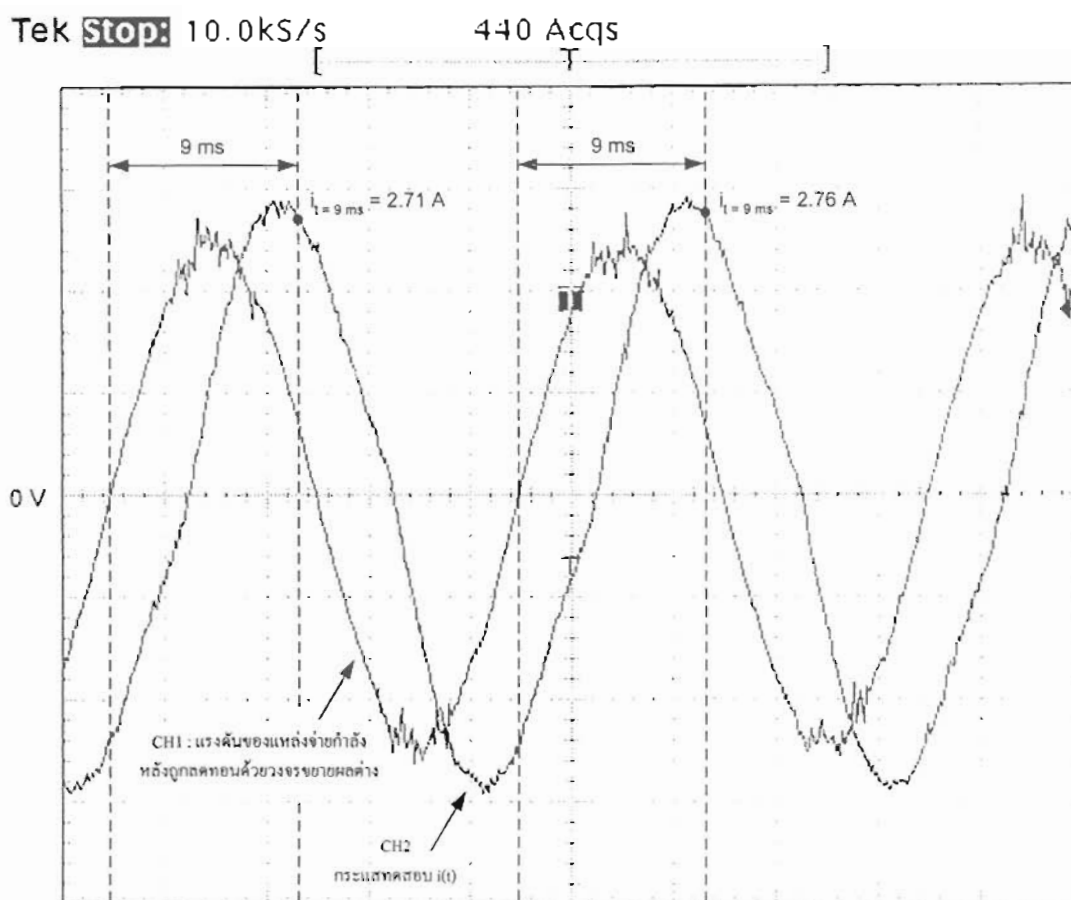
CH1 : $0.5 \times 1\text{M}/27\text{k}$ or 18.52 v/div. , coupling dc

CH2 : 1 A/div. , coupling dc

Time : 5 ms/div.

ภาพที่ 4-22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 1

การทดสอบครั้งที่ 1 ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงค่ากระแส $i_{t=9\text{ms}}$ ที่สุ่มได้ทั้ง 5 ค่า และค่าเฉลี่ยที่ไม่นำค่าสูงสุดและต่ำสุดมาคำนวณ ซึ่งถือเป็นตัวแทนของค่ากระแส $i_{t=9\text{ms}}$ ตามลำดับดังนี้ 2.75, 2.80, 2.76, 2.73, 2.63 และ 2.75 แอมแปร์



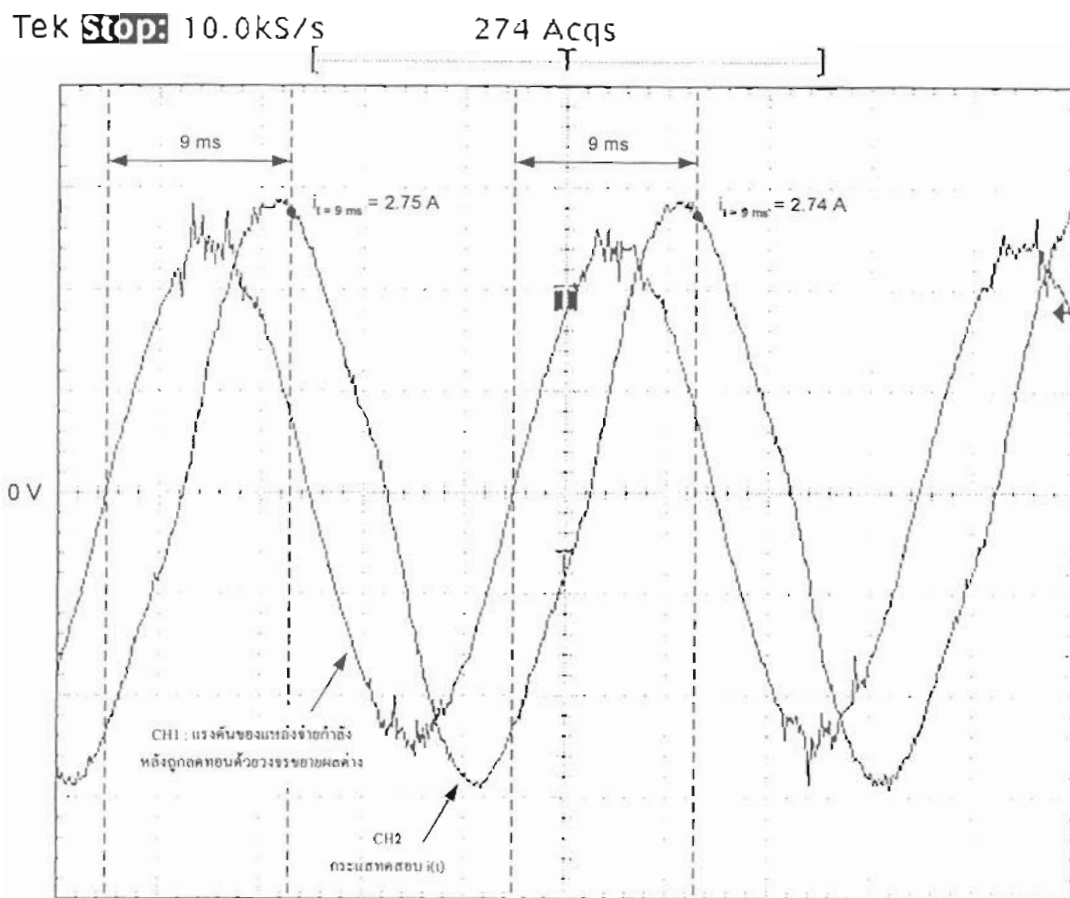
CH1 : $0.5 \times 1\text{M}/27\text{k}$ or 18.52 v/div., coupling dc

CH2 : 1 A/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

ภาพที่ 4-23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 2

การทดสอบครั้งที่ 2 ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงค่ากระแส $i_t = 9 \text{ ms}$ ที่สุ่มได้ทั้ง 5 ค่า และค่าเฉลี่ยที่ไม่นำค่าสูงสุดและต่ำสุดมาคำนวณ ตามลำดับดังนี้ 2.73, 2.65, 2.72, 2.64, 2.77 และ 2.70 แอมแปร์



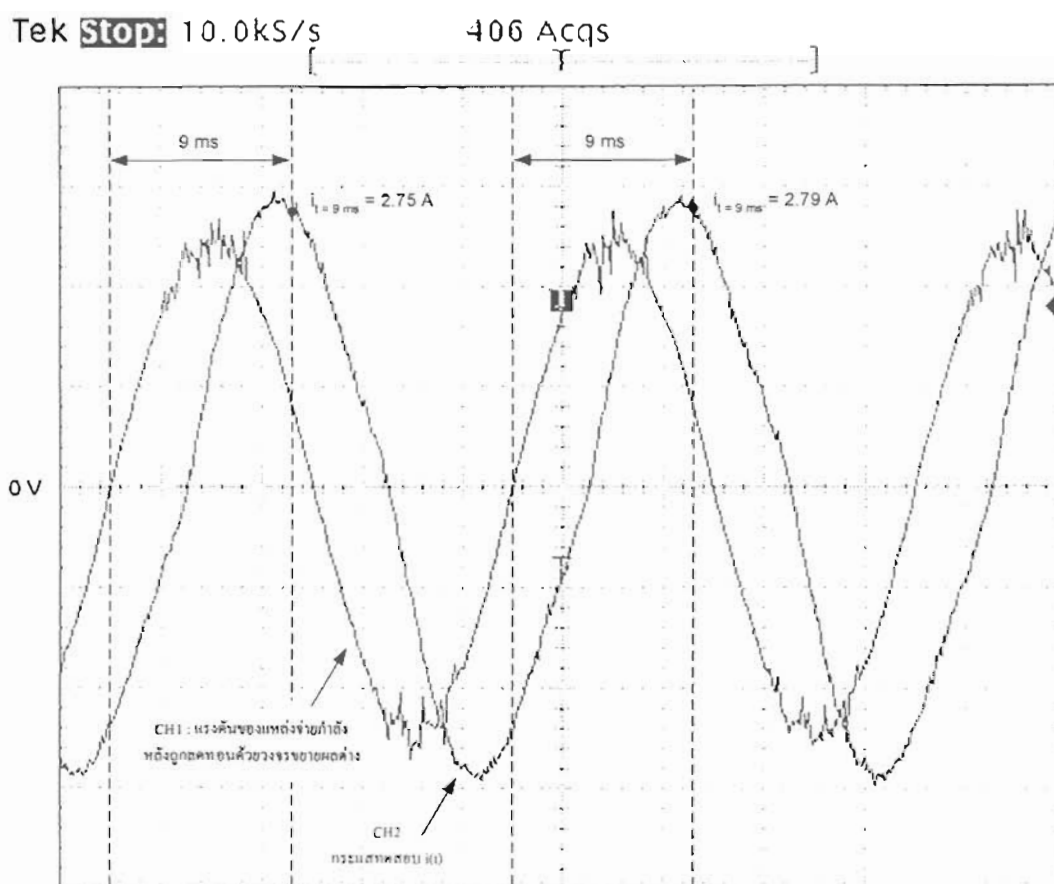
CH1 : $0.5 \times 1\text{M}/27\text{k}$ or 18.52 v/div., coupling dc

CH2 : 1 A/div., coupling dc

Time : 5 ms/div.

ภาพที่ 4-24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 3

การทดสอบครั้งที่ 3 ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงค่ากระแส $i_{t=9ms}$ ที่สุ่มได้ทั้ง 5 ค่า และค่าเฉลี่ยที่ไม่นำค่าสูงสุดและต่ำสุดมาคำนวณ ตามลำดับดังนี้ 2.74, 2.69, 2.77, 2.73, 2.70 และ 2.73 แอมแปร์



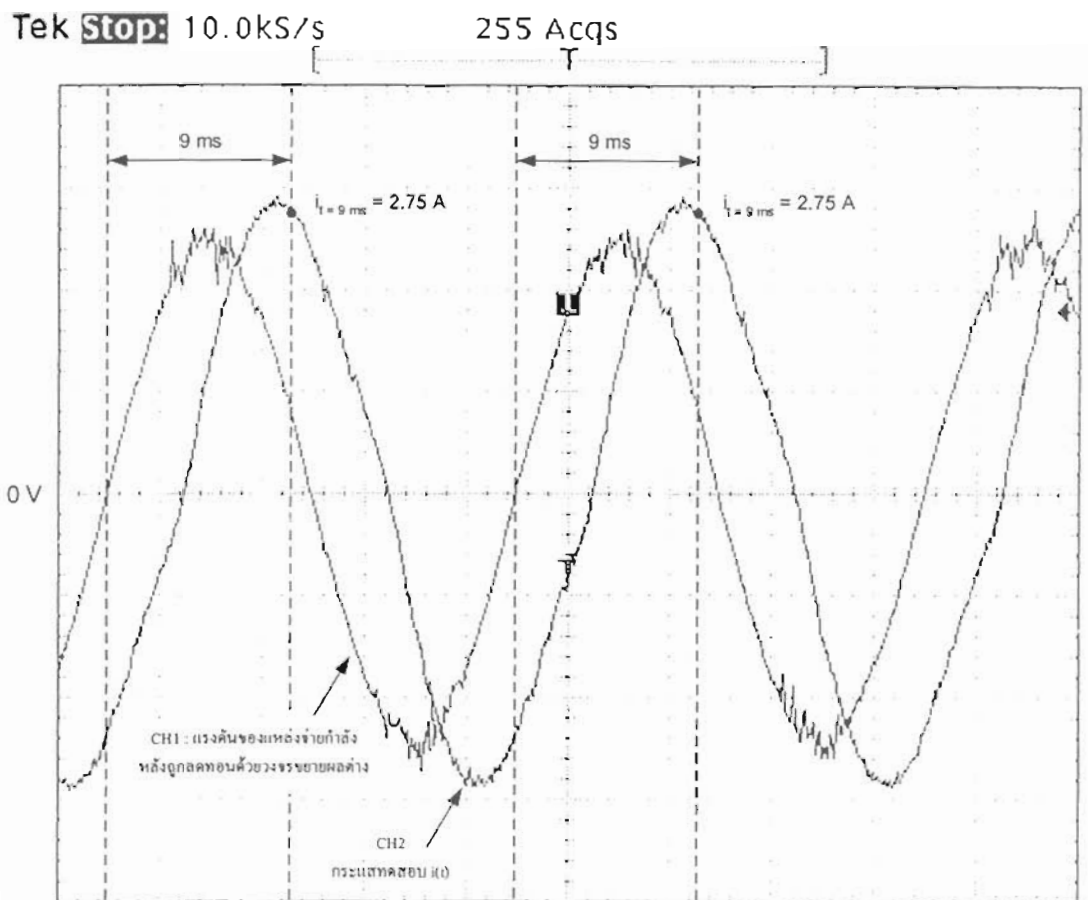
CH1 : $0.5 \times 1\text{M}/27\text{k}$ or 18.52 v/div. , coupling dc

CH2 : 1 A/div. , coupling dc

Time : 5 ms/div.

ภาพที่ 4-25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 4

การทดสอบครั้งที่ 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงค่ากระแส $i_1 = 9 \text{ ms}$ ที่สุ่มได้ทั้ง 5 ค่า และค่าเฉลี่ยที่ไม่นำค่าสูงสุดและต่ำสุดมาคำนวณ ตามลำดับดังนี้ 2.71, 2.80, 2.78, 2.68, 2.64 และ 2.73 แอมแปร์



CH1 : $0.5 \times 1\text{M}/27\text{k}$ or 18.52 v/div. , coupling dc

CH2 : 1 A/div. , coupling dc

Time : 5 ms/div.

ภาพที่ 4-26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่เวลาใดๆ จากการทดสอบครั้งที่ 5

การทดสอบครั้งที่ 5 ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงค่ากระแส $I_{t=9\text{ ms}}$ ที่สุ่มได้ทั้ง 5 ค่า และค่าเฉลี่ยที่ไม่นำค่าสูงสุดและต่ำสุดมาคำนวณ ตามลำดับดังนี้ 2.68, 2.67, 2.70, 2.68, 2.75 และ 2.69 แอมแปร์

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบหาค่ากระแส $i_t = 9 \text{ ms}$

$i_t = 9 \text{ ms}$ MCU (A)	$i_t = 9 \text{ ms}$ Osc. scope (A)	error (A) $i_{t \text{ MCU}} - i_{t \text{ Osc. scope}}$	error (%) $\frac{I_{\text{MCU}} - I_{\text{meter}}}{I_{\text{meter}}} \times 100$
2.75	2.82	-0.07	-2.48
	2.76	-0.01	-0.36
2.70	2.71	-0.01	-0.37
	2.76	-0.06	-2.17
2.73	2.75	-0.02	-0.73
	2.74	-0.01	-0.36
2.73	2.75	-0.02	-0.73
	2.79	-0.06	-2.15
2.69	2.75	-0.06	-2.18
	2.75	-0.06	-2.18

4.7.5 สรุปผลการทดลอง ค่าความแม่นยำของกระแสที่เวลา $t = 9 \text{ ms}$ ก่อนข้างสูง และมีการกระจายตัวต่ำ ระบบหาค่ากระแสที่เวลา $t = 9 \text{ ms}$ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นจึงมีความน่าเชื่อถือสูงในสถานะที่ทำการทดสอบ และจากค่ากระแสที่เวลา $t = 9 \text{ ms}$ ของแต่ละคาบ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์เก็บมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของกระแสที่เวลา $t = 9 \text{ ms}$ นั้น มีพิสัยการกระจายไม่สูงดังนั้นหาต้องการให้ระบบมีความเร็วในการรวบรวมค่ามากขึ้นอาจลดจำนวนการเก็บค่ากระแสที่เวลา $t = 9 \text{ ms}$ ลง แต่ก็ต้องแลกกับความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของค่าที่ระบบคำนวณออกมาเป็นตัวแทนของค่ากระแสที่เวลา $t = 9 \text{ ms}$ ซึ่งจะมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือลดลง

4.8 การทดสอบ การหาความเหนี่ยวนำจากการแก้แบบจำลองโดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์

4.8.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำของการประมาณค่าความเหนี่ยวนำโดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นตามงานวิจัยและอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลแก้แบบจำลอง ค่าอ้างอิงในการทดลองนี้ได้มาจากการจำลองระบบด้วยแบบ MATLAB Simulink

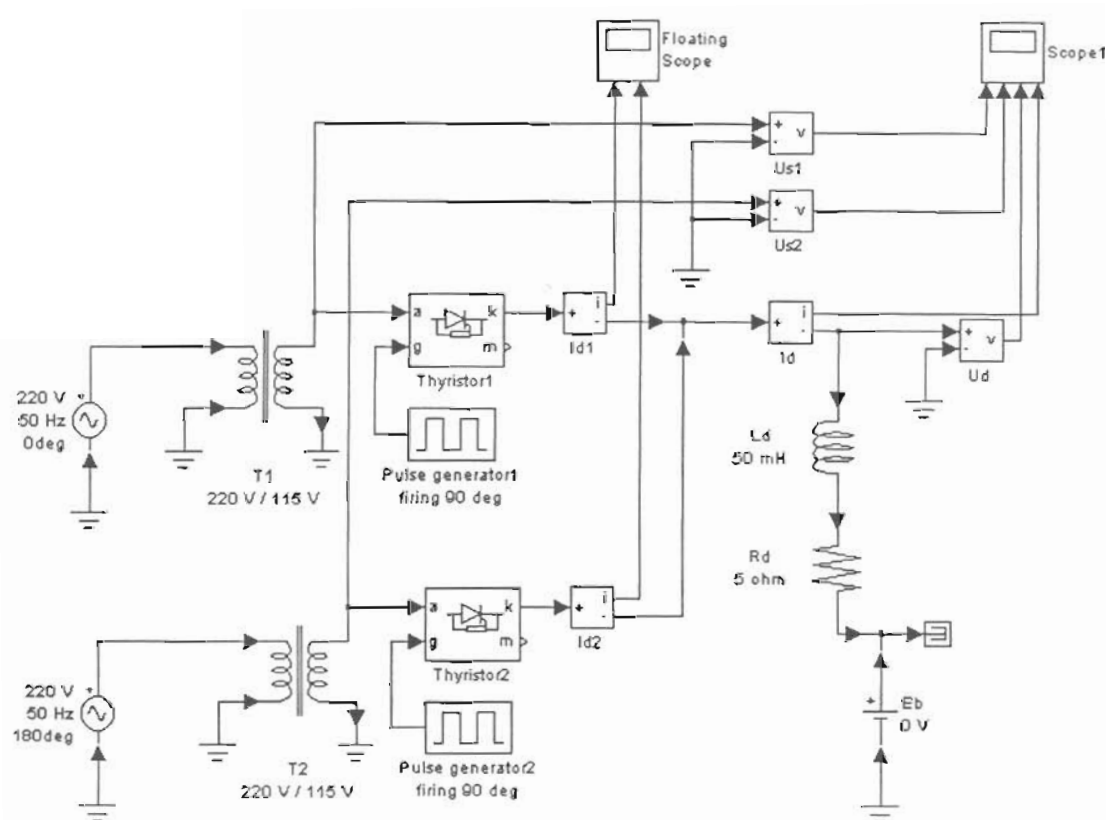
4.8.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.8.2.1บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC Development Board V2.10)

4.8.2.2 เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม MATLAB Simulink (MATLAB 6.5 Release 13)

4.8.3 ขั้นตอนการทดลอง

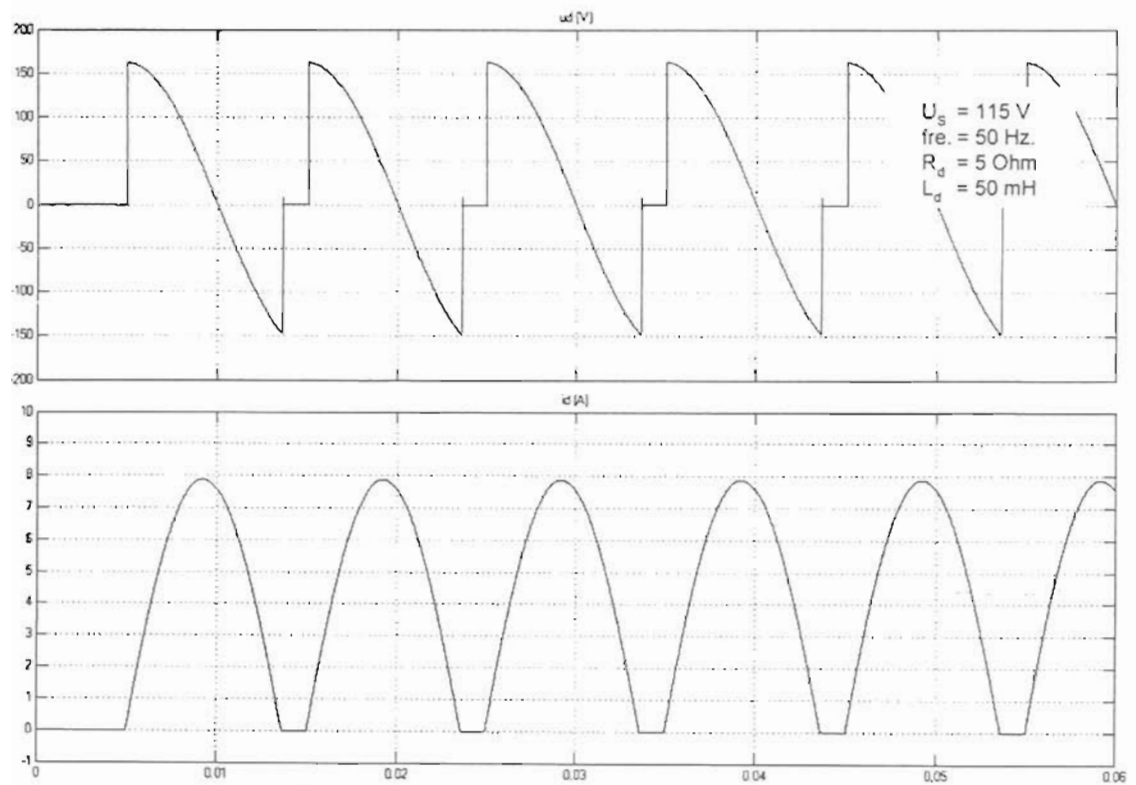
4.8.3.1 คัดลอก Simulink ดังในภาพที่ 4-27 เพื่อใช้เป็นแบบจำลองระบบตัวอย่างอ้างอิง ค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของระบบจำลองนี้ถือเป็นค่าอ้างอิงในการทดสอบเช่นกัน หลังจากดำเนินการจำลองระบบดังกล่าวแล้ว ให้บันทึกค่า U_s , ความถี่ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ, R_d , i_d ณ เวลา t เท่ากับ 9 มิลลิวินาทีหลังแรงดันสายมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง



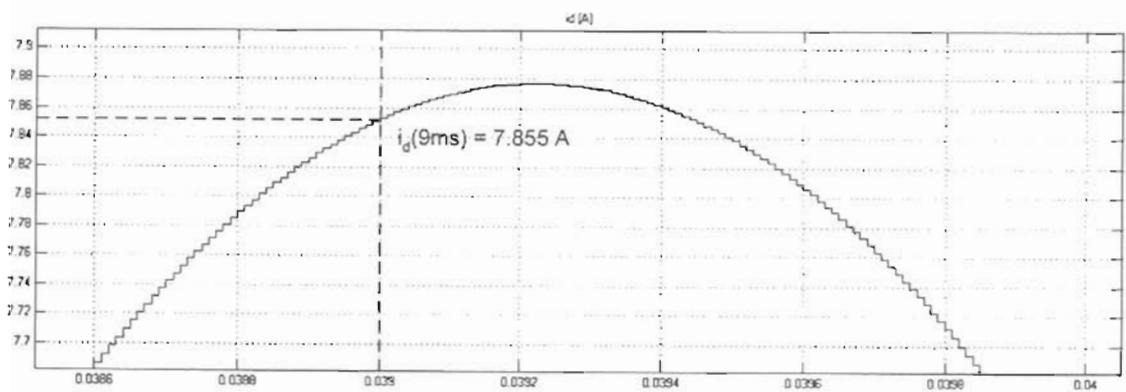
ภาพที่ 4-27 แบบจำลองระบบตัวอย่างซึ่งสร้างด้วย Simulink

4.8.3.2 แยกซอฟต์แวร์การแก้แบบจำลองและคำนวณค่าความเหนี่ยวนำออกจากซอฟต์แวร์ส่วนอื่น แล้วนำค่า U_s , ความถี่ของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ, R_d , i_d ณ เวลา t เท่ากับ 9 มิลลิวินาทีหลังแรงดันสายมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งได้จากการจำลองด้วย Simulink แทนลงในแบบจำลองที่สร้างขึ้นตามงานวิจัย แล้วให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลแก้แบบจำลองดังกล่าว บันทึกค่า L_d ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่า L_d อ้างอิง ใน Simulink

4.8.4 ผลการทดลอง การจำลองระบบตัวอย่างซึ่งสร้างด้วย Simulink ได้ผลดังภาพที่ 4-28



(ก) รูปคลื่น u_d และ i_d จากการจำลองระบบตัวอย่างด้วย Simulink



(ข) รูปคลื่น i_d เมื่อพิจารณาเฉพาะบริเวณค่ากระแสที่เวลา 9 มิลลิวินาทีหลังแรงดันสายมีค่าเป็นศูนย์

ภาพที่ 4-28 รูปคลื่นแรงดัน u_d และรูปคลื่นกระแส i_d จากการจำลองระบบตัวอย่างด้วย Simulink

เมื่อป้อนค่าตัวแปรที่จำเป็นในการแก้แบบจำลองตามค่าอ้างอิงจาก Simulink พบว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถแก้แบบจำลองและคำนวณค่า L_d ได้เท่ากับ 50.02 มิลลิเฮนรี่

4.8.5 สรุปผลการทดลอง การทดลองยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น และแก้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขมีความแม่นยำของคำตอบที่ได้สูง จึงมั่นใจได้ว่าหาสามารถค่าตัวแปรอิสระที่มีความแม่นยำมาใส่ในแบบจำลองนี้ได้แล้ว การแก้แบบจำลองดังกล่าวโดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงได้ (ภายใต้เงื่อนไขการสร้างแบบจำลอง เช่น แรงดันที่ด้าน AC ของคอนเวอเตอร์เป็นรูปไซน์ที่ไม่มีฮาร์มอนิก)

4.9 การทดสอบ การหาทดสอบระบบรวมในสถานะการใช้งานจริง

4.9.1 วัตถุประสงค์การทดลอง เพื่อหาความแม่นยำ, การกระจายตัวและลักษณะความเบี่ยงเบนของทั้งค่าตัวแปรที่จำเป็นในการแก้แบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ โดยทดสอบในสถานะเดียวกับสถานะการใช้งานจริง ตามที่ได้ออกแบบไว้

4.9.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.9.2.1 บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroByte Electronics PIC Development Board V2.10)

4.9.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer 220V/110V 1.6kVA)

4.9.2.3 คอนเวอเตอร์ชนิดควบคุมเฟสแบบเต็มคลื่น

4.9.2.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 kW

4.9.2.5 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์แบบค่าประสิทธิภาพผลแท้จริง (True RMS Digital Multimeter HEWLETT PACKARD 973A)

4.9.2.6 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope Tektronix TDS420A)

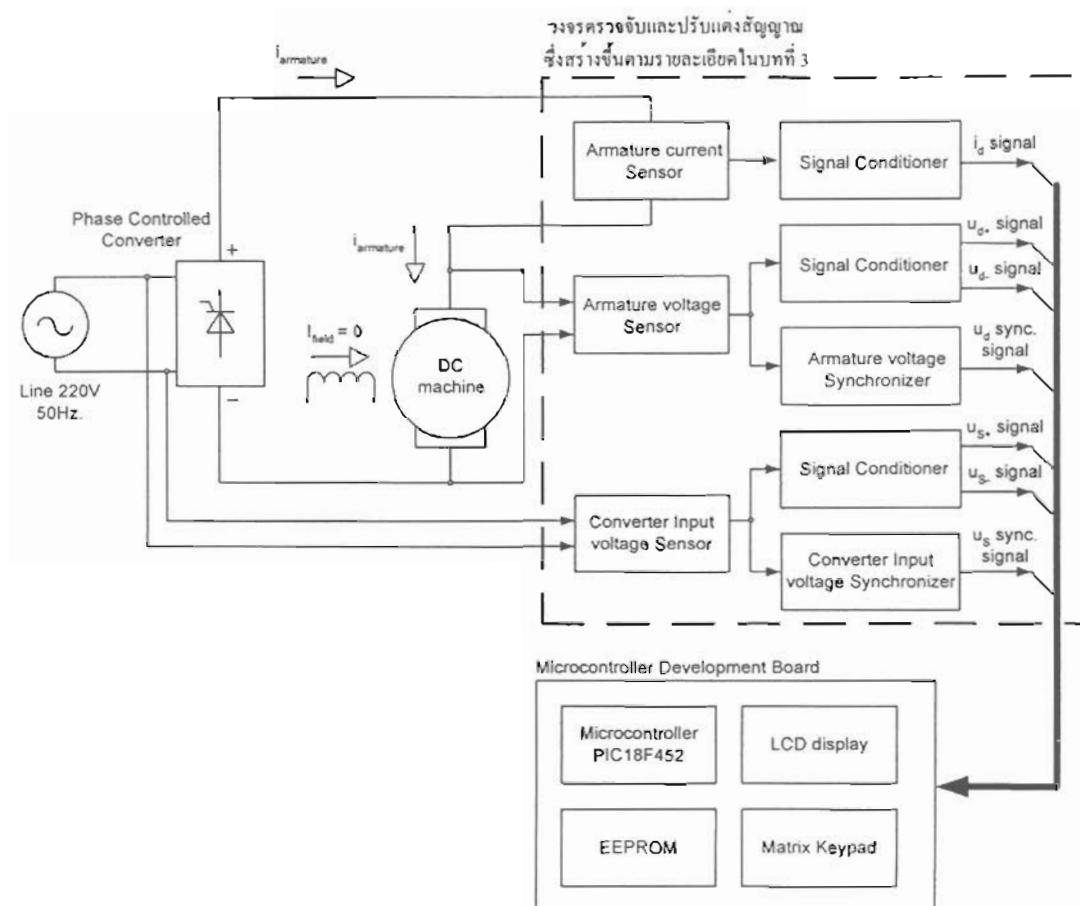
4.9.2.7 หัววัดสัญญาณผลต่าง (Differential Probe YOKOGAWA 700925)

4.9.3 ขั้นตอนการทดลอง

4.9.3.1 ต่อยंत्रทดสอบดังภาพที่ดังในภาพที่ 4-29

4.9.3.2 เขียนซอฟต์แวร์ให้แสดงค่าตัวแปรอิสระที่คำนวณได้ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย U_s , $fre.$, U_d , I_d , $i_d(9ms)$ และ α' นอกเหนือจากการแสดงผลเฉพาะค่าพารามิเตอร์ R_d และ L_d

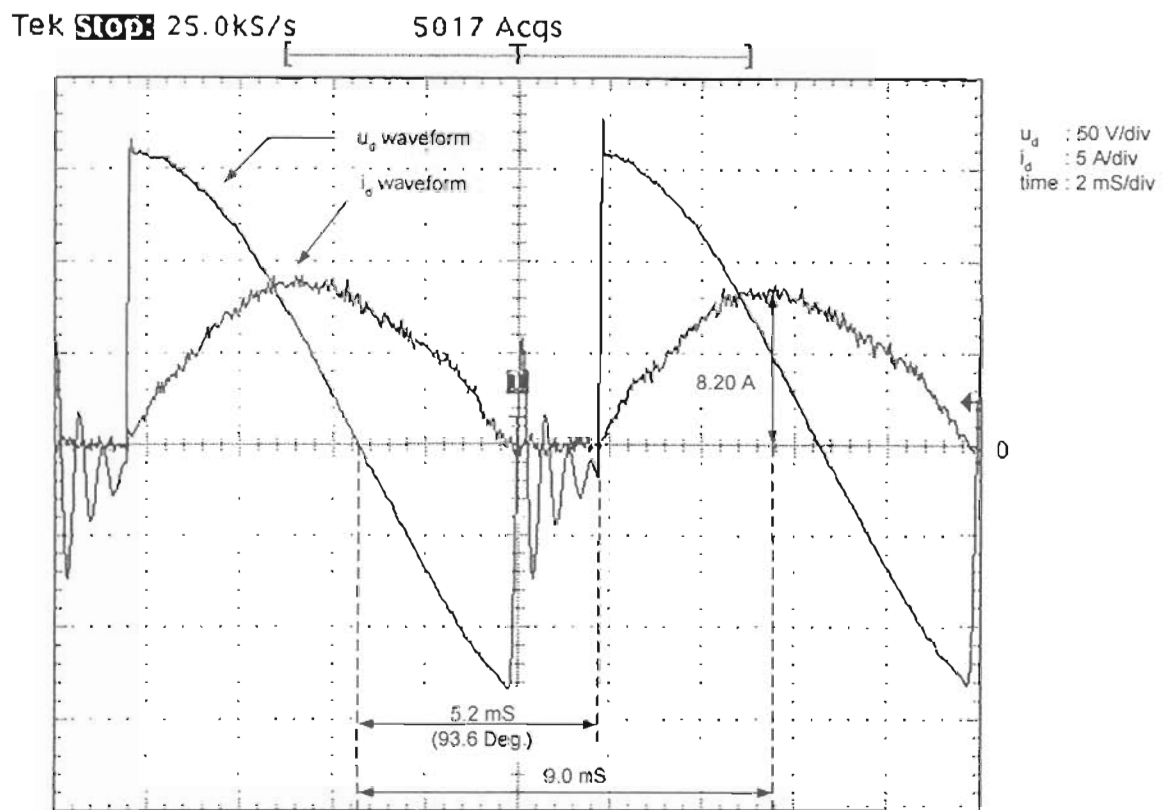
4.9.3.3 บันทึกค่าตัวแปรอิสระที่ได้จากเครื่องมือวัดต่างๆ และบันทึกค่าตัวแปรอิสระที่ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดง



ภาพที่ 4-29 วงจรทดสอบระบบการหาค่าพารามิเตอร์ภายใต้สภาวะเดียวกับการใช้งานจริง

4.9.4 ผลการทดลอง เนื่องค่าตัวแปรอิสระบางตัวไม่สามารถวัดได้โดยตรงด้วยเครื่องมือวัด แต่สามารถหาได้โดยอาศัยรูปคลื่นสัญญาณจากออสซิลโลสโคป ดังภาพที่ 2-30 เป็นตัวอย่างการหาค่ามุมจุดชนวนโดยอาศัยการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคป

ผลการทดลองที่มุมจุดชนวน 90 องศา, 115 องศา และ 140 องศา แสดงในตารางที่ 4-8 ถึงตารางที่ 4-50 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-30 ตัวอย่างการหาค่า $i_{d1=9\text{mS}}$ และ α' จากรูปคลื่น i_d และรูปคลื่น u_d

ตารางที่ 4-8 ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการตามงานวิจัย และค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอื่น เมื่อคอนเวอเตอร์ที่จับรั่วจุดชนวนที่ 90°

ทดสอบครั้งที่	เครื่องมือในการวัด หรือ คำนวณค่าตัวแปรที่จำเป็น และค่าพารามิเตอร์	ค่าของตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จาก แบบจำลอง						ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้	
		U_s (V _{RMS})	Line Fre. (Hz.)	U_d (V _{AVG})	I_d (A _{AVG})	i_{d1-9ms} (A)	α' (Deg.)	L_d (mH.)	R_d (Ω)
1	ไมโครคอนโทรลเลอร์	114.78	50.01	18.06	4.26	8.11	91.75	48.32	4.23
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	115.8	50.0	21.50	4.51	8.44	93.9	-	4.78
2	ไมโครคอนโทรลเลอร์	113.72	50.01	21.83	4.40	8.08	92.83	45.01	4.95
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	115.7	50.0	22.03	4.54	8.80	91.4	-	4.85
3	ไมโครคอนโทรลเลอร์	114.64	50.06	22.24	4.39	8.09	92.27	45.63	5.05
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	115.9	50.0	22.25	4.51	8.80	90.7	-	4.93
4	ไมโครคอนโทรลเลอร์	114.33	50.04	21.83	4.40	8.26	92.18	44.62	4.95
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	115.7	50.0	22.55	4.57	8.64	92.9	-	4.93

ค่า i_{d1-9ms} ในแถวของ มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป ได้จากการอ่านค่าจากรูปคลื่น i_d และ u_d ดังตัวอย่างในภาพที่ 4-29

ค่า L_d ไม่สามารถวัดหรือคำนวณด้วยวิธีทั่วไปจากรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่วัดขณะจับรั่วด้วยคอนเวอเตอร์ชนิดควมเฟส

ตารางที่ 4-9 ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการตามงานวิจัย และค่าที่ได้จากเครื่องมีอีกชิ้นเมื่อคอนเวอเตอร์ที่จับเร้าจุดชนวนที่ 115°

ทดสอบครั้งที่	เครื่องมือในการวัด หรือ คำนวณค่าตัวแปรที่จำเป็น และค่าพารามิเตอร์	ค่าของตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จาก แบบจำลอง							ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้	
		U_s (V _{RMS})	Line Fre. (Hz.)	U_d (V _{AVG})	I_d (A _{AVG})	$i_{d(t=9ms)}$ (A)	α' (Deg.)	L_d (mH.)	R_d (Ω)	
1	ไมโครคอนโทรลเลอร์	114.95	50.04	9.69	2.05	4.78	116.17	47.90	4.71	
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.2	50.0	10.66	2.12	5.20	115.2	-	5.03	
2	ไมโครคอนโทรลเลอร์	116.05	50.05	9.09	2.08	4.81	117.08	47.27	4.35	
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.3	50.0	10.60	2.11	4.88	117.5	-	5.02	
3	ไมโครคอนโทรลเลอร์	116.15	50.04	11.06	2.03	4.91	116.70	44.99	5.43	
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.3	50.0	10.61	2.12	5.56	113.8	-	5.00	
4	ไมโครคอนโทรลเลอร์	115.73	50.03	11.32	2.09	4.82	115.47	47.73	5.39	
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.0	50.0	10.75	2.15	4.94	117.6	-	5.00	

ค่า $i_{d(t=9ms)}$ ในแถวของ มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป ได้จากการอ่านค่าจากรูปคลื่น i_d และ u_d ดังตัวอย่างในภาพที่ 4-29

ค่า L_d ไม่สามารถวัดหาคำนวณด้วยวิธีทั่วไปจากรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่วัดขณะขับเร้าด้วยคอนเวอเตอร์ชนิดความดันเฟส

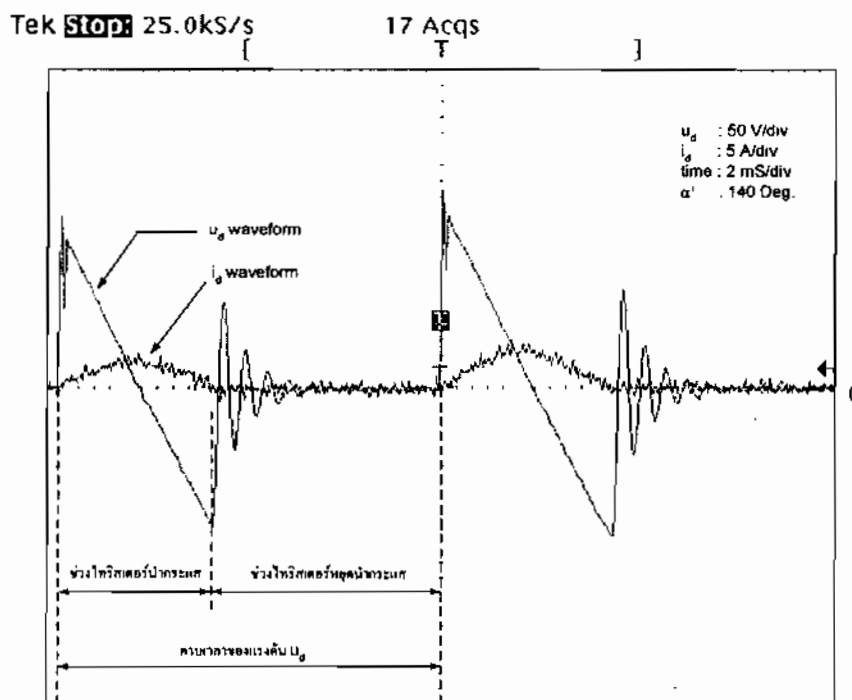
ตารางที่ 4-10 ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการตามทฤษฎีและค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดอื่น เมื่อคอนเวอเตอร์ที่จับเร้าจุดชนวนที่ 140°

ทดสอบครั้งที่	เครื่องมือในการวัด หรือ คำนวณค่าตัวแปรที่จำเป็น และค่าพารามิเตอร์	ค่าของตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง						ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้	
		U_s (V _{RMS})	Line Fre. (Hz.)	U_d (V _{AVG})	I_d (A _{AVG})	$i_{d(1-9\text{ ms})}$ (A)	α' (Deg.)	L_d (mH.)	R_d (Ω)
1	ไมโครคอนโทรลเลอร์	116.34	50.05	1.66	0.58	1.45	140.83	47.90	4.71
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.70	50.0	2.65	0.55	1.84	139.0	-	4.82
2	ไมโครคอนโทรลเลอร์	116.20	49.99	2.24	0.57	1.46	141.26	47.27	4.35
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.70	50.0	2.71	0.58	1.90	136.8	-	4.67
3	ไมโครคอนโทรลเลอร์	116.41	50.05	1.36	0.54	1.34	141.32	44.99	5.43
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.90	50.0	2.61	0.54	1.30	141.8	-	4.83
4	ไมโครคอนโทรลเลอร์	116.57	50.01	3.26	0.54	1.42	141.02	47.73	5.39
	มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป	117.90	50.0	2.67	0.56	1.48	141.8	-	4.77

ค่า $i_{d(1-9\text{ ms})}$ ในแถวของ มัลติมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป ได้จากการอ่านค่าจากรูปคลื่น i_d และ n_d ดังตัวอย่างในภาพที่ 4-29

ค่า L_d ไม่สามารถวัดหรือคำนวณด้วยวิธีทั่วไปจากรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่วัดขณะจับเร้าด้วยคอนเวอเตอร์ชนิดความถี่สูง

4.9.5 สรุปผลการทดลอง ผลการทดลองตามตารางที่ 4-8 และ 4-9 พบว่าค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดอื่นๆ แต่ค่า U_d ในตารางที่ 4-10 มีคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากโวลต์มิเตอร์ประมาณ 31% โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของ U_d จากตารางที่ 4-8 ถึงตารางที่ 4-10 พบว่าการเพิ่มมุมเริ่มจุดชนวนคอนเวเตอร์ที่ขับเร้ามีผลทำให้ค่า U_d ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากโวลต์มิเตอร์มากขึ้น ซึ่งเกิดจากในทางปฏิบัติไทรสเตอร์ในคอนเวเตอร์ที่ขับเร้าจะมีสแน็บเบอร์ป้องกัน dv/dt เกินพิกัด สแน็บเบอร์นี้ส่งผลให้แรงดัน u_d เกิดการแกว่งซึ่งเป็นผลตอบสนองธรรมชาติของวงจรอันดับสอง ดังภาพที่ 4-31 ความถี่ของการแกว่งส่วนหนึ่งขึ้นกับค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าของสแน็บเบอร์ แต่ไม่ขึ้นกับมุมจุดชนวน โดยทั่วไปความถี่ของการแกว่งจะค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับความถี่ของแรงดันด้าน DC ของคอนเวเตอร์แบบควบคุมเฟส ดังนั้นอัตราการสุ่มสัญญาณเพื่อหาค่าเฉลี่ยของแรงดันด้าน DC ของคอนเวเตอร์ (U_d) อาจไม่สูงพอที่จะสุ่มหาค่าเฉลี่ยของแรงดันในช่วงของการแกว่งนี้ได้อย่างแม่นยำ ทำให้เมื่อเราจุดชนวนคอนเวเตอร์ด้วยมุมจุดชนวนค่ามากๆ ซึ่งแรงดันเฉลี่ยที่ได้ในช่วงที่คอนเวเตอร์นำกระแสจะมีค่าต่ำ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการคำนวณแรงดันเฉลี่ยช่วงที่ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสซึ่งขณะนั้นแรงดัน u_d เกิดการแกว่งจึงมีผลต่อแรงดันเฉลี่ยตลอดคาบของ u_d อย่างมีนัยสำคัญสูง



ภาพที่ 4-31 การแกว่งของแรงดัน u_d ช่วงที่ไทรสเตอร์หยุดนำกระแส

4.10 การทดสอบเทียบผลการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ และวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น

เมื่อทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวอย่างด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานในการหาค่าพารามิเตอร์วิธีหนึ่ง (การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นแสดงในภาคผนวก ก) โดยใช้กระแสทดสอบ 3 แอมแปร์เปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่กระแสทดสอบขนาดเท่ากัน ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวอย่างด้วยวิธีออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์ และวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น (ทั้งสองวิธีทดสอบที่กระแส 3 แอมแปร์)

วิธีทดสอบ	ครั้งที่	ความเหนี่ยวนำ L_d (mH)	ความต้านทาน R_d (Ω)
วิธีออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์	1	47.63	5.15
	2	47.28	4.98
	3	46.64	5.07
	4	48.19	5.15
	5	46.78	5.03
	เฉลี่ย	47.30	5.08
วิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น	1	59.17	5.21
	2	58.49	5.22
	3	57.80	5.22
	4	57.64	5.22
	5	58.24	5.26
	เฉลี่ย	58.27	5.23

จากการทดสอบพบว่าทั้งสองวิธีได้ค่าพารามิเตอร์ความต้านทานใกล้เคียงกันเนื่องจากทั้งสองวิธีใช้ความสัมพันธ์ของแรงดันเฉลี่ยที่ไหลกับกระแสเฉลี่ยที่ผ่านไหลนั้น เหมือนกัน ตามสมการที่ (4-1)

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} \quad (4-1)$$

แต่ค่าพารามิเตอร์ความเหนียวที่ได้จากวิธีออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น มีความแตกต่างกันราว 19% ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าคงตัวเวลาของกระแส i_d โดยแท้จริงแล้วเป็นไปตามสมการที่ (4-2) แต่การคำนวณค่า L_d ใช้สมการที่ (4-3) ซึ่งละเลย R_s ทำให้ค่า L_d ที่ได้คลาดเคลื่อนไป

$$\tau_d = \frac{L_d}{R_s + R_d} \quad (4-2)$$

เมื่อละเลย R_s จะได้

$$L_d = \tau_d R_d \quad (4-3)$$

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในการใช้งานกับระบบจริงที่มักมีสแน็บเบอร์อยู่ในวงจรภาคกำลังด้วยทำให้รูปคลื่น u_g ต่างไปจากสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ทางทฤษฎีแล้วความแตกต่างในส่วนนี้จะไม่ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้คลาดเคลื่อนไป เนื่องการแกว่งของ u_g ในช่วงไทรสเตอร์หยุดนำกระแสไม่มีผลกระทบต่อค่าแรงดัน u_g เฉลี่ยที่เราต้องใช้ เนื่องจากแรงดันเฉลี่ยที่เกิดจากการแกว่งมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติอัตราการสุ่มค่าแรงดัน u_g ไม่สูงพอเนื่องจากข้อจำกัดด้านเนื้อที่ของหน่วยความจำข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้มีไม่มากพอที่จะเก็บค่าตัวแปรจากการสุ่มที่ถี่มากๆ ได้ แต่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของ U_g ที่คำนวณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับโวลต์มิเตอร์ เมื่อขับเร้าระบบตัวอย่างด้วยมุมจุดชนวน 90 องศา มีเพียง 5% โดยประมาณ แต่ถ้าทำการขับเร้าด้วยมุมจุดชนวนที่มากขึ้นค่าความผิดพลาดจากการหาค่าเฉลี่ยช่วงที่แรงดัน u_g แกว่งจะมีผลต่อค่าเฉลี่ยตลอดคาบของ u_g มากขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของ U_g ที่คำนวณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เทียบกับโวลต์มิเตอร์ เมื่อขับเร้าระบบตัวอย่างด้วยมุมจุดชนวน 140 องศา มีค่า 31% โดยประมาณ ค่า U_g ที่คลาดเคลื่อนไปมากในกรณีนี้ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูงตามไปด้วย ดังนั้นการใช้งานระบบหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ที่ออกแบบและนำเสนอในที่นี้จะมีที่น่าเชื่อถือสูงเฉพาะเมื่อจุดชนวนระบบขับเร้าด้วยมุมจุดชนวนค่าน้อยเช่น 90 องศา

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของ U_g ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แนวทางการพัฒนาปรับปรุงระบบการหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่น่าเชื่อถือสูงได้แม้ขับเร้าระบบด้วยมุมจุดชนวนค่ามากๆ อาจทำได้หลายทาง ดังนี้

5.2.1 เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ๆ ที่มีเนื้อที่หน่วยความจำข้อมูลสูง แล้วเพิ่มอัตราการสุ่มข้อมูล วิธีนี้อัตราการสุ่มที่สามารถเพิ่มขึ้นได้จะขึ้นอยู่กับเนื้อที่หน่วยความจำข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์

5.2.2 ใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วสูง แล้วทำการประมวลผลค่าที่สุ่มได้ทันทีก่อนการสุ่มค่าครั้งถัดไป ทำให้ไม่ติดข้อจำกัดด้านเนื้อที่หน่วยความจำข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่อัตราการสุ่มที่เพิ่มขึ้นได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการประมวลผลข้อมูลที่สุ่มได้แทน

5.2.3 ทำการสุ่มเก็บค่า u_i เฉพาะช่วงที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส วิธีนี้จะขจัดปัญหาความคลาดเคลื่อนของแรงดันเฉลี่ยที่หาได้ซึ่งเกิดจากการแกว่งของ u_i ขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสได้อย่างสิ้นเชิง แต่วิธีนี้อาจมีความซับซ้อนของโปรแกรมซอฟต์แวร์มากขึ้นวิธีนี้จึงจำกัดด้วยเนื้อที่หน่วยความจำข้อโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารอ้างอิง

1. ชีรพล เดโชเกียรติวัธย์. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า 1. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2547.
2. อรรถกริช ช่างวัฒนา. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง I.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548. (อัดสำเนา)
3. ศิริพงษ์ ศรีพิพัฒน์. คณิตศาสตร์เชิงตัวเลขสำหรับคอมพิวเตอร์. สงขลา : ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2528.
4. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
5. Chapra, Steven C. and Canale, Raymond P. Numerical method for engineers : with software and programming applications. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 2002.

ภาคผนวก ก

การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น (Step Response Method)

การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น

การหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ต่อกันอย่างอนุกรมด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น ทำโดยป้อนแรงดันแบบขั้นกระตุ้น โหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ต้องการหาค่า แล้ววัดค่าคงตัวเวลาของรูปคลื่นกระแส, ขนาดของกระแสและแรงดันในสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ก็จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของโหลดได้ วงจรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นและตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและแรงดันแสดงในภาพที่ ก-1 รูปคลื่นดังกล่าวสามารถนำมาใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ R_a และ L_a ได้ดังนี้

จากสมการกระแสของวงจรความต้านทานอนุกรมกับความเหนี่ยวนำซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแรงดันแบบขั้น

$$i_a = \frac{U_{t=\infty}}{I_{t=\infty}} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) u(t) \quad ; \quad u(t) \text{ คือ ฟังก์ชันแบบขั้น} \quad (\text{ก-1})$$

สมการที่ (ก-1) เมื่อ $t = \tau$ หรือ $t = L_a/R_a$ จะได้

$$i_a = 0.632 \frac{U_{t=\infty}}{I_{t=\infty}} \quad (\text{ก-2})$$

จากภาพที่ ก-2 (ข) พบว่ากระแส i_a มีค่า $0.632 \frac{U_{t=\infty}}{I_{t=\infty}}$ ที่เวลา 10.4 มิลลิวินาที

นั่นคือ $\tau_a = 10.4$ มิลลิวินาที

ที่ $t = \infty$ แรงดัน $U_{t=\infty}$ และกระแส $I_{t=\infty}$ มีค่า 15.28 โวลต์ และ 3.00 แอมแปร์ ตามลำดับ

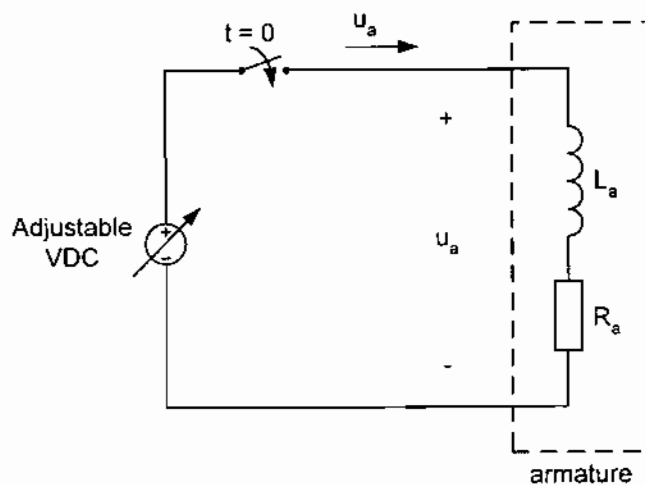
$$\text{จาก} \quad R_a = \frac{U_{t=\infty}}{I_{t=\infty}} \quad (\text{ก-3})$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R_a = 5.09$$

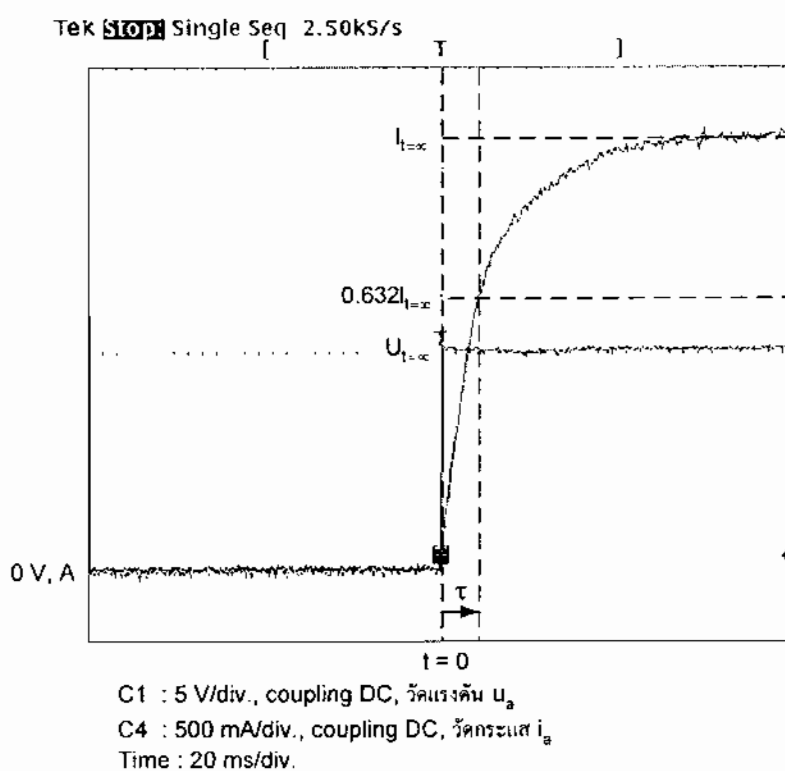
$$\text{และจาก} \quad \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (\text{ก-4})$$

$$\text{จะได้} \quad L_a = (10.4 \times 10^{-3})(5.09)$$

$$L_a = 52.97 \text{ มิลลิเฮนรี่}$$



(ก) วงจรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ด้วยผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น



(ข) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในวงจรหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเลื่อนเฟส

ภาพที่ ก-1 วงจรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีเลื่อนเฟส และรูปคลื่นกระแสและแรงดัน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายนัฐพล ค่อยประเสริฐ
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์โดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ.2521 ที่กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2544 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ในปีการศึกษา 2545

สถานที่ติดต่อ 113/1 ถ.เจริญสนิทวงศ์ แขวงบางพลัด เขตบางพลัด กรุงเทพมหานคร