



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง ชุดฝึกอบรมศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย DSP (TMS320F2812) ที่มีการ
ควบคุมแบบ Real-time
Power Electronics Engineering Education Experimental Set with DSP
(TMS320F2812) in Real-time Control System

ผู้วิจัย

นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

RMUTK - CARIT



โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

กรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2553

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง ชุดฝึกวิศวกรรมศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย DSP (TMS320F2812) ที่มีการ
ควบคุมแบบ Real-time
Power Electronics Engineering Education Experimental Set with DSP
(TMS320F2812) ที่ Real-time Control System



ผู้วิจัย

นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

RMUTK - CARIT



3 2000 00100668 5

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

กรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2553

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

๑๖๖

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้จัดทำชุดฝึกศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย DSP (TMS320F2812) ที่มีการควบคุมแบบ Real-time โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2553 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำชุดฝึกต้นแบบและทดลองใช้ชุดฝึกเพื่อประโยชน์ทางการศึกษา

นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข

ผู้วิจัย

หัวข้อวิจัย	ชุดฝึกศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย DSP (TMS320F2812) ที่มีการควบคุมแบบ Real-time
ผู้วิจัย	นายชาญฤทธิ์ ธาราตันดิสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีงบประมาณ	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยได้ออกแบบและจัดทำชุดฝึกด้านวิศวกรรมศึกษาด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยมี การทดลองของตัววงจรสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสวิตช์กำลังและอุปกรณ์พาสซีฟด้วยรีเลย์ เพื่อ ความสะดวกในการทำการทดลอง ลดเวลา และอุปกรณ์ทดลอง การสร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชั่น (PWM) สำหรับมอเตอร์กำลัง จะใช้ความสามารถของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ผ่าน โปรแกรม Matlab/Simulink ที่มีการควบคุมแบบทันเวลา ทำให้มีสะดวกในการ สร้างสัญญาณ PWM

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งหมดที่สามารถทดลองประกอบด้วยวงจรแปลงผันดิษฐ์ดีซี แบบบัก บูส บัก-บูส ฟอร์เวิร์ด ฟลายแบค และอินเวอร์เตอร์สามเฟส

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ทฤษฎีวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง	4
2.2 มอสเฟตกำลัง	28
2.3 ไดโอด	35
2.4 ตัวเหนี่ยวนำ และการออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่	37
2.5 หลักการทำงานของไอซี HCPL 316J	41
2.6 สถาปัตยกรรมของ TMS320F2812	42
2.7 หน่วยประมวลผลกลาง	44
2.8 สถาปัตยกรรมของหน่วยประมวลผลกลาง	45
2.9 รีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง	46
2.10 การจัดฝั่งหน่วยความจำ	48
2.11 อุปกรณ์ต่อเชื่อม	49
2.12 ระบบควบคุมแบบทันเวลาด้วย eZdsp	53
บทที่ 3 การออกแบบงานวิจัย	
3.1 วงจรควบคุม	60
3.2 วงจรแปลงผันแบบบัค	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วงจรแปลงผันแบบบูส	64
3.4 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส	65
3.5 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	67
3.6 วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	69
3.7 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่	71
3.8 การสั่งรีเลย์เพื่อควบคุมวงจรกำลังด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877	76
3.9 โปรแกรมควบคุม	81
3.10 การใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio 3.1	84
บทที่ 4 ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์	
4.1 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค	88
4.2 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบูส	95
4.3 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส	102
4.4 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	109
4.5 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	118
4.6 การทดลองแรงดันเข้าพุดขณะสแตปโพลตของชุดฝึก	127
4.7 การทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส	129
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	136
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	136
5.3 ข้อเสนอแนะ	137
บรรณานุกรม	138
ภาคผนวก ก. คู่มือใช้งาน	139
ภาคผนวก ข. รูปภาพวิจัย	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองวงจรแปลงคั่นแบบบั๊ก	93
4.2 ผลการทดลองวงจรแปลงคั่นแบบบูส	100
4.3 ผลการทดลองวงจรแปลงคั่นแบบบั๊ก-บูส	107
4.4 ผลการทดลองวงจรแปลงคั่นแบบฟลายแบค ($\frac{N_2}{N_1} = 0.66$)	116
4.5 ผลการทดลองวงจรแปลงคั่นแบบฟอร์เวิร์ด ($\frac{N_2}{N_1} = 0.66$)	125

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์กำลังประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม	1
1.2 ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์กำลังประยุกต์ใช้งานกับพลังงานแสงอาทิตย์	1
2.1 หลักการควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรงโดยใช้มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์	5
2.2 การควบคุมความกว้างพัลส์	6
2.3 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบัก	7
2.4 รูปคลื่นวงจรกรณีกระแสต่อเนื่อง	9
2.5 คลื่นกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง	10
2.6 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง	11
2.7 รูปคลื่น i_C และ V_O	11
2.8 รูปคลื่นกระแส i_L i_S และ i_D	13
2.9 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบัส	14
2.10 รูปคลื่นกรณีกระแสไหลต่อเนื่อง	15
2.11 รูปคลื่นกรณีกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง	16
2.12 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง	17
2.13 รูปคลื่น i_C และ V_O	18
2.14 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบัก-บัส	19
2.15 รูปคลื่นกรณีกระแสไหลต่อเนื่อง	20
2.16 รูปคลื่นกรณีกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง	21
2.17 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง	22
2.18 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	23
2.19 รูปคลื่น V_{Lm} และ I_{Lm} กรณีกระแสต่อเนื่อง	25
2.20 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	26
2.21 รูปคลื่น I_{Lm} , I_L และ V_L กรณีกระแส I_L ต่อเนื่อง	27
2.22 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตกำลัง	32
2.23 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาภายในมอสเฟตกำลัง	33
2.24 Gate Charge Chart	34
2.25 ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกต	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.26 การทำงานของไดโอด	36
2.27 การหุ้ยนํ้ากระแสของไดโอด	37
2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ H	38
2.29 วงจรขับนํ้าเกต	41
2.30 ไคอะแกรมเวลาของไอซี HCPL316J	42
2.31 บล็อกไคอะแกรมของ TMS320F2812	44
2.32 รีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง	48
2.33 ผังหน่วยความจำ	49
2.34 บล็อกไคอะแกรมของ Event Manager A	50
2.35 ระบบควบคุมแบบทันเวลาด้วย eZdsp	53
2.36 Matlab/Simulink Environment Setup	54
2.37 บล็อก F2812 eZdsp	54
2.38 ค่าเริ่มต้นของบอร์ด DSP เบอร์ TMS320F2812	55
2.39 Configuration parameters Setup	56
2.40 Real time Workshop Setup	56
2.41 การกำหนด Signal data types	57
2.42 การกำหนด Parameter data types	57
2.43 C28x IQmath Library	58
2.44 C2800 DSP Core Support	59
3.1 ชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับเป็นชุดทดลองแบบ Real-time	60
3.2 โครงสร้างภายในของไอซีเบอร์ UC3637	61
3.3 วงจรขับนํ้าเกตด้วยไอซีเบอร์ HCPL 316J	62
3.4 วงจรแปลงผันแบบบัค	63
3.5 วงจรแปลงผันแบบบูส	64
3.6 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส	65
3.7 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	67
3.8 วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 ขั้นตอนการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877	76
3.10 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	77
3.11 วงจรกำลังหลักและรีเลย์	78
3.12 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบบัก	78
3.13 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบบูส	78
3.14 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบบัก-บูส	79
3.15 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	79
3.16 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ด	80
3.17 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์สามเฟส	80
3.18 การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	81
3.19 บล็อก C28x PWM	81
3.20 บล็อก Space Vector Generator	82
3.21 บล็อก Inverse Park Transformation	82
3.22 บล็อก PID Control	82
3.23 บล็อก Ramp Generator	83
3.24 สัญญาณที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์	83
3.25 บล็อก QEP	83
3.26 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล	84
3.27 หน้าต่างโปรแกรม Code Composer Studio 3.1	85
3.28 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Code Composer Studio 3.1 กับบอร์ด DSP	85
3.29 โปรแกรม Code Composer Studio 3.1 เมื่อเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว	86
3.30 โปรแกรม Code Composer Studio 3.1 เมื่อหยุดเชื่อมต่อ	86
4.1 การต่อทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก	88
4.2 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	89
4.3 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันคกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	89
4.4 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	90
4.5 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	91
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบบัก	94
4.8 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	92
4.9 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	92
4.10 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	93
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบบัก	94
4.12 การต่อการทดลองวงจรแปลงผันแบบบูส	95
4.13 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	96
4.14 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	96
4.15 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	97
4.16 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	97
4.17 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	98
4.18 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	98
4.19 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	99
4.20 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	99
4.21 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	100
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบบูส	101
4.23 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก-บูส	102
4.24 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	103
4.25 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	103
4.26 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	104
4.27 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	104
4.28 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	105
4.29 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	105
4.30 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})	106
4.31 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)	106
4.32 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบบัก-บูส	108
4.34 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	109
4.35 แรงดันอ้างอิงไฟกระสเตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})	110
4.36 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	110
4.37 กระแสผ่านขดลวดเซคันดารี แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	111
4.38 แรงดันอ้างอิงไฟกระสเตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})	112
4.39 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	112
4.40 กระแสผ่านขดลวดเซคันดารี แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	113
4.41 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)	113
4.42 แรงดันอ้างอิงไฟกระสเตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})	114
4.43 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	114
4.44 กระแสผ่านขดลวดเซคันดารี แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	115
4.45 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)	115
4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	117
4.47 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	118
4.48 แรงดันอ้างอิงไฟกระสเตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})	119
4.49 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	119
4.50 แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	120
4.51 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)	120
4.52 แรงดันอ้างอิงไฟกระสเตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})	121
4.53 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ PWM	121
4.54 แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ PWM	122
4.55 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)	122
4.56 แรงดันอ้างอิงไฟกระสเตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})	123
4.57 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	123
4.58 แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ (PWM)	124
4.59 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)	124

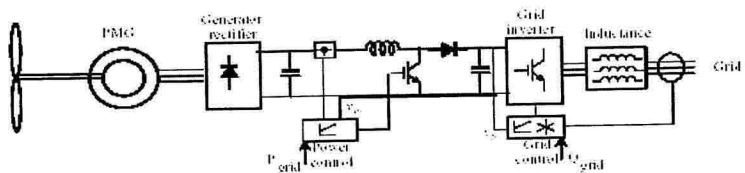
สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	126
4.61 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก	127
4.62 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบบูส	127
4.63 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก-บูส	128
4.64 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค	128
4.65 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด	129
4.66 โปรแกรมควบคุม Matlab / Simulink	129
4.67 สัญญาณ SVPWM ที่ได้จากโปรแกรมควบคุม Matlab / Simulink	130
4.68 สัญญาณ SVPWM ทั้งสามเฟสสำหรับขับมอเตอร์	130
4.69 การหน่วงเวลาของสัญญาณขับเคลื่อนหลัก	131
4.70 การหน่วงเวลาของสัญญาณขับเคลื่อนหลัง	131
4.71 สัญญาณ SVPWM แรงดันและกระแสเฟส A	132
4.72 กระแสที่มอดูเลตทั้งสามเฟส	132
4.73 แรงดันกับกระแสเฟส A	133
4.74 แรงดันกับกระแสเฟส B	133
4.75 แรงดันกับกระแสเฟส C	134
4.76 แรงดันระหว่างสายทั้งสามเฟส	134
4.77 แรงดันเฟสทั้งสามเฟส	135

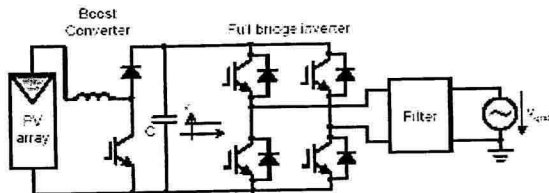
บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถือเป็นวิชาหลักตามหลักสูตรของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอยู่ในเกณฑ์รายวิชาบังคับของสภามหาวิทยาลัย อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้งานเชื่อมโยงกับวิชาด้านระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าและพลังงานทดแทน อาทิเช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์กำลังประยุกต์ใช้งานกับพลังงานลม



ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างอิเล็กทรอนิกส์กำลังประยุกต์ใช้งานกับพลังงานแสงอาทิตย์

อย่างไรก็ตามการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานกับระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจะต้องมีระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นระบบควบคุมจะต้องมีความสามารถที่จะสร้างสัญญาณพัลส์วิทมอดดูเลชั่น(PWM) ตรวจสอบกระแสและแรงดัน ตรวจสอบความเร็วมอเตอร์ได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล (DSP) จึงเหมาะสมที่ใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบกับแนวโน้มราคาที่ถูกลงและใช้งานได้ง่ายขึ้น ชุดฝึกที่มี

ฟังก์ชันการทำงานหลากหลายที่สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานได้หลายวงจร และสามารถปรับเปลี่ยนวงจรทดลองได้ง่าย โดยชุดทดลองที่นำเสนอนี้มีข้อดีอยู่หลายอย่าง อาทิเช่น

1. ชุดฝึกมีความสามารถเปลี่ยนการทดลองได้หลายวงจร
2. ลดเวลาในการทดลอง และสามารถทดลองได้ตามทฤษฎีอย่างครบถ้วน
3. วงจรการทดลองได้ถูกออกแบบมาให้มีความใกล้เคียงกับการใช้งานของอุตสาหกรรม
4. ราคาของชุดฝึกมีราคาต่ำ และสามารถจัดหาอุปกรณ์ได้ภายในประเทศ
5. ลดการนำเข้าชุดฝึกด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังจากต่างประเทศ

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.1.1 เพื่อศึกษาข้อมูลของชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อใช้งานด้านวิศวกรรมสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
- 1.1.2 เพื่อศึกษาระบบควบคุมแบบ Real-time ด้วย DSP เบอร์ TMS320F2812
- 1.1.3 เพื่อจำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย MATLAB/ SIMULINK
- 1.1.4 เพื่อสร้างชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังพร้อมระบบควบคุม
- 1.1.5 เพื่อจัดทำคู่มือทดลองระบบควบคุมแบบ Real-time สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- 1.1.6 เพื่อถ่ายทอดความรู้ทางด้านชุดฝึกทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้กับหน่วยงานการศึกษาอื่นๆ

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาข้อมูลของชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถดัดแปลงให้เหมาะสมกับการใช้งานทางการศึกษาและตรงตามความต้องการด้านอุตสาหกรรม
- 1.2.2 ศึกษาข้อมูลของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุมแบบ Real-time
- 1.2.3 จัดทำแบบจำลองของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB/SIMULINK
- 1.2.4 สร้างชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลักและชุดตรวจับกระแสแรงดัน จำนวน 1 ชุด
- 1.2.5 พัฒนาโปรแกรมควบคุมแบบ Real-time สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังย่อยด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำนวน 1 ชุด
- 1.2.6 มีการควบคุมระบบแบบ Real-time ด้วย DSP เบอร์ TMS320F2812
- 1.2.7 จัดทำคู่มือการใช้งานระบบควบคุมแบบ Real-time สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวน 1 ชุด

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.3.1 ศึกษาข้อมูล จำลองการทำงานและจัดทำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วย DSP เบอร์ TMS320F2812 เพื่อเป็นชุดพัฒนาค้นแบบ

1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทางด้านกระแส แรงดัน ประสิทธิภาพ ของระบบควบคุม และการแสดงผล

1.3.3 วิเคราะห์การทำงานของระบบควบคุมแบบReal-time เปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.4 เก็บผลการทดลองจากชุดฝึกค้นแบบ

1.3.5 จัดทำใบงานการทดลองเผยแพร่ทางเว็บไซต์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

1.3.6 จัดทำสรุปเล่มรายงานการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เมื่องานวิจัยสำเร็จแล้วจะสามารถใช้เป็นแผงฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สอดคล้องกับความต้องการด้านอุตสาหกรรมต่อไป

1.4.2 เมื่องานวิจัยสำเร็จแล้วจะสามารถใช้เป็นชุดทดลองระบบควบคุมแบบทันเวลา (Real Time) ด้วย DSP เบอร์ TMS320F2812

1.4.3 สามารถนำผลงานไปค้นแบบเพื่อเผยแพร่งานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าให้กับระดับ อาชีวศึกษาและระดับมหาวิทยาลัยได้

1.4.4 สามารถส่งเสริมเพื่อพัฒนาเป็นงานชุดฝึกระดับสูงสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ในอนาคตได้

1.4.5 ได้งานวิจัยด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและอินเวอร์เตอร์เพื่อสามารถนำไปใช้กับร่วมกับงานวิจัยอื่นๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการออกแบบและสร้าง ชุดฝึกด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ทฤษฎีวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง วงจรอินเวอร์เตอร์
2. มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) และ ไดโอด (Diode)
3. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่
4. หลักการทำงานของไอซี HCLP 316J
5. การทำงานของตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล (DSP) TMS320F2812
6. ระบบควบคุมแบบทันเวลา (Real-time Control System) ด้วย eZdsp

2.1 ทฤษฎีวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง

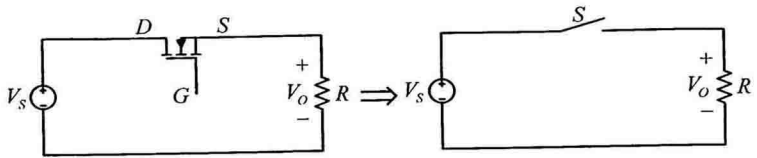
วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง หรือคิซึทซึคอนเวอร์เตอร์ คือวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ให้ได้แรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าแรงดันได้ตามที่โหลดต้องการ การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจะใช้วิธีการเปิดและปิดสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สลับกันอย่างต่อเนื่อง คิซึทซึคอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรภายใน โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป

การเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดมีข้อควรพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบตามลักษณะการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ วงจรแปลงผันตรงแบ่งตามคุณสมบัติของวงจรได้ 3 ประเภท คือ

1. วงจรลดค่าแรงดัน เป็นวงจรที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตเสมอ ได้แก่ วงจรแปลงผันตรงแบบบัค (Buck Converter)
2. วงจรเพิ่มค่าแรงดัน เป็นวงจรที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุตเสมอ ได้แก่ วงจรแปลงผันแบบบูส (Boost Converter)
3. วงจรลด-เพิ่มค่าแรงดัน เป็นวงจรที่สามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันอินพุตก็ได้ ได้แก่ วงจรแปลงผันบัค-บูส (Buck-Boost Converter)

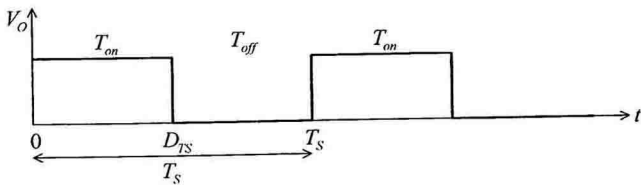
จากวงจรที่กล่าวถึงในข้างต้น อาจจะดัดแปลงไปเป็นวงจรชนิดอื่นๆเช่น วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค (Flyback Converter) วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด (Forward Converter) วงจรแปลงผันแบบพุช-พูล (Push-Pull Converter) วงจรแปลงผันแบบฟูลบริดจ์ (Full Bridge Converter)

2.1.1 หลักการควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง



ก. วงจรที่ใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์

ข. วงจรสมมูล



ค. รูปคลื่น

ภาพที่ 2.1 หลักการควบคุมวงจรแปลงผันตรงใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์

ขณะทรานซิสเตอร์นำกระแสได้ $V_O = V_S$ เรียกช่วงเวลานี้ว่า T_{on} ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแสได้ $V_O = 0$ เรียกช่วงเวลานี้ว่า T_{off}

$$T_S = T_{on} + T_{off}, \quad T_S = \frac{1}{f_s} \quad (0.1)$$

เมื่อ T_S คือ คาบเวลาของการสวิตช์ (Switching Time Period)

f_s คือ ความถี่การสวิตช์ (Switching Frequency)

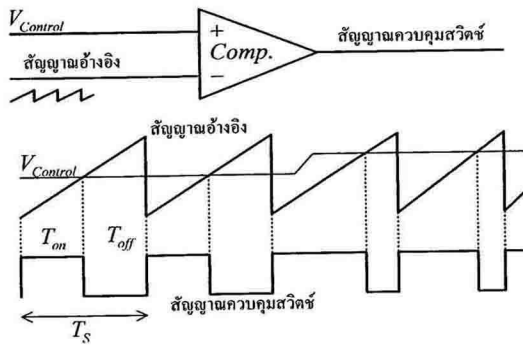
$$D = \frac{T_{on}}{T_S}, \quad T_{on} = DT_S \quad (0.2)$$

เมื่อ D คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle)

$$D' = \frac{T_{off}}{T_S} = \frac{T_S - T_{on}}{T_S} = 1 - D, \quad T_{off} = (1 - D)T_S \quad (0.3)$$

2.1.2 วิธีการควบคุมสวิตช์

1. ควบคุมความกว้างของพัลส์ (ช่วง T_{on}) โดยค่าความถี่ (f_s) มีค่าคงที่เรียกการควบคุมแบบนี้ว่าการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-width Modulation; PWM)
2. เปลี่ยนค่าความถี่ (f_s) เรียกการควบคุมแบบนี้ว่า การมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation; FM)
3. ควบคุมโดยวิธีที่ 1 และ 2 พร้อมกัน การควบคุมโดยวิธีเปลี่ยนค่าความถี่ เป็นวิธีการที่ไม่นิยมใช้งาน เพราะการออกแบบวงจรยุ่งยาก ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการควบคุมความกว้างของพัลส์เท่านั้น



ภาพที่ 2.2 การควบคุมความกว้างพัลส์

จากภาพที่ 2.2 สัญญาณควบคุมสวิตช์ได้จากการนำค่าแรงดัน $V_{Control}$ เปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นภาพฟันเลื่อย (Sawtooth)

ถ้า $V_{Control} > \text{Sawtooth}$ จะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์เป็นบวก

ถ้า $V_{Control} < \text{Sawtooth}$ จะได้สัญญาณควบคุมสวิตช์เป็นศูนย์

นำสัญญาณควบคุมสวิตช์ไปจ่ายให้กับขาเกตของมอสเฟต สามารถควบคุมความกว้างของพัลส์ได้ โดยการเปลี่ยนระดับแรงดัน $V_{Control}$

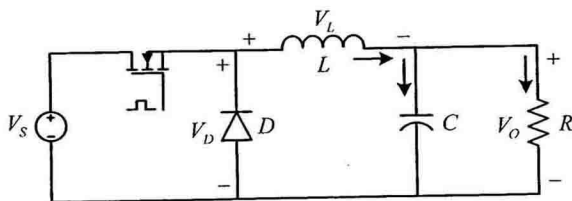
วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง จะทำงานใน 2 แบบวิธี (Mode) คือ

1. กรณีกระแสต่อเนื่อง (Continuous Current Mode)
2. กรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode)

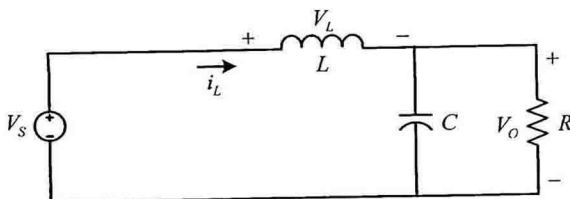
การทำงานในแต่ละแบบวิธี จะทำให้คุณสมบัติวงจรไม่เหมือนกัน (ทั้งที่เป็นวงจรเดียวกัน) ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติของวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง จะต้องพิจารณากันทั้งกรณีกระแสต่อเนื่องและกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.1.3 วงจรแปลงผันแบบบัก (Buck Converter)

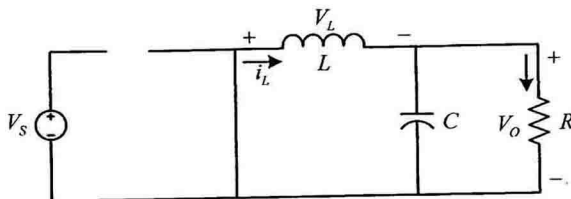
วงจรแปลงผันแบบบักเป็นวงจรลดระดับแรงดัน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต ลักษณะวงจรบักแสดงดังภาพที่ 2.3



ก. วงจรบัก



ข. วงจรบักในช่วง T_{on}



ค. วงจรบักในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.3 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบัก

วงจรบั๊กประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรชอปเปอร์ (Chopper) และวงจรกรอง วงจรชอปเปอร์ประกอบด้วยมอสเฟตและไดโอด โดยมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ไดโอดเป็นทางผ่านของกระแส i_L ขณะมอสเฟตตัดวงจร ส่วนวงจรกรองเป็นวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

ขณะมอสเฟตต่อวงจรแรงดัน $V_D = V_S$ ไดโอดหยุดนำกระแสเนื่องจากได้รับไบแอสย้อนกลับ ขณะมอสเฟตตัดวงจรไดโอดนำกระแสเป็นทางผ่านของกระแส i_L ทำให้แรงดัน $V_D = 0$ ลักษณะเป็นรูปคลื่นแรงดัน V_D แสดงดังภาพที่ 2.3 ข. อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดัน V_D ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฟตรงหรือค่าเฉลี่ย โดยมีค่าเท่ากับ V_O (ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต) ส่วนที่เป็นเทอมไฟสลับประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ความถี่การสวิตช์ (f_s) และความถี่ $2f_s, 3f_s, 4f_s, \dots$

วงจรกรอง LC เป็นวงจรอันดับที่ 2 โดยความถี่ตัด (Cutoff Frequency) มีสมการเป็น

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (0.4)$$

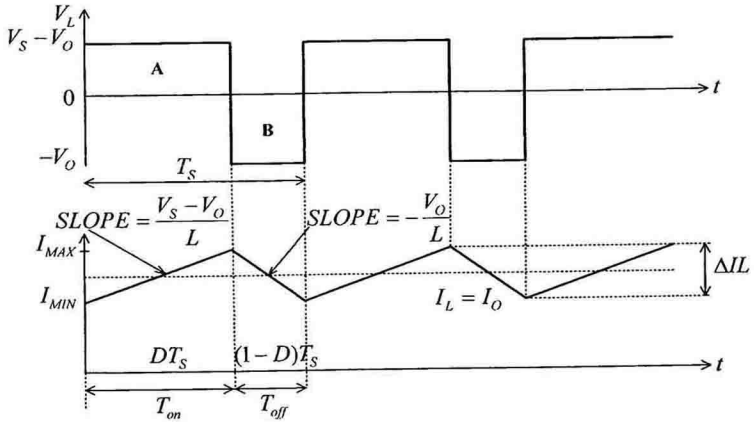
วงจรกรองทำหน้าที่กรองเทอมที่เป็นไฟสลับของแรงดัน V_D

(กรองความถี่ $f_s, 2f_s, 3f_s, \dots$) ดังนั้นในการออกแบบวงจรจะต้องให้ความถี่ตัดของวงจรกรองมีค่าต่ำกว่าความถี่การสวิตช์มาก ๆ $f_c \ll f_s$

การวิเคราะห์วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบั๊ก จะกำหนดให้ตัวเก็บประจุ (C) มีค่าสูงพอที่จะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

2.1.3.1 คุณสมบัติของวงจรกรณีกะแสต่อเนื่อง กรณีกะแสต่อเนื่องหมายถึงกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) มีค่าเป็นบวกเพียงค่าเดียว ไม่ลดลงเป็นศูนย์ จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$L > \frac{(1-D)R}{2f_s} \quad (0.5)$$



ภาพที่ 2.4 รูปคลื่นวงจรกรณิกระแสต่อเนื่อง

ในช่วง T_{on} เป็นช่วงที่มอสเฟตต้องจอร์จะได้ $V_L = V_S - V_O$ ตัวเหนี่ยวนำ L รับพลังงาน กระแส i_L มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง

$$\text{ความชัน (Slope)} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (0.6)$$

ในช่วง T_{off} เป็นช่วงที่มอสเฟตตัดจอร์ จะได้ $V_L = -V_O$ ตัวเหนี่ยวนำ L จ่ายพลังงาน กระแส i_L มีค่าลดลงเป็นเส้นตรง

$$\text{ความชัน (Slope)} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{-V_O}{L} \quad (0.7)$$

จากคุณสมบัติตัวเหนี่ยวนำ (L)

โวลต์-วินาที ขณะรับพลังงาน = โวลต์-วินาที ขณะจ่ายพลังงาน

จากภาพที่ 2.4 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$DT_s(V_S - V_O) = (1 - D)T_s V_O$$

$$DV_S - DV_O = V_O - DV_O$$

$$V_O = DV_S$$

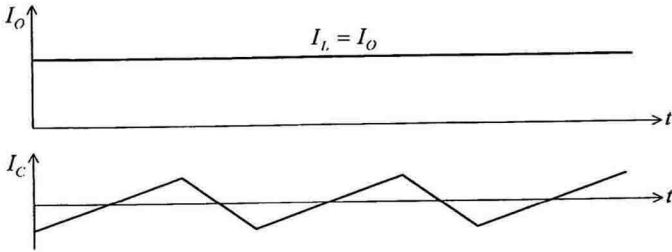
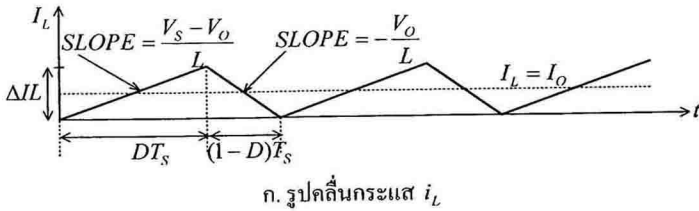
$$\frac{V_O}{V_S} = D$$

$$(0.8)$$

จากสมการ (2.8) ถ้าแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ แรงดันเอาต์พุต V_O จะแปรผันโดยตรง

ค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle; D) โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าอุปกรณ์ในวงจร

2.1.3.2 จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับ ไม่ต่อเนื่อง จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับ ไม่ต่อเนื่อง คือค่าแห่งที่ค่าต่ำสุดของค่ากระแส i_L ($i_{\min}$) ลดลงเป็นศูนย์เมื่อครบ 1 คาบเวลา



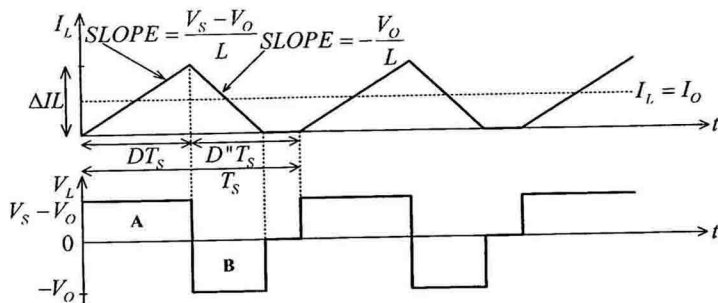
ข. รูปคลื่น i_L แยกเป็น i_o กับ i_c
 ภาพที่ 2.5 คลื่นกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง

กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน (i_o) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_c) กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะมีค่าคงที่ (เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตคงที่) มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแส i_L กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับรูปสามเหลี่ยมมีค่าเป็นศูนย์ (เป็นไปตามหลักการ Amp-Sec Balance ของตัวเก็บประจุ) กระแสส่วนนี้ก็คือค่าระลอกคลื่นของกระแส i_L ดังนั้นจุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับกระแสไม่ต่อเนื่อง คือ

$$\text{ถ้า } L > \frac{(1-D)R}{2f_s} \text{ เป็นกรณีกระแสต่อเนื่อง} \quad (0.9)$$

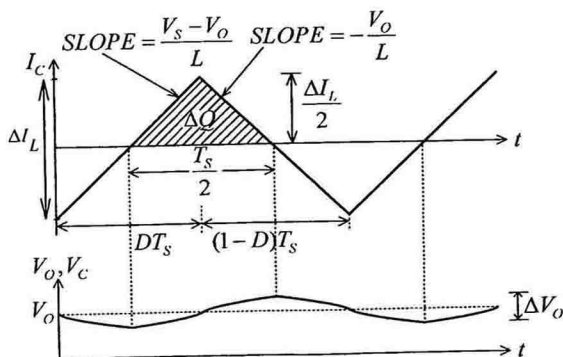
$$\text{ถ้า } L < \frac{(1-D)R}{2f_s} \text{ เป็นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง} \quad (0.10)$$

2.1.3.3 คุณสมบัติของวงจรกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรแปลงผันแบบบักจะทำงานเป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $L < \frac{(1-D)R}{2f_s}$ เป็นกรณีที่กระแส มีค่าทั้งเป็นบวกและศูนย์ ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.1.3.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) พิจารณากระแสต่อเนื่อง กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ i_C แสดงดังภาพที่ 2.7 พื้นที่ใต้กราฟของรูปคลื่นกระแส i_C คือค่าประจุไฟฟ้า (charge) ขณะกระแส i_C เป็นบวก เป็นช่วงที่ C ได้รับประจุ ทำให้แรงดัน V_o มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะกระแส i_C เป็นลบเป็นช่วงที่ C คายประจุ ทำให้แรงดัน V_o มีค่าลดลง



ภาพที่ 2.7 รูปคลื่น i_C และ V_o

2.1.3.5 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัก วงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง ส่วนมากจะใช้งานในช่วงกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นในการออกแบบวงจรจะใช้คุณสมบัติการนิกระแสต่อเนื่องมาออกแบบ วงจรแปลงผันแบบบัก กระแสจะต่อเนื่องเมื่อตัวเหนี่ยวนำมีค่าต่ำสุดตามสมการ

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f_s} \quad (0.11)$$

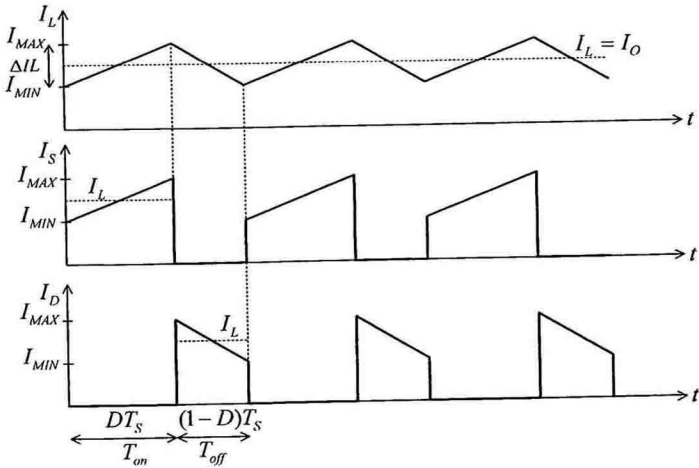
เมื่อ $L_{\min}$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ยังคงทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง ความถี่การสวิตช์ (f_s) จะมีผลกับขนาดกับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร ถ้าความถี่การสวิตช์มีค่าสูง ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ที่ใช้ในวงจรจะมีขนาดเล็กลง แต่ค่ากำลังสูญเสียในการสวิตช์จะสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรจะลดลง โดยปกติความถี่การสวิตช์นิยมใช้งานในช่วง 20 kHz ถึง 50 kHz

ตัวเหนี่ยวนำ (L) จะมีผลกับระลอกคลื่นของกระแส (ΔI_L) การหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำหาได้โดยการพิจารณาจากรูปคลื่นกระแส i_L ขดลวดตัวเหนี่ยวนำต้องทนกระแสมากกว่ากระแส $I_{L,rms}$

ตัวเก็บประจุ (C) จะมีผลกับระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_O) การหาขนาดของตัวเก็บประจุ อาจหาได้จากสมการ 2.12

$$C = \frac{\Delta I_L}{8f_s \Delta V_O} \quad (0.12)$$

ตัวเก็บประจุต้องทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่าค่าแรงดัน V_O



ภาพที่ 2.8 รูปคลื่นกระแส i_L , i_S และ i_D

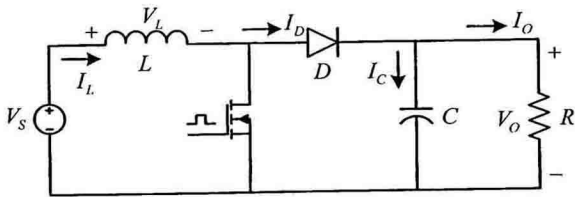
พิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์และไดโอด พิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดขณะหยุดนำกระแส จะได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้เป็นสวิตช์และไดโอดต้องทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า V_S

พิกัดกระแสของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์และไดโอด พิจารณารูปคลื่น i_S และ i_D

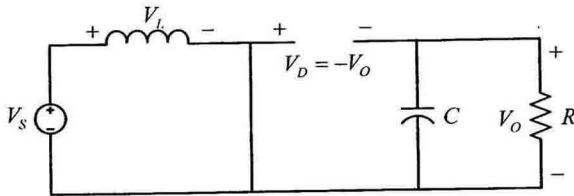
- ค่ากระแสสูงสุดที่อุปกรณ์สวิตช์และไดโอดต้องทนได้คือ i_{max}
- ค่ากระแสเฉลี่ยที่อุปกรณ์สวิตช์ต้องทนได้คือ i_S
- ค่ากระแสเฉลี่ยที่ไดโอดต้องทนได้คือ i_D

2.1.4 วงจรแปลงผันแบบบูส (Boost Converter)

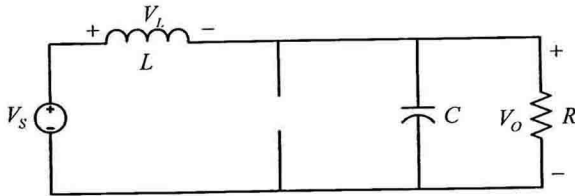
วงจรแปลงผันแบบบูสเป็นวงจรเพิ่มแรงดัน ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าสูงกว่าแรงดันอินพุต ลักษณะวงจรบูสแสดงดังภาพที่ 2.9



ก. วงจรบูส



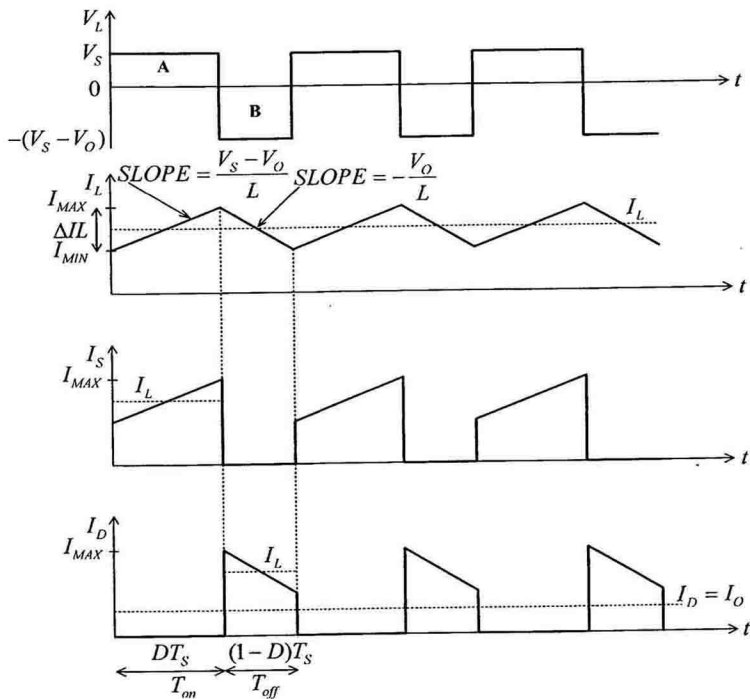
ข. วงจรบูสในช่วง T_{on}



ค. วงจรบูสในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.9 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบูส

2.1.4.1 คุณสมบัติวงจรกรณีกระแสต่อเนื่อง กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) จะต่อเนื่อง เมื่อ $L > \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ ลักษณะรูปคลื่นแสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 รูปคลื่นกรณีกระแสไหลต่อเนื่อง

ขณะช่วง T_{on}

$$V_L = V_S$$

ความชัน (Slope) ของกระแส $i_L = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{-V_L}{L} = \frac{V_S}{L}$

ขณะช่วง T_{off}

$$V_S - V_O = -(V_O - V_S)$$

ความชัน (Slope) ของกระแส $i_L = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_L}{L}$

จากภาพที่ 2.10 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$V_S DT_S = (V_O - V_S)(1-D)T_S$$

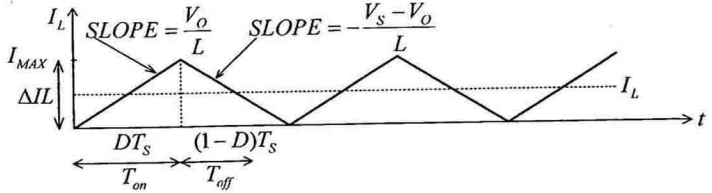
$$V_S D = V_O(1-D) - V_S(1-D)$$

$$V_S = V_O(1-D)$$

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{1-D}$$

(0.13)

2.1.4.2 จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับ ไม่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.11 รูปคลื่นกรณิกระแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง

พิจารณาช่วง T_{on}

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_s DT_s}{L}$$

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_s DT_s}{2L}, V_s = V_o(1-D)$$

$$I_L = \frac{V_o T_s}{2L} D(1-D) \quad (0.14)$$

จากวงจรภาพที่ 2.9 $I_D = I_o = \frac{V_o}{R}$

จากรูปคลื่นภาพที่ 2.10 $I_D = \frac{I_L(1-D)T_s}{T_s} = (1-D)I_L$

$$I_L = \frac{V_o}{(1-D)R} \quad (0.15)$$

จากสมการ (2.14) และ (2.15)

$$\frac{V_o}{(1-D)R} = \frac{V_o T_s}{2L} D(1-D)$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$$

ดังนั้นจุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับกระแสไม่ต่อเนื่อง คือตำแหน่งที่

$$L = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \text{ เรียก } L \text{ ค่านี้ว่า } L_{\min}$$

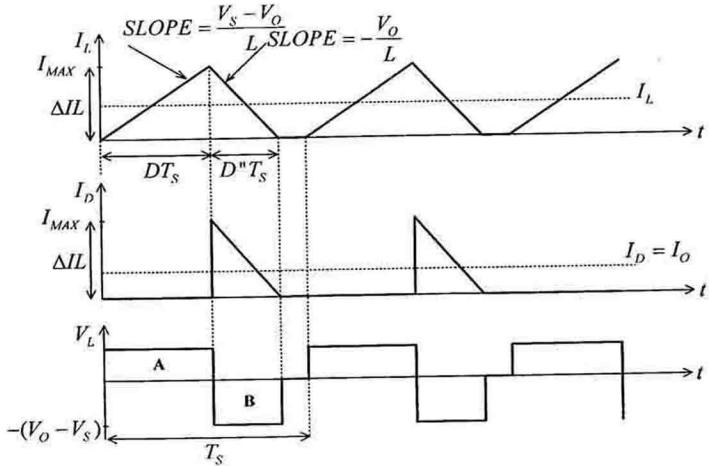
$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \quad (0.16)$$

เมื่อ $L_{\min}$ คือค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ยังคงทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง

ถ้า $L > \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ เป็นกรณิกระแสต่อเนื่อง (0.17)

ถ้า $L < \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ เป็นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง (0.18)

2.1.4.3 คุณสมบัติของวงจรกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรแปลงผันแบบบูสจะทำงานเป็นแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $L < \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$ มีลักษณะรูปคลื่นดังภาพที่ 2.12



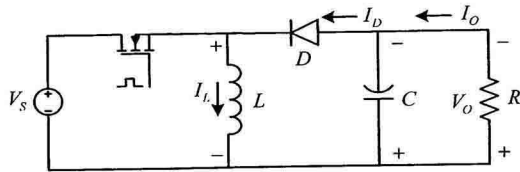
ภาพที่ 2.12 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.1.4.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ (C) ก็คือค่าระลอกคลื่นของกระแสที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังภาพที่ 2.13

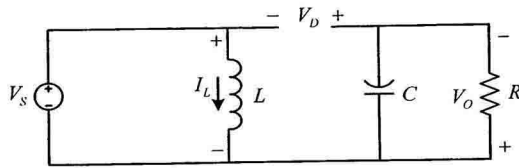
$$\Delta V_o = \frac{V_o D T_s}{RC f_s} \quad (0.19)$$

2.1.5 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส (Buck-Boost Converter)

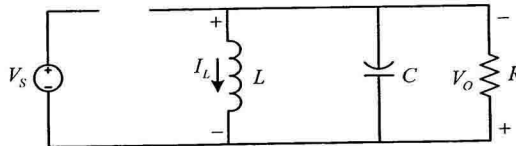
วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัค-บูส เป็นวงจรที่สามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุต (V_O) มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันอินพุต (V_O) ก็ได้ ลักษณะวงจรแสดงดังภาพที่ 2.14



ก. วงจรบัค-บูส



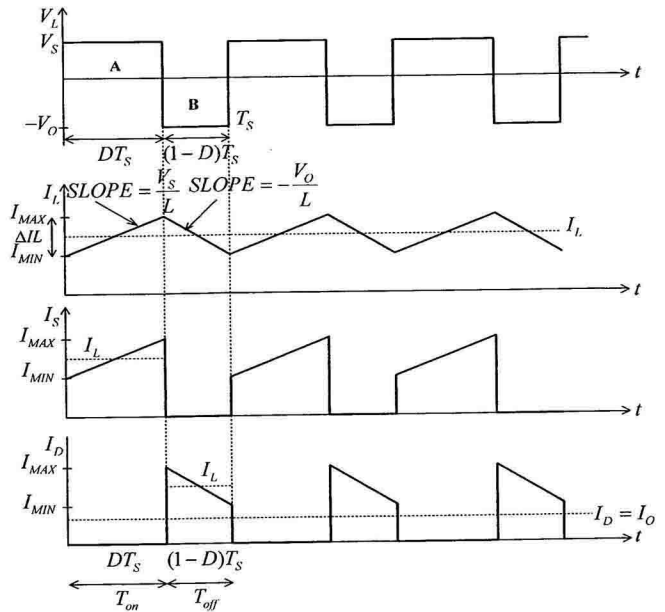
ข. วงจรบัค-บูสในช่วง T_{on}



ค. วงจรบัค-บูสในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.14 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

2.1.5.1 คุณสมบัติของวงจรนี้กระแสต่อเนื่อง กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) จะต่อเนื่องเมื่อ $L > \frac{(1-D)^2 R}{2f_s}$ ลักษณะรูปคลื่นแสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 รูปคลื่นกรณีกะแสไหลต่อเนื่อง

ขณะช่วง T_{on}

$$V_L = V_S$$

ความชัน (Slope) ของกระแส

$$i_L = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_S}{L}$$

ขณะช่วง T_{off}

$$V_L = -V_O$$

ความชัน (Slope) ของกระแส

$$i_L = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_L}{L} = -\frac{V_O}{L}$$

จากภาพที่ 2.15 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$V_S DT_S = (1-D)T_S V_O$$

$$V_O = \frac{D}{1-D} V_S$$

$$(0.20)$$

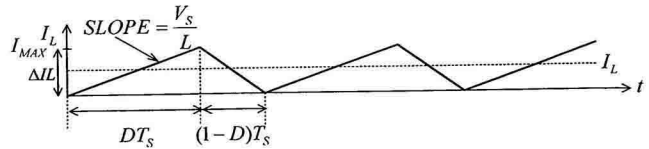
จากสมการที่ (2.20)

ถ้า $D = 0.5$ จะได้ $V_o = V_s$

ถ้า $D < 0.5$ จะได้ $V_o < V_s$

ถ้า $D > 0.5$ จะได้ $V_o > V_s$

2.1.5.2 จุดแบ่งระหว่างการทำงานแบบกระแสต่อเนื่องกับไม่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 2.16 รูปคลื่นกรณีกะแส i_L เริ่มไม่ต่อเนื่อง

พิจารณาช่วง T_{on}

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_s DT_s}{L}$$

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_s DT_s}{2L}, \quad V_s = \frac{(1-D)}{D} V_o$$

$$I_L = \left(\frac{DT_s}{2L} \right) \left(\frac{1-D}{D} V_o \right) \quad (0.21)$$

จากวงจรภาพที่ 2.14 ก

$$I_D = I_o = \frac{V_o}{R}$$

จากรูปคลื่นภาพที่ 2.15

$$I_D = \frac{I_L (1-D) T_s}{T_s} = (1-D) I_L$$

$$I_L = \frac{V_o}{(1-D)R} \quad (0.22)$$

จากสมการ (2.21) และ (2.22)

$$\frac{V_o}{(1-D)R} = \frac{V_o T_s}{2L} D(1-D)$$

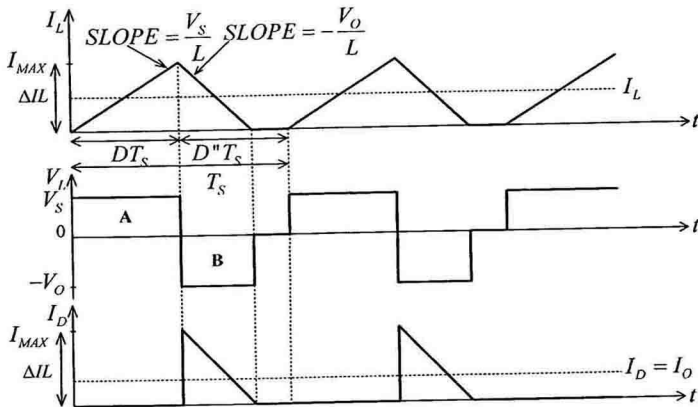
$$L = \frac{(1-D)^2 R}{2f_s} \quad (0.23)$$

เมื่อ L_{min} คือค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ยังคงทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง

$$\text{ถ้า } L > \frac{(1-D)^2 R}{2f_s} \text{ เป็นกรณีกะแสต่อเนื่อง} \quad (0.24)$$

ถ้า $L < \frac{(1-D)^2 R}{2f_s}$ เป็นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง (0.25)

2.1.5.3 คุณสมบัติการมีวงจรกระแสไม่ต่อเนื่อง วงจรแปลงผันแบบบักบัส กระแสไม่ต่อเนื่อง เมื่อ $L < \frac{(1-D)^2 R}{2f_s}$ มีลักษณะรูปคลื่นดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 รูปคลื่นกรณีกระแสไม่ต่อเนื่อง

2.1.5.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) พิจารณากรณีกระแสต่อเนื่อง กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_C) คือค่าระลอกคลื่นของกระแสไดโอดเช่นเดียวกับวงจรแปลงผันแบบบัส มีรูปคลื่นแสดงดังภาพที่ 2.13 ดังนั้นสมการค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_o) จะเหมือนกับวงจรแปลงผันแบบบัส

$$\Delta V_o = \frac{V_o D T_s}{RC f_s} \quad (0.26)$$

2.1.5.5 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัก-บัส การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัก-บัส จะใช้หลักการเช่นเดียวกับวงจรบักและวงจรบัส กล่าวคือออกแบบโดยใช้คุณสมบัติกระแสต่อเนื่อง โดยพิจารณารูปคลื่นประกอบกับสมการ

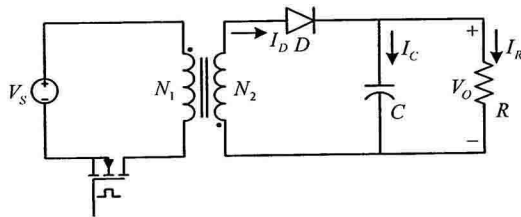
จากวงจรภาพที่ 2.14 ข. และ ค. พิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์ และไดโอด ต้องไม่ต่ำกว่า $V_o + V_s$

พิกัดกระแสเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่เป็นสวิตช์ ต้องไม่ต่ำกว่า DI_L ส่วนพิกัดกระแสเฉลี่ยของไดโอด ต้องไม่ต่ำกว่า I_O

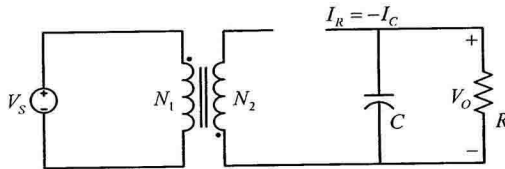
$$I_D = I_O = (1-D)I_L \text{ หรือ } I_L = \frac{I_O}{1-D} \quad (0.27)$$

2.1.6 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค (Flyback Converter)

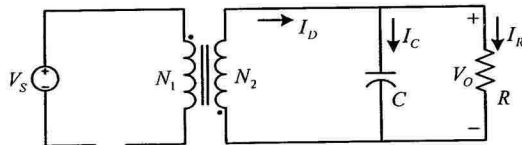
วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค เป็นวงจรที่ตัดแปลงมาจากวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ ดังภาพที่ 2.18



ก. วงจรฟลายแบค



ข. วงจรฟลายแบคในช่วง T_{on}



ค. วงจรฟลายแบคในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.18 คุณสมบัติของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

วงจรแปลงผันแบบฟลายแบคจะใช้ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กของหม้อแปลง (L_m) แทนตัวเหนี่ยวนำในวงจรบัค-บูส ดังนั้นวงจรชนิดนี้จึงไม่ต้องมีตัวเหนี่ยวนำ (L) สำหรับตัวเก็บประจุ (C) ต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_o) มีค่าคงที่เช่นเดียวกับวงจรแปรผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดอื่นๆ

พิจารณาการทำงานของวงจรในสถานะอยู่ตัว (Steady State)

ขณะมอสเฟตนำกระแส (ช่วง T_{on}) ดังวงจรภาพที่ 2.18 ข. รับพลังงานจากแหล่งจ่ายกระแส I_{Lm} จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงไคโอดหยุดนำกระแสเนื่องจากได้รับไบแอสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ จะจ่ายพลังงานให้กับโหลด จะได้

$$I_S = I_{Lm}, \quad I_2 = 0, \quad I = \frac{N_2}{N_1} I_2 = 0, \quad I_R = -I_C$$

$$V_{Lm} = V_1 = V_S$$

ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส (ช่วง T_{off}) ดังวงจรภาพที่ 2.18 ค. ไคโอดนำกระแสเนื่องจากได้รับไบแอสตรง L_m จะจ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลงอุดมคติส่งผ่านไปยังโหลด กระแส L_m จะลดลงเป็นเส้นตรง จะได้

$$I_S = 0, \quad I_1 = -I_{Lm}, \quad I_C + I_R = I_D = \frac{N_1}{N_2} I_{Lm}$$

$$V_{Lm} = V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 = -\frac{N_1}{N_2} V_o$$

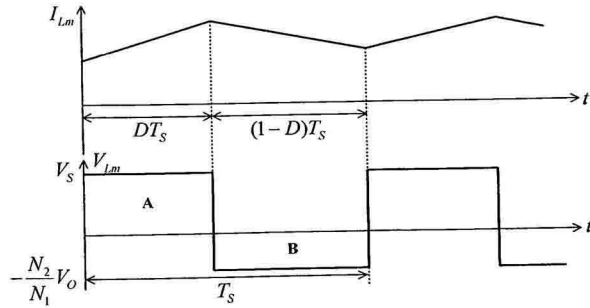
เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานไปยังโหลด เกิดขึ้นในมอสเฟตหยุดนำกระแส (ช่วง T_{off})

ดังนั้นจึงเรียกวงจรนี้ว่าวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค (Flyback converter)

พิจารณากรณีกระแสดiode จะได้ว่าปดล้น V_{Lm} และ I_{Lm} ดังภาพที่ 2.19 ซึ่งสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ V_S ได้ดังนี้
จากภาพที่ 2.19 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$\begin{aligned} V_S D T_S &= \frac{N_1}{N_2} V_o (1-D) T_S \\ V_o &= \frac{D}{1-D} \frac{N_2}{N_1} V_S \end{aligned} \quad (0.28)$$

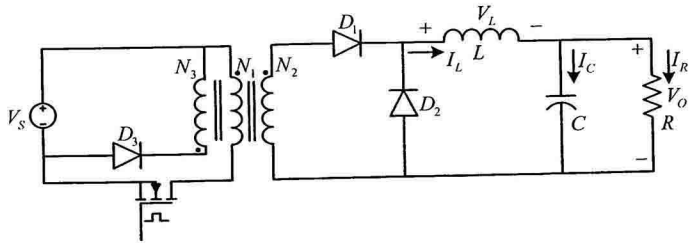
จากสมการ (2.28) ความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ V_S จะคล้ายกับวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส ต่างกันที่มีค่าจำนวนรอบของขดลวดหม้อแปลงเพิ่มขึ้นเข้ามาในสมการ



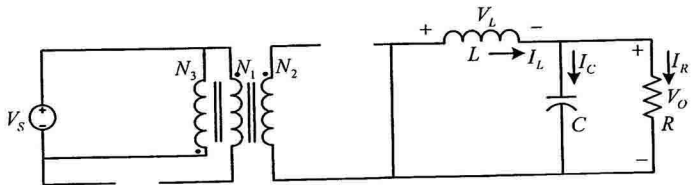
ภาพที่ 2.19 รูปคลื่น V_{Lm} และ I_{Lm} กรณีกระแสต่อเนื่อง

2.1.7 วงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ด (Forward Converter)

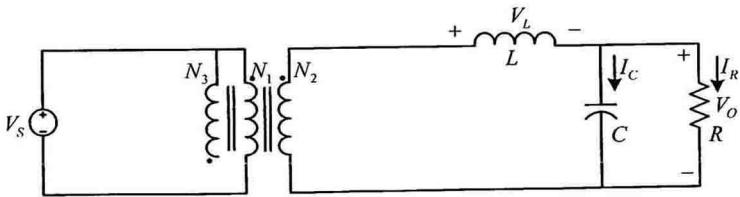
วงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ดเป็นวงจรที่ดัดแปลงมาจากวงจรแปลงผันแบบบัค มีลักษณะวงจรดังภาพที่ 2.20



ก. วงจรฟอว์เวิร์ด



ข. วงจรฟอว์เวิร์ดในช่วง T_{on}



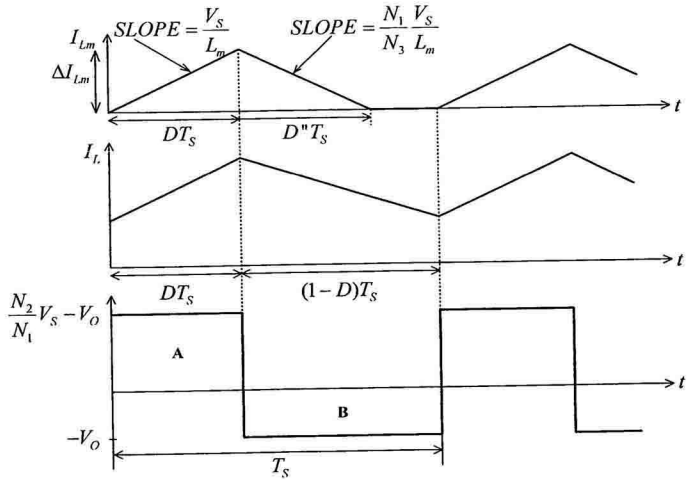
ก. วงจรฟอร์เวิร์ดในช่วง T_{off}

ภาพที่ 2.20 คุณสมบัติวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด

ขณะมอสเฟตนำกระแส (ช่วง T_{on}) ดังวงจรภาพที่ 2.20 ข. ไดโอด D_1 นำกระแส ไดโอด D_2 และ D_3 หยุดนำกระแส เป็นช่วงที่มีการส่งพลังงานจากแหล่งจ่ายหม้อแปลงขดลวดชุด N_1 และ N_2 ไปยังโหลดในช่วงนี้ L รับพลังงาน กระแส I_L เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง จะได้

$$V_1 = V_s, \quad V_L = V_2 - V_O = \frac{N_2}{N_1} V_1 - V_O = \frac{N_2}{N_1} V_s - V_O$$

ขณะมอสเฟตหยุดนำกระแส (ช่วง T_{off}) ดังวงจรภาพที่ 2.20 ก. ไดโอด D_1 หยุดนำกระแส ไดโอด D_2 และ D_3 นำกระแส กระแส I_{Lm} จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแส I_3 ขึ้นในขดลวดชุด N_3 ส่งพลังงานกลับเข้าสู่แหล่งจ่าย ทำให้ I_{Lm} ลดลงเป็นศูนย์ ในช่วงนี้ L จะจ่ายพลังงานให้กับโหลด กระแส I_L ลดลงเป็นเส้นตรง จะได้ $V_L = -V_O$ กรณีกระแส I_L ต่อเนื่อง จะได้ว่าปัลลัส I_{Lm} , I_L และ V_L ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 รูปคลื่น I_{Lm} , I_L และ V_L กรณีกระแส I_L ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.21 พื้นที่ A = พื้นที่ B

$$\left(\frac{N_2}{N_1}V_s - V_o\right)DT_s = V_o(1-D)T_s$$

$$V_o = D \frac{N_2}{N_1}V_s \quad (0.29)$$

จากสมการ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_o กับ V_s จะเหมือนกับสมการของวงจรแปลงผันแบบบัก ต่างกันที่มีค่าจำนวนรอบขดลวดของหม้อแปลงเพิ่มเข้ามาในสมการ

เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานไปยังโหลดเกิดขึ้นในช่วงที่มอสเฟตนำกระแส จึงเรียกว่าวงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ด (Forward Converter)

เพื่อให้กระแส I_{Lm} ลดลงเป็นศูนย์ก่อนที่จะเริ่มต้นการทำงานในคาบเวลาต่อไป ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบขดลวดหม้อแปลง N_1 กับ N_3 ต้องเป็นไปตามสมการที่ 2.30

$$\Delta I_{Lm} = \frac{V_s}{L_m} DT_s = \frac{N_1}{N_3} \frac{V_s}{L_m} D''T_s$$

$$D''T_s = \frac{N_3}{N_1} DT_s$$

$$\begin{aligned}
 DT_S + D''T_S &< T_S \\
 DT_S + \frac{N_3}{N_1}DT_S &< T_S, \quad DT_S(1 + \frac{N_3}{N_1}) < T_S \\
 D(1 + \frac{N_3}{N_1}) &< 1 \quad \text{หรือ} \quad \frac{N_1}{N_3} > \frac{D}{1-D}
 \end{aligned} \tag{0.30}$$

2.2 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันและต้องการกระแสอินพุตที่มีค่าต่ำ มีความสามารถเป็นสวิตช์ที่มีความเร็วสูงและเวลาในการสวิตช์ที่มีความเร็วสูงและเวลาในการสวิตช์ต่ำอยู่ในระดับนาโนวินาที จึงถูกนำมาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่ทรานซิสเตอร์ ด้วยความแตกต่าง ทางฟิสิกส์และ โครงสร้างทำให้มอสเฟตกำลัง ไม่มี ปัญหาในเรื่องแรงดันพังทลายแบบที่สอง (Secondary Breakdown) เหมือนทรานซิสเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟตกำลังยังมีจุดอ่อน ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับ ไฟฟ้าสถิต การเก็บรักษา และ มอสเฟตกำลังที่มีขายตามท้องตลาดยังมีอัตราทนกำลังต่ำอยู่เมื่อเทียบกับอุปกรณ์สวิตช์ประเภทอื่นๆ แต่มีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนามากขึ้น

2.2.1 คุณลักษณะของกระแสแรงดัน

มอสเฟตกำลังมี 3 ขาเช่นเดียวกับอุปกรณ์ชนิดอื่น โดยมีขาเกตเป็นขาที่ควบคุมกระแสที่ ขั้วเอาต์พุตเดรนและซอร์ส ขั้วซอร์สเป็นขั้วร่วมระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของมอสเฟต คุณลักษณะสมบัติทั้งเอาต์พุตกระแสเดรน I_D จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันระหว่างเดรนและซอร์ส V_{DS} กับแรงดันที่เกตและซอร์ส V_{GS} ในการประยุกต์ใช้งานมอสเฟตกำลัง จะทำหน้าที่มีคุณลักษณะใน ย่านคัตออฟ (Cut Off Region) ย่านแอคทีฟ (Active Region) และย่านเชิงเส้น (Ohmic Region)

มอสเฟตกำลังจะทำงานในลักษณะคัตออฟ เมื่อแรงดันระหว่างขาเกตและซอร์สต่ำกว่า แรงดันเทรชโฮล $V_{GS,th}$ ปกติมอสเฟตกำลังโดยทั่วไปจะมีค่าไม่มากนัก ซึ่งจะให้คุณลักษณะเหมือนเปิด วงจรทำให้แรงดันที่เดรนและซอร์สต้องไม่เกินค่าแรงดันพังทลาย BV_{DSS} และมีค่ากำลังไฟฟ้าไม่ เกินกว่าที่พิกัดจะทนได้ เพราะถ้าเกินจะทำให้มอสเฟตกำลังเกิดความเสียหายได้

เมื่อแรงดันที่เกตและซอร์สมีค่ามากพอที่จะทำให้การทำงานของ มอสเฟตกำลังอยู่ในย่าน เชิงเส้นในขณะที่แรงดันระหว่างขาเดรนซอร์สมีค่าต่ำ ในย่านนี้จะมีความกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้นที่มอสเฟต ก่อนข้างมาก โดยมอสเฟตจะทำงานในย่านเมื่อ

$$V_{GS} - V_{GS,th} > V_{DS} > 0$$

ในย่านแอคทิฟกระแสเดรนจะไม่ขึ้นอยู่กับ ค่าแรงดันระหว่างขาเดรนและซอร์ส แต่จะขึ้นอยู่กับแรงดันระหว่างเกตกับซอร์ส อาจกล่าวได้ว่ากระแสอิ่มตัว ในย่านนี้ค่าของกระแสเดรนสามารถหาได้โดยประมาณจาก

$$I_D = K[V_{GS} - V_{GS,th}]^2 \quad (0.31)$$

โดยที่ย่าน K เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะ โครงสร้างของมอสเฟต ในช่วงต่อระหว่างย่านเชิงเส้นกับย่านแอคทิฟ $V_{GS} - V_{GS,th} = V_{DS}$ ทำให้กระแสเดรนเท่ากับ

$$I_D = KV_{DS}^2 \quad (0.32)$$

2.2.2 ข้อจำกัดการทำงานและพื้นที่การทำงาน

2.2.2.1 แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) มอสเฟตมีอัตราทนแรงดันอยู่สองค่าคือค่าที่ใช้ได้ไม่เกินค่าแรกเป็นค่าแรงดัน V_{GS} ค่าที่สองเป็นค่า BV_{DSS} ค่าแรงดันที่ยอมได้สูงสุดระหว่างเกตและซอร์ส V_{GS} เป็นผลจากที่เกตออกไซด์จะพังทลายได้จากสนามไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปการพังทลายของสาร SiO_2 จะมีค่าสนามไฟฟ้าประมาณ 5 ถึง 10 ล้าน V/Cm ดังนั้นถ้าเกตออกไซด์มีความหนา 1000 Å จะสามารถทนแรงดันระหว่างเกตและซอร์สได้ประมาณ 50 ถึง 100 V โดยปกติค่าโดยทั่วไปของ V_{GS} จะอยู่ระหว่าง 20-30 V ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากคู่มือที่แสดงค่าที่ปลอดภัยในการใช้งานที่เพื่อเอาไว้ป้องกันการพังทลายอย่างถาวรของเกตออกไซด์ในอุปกรณ์ สิ่งที่ต้องระวังอีกอย่างคือผลของไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นที่เกตออกไซด์จากการประมาททำให้เกิดออกไซด์นั้นเกิดการแตกและทำให้มอสเฟตกำลังเสียหายได้ ถ้าแรงดันชั่วขณะที่เกิดและซอร์สที่เกินค่าของ V_{GS} นั้นต้องป้องกันด้วยการต่อซีเนอริ์ไดโอดสองตัวอนุกรมกันแบบกลับขั้วต่อคร่อมที่ขาเกตและซอร์ส โดยที่ค่าแรงดันซีเนอริ์จะต้องน้อยกว่าค่าของ V_{GS} แรงดันสูงสุดที่ยอมได้ที่ขาเดรนกับซอร์ส BV_{DSS} เป็นค่าแรงดันขนาดใหญ่ของมอสเฟตกำลังที่ไม่ทำให้รอยต่อ PN ที่ขาเดรนนั้นเกิดการเสียหายค่าแรงดันพังทลายค่ามากนี้ ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างมอสเฟตกำลังในส่วนของความยาวแถบกระจายและการติดตั้งนั้นการใช้งานจะต้องระวังค่าแรงดันระหว่างเดรนและซอร์สไม่ให้เกินกว่าอัตราทนนี้ ตามข้อมูลแต่ละตัวของมอสเฟตกำลัง

2.2.2.2 ค่าสูญเสียขณะนำกระแส (On-State Conduction Losses) เมื่อมอสเฟตกำลังมีสถานะนำกระแสจะเกิดกำลังสูญเสียขึ้นที่มอสเฟตกำลังอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลังโดยหาได้จากสมการ

$$P_{(ON)} = I_O^2 R_{DS(ON)} \quad (0.33)$$

ค่าความต้านทานสถิตยระหว่างเดรนและซอร์สมีค่าเท่ากับ V_{DS} / I_D ในแต่ละจุด ส่วน R_{DS} เป็นค่าความต้านทานไดนามิกขณะนำกระแส V_{DS} / I_D ที่แต่ละจุด ค่าของ R_{DS} นั้นมีส่วนประกอบอยู่สองค่าคือความต้านทานที่แชลแนลกับความต้านทานที่ชั้นของสารกึ่งตัวนำค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นที่แชลแนลนั้นเกี่ยวข้องกับแรงดันเกตกับซอร์สที่ส่งให้นำกระแสโดยที่จะมีค่าลดลงได้โดยการเพิ่มแรงดัน V_{GS} แต่ต้องไม่เกินค่ากำหนดค่าความต้านทานขณะนำกระแสจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟตกำลัง ด้วยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เป็นบวกทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.2.3.3 ทรานซิสเตอร์แฝง (Parasitic BJT) มอสเฟตกำลังมีโครงสร้างที่ทำให้เกิดทรานซิสเตอร์แฝง ผลของทรานซิสเตอร์แฝงนี้อาจทำให้เกิดกระแสไหลผ่านมอสเฟตกำลังได้แม้จะไม่มีแรงดันคดคร่อมระหว่างเดรนและซอร์สที่เกิด V_{GS} เลยกก็ตาม โดยผ่านทรานซิสเตอร์แฝง ซึ่งสามารถป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าวที่มีผลมาจากทรานซิสเตอร์แฝงนี้โดยการต่อเพิ่มไดโอดเพิ่มกับการทำงานของมอสเฟตกำลัง

2.2.3.4 การพิจารณาผลของอุณหภูมิ (Thermal Considerations) ในการใช้งานมอสเฟตกำลังก็เหมือนกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทอื่นในเรื่องอุณหภูมิซึ่งเรียกกันว่าอุณหภูมิรอยต่อ T_j ซึ่งต้องเก็บรักษาไม่ให้เกินค่า T_{jmax} ในการใช้งานซึ่งโดยทั่วไปได้จากคู่มือหรือใบข้อมูลของอุปกรณ์และค่าอัตราทดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายกับมอสเฟตกำลังได้

2.2.3.5 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย (Safe Operating Area) ในย่านการทำงานที่ปลอดภัยของมอสเฟตกำลัง มีสามตัวแปรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยของมอสเฟตกำลังค่ากระแสเดรนสูงสุด I_{DM} ค่าของอุณหภูมิ T_j ซึ่งครอบคลุมค่าของกำลังไฟฟ้าของมอสเฟตกำลังและค่าแรงดันพังทลาย BV_{DSS} ในขณะที่นำกระแสและหยุดนำกระแสโดยเป็นขีดจำกัดทางอุณหภูมิสำหรับมอสเฟตกำลังจะไม่มีปรากฏการณ์ “เซกกันดารีเบรกดาวน์” แต่จะมีข้อจำกัดของกระแสที่ V_{DS} ต่ำๆ เนื่องจากความต้านทานในขณะทำงานเพิ่มขึ้นสำหรับการทำงานในช่วงสั้นๆ ขอบเขตของพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยจะกว้างขึ้นคือ V_{DS} และ I_D มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปกติพื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยมักจะกำหนดไว้ที่ $T_j = 150^\circ\text{C}$

2.2.3 กำลังสูญเสียในรูปความร้อนของมอสเฟตกำลัง

กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอสเฟตกำลังขณะทำงานแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแส สำหรับมอสเฟตกำลังมีช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสสั้น เนื่องจากโครงสร้างไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้น แต่โดยทั่วไปมอสเฟตกำลังถูกใช้งานที่ความถี่สูง (มากกว่า 50 กิโลเฮิรตซ์) การคิดค่ากำลังงานสูญเสียขณะทำงานจึงต้องนำค่ากำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะมาคิดด้วย และเนื่องจากช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (T_{off}) กับช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (T_{on}) ของมอสเฟตกำลังมีค่าใกล้เคียงกันจึงต้องนำมาคิดทั้งสองช่วงเวลา

กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลังมีผลมาจากความต้านทานขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลัง ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส R_{DS} ขึ้นอยู่กับพิกัดการทำงานของแรงดันไฟฟ้าหากทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงก็ยิ่งทำให้ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สมีค่ามากขึ้น และทำให้กำลังสูญเสียขณะนำกระแสมีค่ามากขึ้นด้วย ความต้านทานระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส R_{DS} นอกจากจะขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันแล้วยังต้องพิจารณาพร้อมกับอุณหภูมิ เพราะเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นความต้านทานก็มีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นสมการกำลังงานสูญเสียขณะทำงานของมอสเฟตกำลัง คือ

$$P_D = P_{SW(on)} + P_{SW(off)} + P_C \quad (0.34)$$

$$P_{SW(on)} = \frac{0.5 I_{PK(on)} V_{in} \cdot t_r}{T} \quad (0.35)$$

$$P_{SW(off)} = \frac{0.5 I_{PK(off)} V_{in} \cdot t_f}{T} \quad (0.36)$$

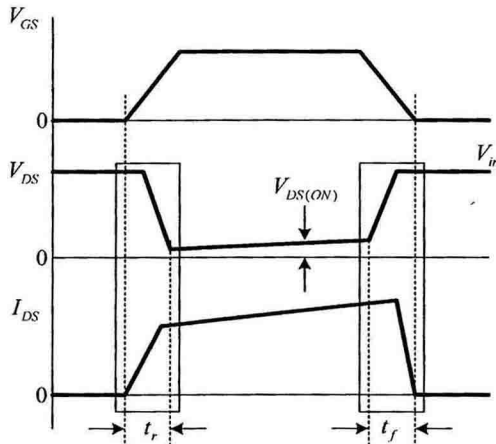
$$P_C = I_{D_{rms}}^2 \times R_{DS(on)}(T_j) \quad (0.37)$$

เมื่อ	$P_{SW(on)}$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสของมอสเฟตกำลัง
	$P_{SW(off)}$	คือ กำลังงานสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลัง
	P_C	คือ กำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสของมอสเฟตกำลัง
	$I_{PK(on)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มนำกระแส
	$I_{PK(off)}$	คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะหยุดนำกระแส
	$I_{D_{rms}}$	คือ ค่ากระแส R_{ms} ที่ไหลผ่านมอสเฟตกำลังขณะทำงาน
	$R_{DS(on)}T(j)$	คือ ค่าความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอร์สที่อุณหภูมิรอบต่อ
		สูงสุดขณะทำงานของมอสเฟตกำลัง

t_r คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสของมอสเฟตกำลัง (Current rise time)

t_f คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลัง

(Current fall time)



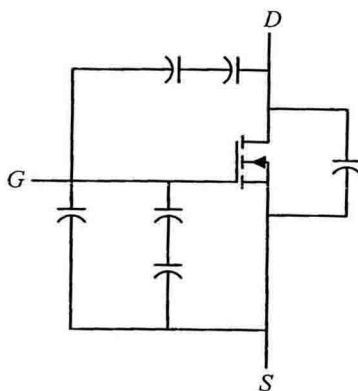
ภาพที่ 2.22 ลักษณะของกระแสและแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์มอสเฟตกำลังเมื่อเริ่มนำกระแสและเริ่มหยุดนำกระแส ในส่วนที่แรงจะเป็นส่วนที่เกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนได้สูง

2.2.4 เงื่อนไขของวงจรขับมอสเฟตกำลัง

การขับมอสเฟตกำลังให้น้ำกระแสโดยมีกระแสไหลผ่านขาเดรนและขาซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกตและขาซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ซึ่งใช้ค่ากระแสต่ำ ดังนั้นการขับมอสเฟตกำลังให้น้ำกระแสจึงไม่ยุ่งยาก โดยต้องศึกษาเงื่อนไขต่างๆ สำหรับบั๊คมอสเฟตกำลังให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.5 ความจุไฟฟ้าด้านอินพุต (Input Capacitance)

เนื่องจากลักษณะ โครงสร้างภายในมอสเฟตกำลังจึงเหมือนกับมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบๆ ขาต่างๆ ดังภาพที่ 2.23

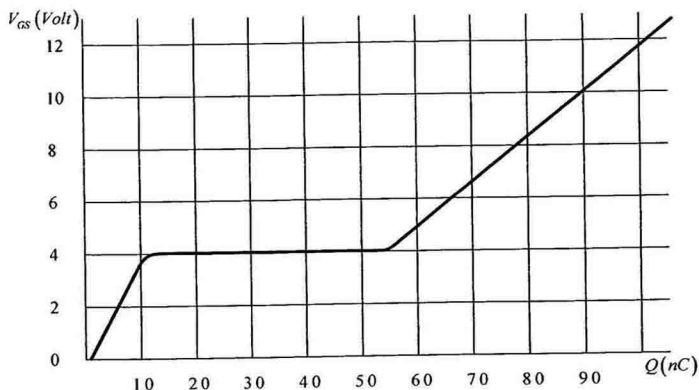


ภาพที่ 2.23 ตัวเก็บประจุแฝงที่ต่ออยู่ที่ขาต่างๆ ภายในมอสเฟटक้ำล้าง

ตัวเก็บประจุที่ขาต่างๆ ของมอสเฟटक้ำล้างต้องถูกขาร้จก่อนเพื่อให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันขีดเริ่ม มอสเฟटक้ำล้างจึงเริ่มนำกระแสในทางกลับกันการหยุดนำกระแสของมอสเฟटक้ำล้างต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกไปจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} มีค่าลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมอสเฟटक้ำล้างจึงหยุดนำกระแส โดยทั่วไปแล้วค่าความจุของตัวเก็บประจุในมอสเฟटक้ำล้างเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟटक้ำล้างแต่ละชนิด

2.2.6 การกำหนดเวลาในการเปลี่ยนสถานะ

เวลาในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟटक้ำล้างขึ้นอยู่กับ Gate Charge Chart แรงดัน V_{GS} ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าประจุสะสมที่ขาเกตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.24 ซึ่งผู้ผลิตจะให้ Gate Charge Chart มาในข้อมูลคุณลักษณะของมอสเฟटक้ำล้างแต่ละชนิด เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่ากระแสไบแอสขาเกตและเวลาในการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟटक้ำล้าง



ภาพที่ 2.24 Gate Charge Chart

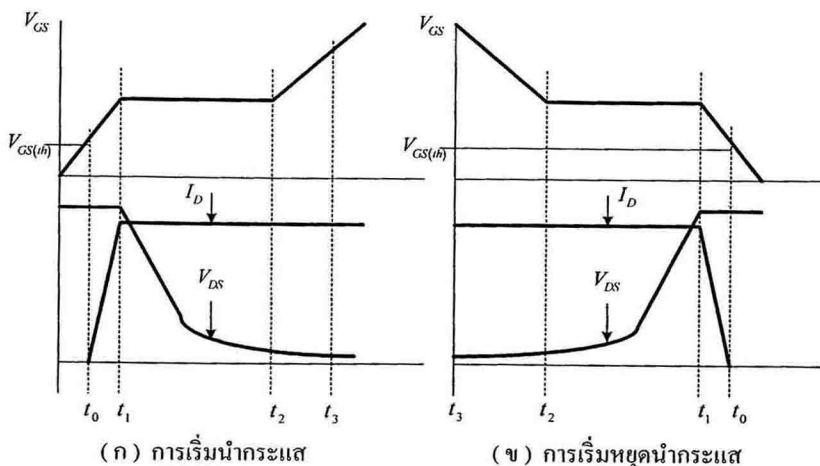
ลักษณะของกราฟแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ตามผลของประจุที่เพิ่มขึ้น คือ

ช่วงเวลานำก่อนเริ่มนำกระแส (Turn on delay) t_0

ช่วงเวลานำกระแส (Rise time) $t_0 \rightarrow t_2$

ช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกิน (Excess charge time) $t_2 \rightarrow t_3$

เมื่อมอสเฟตกำลังเริ่มซาร์จประจุที่ขาเกต จนกระทั่งพ้นช่วงเวลานำก่อนเริ่มนำกระแส แรงดันที่ขาเกตมากกว่าแรงดันขีดเริ่ม $V_{GS,th}$ จึงเริ่มมีกระแสไหลผ่านขาเดรนและขาซอร์สที่เวลา t_0 ค่าของแรงดันจะยังไม่ลดจนกว่าเวลาผ่านไปเท่ากับ t_1 แรงดันตกคร่อมขาเดรนและขาซอร์ส V_{DS} จึงมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจากค่าแรงดันที่ประมาณ 90 % จนเหลือเพียง 10 % ของค่าแรงดัน ตกคร่อม V_{DS} สูงสุด มอสเฟตกำลังนำกระแสได้อย่างเต็มที่ในช่วงเวลานำกระแส $t_1 \rightarrow t_2$ และแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต V_{GS} คงที่จนกว่ามอสเฟตกำลังสามารถนำกระแสได้อย่างเต็มที่ดังภาพที่ 2.25 ในช่วงเวลาสะสมประจุส่วนเกินความต้านทานระหว่างขาเดรนและขาซอร์สมีค่าลดลงได้เรื่อยๆ หากปล่อยให้มีการสะสมประจุต่อไปในช่วงเวลา $t_2 \rightarrow t_3$ แต่ประจุสะสมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการหน่วงขณะเริ่มหยุดนำกระแส เนื่องจากมอสเฟตกำลังต้องใช้เวลามากในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไป ดังนั้นการขับมอสเฟตกำลังที่ขาเกตด้วยแรงดันสูงเกินความจำเป็นทำให้ช่วงเวลานำหยุดนำกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเสีย



ภาพที่ 2.25 ลักษณะการชาร์จประจุที่ขาเกต

เนื่องจากมอสเฟตกำลังไม่เกิดประจุสะสมขณะนำกระแส การหยุดนำกระแสของมอสเฟตกำลังจึงทำได้ง่ายด้วยการคายประจุที่ขาเกตทิ้งไปเช่นเดียวกับขณะเริ่มนำกระแส เมื่อกระแสเพื่อชาร์จประจุและคายประจุมีค่าเท่ากัน ช่วงเวลาเริ่มนำกระแสและช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแสจะมีค่าเท่ากันด้วย ยกเว้นหากมีประจุสะสมมากในช่วงเวลา $t_2 \rightarrow t_3$ การหยุดนำกระแสนั้นมีช่วงเวลานานเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้เวลาส่วนหนึ่งในการคายประจุส่วนเกินทิ้งไปจาก Gate Charge Chart ของมอสเฟตกำลังแต่ละตัว นำมาคำนวณช่วงเวลาเริ่มนำกระแส t_r และช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส t_f ได้จาก

$$t = \frac{Q_G}{I_G} \quad (0.38)$$

เมื่อ Q_G คือ ค่าประจุที่ได้จากกราฟ (C)

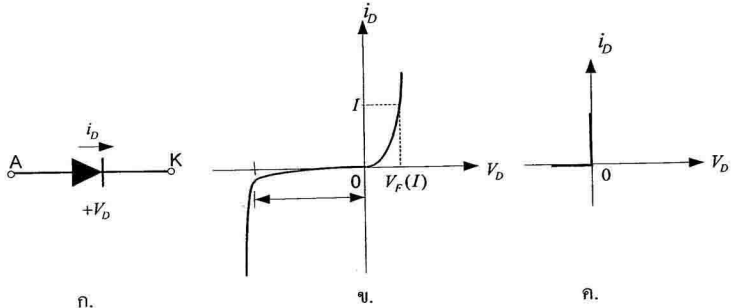
เมื่อ I_G คือ ค่ากระแสที่ใช้ชาร์จประจุที่กระแสคงที่ (A)

2.3 ไดโอด (Diode)

ไดโอดเริ่มนำกระแส เมื่อแรงดันตกคร่อม มีค่าเพียงเล็กน้อยประมาณ 1 โวลต์ ในทำนองเดียวกันเมื่อไดโอดถูกไบแอสย้อนกลับ กระแสจำนวนหนึ่งซึ่งน้อยมาก ก็สามารถไหลผ่านไดโอดตัวนี้ได้ และกระแสจำนวนนี้มีค่าคงที่ตลอดไป จนกระทั่งถึงค่าเบรกดาวน์ ดังนั้นการนำไปใช้งาน

แรงดันไบแอสย้อนกลับที่ป้อนไดโอดไม่ควรมีค่าเกินแรงดันเบรคาวนนี้ ซึ่งได้แสดงสัญลักษณ์และคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดขณะไบแอสไปหน้า ดังภาพที่ 2.26 ก. และ ข.

เนื่องจากกระแสรั่วไหลของไดโอดขณะอยู่ในสถานะกั้นหรือไบแอสย้อนกลับมีค่าน้อย และแรงดันตกคร่อมในขณะนำกระแสหรือไบแอสไปหน้ามีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเปรียบเสมือนเป็นไดโอดอุดมคติ ดังคุณลักษณะดังภาพที่ 2.26 ก.



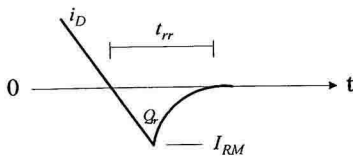
ภาพที่ 2.26 การทำงานของไดโอด

การสวิตช์เพื่อนำกระแสของไดโอด เปรียบเสมือนกับการสวิตช์ทางอุดมคติได้ เนื่องจากใช้เวลาการสวิตช์น้อยมาก เมื่อเทียบกับสภาวะชั่วคราวของวงจรกำลัง แต่ถ้าหากเป็นการสวิตช์เพื่อหยุดนำกระแสจะต้องเสียเวลาให้กับกระแสพื้นตัวย้อนกลับ ดังภาพที่ 2.26 ดังนั้นอาจเป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดแรงดันเกินในวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำด้วย และสำหรับไดโอดสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ คือ

2.3.1 ไดโอดชอตтки (Schottky Diodes) นิยมนำมาใช้งานที่ต้องการแรงดันตกคร่อมต่ำ (ปกติประมาณ 0.3 โวลต์) แต่ไดโอดชนิดนี้ ได้จำกัดความสามารถในการกันแรงดัน 50 ถึง 100 โวลต์ เท่านั้น

2.3.2 ไดโอดฟื้นตัวย้อนกลับเร็ว (Fast-Recovery Diodes) เป็นไดโอดที่ได้รับการพัฒนาเวลาการสวิตช์ขณะนำกระแส และเวลาฟื้นตัวย้อนกลับให้มีค่าต่ำมาก (ปกติเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ มีค่าไม่กี่ไมโครวินาที) ดังนั้นจึงเหมาะกับงานความถี่สูง นอกจากนั้นแรงดันแหล่งจ่ายสามารถจ่ายได้ถึงหลายโวลต์ และกระแสหลายแอมป์

2.3.3 ไดโอดความถี่ต่ำ (Line Frequency Diodes) แรงดันตกคร่อมไดโอดชนิดนี้ ขณะนำกระแสจะมีค่าต่ำ แต่เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับมีค่าสูง ดังนั้นจึงเหมาะกับการงานความถี่สูง สำหรับค่าพิทักแรงดันกันกับพิทักการไหลของกระแสมีค่าสูงหลายกิโลโวลต์และหลายกิโลแอมป์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถต่ออนุกรมและขนานกันเพื่อให้ได้ค่าแรงดันและกระแสตามต้องการได้

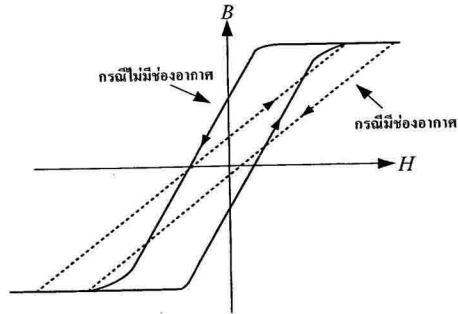


ภาพที่ 2.27 การหยุดนำกระแสของไดโอด

2.4 ตัวเหนี่ยวนำ และการออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่

2.4.1 ตัวเหนี่ยวนำ

คุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ดี คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กมีความเป็นเชิงเส้น สารเฟอร์โรแมกเนติกมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น แต่มีค่าความซึมซาบได้สูงในขณะที่แกนอากาศ หรือแกนที่ไม่ได้ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกค่าความซึมซาบได้มีค่า $\mu = \mu_0$ ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นสูงแต่ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ ด้วยข้อจำกัดต่างๆ นี้ การแก้ปัญหาในทางปฏิบัติคือ การเพิ่มช่องอากาศในแกนแม่เหล็ก ซึ่งทำให้แกนแม่เหล็กที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกให้ค่าความซึมซาบได้ที่สูง ในขณะที่ช่องอากาศมีผลทำให้ค่าความซึมซาบได้มีค่าคงที่ โดยช่องอากาศที่เพิ่มเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์ใช้ในการสะสมพลังงานแม่เหล็กและทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีความเป็นเชิงเส้น นอกจากสารเฟอร์โรแมกเนติกแล้ว ยังมีสารแกน โลหะแบบผง (Powder metal core) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีช่องอากาศกระจายอยู่ภายในให้ผลเหมือนกับการเพิ่มช่องอากาศเข้าไปในแกนเฟอร์ไรต์



ภาพที่ 2.28 ผลกระทบของช่องอากาศต่อกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

เมื่อกำหนดให้ค่า $H_c = H_g$ เห็นได้ว่าพลังงานที่สะสมในแกนแม่เหล็กมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่สะสมในอากาศมากเพราะค่าความซึมซาบได้สัมพัทธ์ของแกนแม่เหล็กมีค่ามากกว่าค่าความซึมซาบได้ของอากาศประมาณ 10-1000 เท่า ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำจึงทำหน้าที่สะสมพลังงาน จึงจำเป็นต้องมีช่องอากาศ ผลกระทบจากการเพิ่มช่องอากาศดังกล่าวนี้ ได้แก่

1. ค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก L_m มีค่าลง
2. ลดค่าความเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กลง
3. สามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้
4. ลดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง
5. หลีกเลี่ยงการอิ่มตัวเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรง
6. เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำรั่ว L_r ซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรงต่อขนาดสไปก์ของกระแส

2.4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่

กรณีเป็นตัวเหนี่ยวนำ เส้นแรงแม่เหล็กในแกนแม่เหล็กขึ้นอยู่กับกระแสไหล เมื่อกระแสไหลมีค่าเพิ่มขึ้น อาจทำให้แกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวได้ และเมื่อแกนแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กมีค่าลดลง ดังนั้นในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจึงต้องมีการระบุค่ากระแสสูงสุดเพื่อทำการออกแบบแกนแม่เหล็กที่จะไม่เกิดการอิ่มตัว การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ มีขั้นตอนดังนี้

2.4.2.1 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ สำหรับขั้นตอนแรกในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ คือการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำ โดยใช้กฎของฟาราเดย์ $e = L \frac{di}{dt}$ ในการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำของวงจร

2.4.2.2 คำนวณหาผลคูณพื้นที่ A_p พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$E = \frac{1}{2} LI_m^2 \quad (0.39)$$

โดยที่ E หมายถึง พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ

L หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำ H

I_m หมายถึง กระแสยอดของวงจร A

โดยที่พื้นที่ในการพันขดลวดต้องเหมาะสมกับจำนวนรอบ N และพื้นที่หน้าตัดของขดลวด a ดังนี้

$$K_w A_w = N \cdot a \quad (0.40)$$

แทนค่า $a = \frac{I}{J}$ ลงในสมการที่ 2.38 จะได้

$$K_w A_w = N \frac{I}{J} \quad (0.41)$$

และจาก $K_c = \frac{I_m}{I}$ ดังนั้น

$$K_w K_c A_w J = NI_m \quad (0.42)$$

จากสมการแรงดันของฟาราเดย์

$$e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} = N A_c \frac{dB}{dt}$$

และ

$$LI_m = N A_c B_m \quad (0.43)$$

จะได้

$$E = \frac{1}{2} NI_m A_c B_m \quad (0.44)$$

$$A_p = A_w A_c = \frac{2E}{K_w K_c J B_m} \quad (0.45)$$

2.4.2.3 คำนวณหาจำนวนรอบ ในการพันตัวเหนี่ยวนำจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้จาก

$$N = \frac{LI_m}{A_c B_m} \quad (0.46)$$

2.4.2.4 จำนวนหาขนาดของขดลวดเหนี่ยวนำ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเหนี่ยวนำ
สามารถคำนวณได้จาก

$$a = \frac{I}{J} \quad (0.47)$$

2.4.2.5 ช่องอากาศ จากสมการแรงดันของฟาราเดย์โดยที่

$$e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (0.48)$$

$$B = \frac{LI}{NA_c} \quad (0.49)$$

หรือ

$$B = \frac{\phi}{A_c} \quad (0.50)$$

จากกฎของแอมแปร์จะได้

$$H = \frac{NI}{I_m} \quad (0.51)$$

ดังนั้น

$$B = \frac{NI}{I_m} \quad (0.52)$$

จากสมการที่ 2.50 และ 2.51 จะได้

$$\frac{I_m}{\mu A_c} = \frac{N^2}{L} \quad (0.53)$$

โดยที่ $\frac{I_m}{\mu A_c}$ หมายถึงค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ

$$\frac{I_m}{\mu A_c} = \frac{I_c}{\mu_0 \mu_r A_c} + \frac{I_g}{\mu_0 A_c} \quad (0.54)$$

I_c หมายถึง เส้นทางเดินแม่เหล็ก m

I_g หมายถึง ระยะห่างของช่องอากาศ m

A_c หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก m^2

ถ้าแกนแม่เหล็กมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสูง จะทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กที่เกิดจาก
ช่องอากาศมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความต้านทานแม่เหล็กของแกนแม่เหล็ก

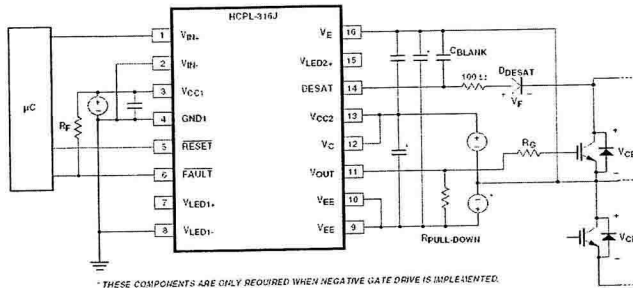
$$\frac{I_c}{\mu_0 \mu_r A_c} = \frac{I_g}{\mu_0 A_c} \quad (0.55)$$

จากสมการที่ 2.53 สามารถจัดรูปเพื่อหาค่า I_g ได้ดังนี้

$$I_g = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{L} \quad (0.56)$$

2.5 หลักการทำงานของไอซี HCPL 316J

ไอซีแยกโคตทางแสงเบอร์ HCPL 316J ที่เลือกใช้งานสำหรับขับเคลื่อนหลอดไฟหรือไอจีบีที นั้นมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์และมิกจรป้องกันอุปกรณ์เสียหายเนื่องจากกระแสเกินได้



* THESE COMPONENTS ARE ONLY REQUIRED WHEN NEGATIVE GATE DRIVE IS IMPLEMENTED.

ภาพที่ 2.29 วงจรขับนำเกต

การป้อนสัญญาณและต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับไอซี HCPL 316J

ขา 1 และ 2 เป็นขาสัญญาณพัลส์อินพุตที่ต้องการป้อนให้กับอุปกรณ์กำลัง โดยสามารถใช้งานได้ทั้งแบบ Inverting และ Non-Inverting โดยต่อขา (V_{m-}) ลงกราวด์

ขา 3 และ 4 เป็นไฟเลี้ยงในวงจรขับเกต +5 โวลต์

ขา 5 เป็นค่ารีเซตใช้งานกรณีเมื่อกระแสเกินและเกิดการความผิดพลาดขึ้น ตัวประมวลผล DPS จะรับทราบและเมื่อต้องการเริ่มทำงานใหม่อีกครั้งจะต้องส่งสัญญาณที่ขา รีเซตเป็น '0'

RESET ไอซีขับเกตจึงจะเริ่มทำงานอีกครั้ง

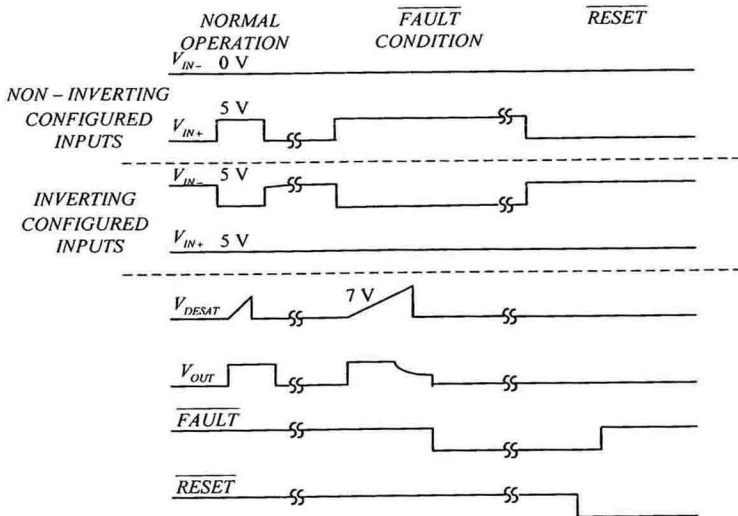
ขา 6 เป็นขา FAULT เมื่อแรงดัน V_{Desat} มากกว่าที่กำหนดแรงดันที่ขา 6 จะลดลงเป็น '0' พร้อมกันนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 11 ก็จะหยุดจ่ายสัญญาณเพื่อป้องกันอุปกรณ์กำลัง

ขา 9 13 และ 16 เป็นไฟเลี้ยงบวกและลบ ของวงจรขับเกตด้านเอาต์พุต

ขา 14 เป็นขาที่วัดแรงดันตกคร่อม V_{CE} สำหรับตรวจสอบสถานะกระแสเกิน เมื่อ V_{Desat} มากกว่า 7 โวลต์ แรงดันเอาต์พุตจะลดลงเป็นศูนย์ และจะต้องรีเซตวงจรอีกครั้ง

ขา 11 เป็นขาเอาต์พุตสำหรับอุปกรณ์กำลัง โดยสามารถเลือก R_L สำหรับอุปกรณ์กำลังพิกัดต่างๆ ได้

ส่วนตัวเก็บประจุ 0.1 ไมโครฟารัด สำหรับลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณสวิตซ์



ภาพที่ 2.30 ไลอะแกรมเวลาของวงจรขับเคลื่อนไอซี HCPL 316J

2.6 สถาปัตยกรรมของ TMS320F2812

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ผลิตภัณฑ์ของบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์ (Texas Instrument) ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Controller) ที่เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเนื่องจากโครงสร้างภายในมีความอ่อนตัวเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์หลายชนิด เช่นมอเตอร์เหนี่ยวนำ, มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน, ซิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร, และรีแอคแตนซ์มอเตอร์เป็นต้น มีลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. สร้างโดยใช้เทคโนโลยี High-Performance Static CMOS มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 150 MHz หรือ 6.67 nS ต่อหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา
2. รองรับการพอร์ต JTAG Boundary Scan
3. หน่วยประมวลผลกลางประสิทธิภาพสูงขนาด 32 บิต ใช้สถาปัตยกรรมแบบฮาวาร์ด (Harvard - Bus Architecture) ปฏิบัติการแบบ 16×16 และ 32×32 มีกระบวนการตอบสนองอินเทอร์รัพท์ที่รวดเร็ว

4. คอมแพคติเบิ้ลกับชุดคำสั่งของ DSP ตระกูล TMS320F24X/LF240X หน่วยความจำชนิดSARAM และ Flash ขนาด $128K \times 16$ บิต

5. มี Boot ROM ขนาด $4K \times 16$ ภายในบรรจุ Software Boot Modes และตารางคณิตศาสตร์

6. ตัวแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลความละเอียด 12 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ อินพุตมีลักษณะเป็นแบบมัลติเพล็กซ์ 2 ชุดๆ ละ 8 ช่องสัญญาณ มีตัวลatchingและคงค่า (Sample-and-Hold) จำนวนสองชุด สามารถทำการแปลงสัญญาณเพียงช่องเดียวหรือทุกช่องพร้อมกันได้ ซึ่งใช้เวลาในการแปลงสัญญาณเพียง 80 ns ต่อ 1 ครั้ง

7. ตัวสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) 12 ช่องสัญญาณ เรียกว่า Event Manager จำนวน 2 ชุด คือ EVA, EVB

8. ตัวนับขนาด 32 บิต 3 ชุด

9. ตัวรับสัญญาณจากเอ็น โคดเดอร์ (Quadrature Encoder Pulse)

10. Enhance Controller Area Network (eCAN) Module

11. Multichannel Buffered Serial Port (McBSP) With SPI Mode

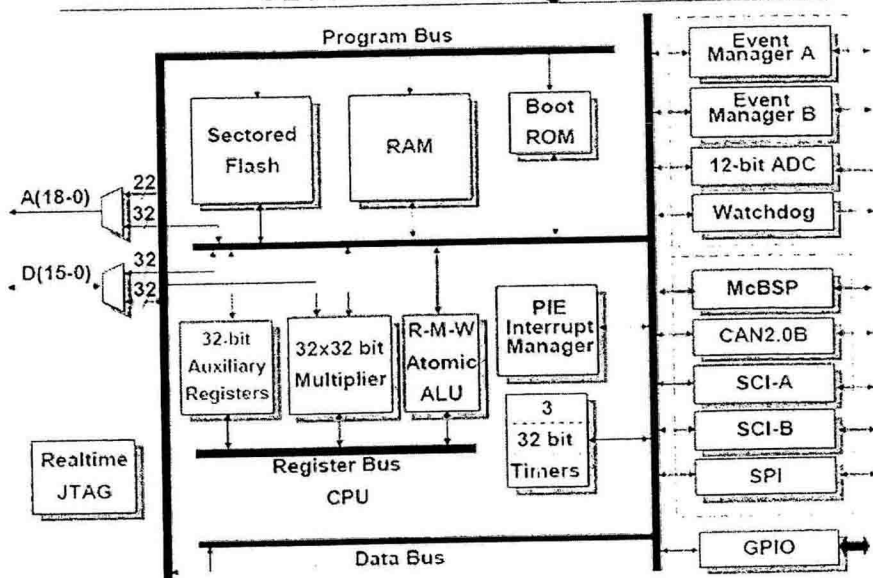
12. อินพุต/เอาต์พุต พอร์ต 56 ช่อง

13. ชุดติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม

14. รองรับสัญญาณอินเตอร์รัพท์จากอุปกรณ์รอบข้างจำนวน 45 แหล่ง

15. สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

C281x Block Diagram



ภาพที่ 2.31 บล็อกไดอะแกรมของ TMS320F2812

TMS320F2812 แบ่งออกเป็นสามส่วนใหญ่ๆ ได้ดังนี้คือ

1. หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit : CPU)
2. หน่วยความจำ (Memory)
3. อุปกรณ์ต่อเชื่อม

2.7 หน่วยประมวลผลกลาง

หน่วยประมวลผลกลาง เป็นหน่วยประมวลชนิดจุดทศนิยมคงที่ (Fixed Point) โดยมีขนาด 32 บิต อุปกรณ์นี้อาศัยข้อดีของกระบวนการประมวลสัญญาณดิจิทัล ด้วยการนำสถาปัตยกรรมแบบ RISC ร่วมกับ สถาปัตยกรรมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อดีของ DSP รวมถึงสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harward) และการอ้างตำแหน่งแบบวงกลม ข้อดีในส่วนของ RISC คือ ชิปที่สามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถกระทำคำสั่งได้ภายในหนึ่งรอบสัญญาณ

นาฬิกาโดยผ่านทางไปป์ไลน์(Pipeline) และการกระทำแบบรีจิสเตอร์ไปยังรีจิสเตอร์ ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์ก็คือ ความง่ายของการใช้งานผ่านทางชุดคำสั่ง และสามารถใช้งานในระดับบิตได้ ส่วนประกอบของหน่วยประมวลผลกลางมีดังนี้ คือ

1. หน่วยประมวลผลกลาง สำหรับถอดรหัสกระทำคำสั่งคำนวณทางคณิตศาสตร์ ลอจิก การเลื่อนบิต และควบคุมการส่งผ่านข้อมูลระหว่างรีจิสเตอร์ หน่วยความจำข้อมูลและหน่วยความจำโปรแกรม

2. อีมูเลชันลอจิก (Emulation Logic) สำหรับแสดงผลและควบคุมในหลายๆส่วนและสำหรับตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์

3. สัญญาณสำหรับการเชื่อมต่อกับหน่วยความจำและอุปกรณ์ภายนอกสัญญาณนาฬิกา และควบคุมหน่วยประมวลผลกลาง สัญญาณอีมูเลชันลอจิก แสดงผลสถานะภาพของหน่วยประมวลผลกลางอีมูเลชันลอจิก และการอินเตอร์รัพท์

2.8 สถาปัตยกรรมของหน่วยประมวลผลกลาง

1. ลอจิกควบคุมการทำงาน โปรแกรม และข้อมูลลอจิกนี้ทำหน้าที่เก็บแถวของคำสั่งที่มีอยู่โดยไปเอามาจากหน่วยความจำโปรแกรม

2. หน่วยตำแหน่งของรีจิสเตอร์ที่มีการกระทำทางคณิตศาสตร์ (Address Register Arithmetic Unit :ARAU) ARAU ให้กำเนิดตำแหน่งสำหรับค่าที่ต้องไปเอามาจากหน่วยความจำข้อมูลสำหรับการอ่านข้อมูล สถานที่ข้อมูลอยู่ที่ตำแหน่งบนบัสตำแหน่งอ่านข้อมูล (Data-read Address Bus :DRAB) สำหรับการเขียนข้อมูลที่ถูกรับอยู่ที่บัสตำแหน่งเขียนข้อมูล (Data-write Address Bus :DWAB) ARAU สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสแตคพอยเตอร์ (Stack Pointer) และรีจิสเตอร์ช่วย (Auxiliary Register) (XAR0, XAR1, XAR2, XAR3, XAR4, XAR5, XAR6, XAR7)

3. หน่วย (atomic arithmetic logic unit (ALU)) มีขนาด 32 บิต มีการกระทำทางคณิตศาสตร์แบบ 2' Complement และ การกระทำลอจิกบูลีน (Boolean Logic) ซึ่งก่อนที่ ALU จะกระทำการคำนวณนั้น ALU จะตอบรับข้อมูลจากรีจิสเตอร์ หน่วยความจำข้อมูล หรือจากโปรแกรมควบคุมลอจิก จากนั้น ALU จะเก็บผลลัพธ์ไปยังรีจิสเตอร์หรือหน่วยความจำข้อมูล

4. จุดทศนิยมคงที่ (Fixed-point :MPY/ALU) ตัวคูณกระทำการคูณแบบ 32 บิต× 32 บิต 2' Complement พร้อมกับผลลัพธ์ขนาด 64 บิต โดยกระทำร่วมกับรีจิสเตอร์ XT รีจิสเตอร์ผลลัพธ์ P และแอดคิวมูเลเตอร์ขนาด 32 บิต ผลลัพธ์ของการคูณสามารถส่งไปยังรีจิสเตอร์ P ได้

2.9 รีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง

1. แอคคิวมูเลเตอร์ (ACC, AH, AL) คือรีจิสเตอร์หลักที่ทำงานสำหรับกระบวนการทำงานทั้งหมดของ ALU นอกเหนือจากการกระทำโดยตรงบนหน่วยความจำ แอคคิวมูเลเตอร์รองรับการเคลื่อนย้ายแบบรอบเดียว รวมถึง การบวก การลบ และกระบวนการเปรียบเทียบจากหน่วยความจำ ข้อมูลขนาด 32 บิต ซึ่งเป็นความสามารถที่นอกเหนือจากผลลัพธ์ 32 บิต ของการกระทำการคูณแอกคิวมูเลเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นรีจิสเตอร์อิสระขนาด 16 บิต ได้ 2 ตัว คือ AH (16 บิตทางด้านสูง) และ AL (16 บิตทางด้านต่ำ) ซึ่งแต่ละไบต์ภายใน AH และ AL สามารถเข้าถึงได้อย่างอิสระ

2. รีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตั้งสำหรับคูณ (Multiplication Register :XT) รีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตั้งสำหรับคูณ ถูกใช้สำหรับเก็บค่าจำนวนเต็มที่มีเครื่องหมายขนาด 32 บิต เพื่อที่จะส่งไปกระทำการคูณต่อไป ส่วน 16 บิตทางด้านต่ำของรีจิสเตอร์ XT เรียกว่ารีจิสเตอร์ TL และ 16 บิตทางด้านสูงของรีจิสเตอร์ XT เรียกว่ารีจิสเตอร์ T รีจิสเตอร์นี้ส่วนใหญ่ใช้เก็บค่าจำนวนเต็มขนาด 16 บิต ที่เกิดจากการะบวนการคูณ และใช้ระบุค่าการเลื่อนบิตสำหรับบางการทำงานของกระบวนการเลื่อนบิต

3. รีจิสเตอร์ผลลัพธ์ (Product Register : P, PH, PL) รีจิสเตอร์ผลลัพธ์โดยปกติถูกใช้สำหรับเก็บผลลัพธ์ขนาด 32 บิต ที่เกิดจากการคูณและสามารถเคลื่อนย้ายข้อมูลขนาด 16 บิต หรือ 32 บิตได้โดยตรงจากหน่วยความจำข้อมูล ค่าคงที่ขนาด 16 บิตค่า 32 บิต จากแอกคิวมูเลเตอร์ และ 16 บิตหรือ 32 บิต จากการอ้างตำแหน่งของรีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง รีจิสเตอร์นี้แบ่งออกได้เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต สองส่วนคือ รีจิสเตอร์ PH (16 บิตทางด้านสูง) และรีจิสเตอร์ PL (16 บิตทางด้านล่าง)

4. ตัวชี้บนหน่วยความจำ (Data Page Pointer :DP) ในโหมดการอ้างตำแหน่งโดยตรง หน่วยความจำข้อมูลจะถูกระบุตำแหน่งโดยแบ่งออกเป็นตอนละ 64 เวิร์ด ซึ่งถูกเรียกว่าหน้าหน่วยความจำ

5. ตัวชี้สแตค (Stack Pointer :SP) ตัวชี้สแตคทำให้สามารถใช้ซอฟต์แวร์สแตคในหน่วยความจำข้อมูลได้ ตัวชี้สแตคมีขนาด 16 บิต และสามารถอ้างตำแหน่งได้เฉพาะ 64K ของพื้นที่ข้อมูล

6. รีจิสเตอร์ช่วย (Auxiliary Register: XAR0-XAR7,AR0-AR7) หน่วยประมวลผลกลางจะเปิดช่องให้รีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต จำนวน 8 ตัวให้สามารถใช้ตัวชี้ไปยังหน่วยความจำหรือรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปได้ รีจิสเตอร์ช่วยนี้ใช้สำหรับเมื่อต้องการอ้างถึงตำแหน่งในหน่วยความจำแบบต่างๆ และเช่นเดียวกันรีจิสเตอร์ขนาด 32 บิต ทั้ง 8 ตัวนี้ แต่ละตัวสามารถ แบ่งเป็นสองส่วนๆละ 16 บิต

7. โปรแกรมเคาน์เตอร์ (Program Counter :PC) หน้าที่หลักของโปรแกรมเคาน์เตอร์คือเป็นตัวชี้ตำแหน่งของคำสั่งต่อไปที่จะทำการ fetch

8. รีเทิร์นโปรแกรมเคาน์เตอร์ (Return Program Counter :RPC) เมื่อทำการเรียกใช้คำสั่ง LCR ตำแหน่งที่ใช้ในการย้อนกลับถูกเก็บในรีจิสเตอร์ RPC ค่าเดิมในรีจิสเตอร์ RPC ถูกเก็บบนสแตค กระบวนการย้อนกลับสามารถทำได้โดยการใช้คำสั่ง LRETR โดยตำแหน่งที่ทำการย้อนกลับจะอ่านจากรีจิสเตอร์ RPC และค่าบนสแตคจะถูกเขียนไปยังรีจิสเตอร์ RPC

9. รีจิสเตอร์สถานะ (Status Register :ST0, ST1) บน TMS320F2812 มีรีจิสเตอร์สถานะอยู่สองตัวคือ ST0 และ ST1 ซึ่งบรรจุบิตแฟลกและบิตควบคุมอยู่ในรีจิสเตอร์นี้สามารถที่จะถูกเก็บและถูกโหลดได้จากหน่วยความจำข้อมูล

10. รีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมกระบวนการอินเตอร์รัพท์ TMS320F2812 มีรีจิสเตอร์อยู่สามตัวที่ใช้ควบคุมกระบวนการอินเตอร์รัพท์คือ

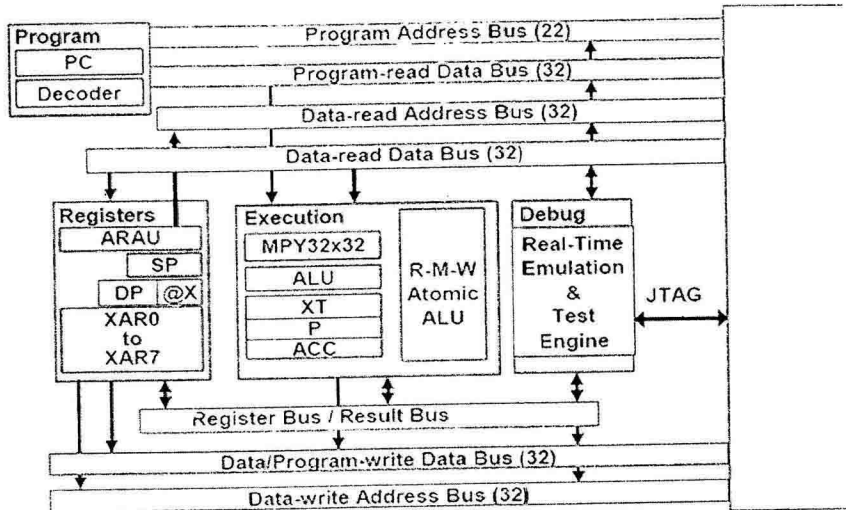
10.1 อินเตอร์รัพท์แฟลกรีจิสเตอร์ (Interrupt Flag Register :IFR)

10.2 อินเตอร์รัพท์เอเนเบิลรีจิสเตอร์ (Interrupt Enable Register :IER)

10.3 ดีบั๊กอินเตอร์รัพท์เอเนเบิลรีจิสเตอร์ (Debug Interrupt Enable Register :DBGIER)

ภายใน IFR บรรจุบิตแฟลกสำหรับกระบวนการมาสเคเบิลอินเตอร์รัพท์ (Master Interrupt) เมื่อบิตใดบิตหนึ่งของแฟลกถูกเซต ไม่ว่าจะโดยฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์กระบวนการอินเตอร์รัพท์จะได้รับการตอบสนองถ้าได้มีการเปิดการทำงานเอาไว้ ซึ่งสามารถเปิดหรือปิดกระบวนการทำงานมาสเคเบิลอินเตอร์รัพท์ได้ที่บิตใน IER

C28x Internal Bus Structure



ภาพที่ 2.32 รีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลาง

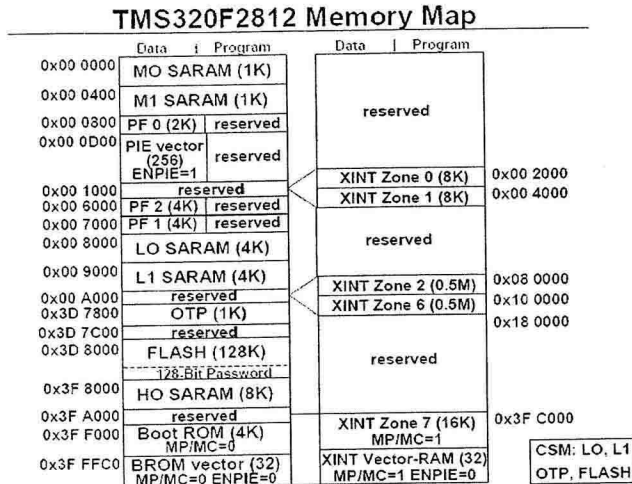
2.10 การจัดผังหน่วยความจำ

TMS320F2812 มีการอ้างที่อยู่แยกกันระหว่างหน่วยความจำข้อมูลกับ หน่วยความจำโปรแกรม อีกทั้งยังสามารถติดต่อกับหน่วยความจำที่อยู่ภายนอกได้ ตำแหน่งของข้อมูลใช้ขนาด 32 บิต และตำแหน่งของโปรแกรมใช้ขนาด 22 บิต โดยผังของหน่วยความจำมีการแบ่งออกเป็น ส่วนๆ ดังนี้

1. หน่วยความจำข้อมูลและหน่วยความจำโปรแกรมภายใน
2. พื้นที่สำรอง
3. เวกเตอร์สำหรับการอินเทอร์รัพท์ของ CPU

ในช่วงตำแหน่ง “Low 64K” ของผังหน่วยความจำจะเปรียบเสมือนกับพื้นที่ของข้อมูลบนDSP ตระกูล 240x ส่วน “High 64K” ในช่วงตำแหน่งของผังหน่วยความจำจะเปรียบเสมือน กับพื้นที่ของ

โปรแกรมบน DSP ตระกูล TMS320F24x/240x ซึ่งการที่จะให้มีความคอมแพคติเบิ้ลกับโค้ดของตระกูล TMS320F24x/240x



ภาพที่ 2.33 ผังหน่วยความจำ

2.11 อุปกรณ์ต่อเชื่อม

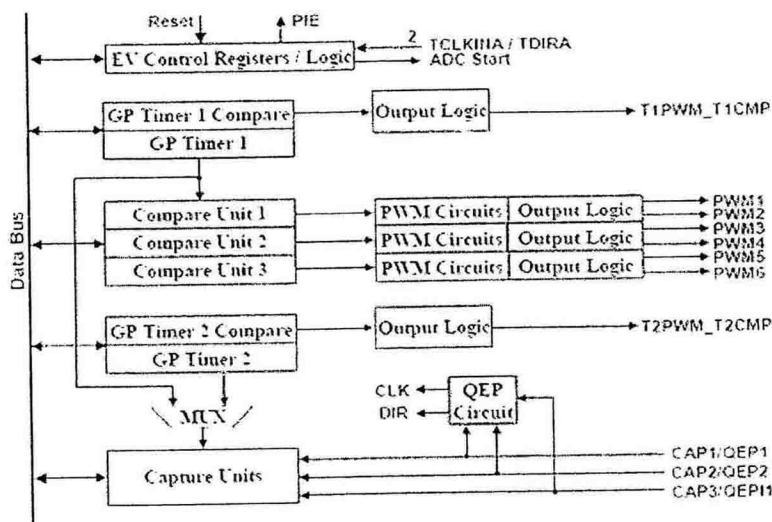
อุปกรณ์ต่อเชื่อมของ TMS320F2812 ประกอบด้วย

1. TIMER ขนาด 32 บิต (0, 1, 2) บน TMS320F2812 มี Timer ของหน่วยประมวลผลกลางขนาด 32 บิตจำนวน 3 ตัวคือ Timer 0/1/2 Timer 1 และ 2 ถูกสงวนไว้สำหรับระบบการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง ส่วน Timer 0 นั้นเป็นส่วนที่ผู้ใช้สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่ง Timer นี้ได้ถูกใช้งานในโมดูล Event-manager ทั้ง EVA และ EVB ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกที่แตกต่างออกไปคือ “Timer สำหรับใช้งานทั่วไป (general-purpose (GP) timer)”

2. โมดูล Event Manager (EVA, EVB) Event Manager ได้รวม TIMER สำหรับใช้งานทั่วไป (GPTimers) หน่วย Full-compare PWM หน่วย Capture และวงจร Quadrature encoder Pulse (QEP) ในรูปที่ 2.26 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Event Manager A ส่วนบล็อกไดอะแกรม Event

Manager B นั้นจะเหมือนกันกับ Event Manager A แต่ก็มีส่วนที่แตกต่างกัน คือชื่อของสัญญาณ และ ตำแหน่งที่อยู่ของรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานซึ่งได้แสดงรายละเอียดชื่อของสัญญาณไว้ใน

Event Manager Block Diagram (EVA)



ภาพที่ 2.34 บล็อกไดอะแกรมของ Event Manager A (EVA)

Timer สำหรับใช้งานทั่วไป (GP timer) Timer สำหรับใช้งานทั่วไป สามารถทำงานได้อย่างอิสระหรือทำงานพร้อมกันในแต่ละ Timer รีจิสเตอร์สำหรับใช้เปรียบเทียบ (Compare Register) เป็นส่วนเดียวกันกับ Timer ซึ่งเมื่อทำงานร่วมกันแล้วจะสามารถสร้างสัญญาณ PWM ออกมาได้

หน่วย Full-compare ใน Event Manager แต่ละชุดมีหน่วย Full-compare อยู่ชุดละ 3 ตัว หน่วย Full-compare นี้ใช้ GP timer 1 เป็นตัวสร้างฐานเวลาในการให้กำเนิดสัญญาณ PWM ทั้ง 6 เอาต์พุต ในแต่ละส่วนของทั้ง 6 เอาต์พุต สามารถปรับแต่งให้เป็นอิสระต่อกัน

วิธีกำหนด Deadband การให้กำเนิด Deadband นั้นสามารถเปิดปิดการทำงานของแต่ละเอาต์พุตได้ในหน่วย Compare ซึ่งวงจรให้กำเนิด Deadband สร้างเอาต์พุตมาสองค่าคือ โชนที่มี Deadband กับโชนที่ไม่มี Deadband

หน่วย Capture หน่วย Capture ได้มีการจัดเตรียมฟังก์ชันสำหรับเหตุการณ์ที่ผัดกันหรือเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าของ GP Timer Counter ที่ถูกเลือกให้ตรวจจับจะเก็บไว้ใน สเตตที่ที่มีชื่อว่า Two-level-deep FIFO

วงจร Quadrature Encoder Pulse (QEP) อินพุตทั้งสองของ Capture (CAP1 และ CAP2) สำหรับ EVA; CAP4 CAP5 สำหรับ EVB) สามารถใช้เชื่อมต่อกับวงจร Quadrature encoder Pulse(QEP) จะตรวจสอบทิศทางหรือลำดับของ Leading quadrature Pulse และ GP timer 2/4 จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณอินพุตทั้งสอง

3. โมดูลแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 3.1 มีความละเอียด 12 บิต และมีวงจร Sample and Hold (S/H) บรรจุอยู่ภายใน
- 3.2 สัญญาณอะนาลอกของอินพุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 โวลต์
- 3.3 ใช้ระยะเวลาในการแปลง 80ns เมื่อความถี่อินพุตของ ADC คือ 25MHz
- 3.4 มีอินพุตแบบมัลติเพล็กซ์จำนวน 16 ตัว
- 3.5 มีรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการเก็บผลลัพธ์ในการแปลงจำนวน 16 ตัว
- 3.6 มีความยืดหยุ่นในการควบคุมกระบวนการอินเตอร์รัพท์โดยยอมรับให้เกิดการร้องขออินเตอร์รัพท์บนทุกๆ End-of-sequence (EOS)
- 3.7 สามารถทำการแปลงในโหมดเรียงตามลำดับทั้งหมดโดยอัตโนมัติ (Autosequenced ADC in Cascade Mode) ซึ่งสามารถใช้งานอินพุตได้ทั้ง 16 ช่อง หรือขึ้นอยู่กับว่าต้องการเลือกให้อินพุตช่องใดทำงาน

3.8 สามารถทำการแปลงในโหมดเรียงตามลำดับทั้งหมดโดยอัตโนมัติแบบเรียงตามลำดับคู่ (Autosequenced ADC With Dual Sequencers) โดยแบ่งอินพุตออกเป็นสองส่วนๆ ละ 8 ช่อง ซึ่งทั้งสองส่วนนี้สามารถสั่งให้เริ่มทำงานได้โดยเป็นอิสระต่อกัน

4. Watchdog F2810 และ F2812 สนับสนุนการทำงานของ Watchdog Timer โดยผู้ใช้ต้องเขียนโปรแกรมเพื่อทำการรีเซ็ต Watchdog counter นอกจากนี้ยังเกิดการรีเซ็ต Watchdog ได้จากกระบวนการทำงาน ซึ่งสามารถหยุดการทำงานของ Watchdog ได้โดยการ disable

5. General-purpose Input/Output (GPIO) Multiplexer เป็นอินพุต/เอาต์พุตของสัญญาณที่ถูกใช้โดยการมัลติเพล็กซ์ ในขณะที่รีเซ็ต ขา GPIO ทั้งหมดจะถูกจัดให้เป็นอินพุต นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดให้ขาอินพุต/เอาต์พุต เป็นได้ทั้งโหมด GPIO และ โหมดอินพุต/เอาต์พุต ทั่วไป

6. Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block PIE block สามารถรองรับการอินเตอร์รัพท์ได้จาก 96 แหล่ง โดยสามารถแบ่งได้ 8 กลุ่ม แต่ละกลุ่มถูกป้อนยังอินพุต การ

อินเตอร์รัพท์ 12 เส้น (INT1 ถึง INT12) ซึ่งอินเตอร์รัพท์ทั้ง 96 จะมีตำแหน่งแอดเดรสของตัวเองในบล็อกหน่วยความจำแบบ RAM ซึ่งสามารถเขียนซ้ำได้

7. Enhanced Controller Area Network (eCAN) ในเวอร์ชันนี้ประกอบด้วย CAN ซึ่งสนับสนุนเมสส์ บ็อกซ์ และบันทึกเวลาของแต่ละเมสเสจที่เข้ามา ซึ่งเป็น CAN 12.0 B

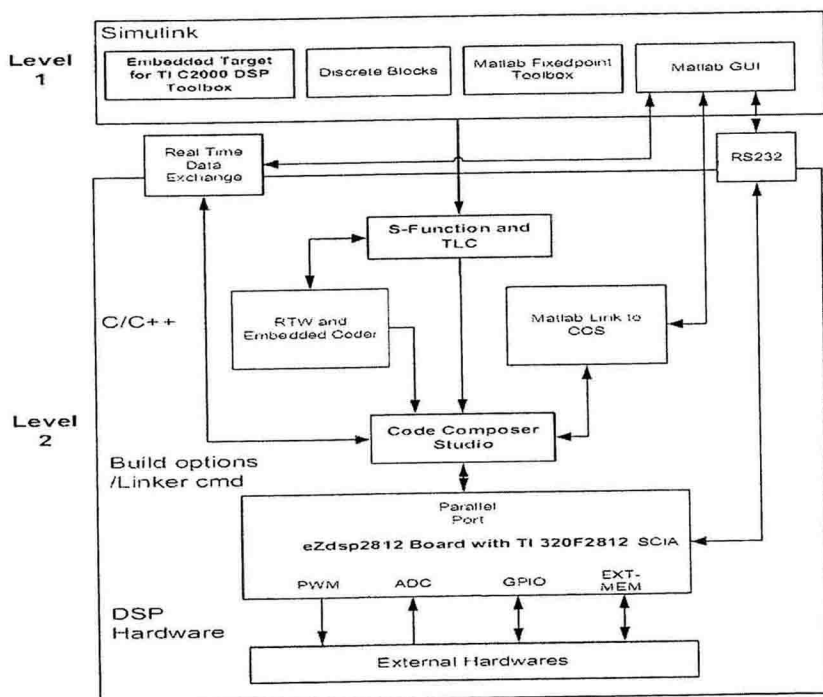
8. Multichannel Buffered Serial Port (McBSP) McBSP สามารถใช้ต่อการเข้ารหัสของโมเด็มได้ หรือใช้กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอกแบบสเตอริโอคุณภาพสูงได้ ซึ่งMcBSP จะรับส่งข้อมูลในรีจิสเตอร์แบบ FIFO (First In First Out)

9. Serial Port Interface (SPI) SPI เป็นพอร์ตอินพุต เอาต์พุตอนุกรมแบบซิงโครนัส (Synchronous) ความเร็วสูง ซึ่งสามารถส่งข้อมูลโดยมีจำนวนบิตได้ตั้งแต่ 1 ถึง 16 บิต ซึ่งสามารถเข้าและออกอุปกรณ์โดยอัตราการส่งสามารถโปรแกรมได้โดยปกติ SPI ใช้สำหรับการติดต่อกันระหว่าง DSP คอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ภายนอกหรือโปรเซสเซอร์อื่นๆ ซึ่งโดยปกติจะรวมไปถึงการใช้งาน I/O ภายนอกหรือการส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์เช่น ชิฟต์รีจิสเตอร์ (Shift Register) ไดรเวอร์การแสดงผลและ ADC ในการติดต่อกัน ระหว่างอุปกรณ์หลายๆ ตัว จะใช้ระบบมาสเตอร์/สเลฟ (Master/Slave) ของ SPI และ F2812 จะสามารถส่งข้อมูลแบบ FIFO 16 ระดับ ซึ่งช่วยทำให้การทำงานต่างๆ รวดเร็วยิ่งขึ้น

10. Serial Communication Interface (SCI) SCI เป็นพอร์ตอนุกรมแบบ 2 เส้น (Two-wire) ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อของ UART ซึ่งใน F2810 และ F2812 สนับสนุนการรับ-ส่งข้อมูลแบบFIFO

2.12 ระบบควบคุมแบบทันเวลา (Real-time Control System) ด้วย eZdsp

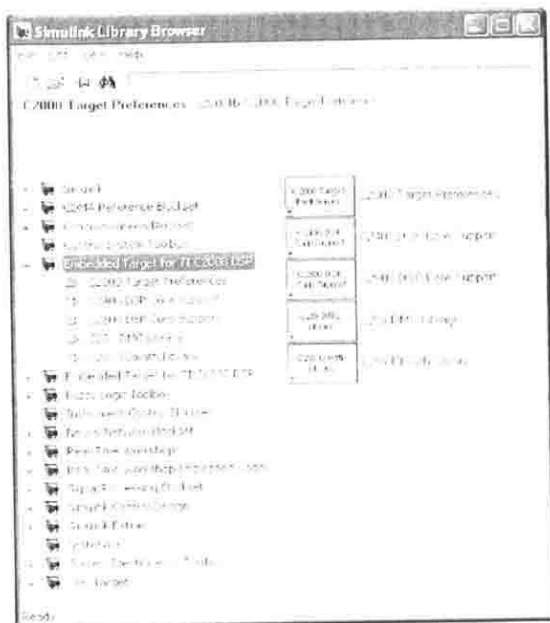
โปรแกรม Code Composer Studio (CCS) เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาสำหรับ DSP ของบริษัท TI ปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 4 ซึ่งการใช้งาน DSP ร่วมกับโปรแกรม Matlab/Simulink จะต้องติดตั้งโปรแกรม CCS ก่อน ซึ่งโปรแกรม Matlab/Simulink จะทำหน้าที่สร้างโค้ดอัตโนมัติจากบล็อกต่างๆที่สร้างด้วยโปรแกรม Simulink ผ่านการอัลกอริทึมที่เรียกว่า Real Time Workshop (RTW) ของโปรแกรม Matlab/Simulink ดังภาพที่ 2.35



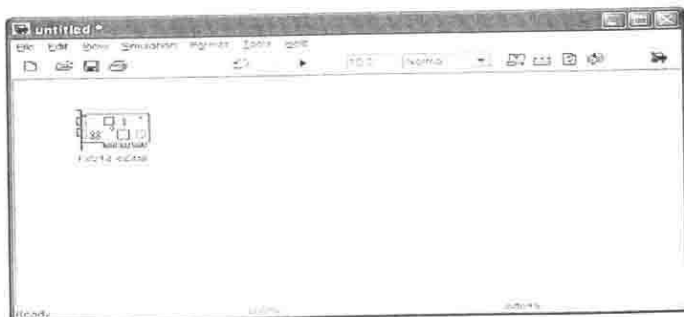
ภาพที่ 2.35 ระบบควบคุมแบบทันเวลา (Real-time Control System) ด้วย ezDSP

ในการใช้งานจะต้องเชื่อมต่อบอร์ด DSP ผ่านพอร์ตขนาน โดยมีพอร์ตที่ใช้งานเพื่อเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาทิเช่น PWM, ADC, GPIO, SCIA เป็นต้น เมื่อติดตั้งโปรแกรม CCS เรียบร้อยแล้วจึงติดตั้งโปรแกรม Matlab/Simulink ซึ่งมี Blockset ของ DSP ตระกูล C2000 ดังในภาพที่ 2.36 ให้เลือกบล็อก F2812 eZdsp จาก “C2000 Target Preference” ลงในไฟล์

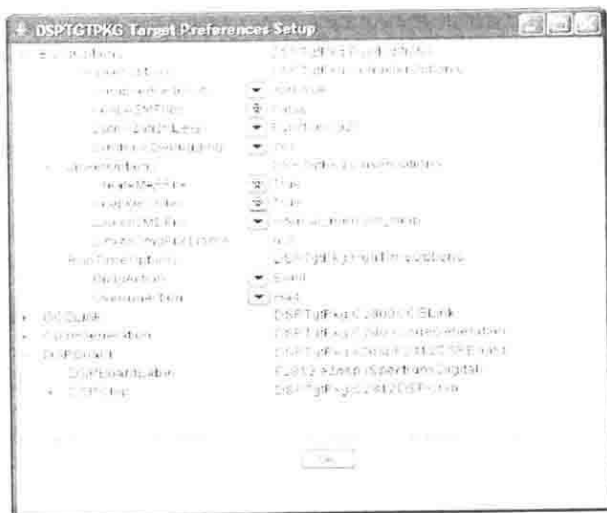
วางเพื่อกำหนดบอร์ด DSP เป็นค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมดังในภาพที่ 2.37 ซึ่งเมื่อคลิกจะเห็นค่าเริ่มต้นใช้งานของบอร์ดตามรูปที่ 2.38



ภาพที่ 2.36 Matlab/Simulink Environment Setup



ภาพที่ 2.37 บล็อก F2812 cZdsp



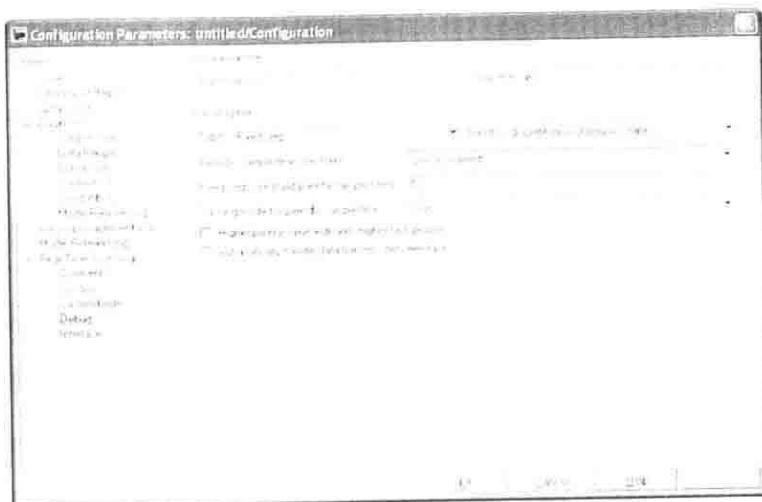
ภาพที่ 2.38 ค่าเริ่มต้นของบอร์ค DSP เบิร์ TMS320F2812

ในการใช้งาน RTW จะต้องทำการแก้ไขพารามิเตอร์ของการจำลองดังในภาพที่ 2.39 ดังนี้

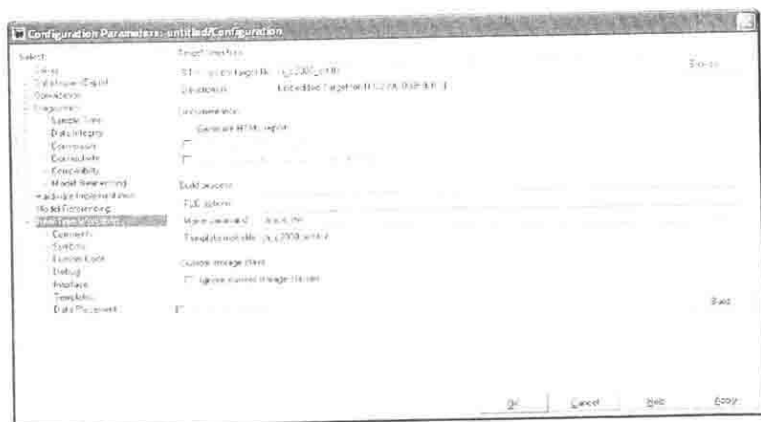
- Simulation time $\rightarrow$ Stop time $\rightarrow$ inf
- Solver options $\rightarrow$ type $\rightarrow$ Fixed-step
- Solver options $\rightarrow$ solver $\rightarrow$ discrete
- Solver options $\rightarrow$ Fixed-step size $\rightarrow$ Ts (defined)

ในส่วนการกำหนดค่า Real-time Workshop ในภาพที่ 2.39 มีดังต่อไปนี้

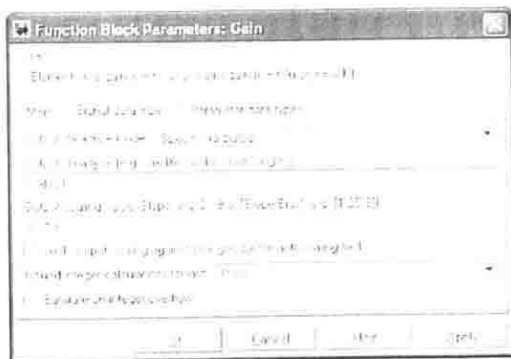
- Target selection → RTW system target file → ti_c2000_ert.tlc
- Build



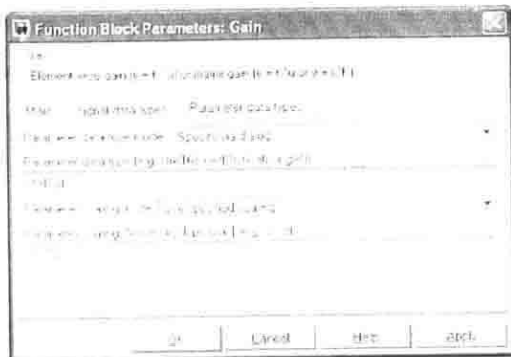
ภาพที่ 2.39 Configuration parameters Setup



ภาพที่ 2.40 Real time Workshop Setup



ภาพที่ 2.41 การกำหนด Signal data types

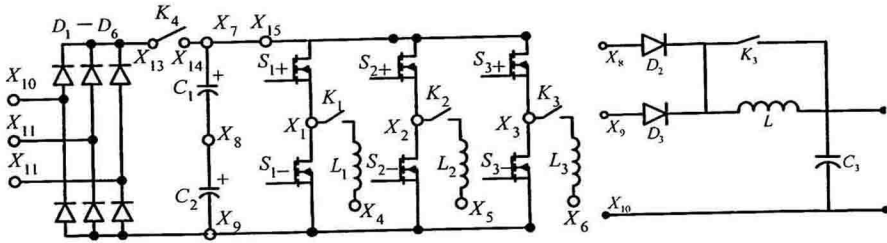


ภาพที่ 2.42 การกำหนด Parameter data types

เนื่องจาก DSP เบอร์ TMS320F2812 นั้นมีการคำนวณแบบ Fixed point ฉะนั้นแบบจำลองบนไฟล์ Simulink จึงต้องมีการแปลง Data type สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนที่คุณสมบัติของบล็อก (block property tab) ตัวอย่างเช่น ต้องการแปลงค่าอัตราขยาย 3.14159 ให้เป็น Data type แบบ fixed point 32 bit ความละเอียด 1/100000 บนค่าเข้าชุด +/-2000 จะต้องทำการตั้งค่า signal data types ดังในภาพที่ 2.41 32~19 มีความละเอียดเท่ากับ $2e-6$ เป็นเศษส่วนของจำนวนเลข 32 bit ซึ่งได้ช่วงของค่าจริง 0 ถึง +/- 4096

บทที่ 3

การออกแบบงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 ชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับเป็นชุดทดลองแบบ Real-time

ชุดฝึกวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำเสนอในงานวิจัยสามารถที่จะดัดแปลงเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับได้ดังนี้

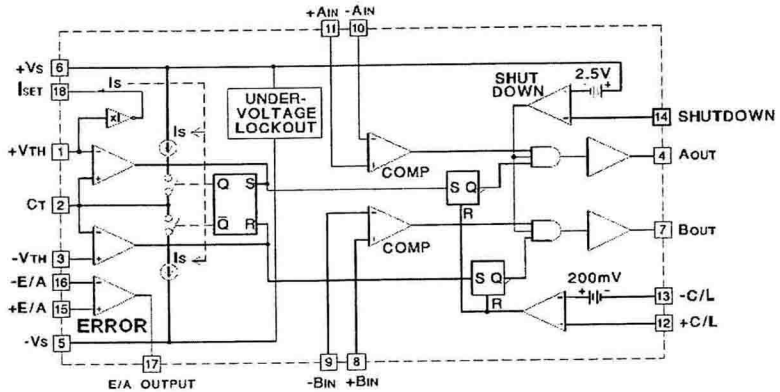
1. วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
2. วงจรแปลงผันแบบบัก
3. วงจรแปลงผันแบบบูส
4. วงจรแปลงผันแบบบัก-บูส
5. วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค
6. วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด
7. วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อต้องการควบคุมแบบวงปิดจะต้องหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบแล้วจึงไปออกแบบตัวควบคุม โดยตัวควบคุมจะต้องสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับระบบได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการออกแบบตัวควบคุม การจำลองการทำงานก่อนนำไปใช้งานจริงด้วยโปรแกรมควบคุม

3.1 วงจรควบคุม

สำหรับวงจรควบคุมใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่ได้จากสัญญาณ PWM (eZdsp) หรือวงจรแอนะล็อกสร้างสัญญาณพัลส์ที่เหลี่ยม ที่มีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปสามเหลี่ยมและมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลของการมอดูเลต ค่าความกว้างของพัลส์นี้จะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลากระแสของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์

ไอซีเบอร์ UC3637 ซึ่งเป็นไอซีที่ออกแบบมาเพื่อใช้ควบคุมการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ โครงสร้างภายในแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างภายในของไอซีเบอร์ UC3637

การกำหนดคาบเวลาการทำงานของไอซี UC3637 ทำได้โดยกำหนดค่าของ R_T และ C_T จากภายนอกที่ขา 18 และ 2 ของไอซี

ค่าเวลาที่กำหนดได้จาก

$$T = \frac{2C_T R_T ((+V_{TH}) - (-V_{TH}))}{I_S} \quad (3.1)$$

จาก
$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

$$f = \frac{I_S}{2C_T R_T ((+V_{TH}) - (-V_{TH}))} \quad (3.3)$$

ไอซีที่ขั้วนำเกิดใช้ ไอซีเบอร์ HCPL-316J เป็นตัวแยกสัญญาณไฟฟ้า ลักษณะการจัดวงจรเป็นดังภาพที่ 3.3

การป้อนสัญญาณและต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับไอซี HCPL-316J

ขา 1 และ 2 เป็นขาสัญญาณพลัสอินพุตที่ต้องการป้อนให้กับอุปกรณ์กำลังโดยใช้งานแบบ Non-Inverting โดยต่อขา (V_{in+}) ลงกราวด์

ขา 3 และ 4 เป็นไฟเลี้ยงในวงจรจับเกต 5 โวลต์

ขา 5 เป็นขารีเซตใช้งานกรณีเมื่อกระแสเกินและเกิดการความผิดปกติขึ้น โดยจ่ายสัญญาณพลัสเข้าที่ขา

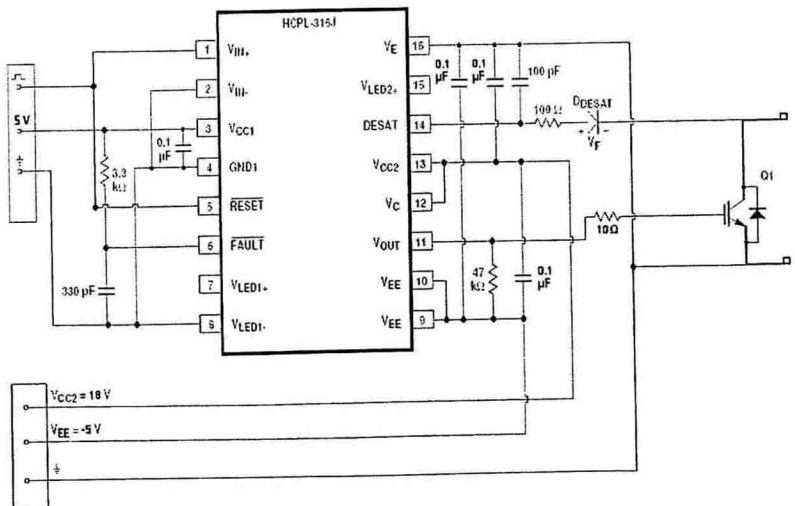
ขา 8 ต่อลงกราวด์

ขา 9 10 13 และ 16 เป็นไฟเลี้ยงบวกและลบ ของวงจรจับเกตด้านเอาต์พุต

ขา 14 เป็นขาที่วัดแรงดันตกคร่อม V_{CE} สำหรับตรวจสอบสถานะกระแสเกิน เมื่อ V_{Desat} มากกว่า 7 โวลต์ แรงดันเอาต์พุตจะลดลงเป็นศูนย์ และจะต้องรีเซตวงจรอีกครั้ง

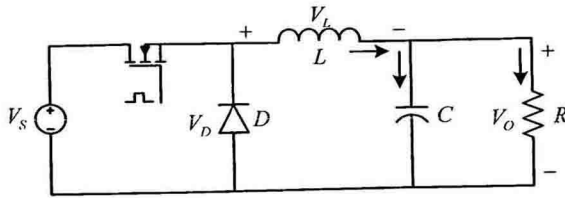
ขา 11 เป็นขเอาต์พุตสำหรับอุปกรณ์กำลัง โดยสามารถเลือก R_L สำหรับอุปกรณ์กำลังพิกัดต่างๆ ได้

ส่วนตัวเก็บประจุ 0.1 ไมโครฟารัด สำหรับลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสัญญาณสวิตช์



ภาพที่ 3.3 วงจรขั้วนำเกิดด้วยไอซีเบอร์ HCPL 316J

3.2 วงจรแปลงผันแบบบัค



ภาพที่ 3.4 วงจรแปลงผันแบบบัค

การออกแบบชุดทดลองใช้สัญญาณพัลส์จากเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่มีความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และต้องการให้วงจรแปลงผันแบบบัคทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จึงทำการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด ที่ทำให้กระแสต่อเนื่อง

แรงดันอินพุต	40 V
ค่าดีวตีไซเคิล	0.5
ตัวเหนี่ยวนำ	800 μH
ตัวต้านทาน	10 Ω

ค่าแรงดันเอาต์พุต

$$\begin{aligned} V_O &= DV_S \\ &= 0.5 \times 40 \\ &= 20V \end{aligned} \quad (3.4)$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด

$$\begin{aligned} L_{\min} &= \frac{(1-D)R}{2f_s} \\ &= \frac{(1-0.5)10}{2 \times 20 \times 10^3} \\ &= 125 \mu H \end{aligned} \quad (3.5)$$

L มีค่าความเหนี่ยวนำไม่ต่ำกว่า 125 μH

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{1-D}{8LCf_s^2} \quad (3.6)$$

กำหนดค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ 1 %

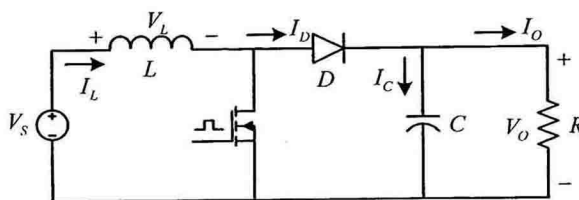
$$C = \frac{(1-0.5)}{8 \times 800 \times 10^{-6} \times (20 \times 10^3)^2 \times 0.01}$$

$$= 19.53 \mu F$$

ตัวเก็บประจุมีค่าไม่ต่ำกว่า $19.53 \mu F$

3.3 วงจรแปลงผันแบบบูส

สำหรับวงจรแปลงผันแบบบูส ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เหมือนกับวงจรแปลงผันแบบบัค แต่มีความต่างกันตรงที่สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์และไดโอดสลับกัน



ภาพที่ 3.5 วงจรแปลงผันแบบบูส

การออกแบบชุดทดลองใช้สัญญาณพัลส์จากเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่มีความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และต้องการให้วงจรแปลงผันแบบบูสทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จึงทำการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด ที่ทำให้กระแสต่อเนื่อง

แรงดันอินพุต	20 V
ค่าตัวดีไซเกิล	0.5
ตัวเหนี่ยวนำ	800 μH
ตัวต้านทาน	10 Ω

ค่าแรงดันเอาต์พุต

$$V_o = \frac{V_s}{1-D}$$

$$= \frac{20}{1-0.5}$$

$$= 20V$$
(3.7)

ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด

$$\begin{aligned}
 L_{\min} &= \frac{D(1-D)R}{2f_s} \\
 &= \frac{0.5(1-0.5)10}{2 \times 20 \times 10^3} \\
 &= 62.5 \mu H
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

L มีค่าความเหนี่ยวนำไม่ต่ำกว่า $62.5 \mu H$

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf_s} \tag{3.9}$$

กำหนดค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ 1 %

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{0.5}{10 \times 20 \times 10^3 \times 0.01} \\
 &= 250 \mu F
 \end{aligned}$$

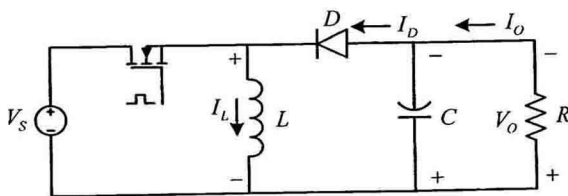
ตัวเก็บประจุมีค่าไม่ต่ำกว่า $250 \mu F$

3.4 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

อัตราการใช้พลังงานของวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส เป็นผลคูณอัตราการใช้พลังงานของวงจรแปลงผันแบบบัคและวงจรแปลงผันแบบบูส แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต จะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแรงดันอินพุต

สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคบูส สามารถแบ่งตามค่าดีวีไอได้ดังนี้

- ดีวีไอ ตั้งแต่ 0-0.5 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส ทำงานเสมือนวงจรแปลงผันแบบบัค
- ดีวีไอ ตั้งแต่ 0.5-1 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส ทำงานเสมือนวงจรแปลงผันแบบบูส
- ดีวีไอ ที่ 0.5 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส มีอัตราการใช้พลังงานเท่ากับหนึ่ง ไม่สามารถเพิ่มหรือลดแรงดันเอาต์พุตได้



ภาพที่ 3.6 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

การออกแบบชุดทดลองใช้สัญญาณพัลส์จากเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่มีความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และต้องการให้วงจรแปลงผันแบบบัค-บูสทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง จึงทำการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด ที่ทำให้กระแสต่อเนื่อง

แรงดันอินพุต 20 V

ตัวเหนี่ยวนำ 800 μH

ตัวต้านทาน 10 Ω

3.4.1 กรณีทำงานเสมือนวงจรแปลงผันแบบบัค

ค่าตัวใช้เกิล 0.25

$$\begin{aligned} V_o &= -V_s \left[\frac{D}{1-D} \right] \\ &= -20 \left[\frac{0.25}{1-0.25} \right] \\ &= -6.67V \end{aligned} \quad (3.10)$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด

$$\begin{aligned} L_{\min} &= \frac{(1-D)^2 R}{2f_s} \\ &= \frac{(1-0.25)^2 \times 10}{2 \times 20 \times 10^3} \\ &= 140.66 \mu H \end{aligned} \quad (3.11)$$

ตัวเหนี่ยวนำไม่ต่ำกว่า 140.66 μH

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf_s} \quad (3.12)$$

กำหนดค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ 1 %

$$\begin{aligned} C &= \frac{0.25}{10 \times 20 \times 10^3 \times 0.01} \\ &= 125 \mu F \end{aligned}$$

ตัวเก็บประจุมีค่าไม่ต่ำกว่า 125 μF

3.4.2 กรณีทำงานเสมือนวงจรแปลงผันแบบบูส

ค่าตัวใช้เกิล 0.75

$$\begin{aligned} V_o &= -V_s \left[\frac{D}{1-D} \right] \\ &= -20 \left[\frac{0.75}{1-0.75} \right] \\ &= -60V \end{aligned} \quad (3.13)$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด

$$\begin{aligned} L_{\min} &= \frac{(1-D)^2 R}{2f_s} \\ &= \frac{(1-0.75)^2 \times 10}{2 \times 20 \times 10^3} \\ &= 15.66 \mu H \end{aligned} \quad (3.14)$$

ตัวเหนี่ยวนำไม่ต่ำกว่า $15.66 \mu H$

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุต

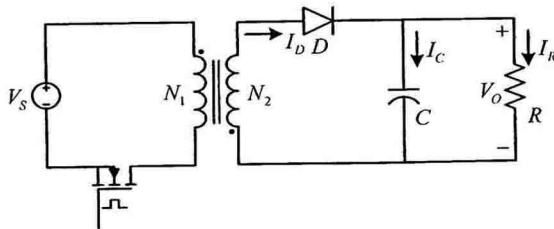
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf_s} \quad (3.15)$$

กำหนดค่าระลอกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่ 1 %

$$\begin{aligned} C &= \frac{0.75}{10 \times 20 \times 10^3 \times 0.01} \\ &= 375 \mu F \end{aligned}$$

ตัวเก็บประจุมีค่าไม่ต่ำกว่า $375 \mu F$

3.5 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค



ภาพที่ 3.7 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

การออกแบบวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค และการคำนวณต่าง ๆ เพื่อให้ได้วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค ที่ทำงานในช่วงความถี่เท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์

แรงดันอินพุต 40 V

แรงดันเอาต์พุต 20 V

ค่าตัวใช้เกิล 0.5

ค่าคาบเวลาการทำงาน

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{f} \\ &= \frac{1}{20 \times 10^3} \\ &= 50 \mu s \end{aligned} \quad (3.16)$$

กำหนดอัตราส่วนจำนวนรอบ $\frac{N_1}{N_2}$

$$\begin{aligned} t_{on(max)} &= \frac{(V_O + V_D)(N_1 / N_2)(0.8T)}{(V_{in(min)} - V_{CE(sat)}) + (V_O + V_D)(N_1 / N_2)} \\ \frac{N_1}{N_2} &= 1.8 \end{aligned} \quad (3.17)$$

เลือกใช้ $\frac{N_1}{N_2}$ เท่ากับ 1.5

คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L_p ของขดลวด N_1

$$\begin{aligned} L_p &= \frac{4\pi \times A_e \times N_1^2 \times 10^{-8}}{I_g} \\ L_p &= \frac{4\pi \times 3.68 \times 34^2 \times 10^{-8}}{1} \\ &= 534 \mu H \end{aligned} \quad (3.18)$$

คำนวณค่ากระแสสูงสุดทาง N_1

$$\begin{aligned} I_{p(PK)} &= \frac{(V_{in(min)} - V_{CE(sat)})t_{on(max)}}{L_p} \\ &= \frac{(40 - 1)20 \times 10^{-6}}{534 \times 10^{-6}} \\ &= 1.46 A \end{aligned} \quad (3.19)$$

คำนวณจำนวนรอบ N_1

$$N_1 = \frac{(V_{in(min)} - V_{CE(sat)})t_{on(max)} \times 10^8}{\Delta B_{max} \cdot Ae} \quad (3.20)$$

$$N_1 = \frac{(40-1)20 \times 10^{-6} \times 10^8}{1600 \times 3.68}$$

$$= 15 \text{ รอบ}$$

เลือก N_1 เท่ากับ 15 รอบ

คำนวณจำนวนรอบ N_2

$$\frac{N_1}{N_2} = 1.5$$

$$N_2 = \frac{15}{1.5} = 10 \text{ รอบ}$$

เลือก N_2 เท่ากับ 10 รอบ

คำนวณแรงดันเอาต์พุต

$$V_o = \frac{D}{1-D} \frac{N_2}{N_1} V_s \quad (3.21)$$

ค่าคิวตี้ไซเคิล 0.5

$$= \frac{0.5}{1-0.5} \frac{10}{15} 40$$

$$= 26.66 \text{ V}$$

คำนวณค่าตัวเก็บประจุ C กำหนดแรงดันคลื่นกระเพื่อมที่ 50 mV

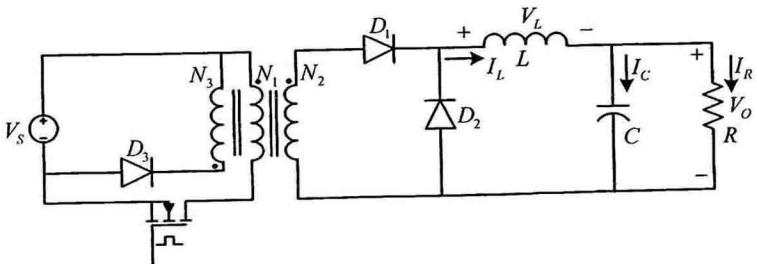
$$C = \frac{I_{O \times t_{on(\max)}}}{V_{\text{ripple}}} \quad (3.22)$$

$$= \frac{2 \times 20 \times 10^{-6}}{500 \times 10^{-3}}$$

$$= 80 \mu\text{F}$$

ตัวเก็บประจุมีค่าไม่ต่ำกว่า $80 \mu\text{F}$

3.6 วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด



ภาพที่ 3.8 วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด

การออกแบบวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด และการคำนวณต่าง ๆ เพื่อให้ได้วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด ที่ทำงานในช่วงความถี่เท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และใช้หม้อแปลงตัวเดียวกับวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

แรงดันอินพุต 40 V

แรงดันเอาต์พุต 20 V

ค่าตัวชี้เซลล์ 0.4

ค่าเวลาการทำงาน

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{f} \\ &= \frac{1}{20 \times 10^3} \\ &= 50 \mu s \end{aligned} \quad (3.23)$$

กำหนดจำนวนรอบขดลวด N_1 ให้มีค่าเท่ากับจำนวนรอบขดลวดแมกนีไทซ์ N_3

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } V_{CE(\max)} &= 2V_{S(\max)} \\ &= 2 \times 40 \\ &= 80 V \end{aligned} \quad (3.24)$$

กำหนดอัตราส่วนจำนวนรอบ $\frac{N_1}{N_2}$ เท่ากับ 1.5

เลือก N_1 เท่ากับ 15 รอบ

เลือก N_2 เท่ากับ 10 รอบ

เลือก N_3 เท่ากับ 15 รอบ

คำนวณแรงดันเอาต์พุต

$$V_o = D \frac{N_2}{N_1} V_s \quad (3.25)$$

ค่าตัวชี้เซลล์ 0.4

$$\begin{aligned} &= 0.4 \frac{10}{15} 40 \\ &= 10.65 V \end{aligned}$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่น้อยที่สุด

$$\begin{aligned} L_{\min} &= \frac{(V_o + V_D)}{V_{\text{ripple}}} [T - t_{ON \max} \frac{V_{in(\min)}}{V_{in(\max)}}] \\ &= (20 + 1) \times \frac{50 \times 10^{-3}}{200 \times 10^{-3}} [50 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6} \frac{40}{40}] \\ &= 157 \mu H \end{aligned} \quad (3.26)$$

L มีค่าความเหนี่ยวนำไม่ต่ำกว่า $157 \mu H$

ตัวเก็บประจุเอาต์พุต C จะขึ้นอยู่กับค่า ESR และแรงดันกระเพื่อมที่ต้องการโดยอาจเลือกค่า C ให้มีค่ามากๆ ไว้ก่อน เพื่อลดค่า ESR ในที่นี้เลือกเท่ากับ $6,800 \mu F$

3.7 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้วยวิธีผลคูณพื้นที่

3.7.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัค บูส และบัค-บูส

กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ $800 \mu H$ เมื่อได้ค่าของตัวเหนี่ยวนำแล้วจะหาขนาดของแกนที่ใช้โดยเลือกชนิดของแกนเป็นแกนเฟอร์ไรต์ เพราะมีค่าสูญเสียต่ำเมื่อทำงานที่ความถี่สูง การคำนวณขนาดใช้วิธีการคำนวณแบบ A_p (Area Approach) วิธีนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้ค่า T_{rise} ซึ่งอยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ ($J = 100 - 1000 A/cm^2$) โดยคำนวณหาขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ดังนี้

3.7.1.1 ขั้นตอนที่ 1 จากขีดจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหาค่า A_p ในการกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ $J = 4 A/mm^2$ $k = 0.45$ กระแสอินพุต (I_{rms}) = $3.53 A$ กระแสอินพุตสูงสุด (I_{peak}) = $5 A$ และ $B = 0.25$

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{LI_{peak}I_{rms}}{BJk} \\ &= \frac{800 \times 10^{-6} \times 5 \times 3.53}{0.25 \times 4 \times 10^6 \times 0.45} \\ &= 31.377 \times 10^{-9} \\ &= 31377 mm^3 \end{aligned} \quad (3.27)$$

3.7.1.2 ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่า A_p มากกว่าที่ได้คำนวณมาจากขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากถ้าเลือก A_p น้อยกว่าที่คำนวณได้อาจจะทำให้ไม่ได้ค่าต่างๆ ตามต้องการ โดยจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ ETD59 ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

$$A_p = 51500 mm^3, A_w = 366 mm^2, S = 368 mm^2$$

3.7.1.3 ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำได้ ดังนี้ กำหนดให้ $L = 800 \mu H$, $I_{peak} = 5 A$, $B = 0.25$ และ $S = 368 mm^2$ แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{LI_{peak}}{BS} \\
 &= \frac{800 \times 10^{-6} \times 5}{0.25 \times 368 \times 10^{-6}} \\
 &= 44 \text{ รอบ}
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

3.7.1.4 ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ A_w

$$\begin{aligned}
 A_w &= \frac{I_{rms}}{J} \\
 &= \frac{3.53 A}{4 \times 10^6 A / m^2} \\
 &= 0.88 mm^2
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

3.7.1.5 ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณจากขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \\
 &= \sqrt{\frac{4 \times 0.88 mm^2}{\pi}} \\
 &= 1.058 mm
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

เลือกขดลวดเบอร์ 26 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.457 mm$ นำมาคิดเทียบจำนวน 6 เส้น มากกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ถ้าค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้กระแสจะไหลได้ไม่ถึงที่ต้องการ

3.7.1.6 ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้งานจริงว่าสามารถนำไปใช้กับแกนเฟอไรท์ได้หรือไม่

$$\begin{aligned}
 A_w &= \frac{\pi d^2}{4} \\
 &= \frac{\pi (1.058)^2}{4}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.88 mm^2 \\
 W &= \frac{N \times A_w}{k}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{44 \times 0.88^2}{0.45} \\
 &= 86.84 \text{ mm}^2 \\
 W \text{ ที่ใช้ได้ต้องมีค่า } &\leq 366 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

3.7.1.7 ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาความกว้างของ Air Gap (A_g)

$$\begin{aligned}
 A_g &= \frac{\mu_o N^2 S}{2L} \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (44)^2 \times 368 \times 10^{-6}}{2 \times 800 \times 10^{-6}} \\
 &= 0.55 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

3.7.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด

กำหนดค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ $400 \mu H$

3.7.2.1 ขั้นตอนที่ 1 จากขีดจำกัดและข้อกำหนดในการคำนวณหา A_p ในการกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ $J = 4 A / \text{mm}^2$ $k = 0.45$ กระแสอินพุต (I_{rms}) = $3.53 A$ กระแสอินพุตสูงสุด (I_{peak}) = $5 A$ และ $B = 0.25$

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ (3.27)} \quad A_p &= \frac{LI_{peak} I_{rms}}{BJk} \\
 \text{แทนค่าในสมการ} \quad &= \frac{400 \times 10^{-6} \times 5 \times 3.53}{0.25 \times 4 \times 10^6 \times 0.45} \\
 &= 15.688 \times 10^{-9} \\
 &= 15688 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

3.7.1.2 ขั้นตอนที่ 2 เลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ที่มีค่า A_p มากกว่าที่ได้คำนวณมาจากขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากถ้าเลือก A_p น้อยกว่าที่คำนวณได้อาจจะทำให้ไม่ได้อายุการใช้งานที่ต้องการ โดยจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ ETD44 ซึ่งมีค่าต่างๆ ดังนี้

$$A_p = 36849 \text{ mm}^3, A_w = 173 \text{ mm}^2, S = 213 \text{ mm}^2$$

3.7.1.3 ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำได้ ดังนี้
กำหนดให้ $L = 400 \mu H$, $I_{peak} = 5 A$, $B = 0.25$ และ $S = 213 \text{ mm}^2$ แทนค่าเพื่อหาจำนวนรอบของขดลวดตัวเหนี่ยวนำจะได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ (3.28)} \quad N &= \frac{LI_{peak}}{BS} \\
 \text{แทนค่าในสมการ} &= \frac{400 \times 10^{-6} \times 5}{0.25 \times 213 \times 10^{-6}} \\
 &= 38 \text{ รอบ}
 \end{aligned}$$

3.7.1.4 ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำ A_w

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ (3.29)} \quad A_w &= \frac{I_{rms}}{J} \\
 \text{แทนค่าในสมการ} &= \frac{3.53 A}{4 \times 10^6 A / m^2} \\
 &= 0.88 mm^2
 \end{aligned}$$

3.7.1.5 ขั้นตอนที่ 5 เลือกเบอร์ลวดทองแดงให้มี A_w ใหญ่กว่า A_w ที่ได้จากการคำนวณจากขั้นตอนที่ 4 โดยคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ (3.30)} \quad d &= \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \\
 \text{แทนค่าในสมการ} &= \sqrt{\frac{4 \times 0.88 mm^2}{\pi}} \\
 &= 1.058 mm
 \end{aligned}$$

เลือกขดลวดเบอร์ 26 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.457 mm$ นำมาตีเกลียวจำนวน 6 เส้น มากกว่าที่คำนวณได้ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางมีผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ถ้าค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้กระแสจะไหลได้ไม่ถึงที่ต้องการ

3.7.1.6 ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่ใช้งานจริงว่าสามารถนำไปใช้กับแกนเฟอร์ไรต์ได้หรือไม่

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ (3.31)} \quad A_w &= \frac{\pi d^2}{4} \\
 \text{แทนค่าในสมการ} &= \frac{\pi (1.058)^2}{4} \\
 &= 0.88 mm^2 \\
 \text{จากสมการที่ (3.32)} \quad W &= \frac{N \times A_w}{k}
 \end{aligned}$$

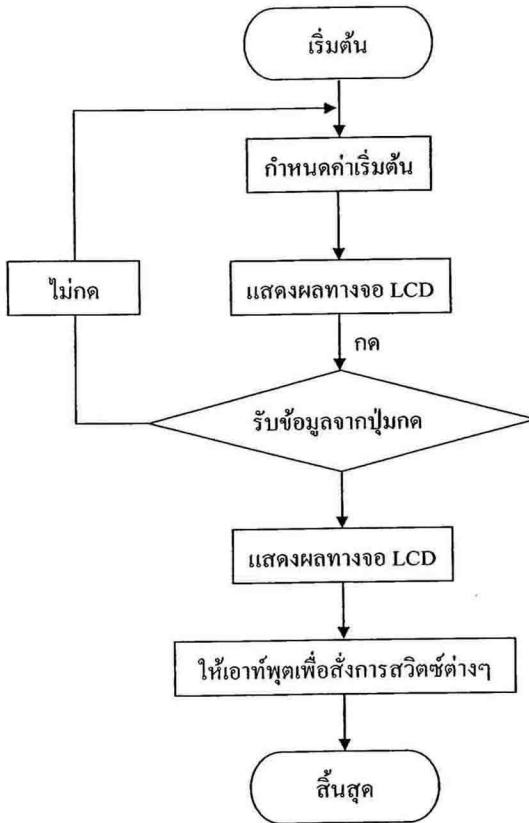
$$\begin{aligned}\text{แทนค่าในสมการ} &= \frac{38 \times 0.88^2}{0.45} \\ &= 65.39 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

W ที่ใช้ได้ต้องมีค่า $\leq 173 \text{ mm}^2$

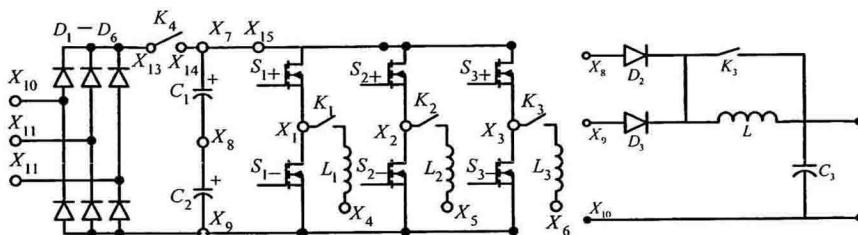
3.7.1.7 ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าความกว้างของ Air Gap (A_g)

$$\begin{aligned}\text{จากสมการที่ (3.33)} \quad A_g &= \frac{\mu_o N^2 S}{2L} \\ \text{แทนค่าในสมการ} &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (38)^2 \times 173 \times 10^{-6}}{2 \times 400 \times 10^{-6}} \\ &= 0.40 \text{ mm}\end{aligned}$$

3.8 การสั่งรีเลย์เพื่อควบคุมวงจรกำลังด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

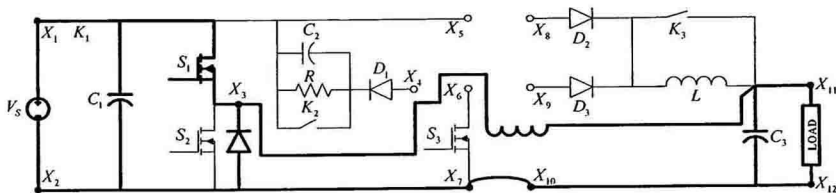


ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877



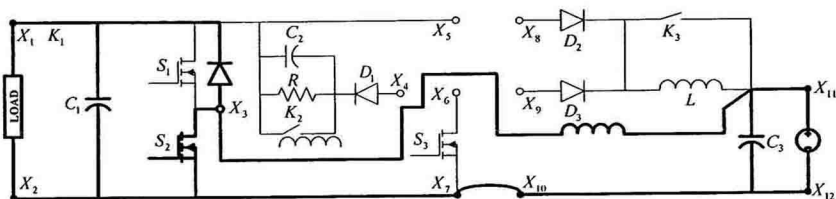
ภาพที่ 3.11 วงจรกำลังหลักและรีเลย์

3.8.1 วงจรแปลงผันแบบบัก เมื่อออก สวิตช์ Buck ชุดควบคุม PIC 16F877 ได้ทำการสั่ง วงจรขับนำเกตตัวที่ 1 ทำงาน และ รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน



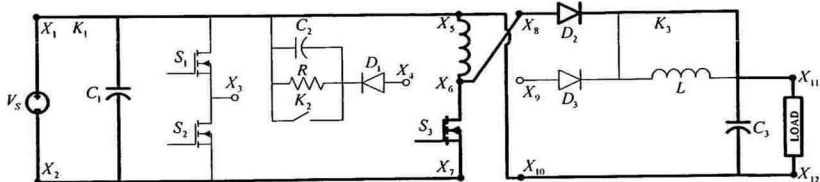
ภาพที่ 3.12 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบบัก

3.8.2 วงจรแปลงผันแบบบูส เมื่อออก สวิตช์ Boost ชุดควบคุม PIC 16F877 ได้ทำการสั่ง วงจรขับนำเกตตัวที่ 2 ทำงาน และ รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน



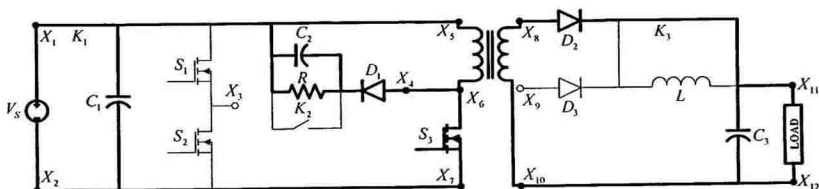
ภาพที่ 3.13 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบบูส

3.8.3 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส เมื่อกด สวิตช์ Buck-Boost ชุดควบคุม PIC 16F877 ได้ทำการส่งวงจรขั้วนำเกิดตัวที่ 3 ทำงาน รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน และรีเลย์ตัวที่ 3 ทำงาน



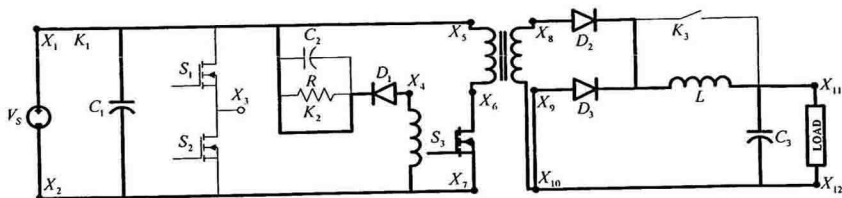
ภาพที่ 3.14 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

3.8.4 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค เมื่อกด สวิตช์ Flyback ชุดควบคุม PIC 16F877 ได้ทำการส่งวงจรขั้วนำเกิดตัวที่ 3 ทำงาน รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน และรีเลย์ตัวที่ 3 ทำงาน



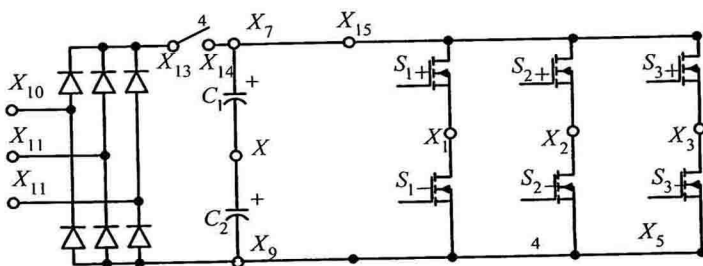
ภาพที่ 3.15 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

3.8.5 วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด เมื่อเกิด สวิตช์ Forward ชุดควบคุม PIC 16F877 ได้ทำการสั่งวงจรขับนำเกตตัวที่ 3 ทำงาน รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน และรีเลย์ตัวที่ 2 ทำงาน



ภาพที่ 3.16 วงจรกำลังเพื่อวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด

3.8.6 หยุดการทำงาน เมื่อเกิด สวิตช์ Reset ชุดควบคุม PIC 16F877 ได้ทำการสั่งหยุดการทำงานของรีเลย์ และวงจรขับนำเกต



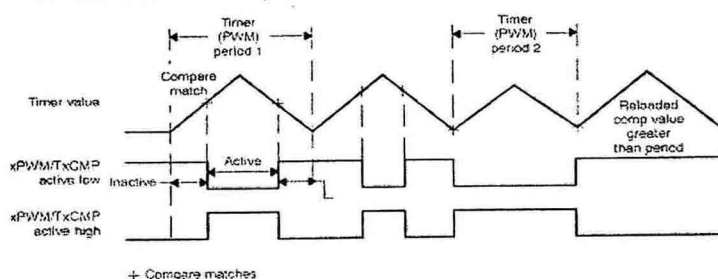
ภาพที่ 3.17 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์สามเฟส

ในส่วนนี้จะแสดงการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์จะใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อจำลองการทำงานของการทำงานวิธีการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เบอร์ TMS 320F2812 และการใช้งานร่วมกันของโปรแกรม Matlab/Simulink กับ Code Composer Studio 3.1

3.9 โปรแกรมควบคุม

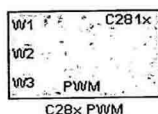
3.9.1 บล็อก C28x PWM

เป็นส่วนของการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 12 สัญญาณ โดยนำคาบเวลาที่ได้จากโปรแกรมในส่วนของการคำนวณคาบเวลา มากำหนดเวลาในการสับสวิชของอุปกรณ์สวิตซ์แต่ละตัว โดยจะนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มทั้ง 12 สัญญาณ เมื่อพิจารณาภายในโครงสร้าง Event Manager ของ DSP จะเห็นว่ามีส่วนที่ช่วยในการสร้างสัญญาณ PWM แบบสมมาตรที่เรียกว่า Symmetric Waveform Generation โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบกับตัวนับภายใน ถ้าค่าตัวนับมีค่ามากกว่าตัวเปรียบเทียบจะทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนสถานะไป ดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

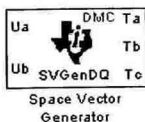
การทำงานในโหมด Symmetric Waveform Generation มีการเปรียบเทียบค่าทั้งในช่วงขอบขาขึ้นและขอบขาลงของโหนดการแบบขึ้นลงต่อเนื่องใน Timer ดังนั้นในหนึ่งคาบของ Timer เอาต์พุตจึงเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 2 ครั้ง ดังนั้นจึงสามารถกำหนดความกว้างของสัญญาณ PWM ได้ตามต้องการโดยกำหนดได้ที่หน่วยความจำเปรียบเทียบ ค่าที่นำมาเปรียบเทียบกับมาจาก รีจิสเตอร์ CMPRX ซึ่งมีทั้งหมด 3 ชุด ในแต่ละชุดมีการควบคุมเอาต์พุตชุดละ 2 ช่อง โดยในแต่ละชุดจะมีส่วนสร้างตัวประวิงเวลา(Dead Time) เพื่อป้องกันสวิตซ์ดับบนกับตัวล่างทำงานพร้อมกัน สำหรับโครงงานนี้ต้องใช้เอาต์พุตทั้งหมด 6 ช่อง (PWM1-PWM6) ดังนั้นจึงต้องใช้รีจิสเตอร์ CMPRX เพียงแค่ 1 ชุด คือ EVA



ภาพที่ 3.19 บล็อก C28x PWM

3.9.2 บล็อก Space Vector Generator

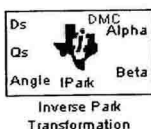
เป็นส่วนของการคำนวณคาบเวลาเพื่อให้ได้รูปคลื่นสามเฟสโดยอาศัยหลักการของสเปซเวกเตอร์เทคนิค โดยนำค่าความถี่จากโปรแกรมในส่วนของการควบคุมสัญญาณแรมพ์ และค่าแรงดันในส่วนของการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ มาใช้ในการคำนวณหาความถี่ในการหมุนของสเปซเวกเตอร์หลังจากนั้นทำการคำนวณหาคาบเวลาในแต่ละโซน หาเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันพร้อมทั้งกำหนดคาบเวลาในการสับสวิตซ์ของอุปกรณ์สวิตซ์แต่ละตัว



ภาพที่ 3.20 บล็อก Space Vector Generator

3.9.3 บล็อก Inverse Park Transformation

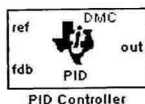
จะทำการแปลงแกนหมุนอ้างอิงกลับไปเป็นแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง ซึ่งจะรับอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้า V_d , V_q และ มุมที่ใช้ในการแปลงแกน ซึ่งมีเอาต์พุตเป็น แรงดัน V_α และ V_β ซึ่งอยู่ในแกนอ้างอิงหยุดนิ่ง



ภาพที่ 3.21 บล็อก Inverse Park Transformation

3.9.4 บล็อก PID Control

บล็อกนี้จะเป็นตัวควบคุมสัญญาณป้อนกลับให้มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด ซึ่งสัญญาณที่ค่าอ้างอิงรับเข้ามานั้นจะเป็นค่าคงที่

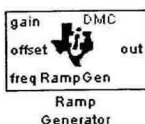


ภาพที่ 3.22 บล็อก PID Control

3.9.5 บล็อก Ramp Generator

การควบคุมสัญญาณแรมพ์ โปรแกรมในส่วนนี้จะถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้ได้ค่าความเร็วที่ต้องการและหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบทันทีทันใด โดยจะกำหนดค่าความเร็วที่

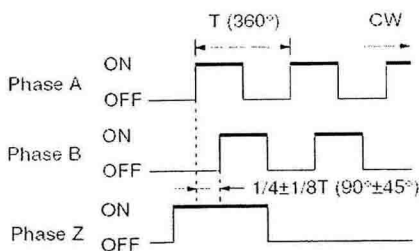
ต้องการให้เป็นอินพุท โปรแกรมจะค่อยๆทำการเปลี่ยนความเร็วไปเป็นความเร็วที่กำหนด โดยการ ทำงานจะมี ค่า Ramp Delay ไว้เพื่อช่วยให้การเปลี่ยนแปลงความเร็วค่อยๆ เกิดขึ้นอย่างช้าๆเอาต์พุท ที่ได้จากโปรแกรมจะเป็นค่าความถี่ซึ่งจะเป็นอินพุทให้กับโปรแกรมในส่วนการควบคุมแบบ แรงดันต่อความถี่ ภาพกำหนดมีค่าน้อยกว่าความเร็วขณะทำงาน



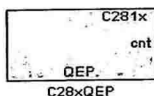
ภาพที่ 3.23 บล็อก Ramp Generator

3.9.6 บล็อก QEP

สัญญาณที่ได้จากเอ็น โค้ดเดอร์จะเป็นพัลส์ที่มีมุมต่างเฟสกัน 90 องศาหรือหนึ่งในสี่ส่วนของ คาบเวลาโดยจะมี Index Puls เกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อหมุนครบหนึ่งรอบ ความถี่การเกิดพัลส์นั้นจะขึ้นอยู่กับ การหมุนของแกน โรเตอร์ดังภาพที่ 3.24



รูปที่ 3.24 สัญญาณที่ได้จากเอ็น โค้ดเดอร์

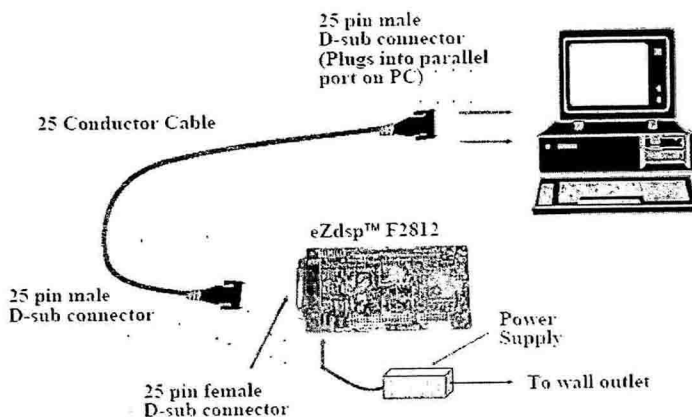


รูปที่ 3.25 บล็อก QEP

3.10 การใช้งานโปรแกรม Code Composer Studio 3.1

บริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์ได้พัฒนาเครื่องมือต่างๆที่สามารถใช้งานได้และมีความรวดเร็วในการติดต่อผ่านตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งเป็นพื้นฐานในกระบวนการสร้างการแก้ปัญหาการวิเคราะห์การทดสอบต่างๆ ซึ่งโปรแกรม Code Composer Studio 3.1 เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อระหว่างตัวประมวลผลและโปรแกรมควบคุม โดยมีวิธีในการใช้งานดังนี้

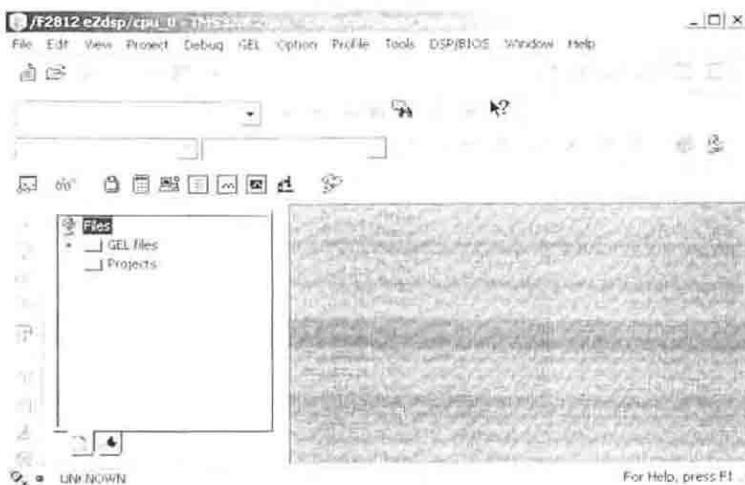
3.10.1 ทำการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล



Code Composer Studio – eZdsp™ F2812 Configuration

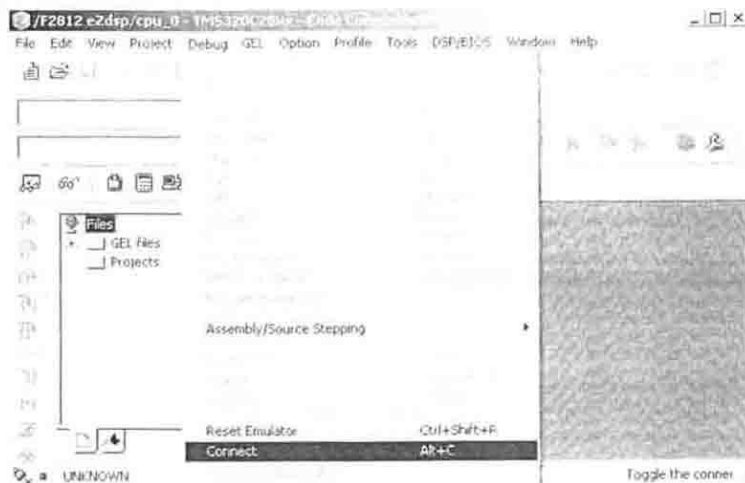
ภาพที่ 3.26 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

3.10.2 เมื่อเปิด โปรแกรม Code Composer Studio 3.1 ขึ้นมา โปรแกรมจะเป็นดังภาพที่ 3.27



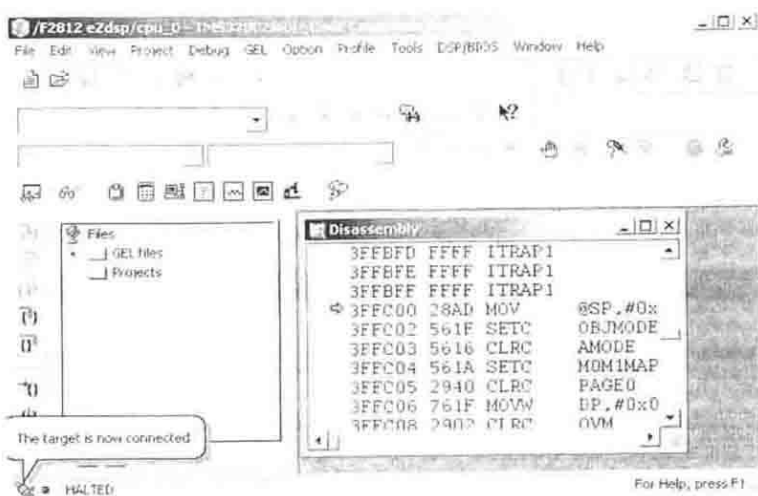
ภาพที่ 3.27 หน้าต่างโปรแกรม Code Composer Studio 3.1

3.10.3 เข้าไปที่ Debug / Connect ดังภาพที่ 3.28



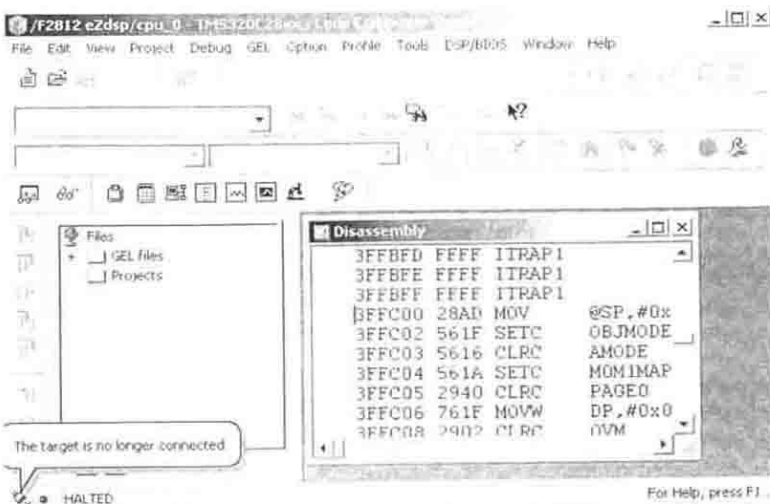
ภาพที่ 3.28 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Code Composer Studio 3.1 กับบอร์ด DSP

3.10.4 ส่วนของโปรแกรมเมื่อทำการเชื่อมต่อ



ภาพที่ 3.29 โปรแกรม Code Composer Studio 3.1 เมื่อเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว

3.10.5 เมื่อหยุดการใช้งานให้เข้าไปที่ Debug / Disconnect



ภาพที่ 3.30 โปรแกรม Code Composer Studio 3.1 เมื่อหยุดเชื่อมต่อ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

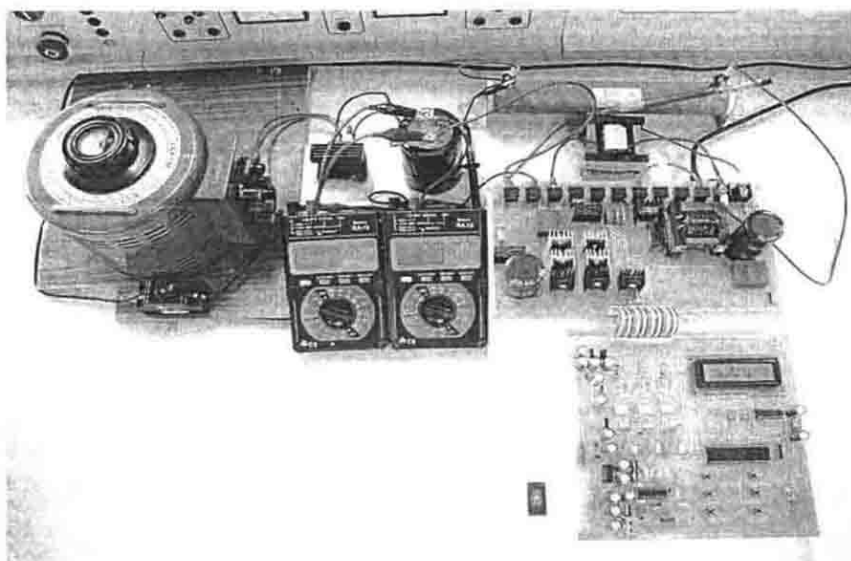
หลังจากที่ได้ศึกษาหลักการทำงานและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ ทั้งหมดเพื่อนำมาประกอบเป็นวงจรทดลอง ซึ่งการออกแบบชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นชุดทดลองที่สามารถใช้อุปกรณ์ร่วมกันได้ซึ่งวงจรทั้งหมดประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบัค วงจรแปลงผันแบบบูส วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส เมื่อประกอบเป็นชุดทดลองเสร็จแล้วทำการต่อวงจรวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ ของแต่ละวงจรเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและปรับปรุงแก้ไข

ผลของการสร้างชุดทดลองนี้มาสามารถให้ประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาหลักการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังตลอดจนผู้ที่สนใจศึกษาจะได้ใช้ชุดทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยลดเวลาเรื่องการจัดหาอุปกรณ์การทดลองและเวลาในการต่อวงจรเพื่อให้เป็นผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์การสอนอย่างครบถ้วน

จากการออกแบบชุดฝึกอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบด้วยชุดภาคควบคุมแบบแอนะล็อก ในส่วนของภาคควบคุมประกอบด้วย วงจรสร้างสัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก รับสัญญาณพัลส์จาก eZdsp วงจรสร้างสัญญาณขั้วนำเกต และวงจรควบคุมรีเลย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC 16F877 จะควบคุมการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งจะแสดงผลด้วยหน้าจอดีจิดอลมีไม่กด สวิตช์ควบคุมทั้ง 6 วงจร ชุดภาคกำลังที่ประกอบด้วยไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ คาปาซิเตอร์ หม้อแปลง ความถี่สูง มอสเฟตกำลัง และรีเลย์

4.1 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก

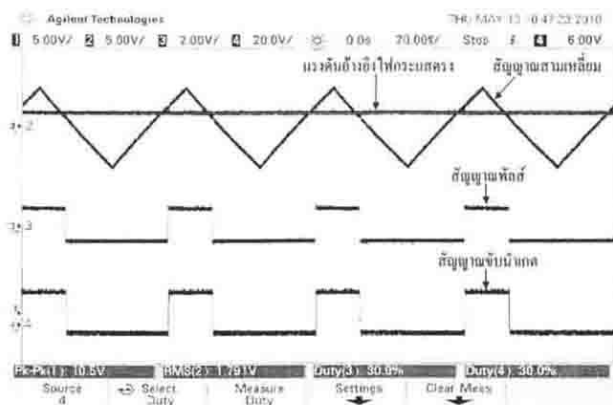
Control of PWM Duty Cycle



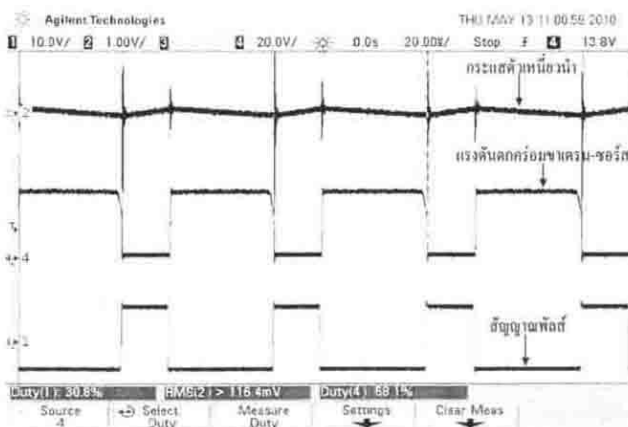
ภาพที่ 4.1 การต่อทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก

จากการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) $800 \mu H$ โหลดความต้านทาน (R) 50Ω แรงดันอินพุต (V_s) 10, 20, และ $30 V$ ความถี่ (f_s) $20 kHz$ ปรับค่าตัวดีไอเทิล (D) ตั้งแต่ 0.1-0.9

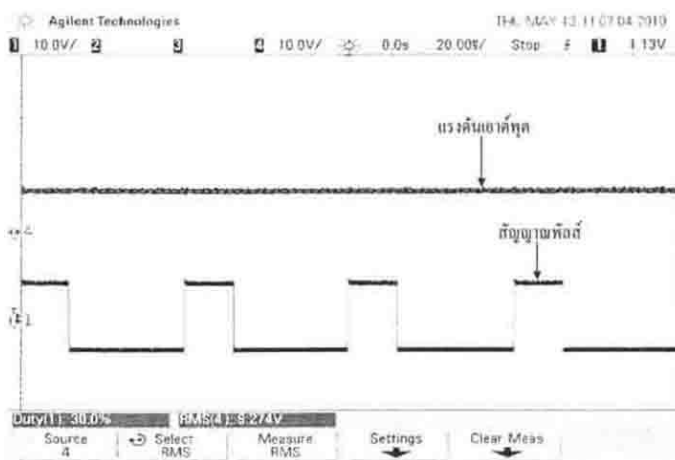
4.1.1 กรณีค่าตัวต้านโหลด 0.3 แอมป์อินพุต 30 V



ภาพที่ 4.2 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri}) สัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก (PWM) สัญญาณขับน้ำเกลือ

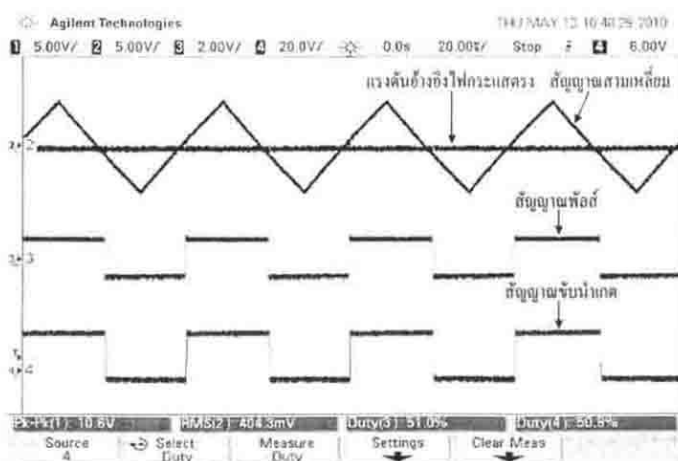


ภาพที่ 4.3 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)

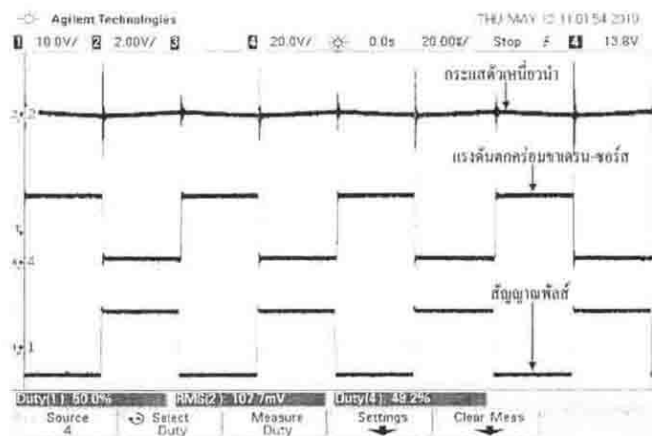


ภาพที่ 4.4 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

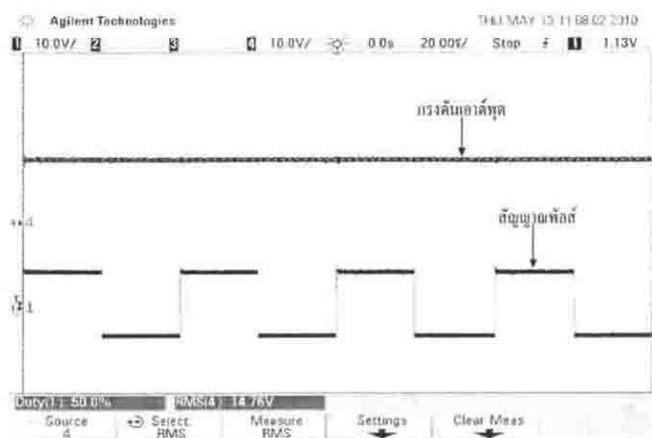
4.1.2 กรณีค่าตัวชี้ไขเกล็ด 0.5 แรงดันอินพุต 30 V



ภาพที่ 4.5 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in}) สัญญาณพัลส์แอนะล็อก (PWM) สัญญาณขับโมกาด

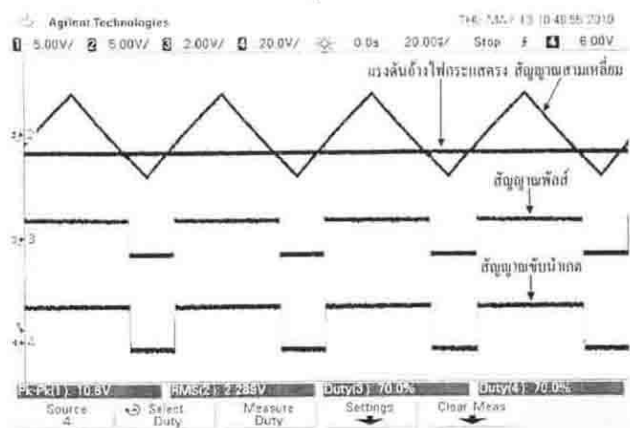


ภาพที่ 4.6 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันคกคร่อมขาเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)

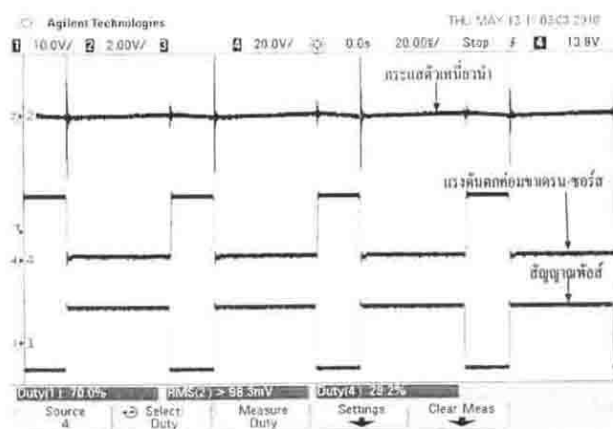


ภาพที่ 4.7 แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)

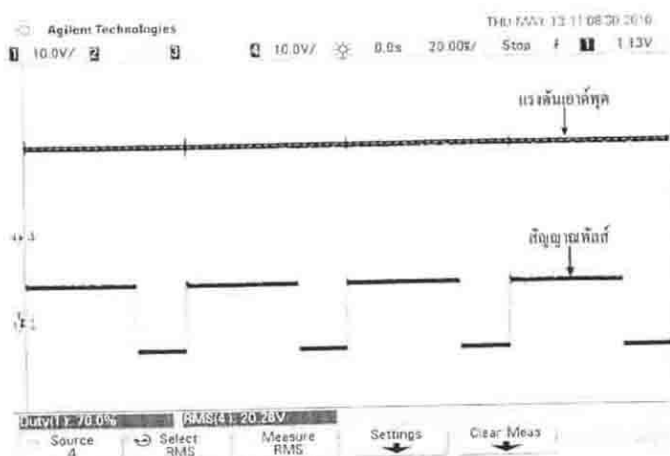
4.1.3 กรณีค่าตัวชี้ไขเคล 0.7 แรงแฉฉนพุต 30 V



ภาพที่ 4.8 แรงแฉฉอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in}) สัญญาณพัลส์แอนาลอก (PWM) สัญญาณขั้วนำเกด



ภาพที่ 4.9 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงแฉฉคกคร่อมขาเครน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)



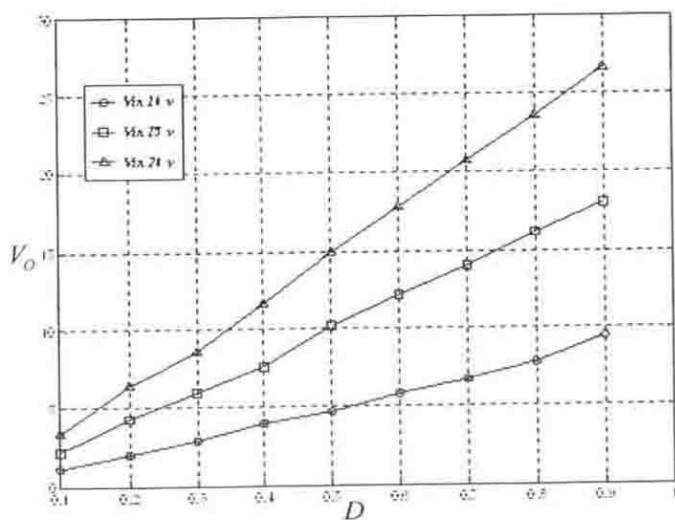
ภาพที่ 4.10 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

4.1.4 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก

ค่าตัวดี (D)	แรงดันอินพุต (V_s)	แรงดันเอาต์พุต (V_o)	
		ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการคำนวณ
0.1	10	1.10	1.00
	20	2.21	2.00
	30	3.35	3.00
0.2	10	2.00	2.00
	20	4.28	4.00
	30	6.42	6.00
0.3	10	2.90	3.00
	20	5.97	6.00
	30	8.59	9.00
0.4	10	3.97	4.00
	20	7.63	8.00
	30	11.68	12.00
0.5	10	4.70	5.00
	20	10.21	10.00

	30	14.93	15.00
0.6	10	5.85	6.00
	20	12.13	12.00
	30	17.79	18.00
0.7	10	6.74	7.00
	20	14.01	14.00
	30	20.71	21.00
0.8	10	7.85	8.00
	20	16.10	16.00
	30	23.57	24.00
0.9	10	9.45	9.00
	20	18.06	18.00
	30	26.66	27.00

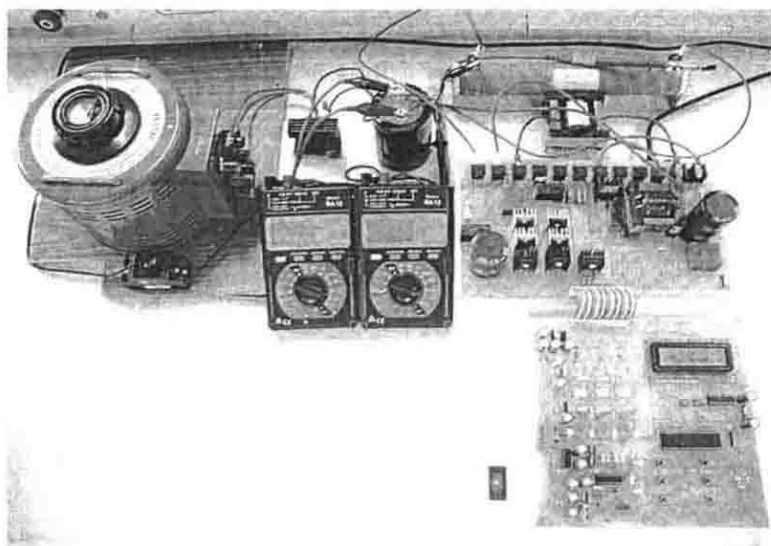


ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบบัก

4.1.5 สรุปผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัก

การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัก จากการทดลองพบว่าแรงดันเอาต์พุตจะต่ำกว่าแรงดันอินพุต เมื่อทำการเปลี่ยนค่า D ให้มีค่าต่างๆ แรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามค่า D เมื่อทำการปรับค่า D ให้มีค่าต่ำจะทำให้แรงดันเอาต์พุตลดลงมากกว่าค่า D ที่สูงกว่าตามอัตราส่วน แต่จะมีค่าไม่เกินแรงดันอินพุต การนำวงจรไปใช้งานควรออกแบบให้วงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง เพราะการกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตจะทำได้ง่ายกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

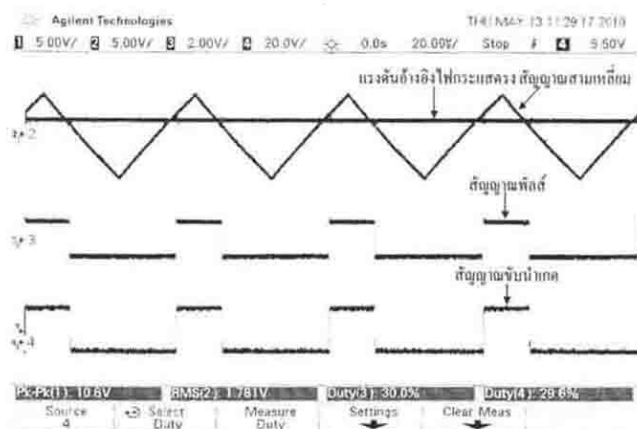
4.2 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัส



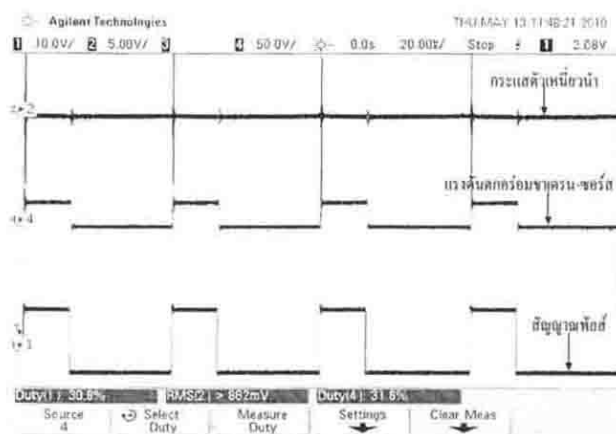
ภาพที่ 4.12 การต่อวงจรทดลองวงจรแปลงผันแบบบัส

จากการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัส โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) $800 \mu H$ โหลดความต้านทาน (R) 50Ω แรงดันอินพุต (V_S) 10, 15, และ $20V$ ความถี่ (f_S) $20 kHz$ ปรับค่าตัวดีไซเกิล (D) ตั้งแต่ 0.1-0.7

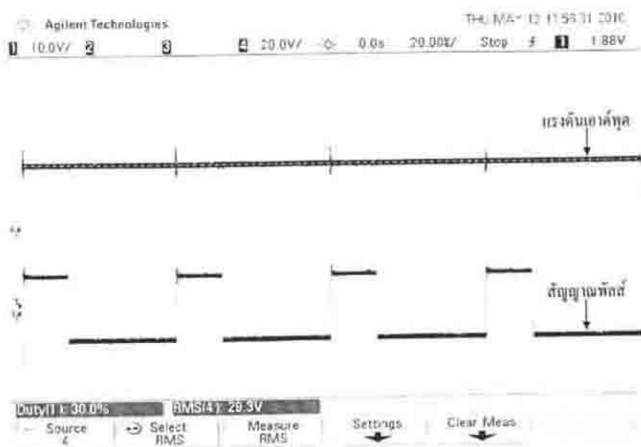
4.2.1 กรณีค่าตัวชี้ไขเกล็ด 0.3 แรงดันอินพุต 20 V



ภาพที่ 4.13 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in}) สัญญาณพัลส์แอนะล็อก (PWM) สัญญาณขั้วนำเกิด

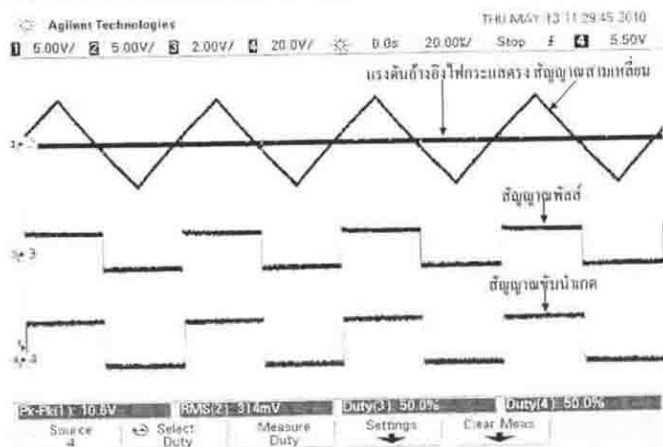


ภาพที่ 4.14 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (I_L) แรงดันตกคร่อมขาแตรน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)

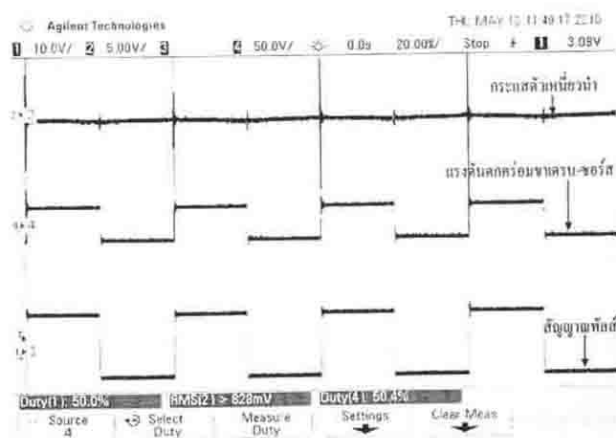


ภาพที่ 4.15 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

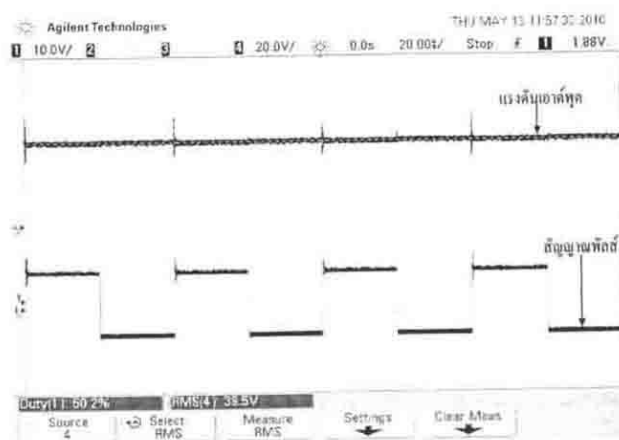
4.2.2 กรณีค่าตัวใช้เกิด 0.5 แรงดันอินพุต 20V



ภาพที่ 4.16 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in}) สัญญาณพัลส์ (PWM) สัญญาณขั้วนำเกิด

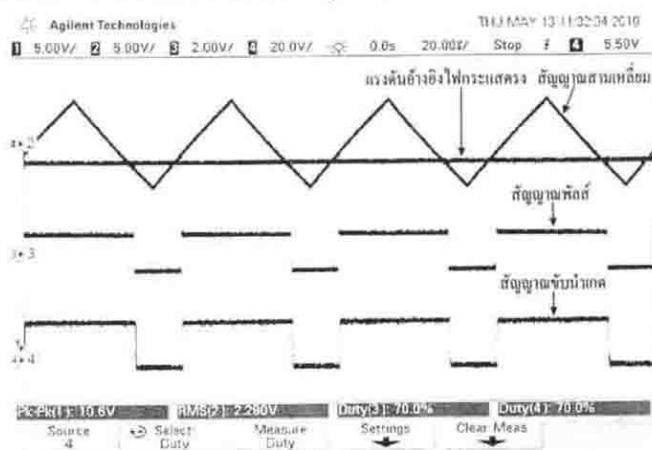


ภาพที่ 4.17 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมชาเลนเจอร์ (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)

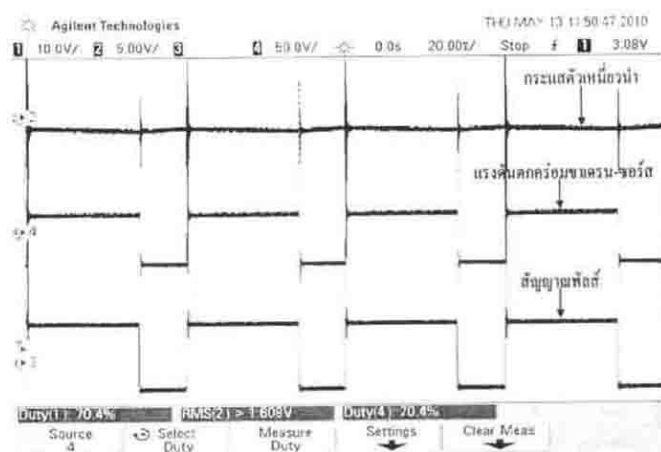


ภาพที่ 4.18 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

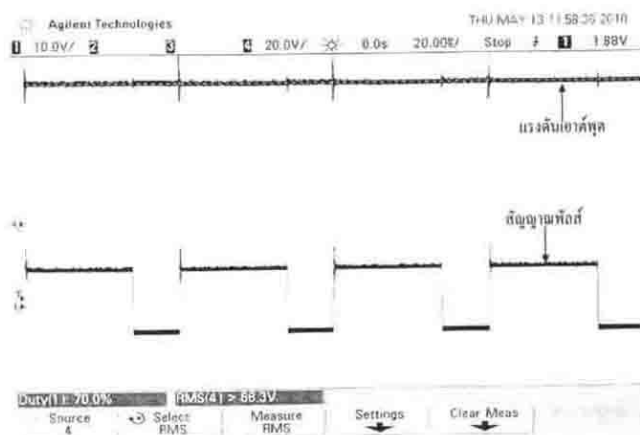
4.2.3 กรณีค่าตัวใช้เกิล 0.7 แรงดันอินพุต 20 V



ภาพที่ 4.19 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสดรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{ref}) สัญญาณพัลส์แอนาโลก (PWM) สัญญาณขั้วนำเกต



ภาพที่ 4.20 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขดลวด-ขอรืต (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)



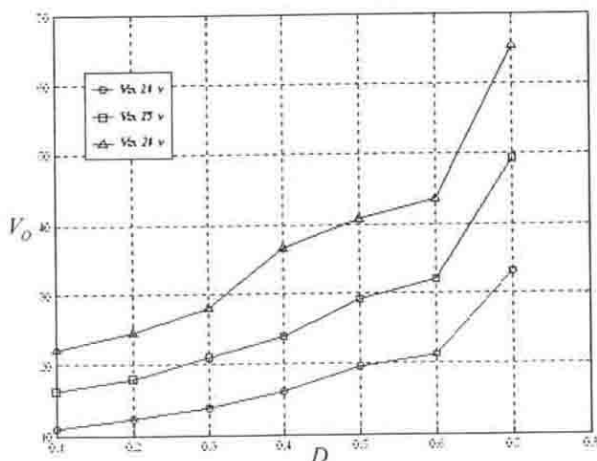
ภาพที่ 4.21 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

4.2.4 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบูส

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบูส

ค่าตัวดี (D)	แรงดันอินพุต (V_S)	แรงดันเอาต์พุต (V_o)	
		ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการคำนวณ
0.1	10	11.00	11.10
	15	16.26	16.65
	20	22.20	22.20
0.2	10	12.32	12.50
	15	17.92	18.75
	20	24.56	25.00
0.3	10	13.89	14.720
	15	20.99	21.30
	20	28.01	28.40
0.4	10	16.22	16.60
	15	24.04	24.90
	20	36.60	33.20
0.5	10	19.59	20.00
	15	29.26	30.00

	20	40.70	40.00
0.6	10	21.27	21.70
	15	32.02	32.55
	20	43.50	43.40
0.7	10	33.21	33.30
	15	49.30	49.95
	20	65.40	66.66

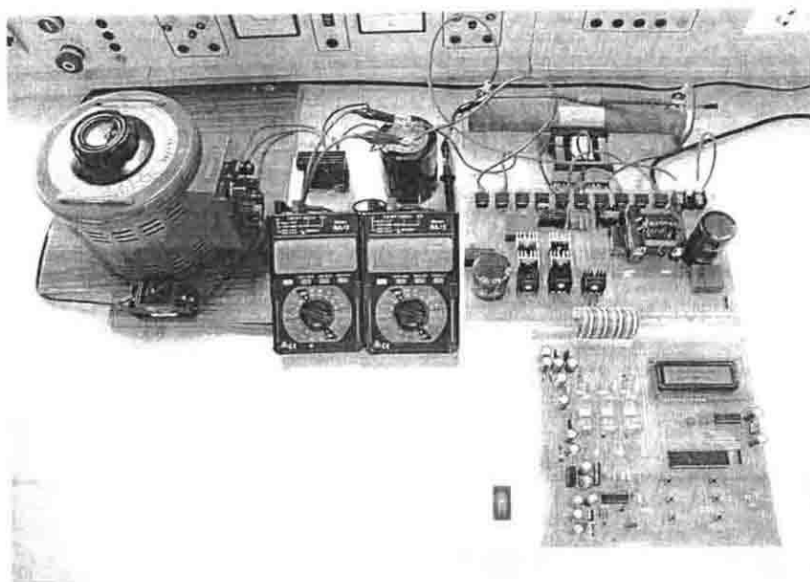


ภาพที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงคั่นแบบบูส

4.2.5 สรุปผลการทดลองวงจรแปลงคั่นแบบบูส

การทำงานของวงจรแปลงคั่นแบบบูส จากการทดลองพบว่าแรงดันเอาต์พุตจะสูงกว่าแรงดันอินพุต เมื่อทำการเปลี่ยนค่า D ให้มีค่าต่างๆ แรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงตามค่า D เมื่อทำการปรับค่า D ให้มีค่าต่ำจะทำให้แรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าค่า D ที่สูงกว่าความอัตราส่วน ขนาดแรงดันเอาต์พุตจึงเพิ่มขึ้นตามค่า D การนำวงจรไปใช้งานควรออกแบบให้วงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง เพราะการกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตจะทำได้ง่ายกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

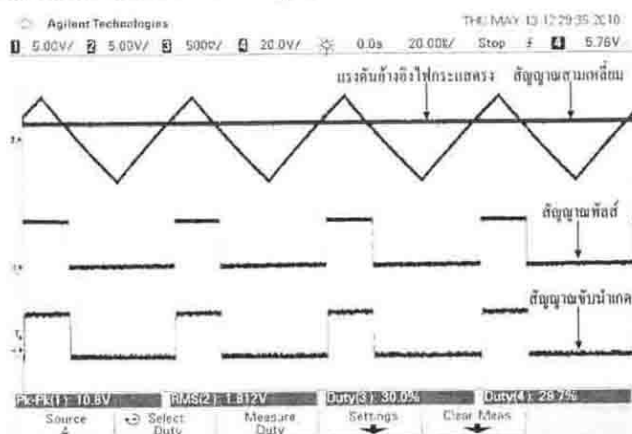
4.3 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส



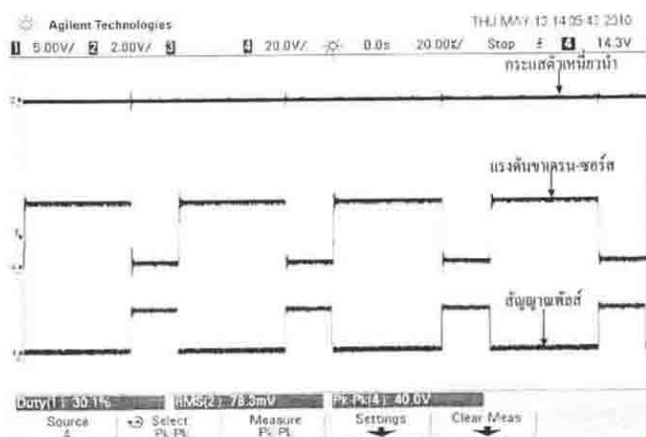
ภาพที่ 4.23 การทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

จากการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) $800\ \mu H$ โหลดความต้านทาน (R) $50\ \Omega$ แรงดันอินพุต (V_s) 10, 15, และ $20\ V$ ความถี่ (f_s) $20\ kHz$ ปรับค่าตัวโวลเทจ (D) ตั้งแต่ 0.1-0.7

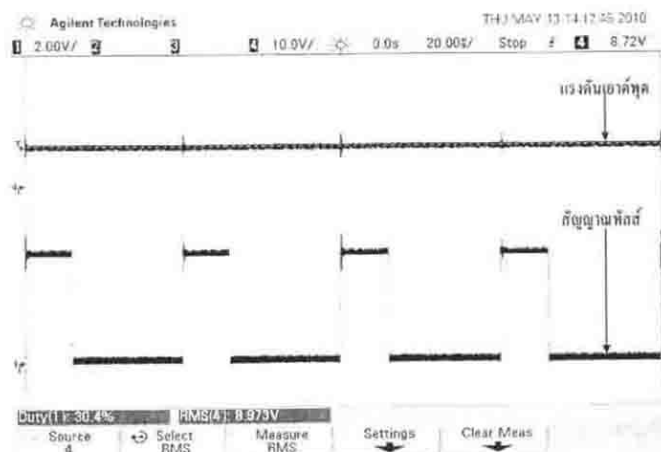
4.3.1 กรณีค่าตัวใช้เกิล 0.3 แร่งดันอินพุต 20 V



ภาพที่ 4.24 แร่งดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{rs}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tr})
สัญญาณพัลส์แอนะล็อก (PWM) สัญญาณขับน้ำเกลือ

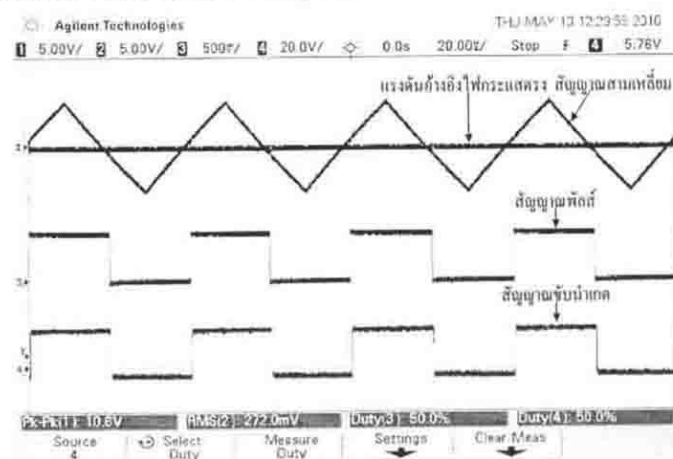


ภาพที่ 4.25 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แร่งดันตกคร่อมขาทราน-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)



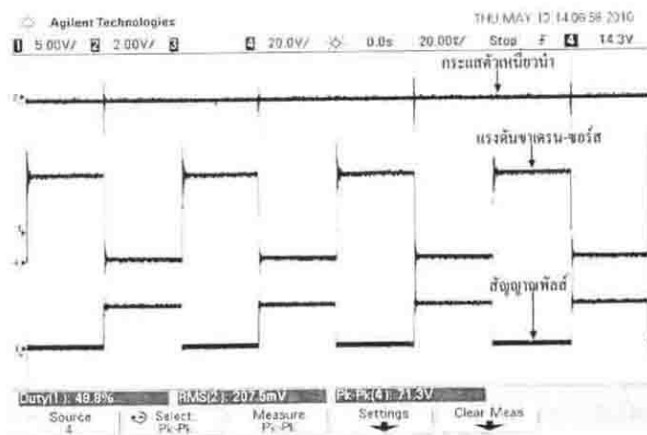
ภาพที่ 4.26 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

4.3.2 กรณีสำคัญที่ 0.5 แรงดันอินพุต 20 V

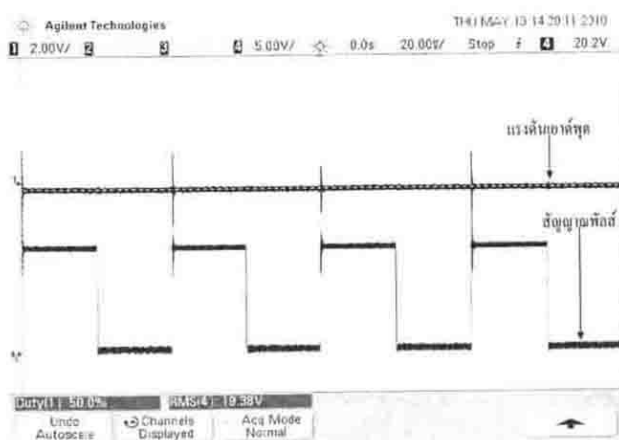


ภาพที่ 4.27 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri})

สัญญาณพัลส์แอมพลิจูด (PWM) สัญญาณซึบนำเกิด

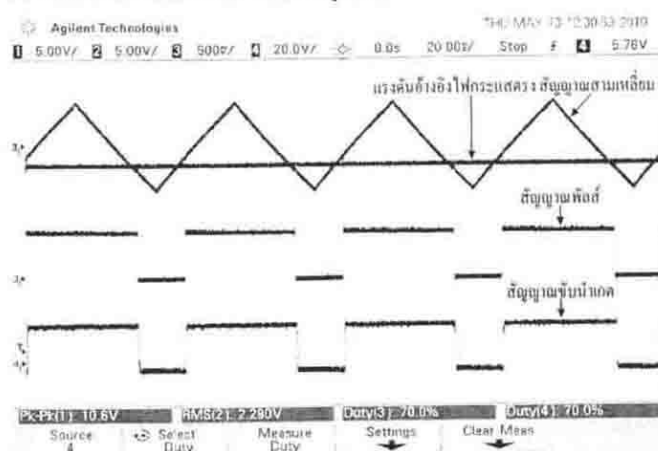


ภาพที่ 4.28 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขาคะพิกซ์ (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)

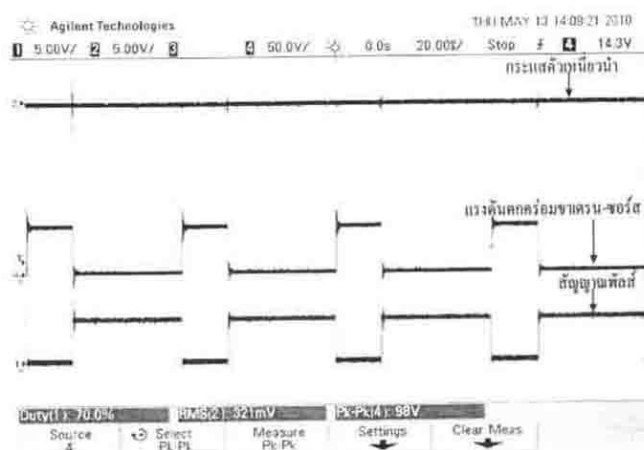


ภาพที่ 4.29 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

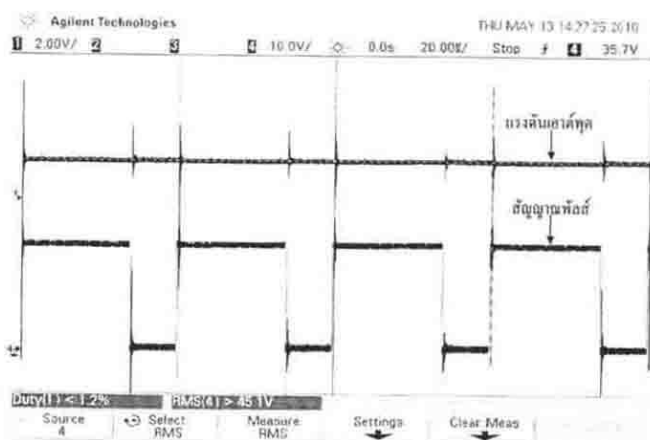
4.3.3 กรณีค่าตัวชี้ไขเกล 0.7 แรงดันอินพุต 20 V



ภาพที่ 4.30 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_m) สัญญาณพัลส์ แอนาล็อก(PWM) สัญญาณซึบนำเกิด



ภาพที่ 4.31 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันตกคร่อมขดลวด-ซอร์ส (V_{DS}) สัญญาณพัลส์ (PWM)



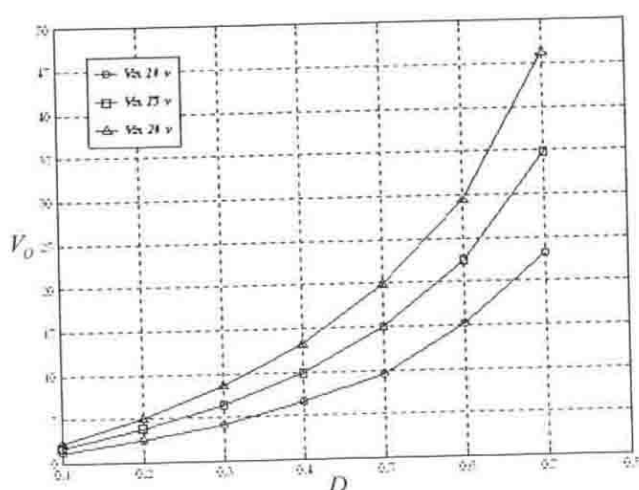
ภาพที่ 4.32 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

4.3.4 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

ค่าตัวเก็บ (D)	แรงดันอินพุต (V_s)	แรงดันเอาต์พุต (V_o)	
		ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการคำนวณ
0.1	10	1.10	1.10
	15	1.60	1.65
	20	2.20	2.20
0.2	10	2.45	2.50
	15	3.75	3.75
	20	4.90	5.00
0.3	10	4.10	4.20
	15	6.31	6.30
	20	8.52	8.40
0.4	10	6.49	6.60
	15	9.84	9.90
	20	13.11	13.20
0.5	10	9.52	10.00
	15	14.95	15.00

	20	19.84	20.00
0.6	10	15.12	15.00
	15	22.41	22.50
	20	29.37	30.00
0.7	10	23.15	23.30
	15	34.70	34.95
	20	46.22	46.60



ภาพที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

4.3.5 สรุปผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส

การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส จากการทดลองพบว่าแรงดันเอาต์พุตสามารถมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตและสามารถสูงกว่าแรงดันอินพุต ซึ่งอาศัยคุณสมบัติของวงจรแปลงผันแบบบัคและวงจรแปลงผันแบบบูสมารวมกัน ดังนั้นจึงสามารถลดค่าแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตและสามารถเพิ่มค่าแรงดันเอาต์พุตให้มากกว่าแรงดันอินพุตได้โดยการปรับค่า D

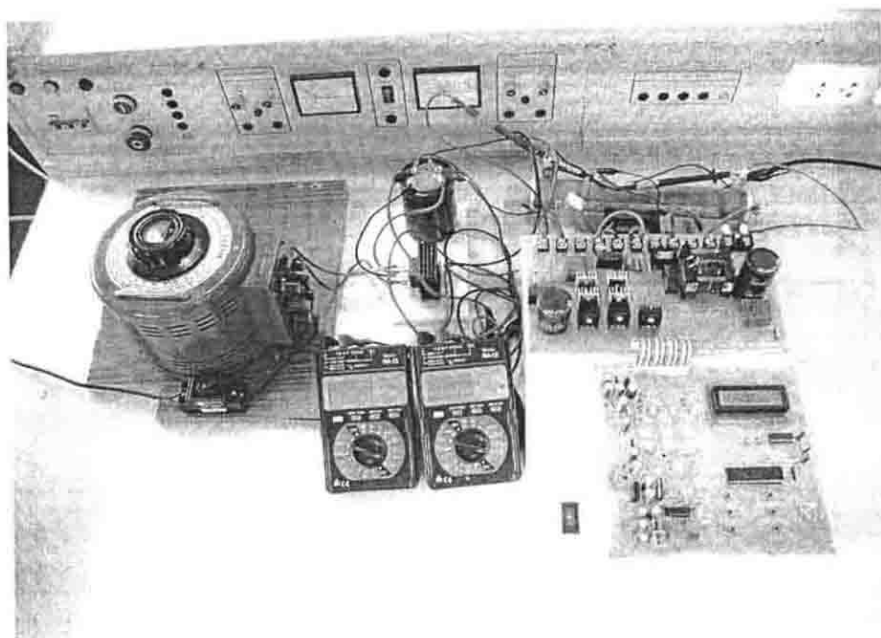
D ตั้งแต่ 0-0.5 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส ทำงานเสมือนวงจรแปลงผันแบบบัค

D ตั้งแต่ 0.5-1 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส ทำงานเสมือนวงจรแปลงผันแบบบูส

D ที่ 0.5 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูส มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับหนึ่งไม่สามารถเพิ่มหรือลดแรงดันเอาต์พุตได้

การนำวงจรไปใช้งานควรออกแบบให้วงจรทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง เพราะการกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตจะทำได้ง่ายกว่าการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

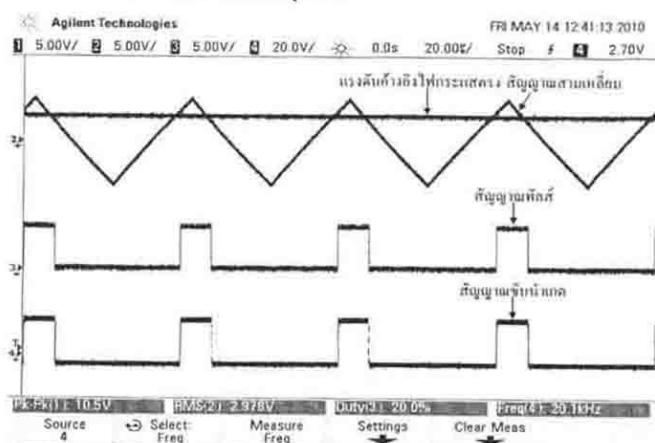
4.4 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค



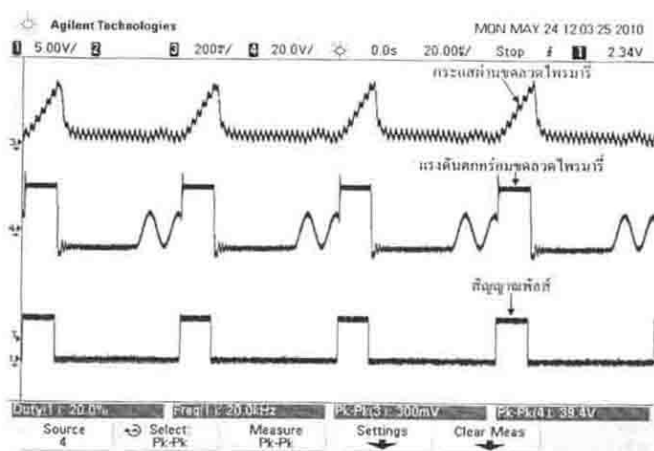
ภาพที่ 4.34 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

จากการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค โดยใช้โหลดความต้านทาน $50\ \Omega$ แรงดันอินพุต (V_s) 10, 20, และ 30V ความถี่ 20 kHz ปรับค่าตัวชี้ไขเกล (D) ตั้งแต่ 0.2-0.6

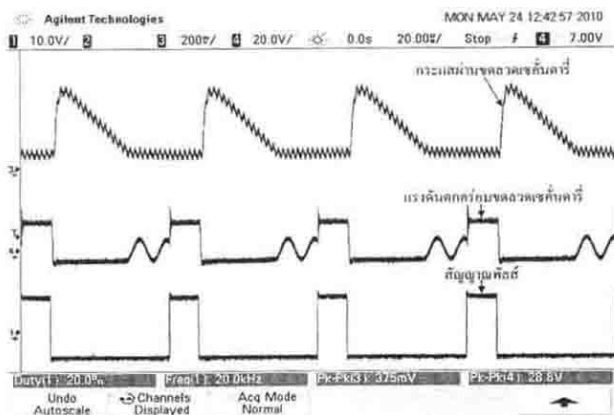
4.4.1 กรณีค่าตัวชี้โวลเทจ 0.2 แรงดันอินพุต 20 V



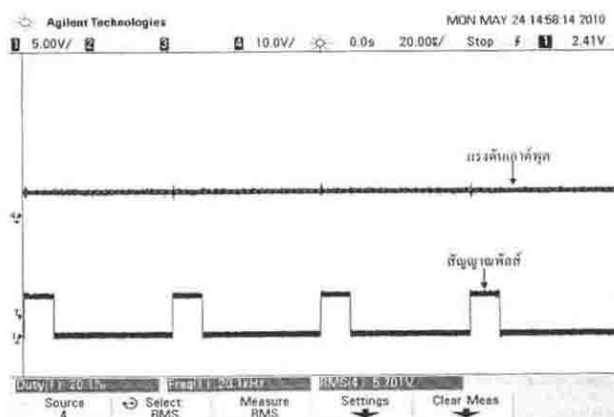
ภาพที่ 4.35 แรงดันอ้างอิงไฟกระพริบ (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri}) สัญญาณพัลส์แอนาล็อก (PWM) สัญญาณเข็มนาฬิกา



ภาพที่ 4.36 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)

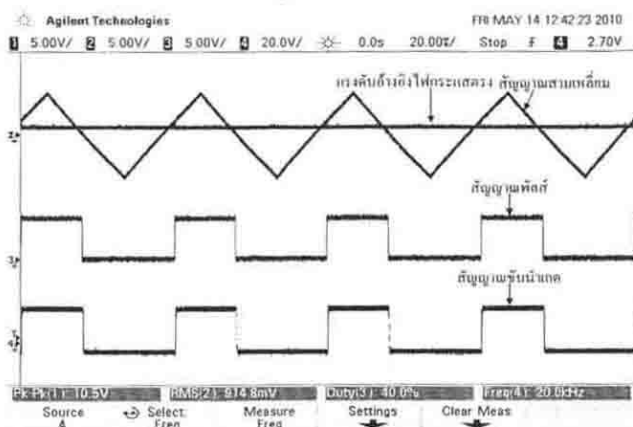


ภาพที่ 4.37 กระแสผ่านขดลวดเซคันดารี แรงดันตกคร่อมขดลวดเซคันดารี สัญญาณพัลส์ (PWM)

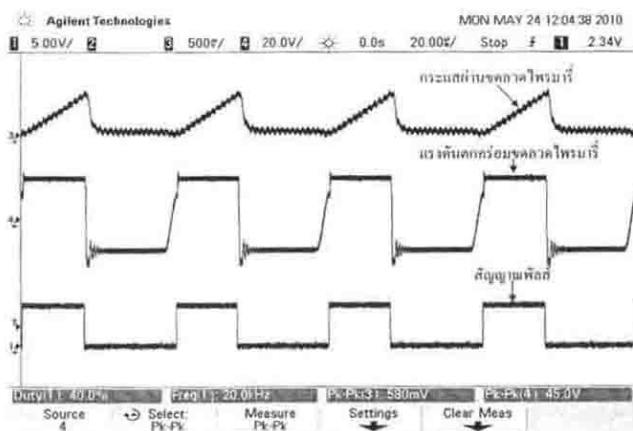


ภาพที่ 4.34 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

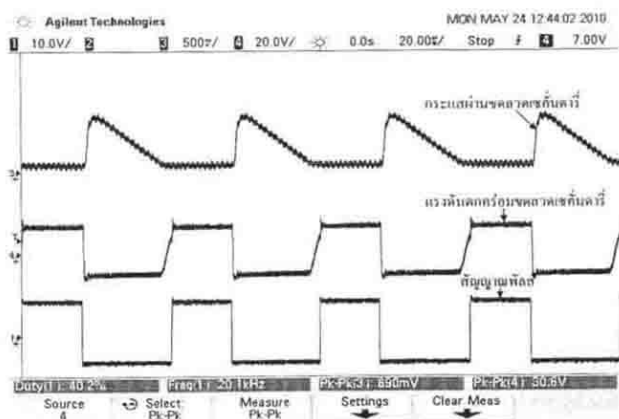
4.4.2 กรณีค่าตัวใช้เกิล 0.4 แรงดันอินพุต 20 V



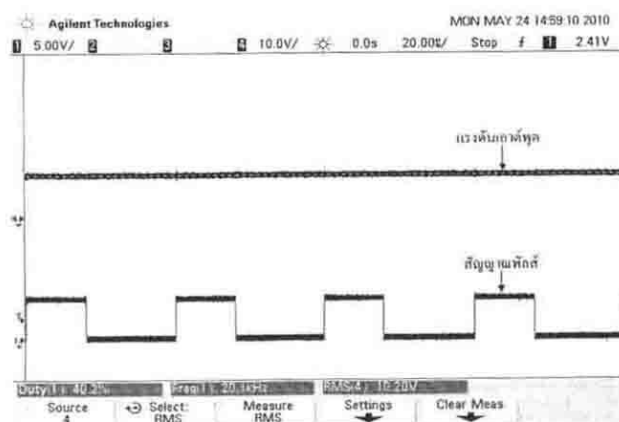
ภาพที่ 4.38 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสดร.4 (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_m) สัญญาณพัลส์แอนะล็อก (PWM) สัญญาณชับน้ำเกต



ภาพที่ 4.39 กระแสผ่านขดลวดไฟไหมรี แรงดันตกคร่อมขดลวดไฟไหมรี สัญญาณพัลส์ (PWM)

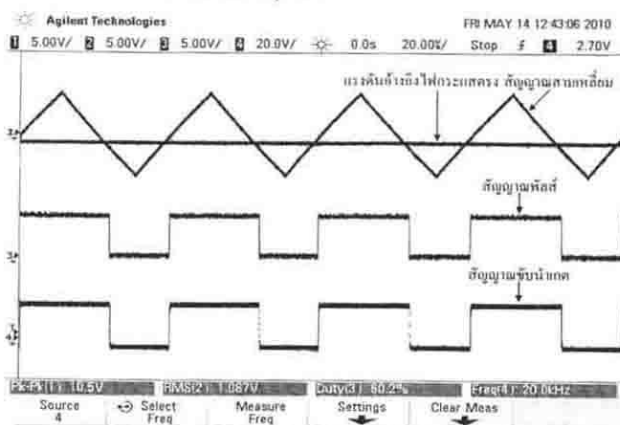


ภาพที่ 4.40 กระแสผ่านขดลวดเซ็กชั่นตัว แรงดันเบรกเกอร์อมขดลวดเซ็กชั่นตัว สัญญาณพัลส์ (PWM)

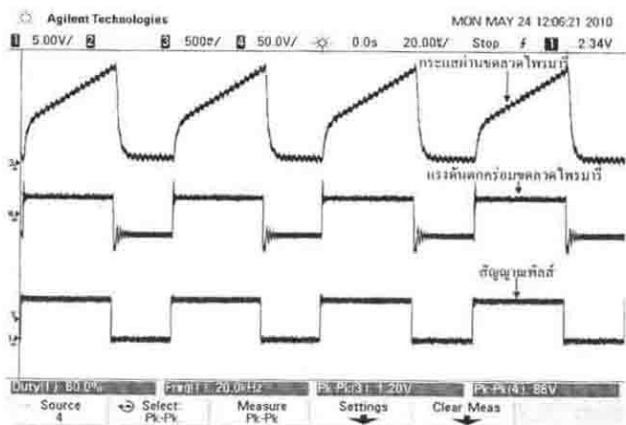


ภาพที่ 4.41 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

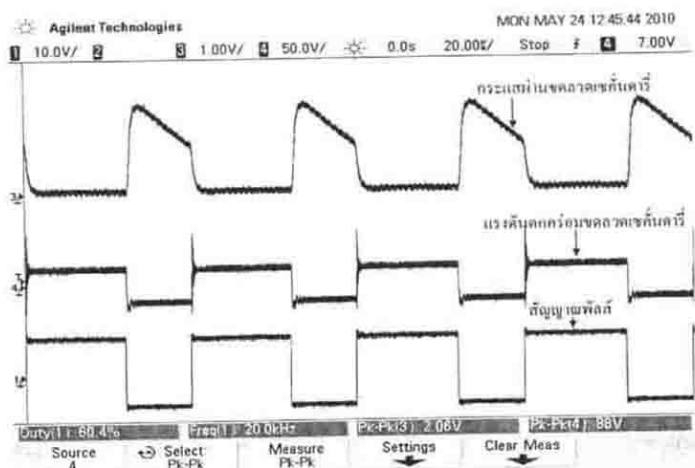
4.4.3 กรณีค่าตัวใช้เกิล 0.6 แรงดันอินพุต 20 V



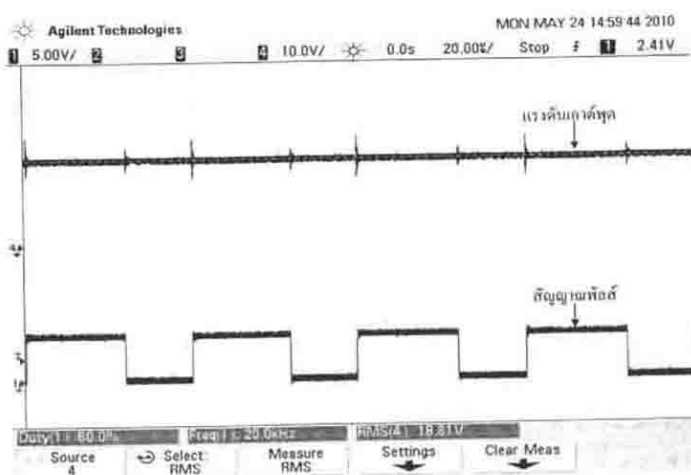
ภาพที่ 4.42 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{in})
สัญญาณพัลส์แอนะล็อก (PWM) สัญญาณขับน้ำเกล็ด



ภาพที่ 4.43 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)



ภาพที่ 4.44 กระแสผ่านขดลวดเซ็กชั่นตัวรี แรงดันตกคร่อมขดลวดเซ็กชั่นตัวรี สัญญาณพัลส์ (PWM)

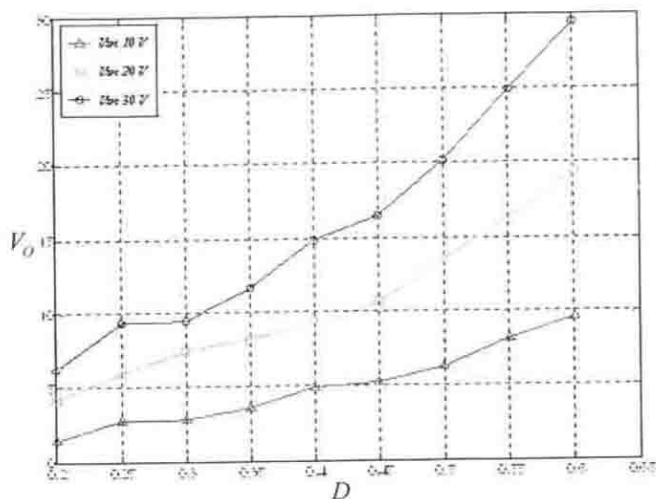


ภาพที่ 4.45 แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

4.4.4 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค ($\frac{N_2}{N_1} = 0.66$)

ค่าตัวดี (D)	แรงดันอินพุต (V_S)	แรงดันเอาต์พุต (V_O)	
		ค่าจากผลการทดลอง	ค่าจากการคำนวณ
0.2	10	1.43	1.65
	20	4.20	3.30
	30	6.20	4.95
0.25	10	2.75	2.20
	20	6.00	4.40
	30	9.35	6.60
0.30	10	2.81	2.80
	20	7.45	5.64
	30	9.47	8.46
0.35	10	3.62	3.55
	20	8.26	7.10
	30	11.26	10.65
0.40	10	7.93	4.40
	20	9.20	8.80
	30	14.84	13.20
0.45	10	5.28	5.40
	20	10.62	10.80
	30	16.41	16.20
0.50	10	6.29	6.60
	20	13.52	13.20
	30	20.17	19.80
0.55	10	8.20	8.00
	20	16.26	16.00
	30	24.9	24.00
0.60	10	9.62	9.90
	20	19.36	19.80
	30	29.46	29.70

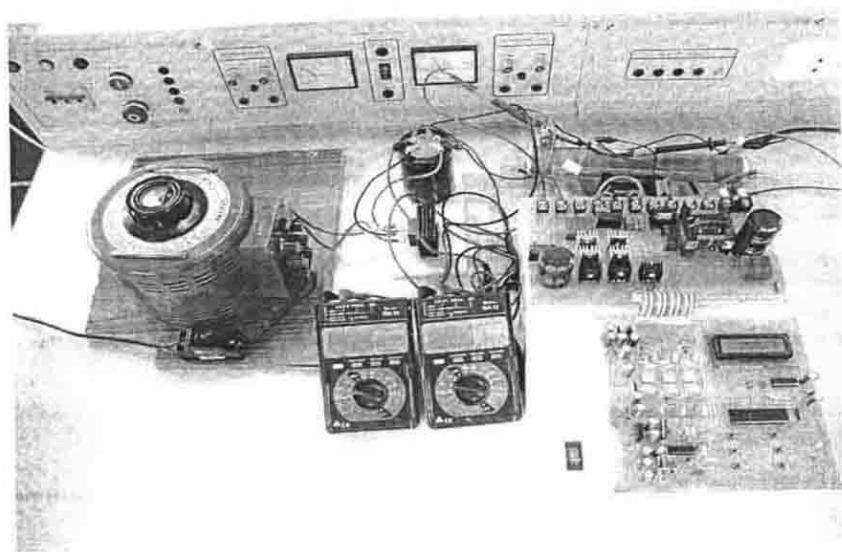


ภาพที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค
 $(\frac{N_2}{N_1} = 0.66)$

4.4.5 สรุปผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

จากการทดลองแรงดันเอาต์พุต สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการปรับค่า D วงจรแปลงผันแบบฟลายแบคได้คิดแปลงมาจากวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส แต่นำเอาหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุต และเอาต์พุต

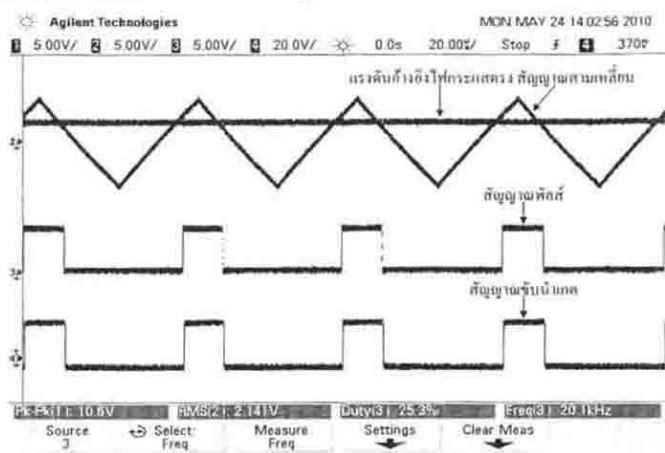
4.5 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด



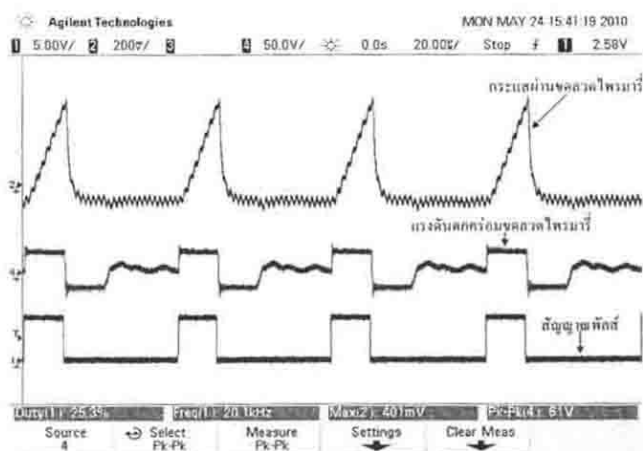
ภาพที่ 4.47 การทดลองวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด

จากการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด โดยใช้ตัวเหนี่ยวนำ (L) $400\ \mu H$ โหลดความต้านทาน (R) $50\ \Omega$ แรงดันอินพุต (V_s) 10, 20, และ $30\ V$ ความถี่ (f_s) $20\ kHz$ ปรับค่าตัวดีไซเคต (D) ตั้งแต่ 0.20-0.45

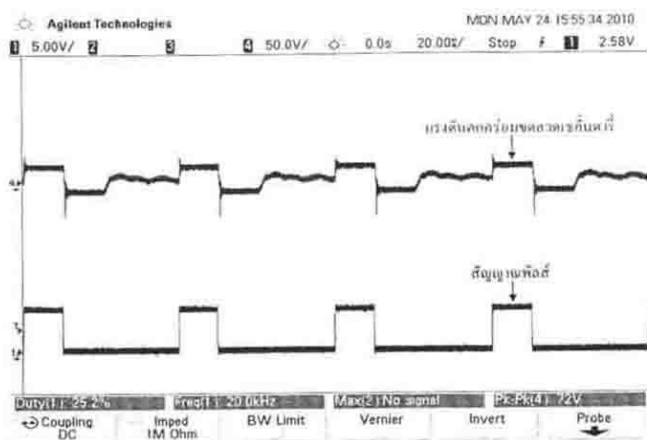
4.5.1 กรณีค่าตัวตัดไฮเกิล 0.25 แรงดันอินพุต 30 V



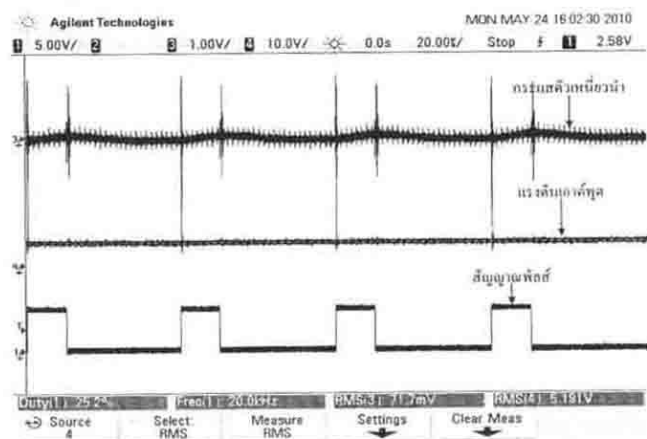
ภาพที่ 4.48 แรงดันอ้างอิงไฟกระพริบ (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_m)
สัญญาณพัลส์ แอนาล็อก (PWM) สัญญาณขึ้นน้ำเบด



ภาพที่ 4.49 กระแสน้ำวนขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)

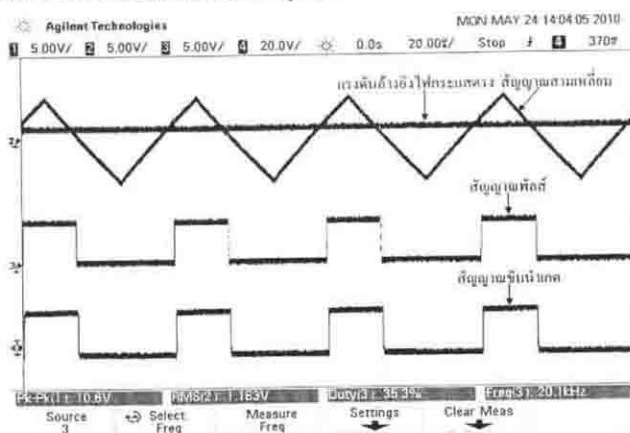


ภาพที่ 4.50 แรงดันตกคร่อมขดลวดเซรอนิคตัว สัญญาณพัลส์ (PWM)

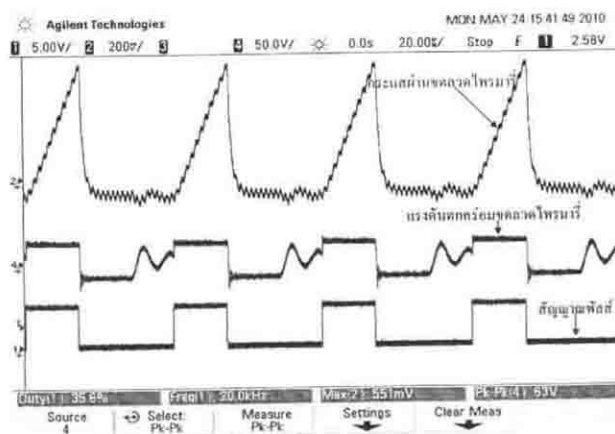


ภาพที่ 4.51 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

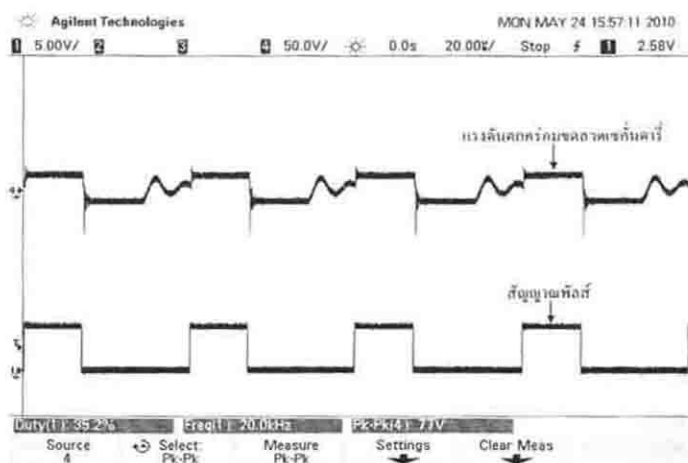
4.5.2 กรณีค่าตัวชี้ไขเกิล 0.35 แรงดันอินพุต 30 V



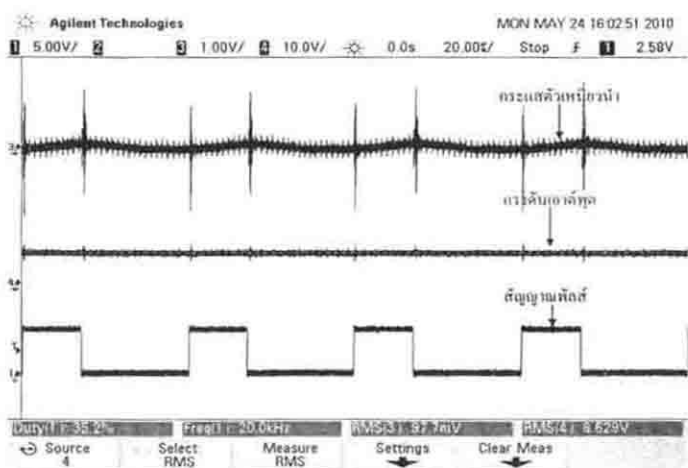
ภาพที่ 4.52 แรงดันอ้างอิงไฟกระพริบตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri}) สัญญาณพัลส์ แอนาล็อก (PWM) สัญญาณขับน้ำเกลือ



ภาพที่ 4.53 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ PWM

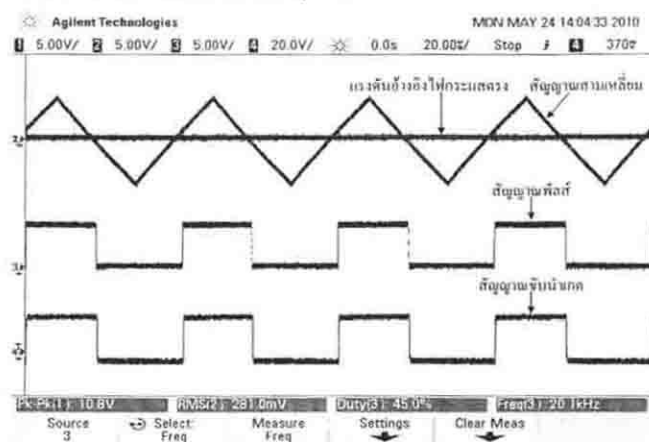


ภาพที่ 4.54 แรงดันตกคร่อมขดลวดเซกันดารี สัญญาณพัลส์ PWM

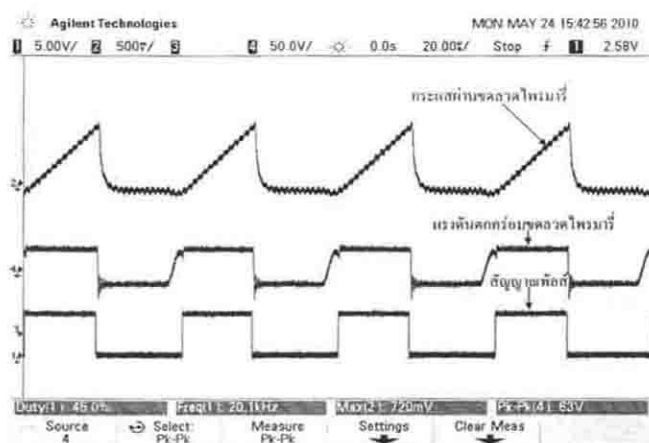


ภาพที่ 4.55 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันเอาต์พุต (V_O) สัญญาณพัลส์ (PWM)

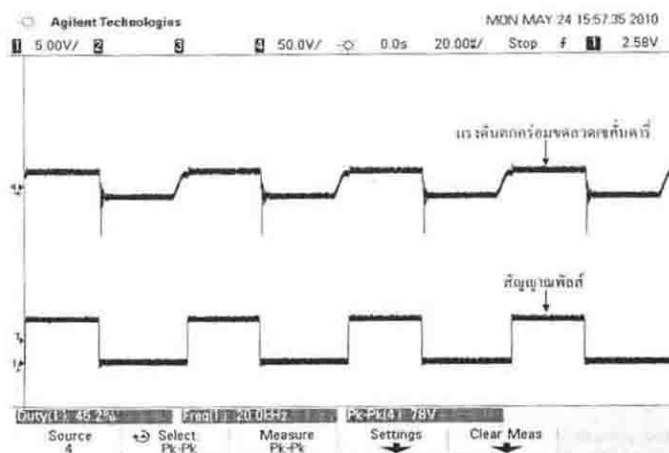
4.5.3 กรณีสถานะโหลด 0.45 แรงดันอินพุต 30 V



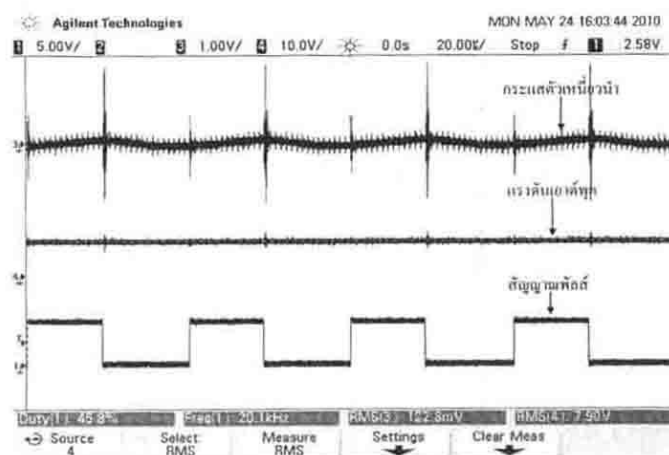
ภาพที่ 4.56 แรงดันอ้างอิงไฟกระแสตรง (V_{ref}) สัญญาณสามเหลี่ยม (V_{tri}) สัญญาณพัลส์ (PWM) สัญญาณขับน้ำเกลือ



ภาพที่ 4.57 กระแสผ่านขดลวดไพรมารี แรงดันตกคร่อมขดลวดไพรมารี สัญญาณพัลส์ (PWM)



ภาพที่ 4.58 แรงดันตกคร่อมขดลวดเซ็กเมนต์ สัญญาณพัลส์ (PWM)

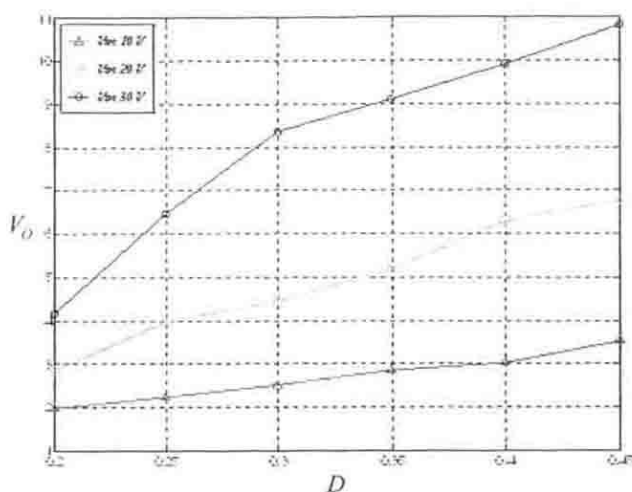


ภาพที่ 4.59 กระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) แรงดันเอาต์พุต (V_o) สัญญาณพัลส์ (PWM)

4.5.4 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟูลวีรีด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟูลวีรีด ($\frac{N_2}{N_1} = 0.66$)

ค่าตัวดี (D)	แรงดันอินพุต (V_s)	แรงดันเอาต์พุต (V_o)	
		ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการคำนวณ
0.2	10	1.96	1.32
	20	2.84	2.64
	30	4.15	3.96
0.25	10	2.23	1.65
	20	3.96	3.30
	30	6.46	4.95
0.30	10	2.50	1.98
	20	4.44	3.96
	30	8.35	5.94
0.35	10	2.84	2.31
	20	5.16	4.62
	30	9.09	6.93
0.40	10	3.02	2.64
	20	6.28	5.28
	30	9.90	7.92
0.45	10	3.52	2.97
	20	6.70	5.94
	30	10.81	8.91



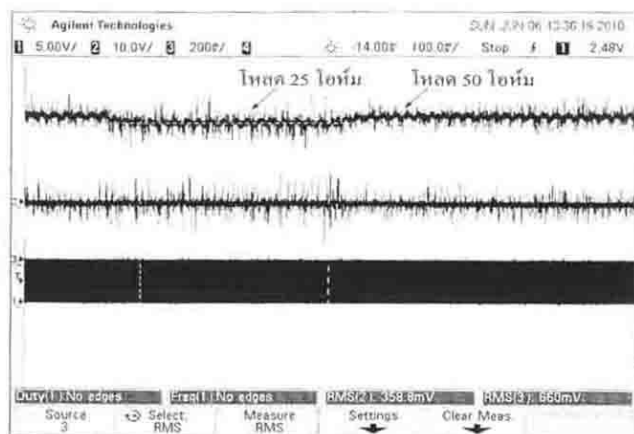
ภาพที่ 4.60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ด

$$\left(\frac{N_2}{N_1} = 0.66 \right)$$

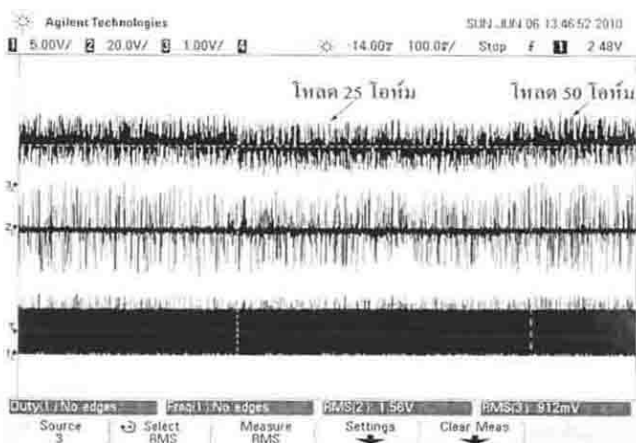
4.5.5 สรุปผลการทดลองวงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ด

วงจรแปลงผันแบบฟอว์เวิร์ดเป็นวงจรที่ดัดแปลงมาจาก วงจรแปลงผันแบบบัค แต่จะมีหม้อแปลงความถี่สูงมาเป็นตัวแยกสัญญาณทางไฟฟ้าออกจากกันระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของวงจร การคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะคล้ายกันกับวงจรแปลงผันแบบบัค แต่จะมีจำนวนรอบของหม้อแปลงความถี่สูงมาเกี่ยวข้อง

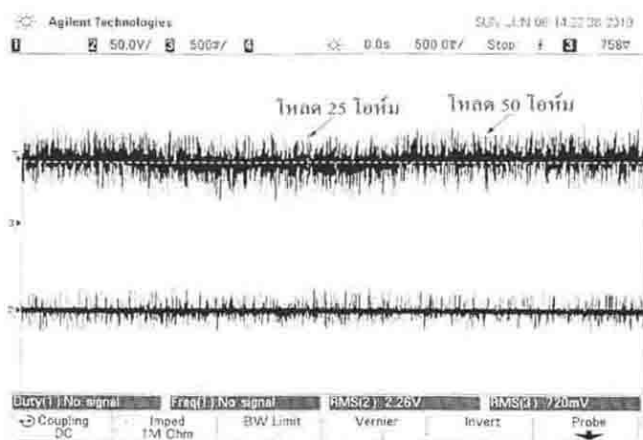
4.6 การทดลองแรงดันขณะสวิตช์โหลดของชุดฝึก



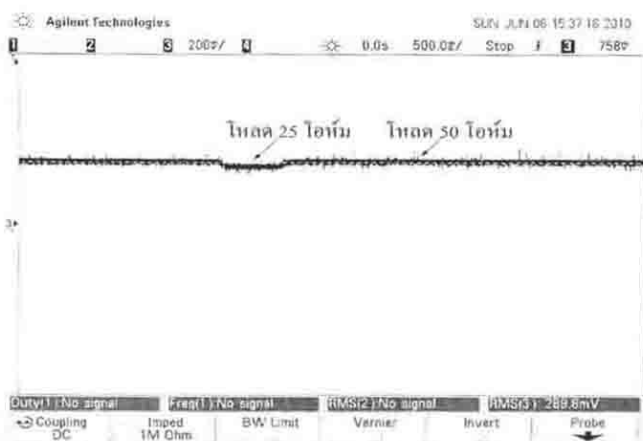
ภาพที่ 4.61 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสวิตช์โหลดของวงจรแปลงผันแบบบัค



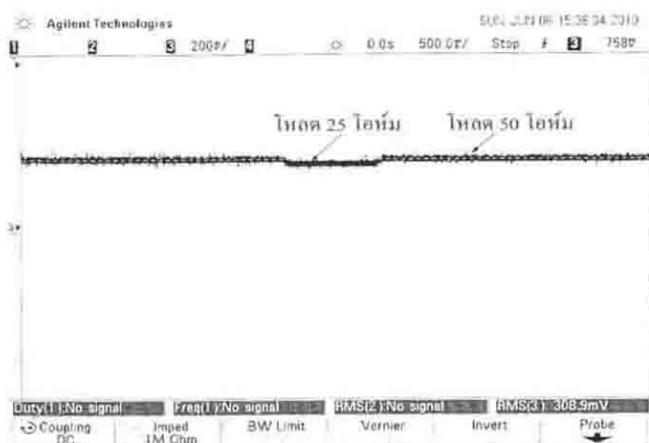
ภาพที่ 4.62 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสวิตช์โหลดของวงจรแปลงผันแบบบูส



ภาพที่ 4.63 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัค-บูส



ภาพที่ 4.64 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

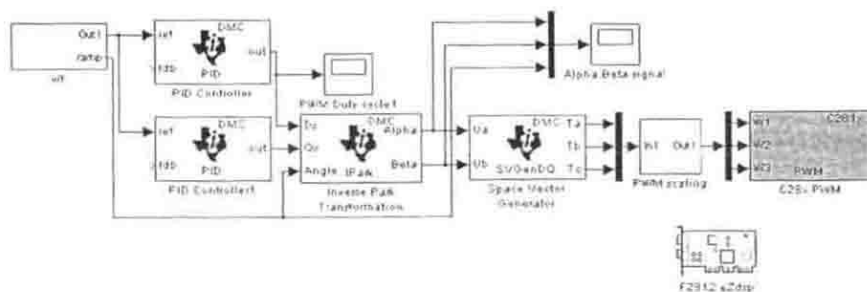


ภาพที่ 4.65 แรงดันเอาต์พุต (V_o) เมื่อมีการสลับโหลดของวงจรแปลงผันแบบฟูลบริดจ์

4.7 การทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

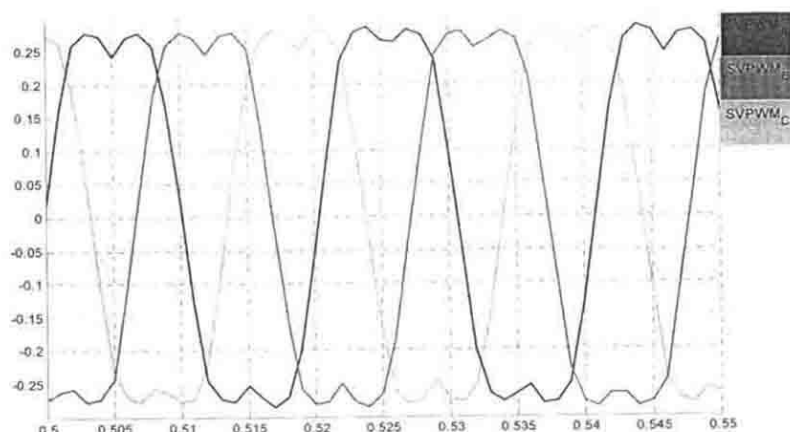
การทดสอบอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์สามเฟสในงานวิจัยนี้จะใช้อะแดปเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 380/660 โวลท์ 50 เฮิร์ตซ์ 1 กิโลวัตต์ 4 ขั้ว ในการทดสอบ

การทดสอบสัญญาณ V_{sref} และ $V_{s/rref}$ สามารถวัดได้จากโปรแกรมควบคุม Matlab / Simulink ดังรูปที่ 4.66

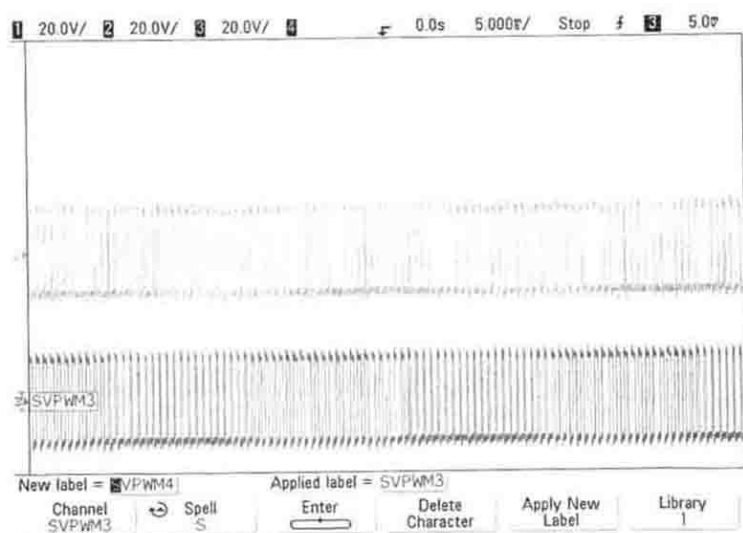


ภาพที่ 4.66 โปรแกรมควบคุม Matlab / Simulink

การทดสอบทำได้โดยการวัดสัญญาณที่ได้จากโปรแกรม Matlab / Simulink และวัดที่วงจรขับ
เกดโดยค่าความถี่ที่ใช้ในการสวิตซ์ที่ 2 kHz ดังภาพที่ 4.67-4.68 ตามลำดับ

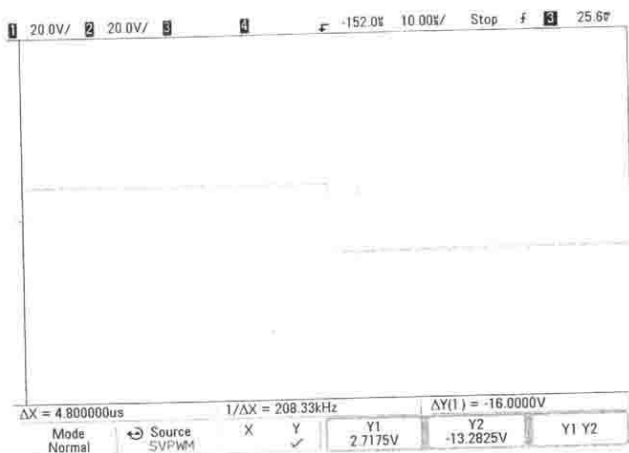


ภาพที่ 4.67 สัญญาณ SVPWM ที่ได้จากโปรแกรมควบคุม Matlab / Simulink

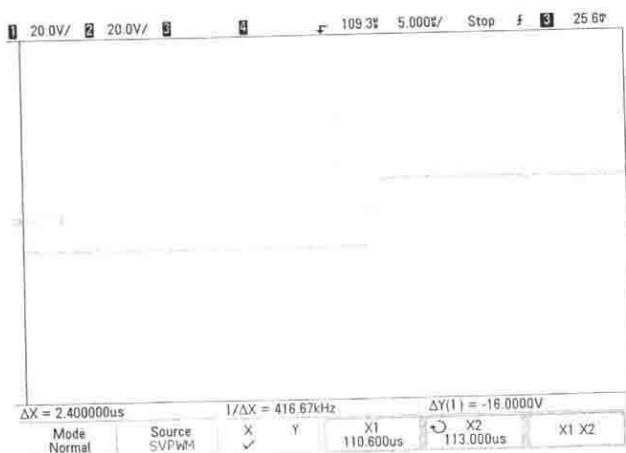


ภาพที่ 4.68 สัญญาณ SVPWM ทั้งสามเฟสสำหรับขับมอเตอร์

ทดสอบค่าเดิใหม่ทำโดยวัดสัญญาณที่ได้จากวงจรขั้วเกิดว่าสัญญาณของคิวบนและตัวล่าง มีการหน่วงเวลาเพื่อป้องกันการทำงานพร้อมกัน โดยสัญญาณที่ทำการหน่วงนั้นอยู่ที่ประมาณ $3 \mu s$ ดังภาพที่ 4.69 และ 4.70

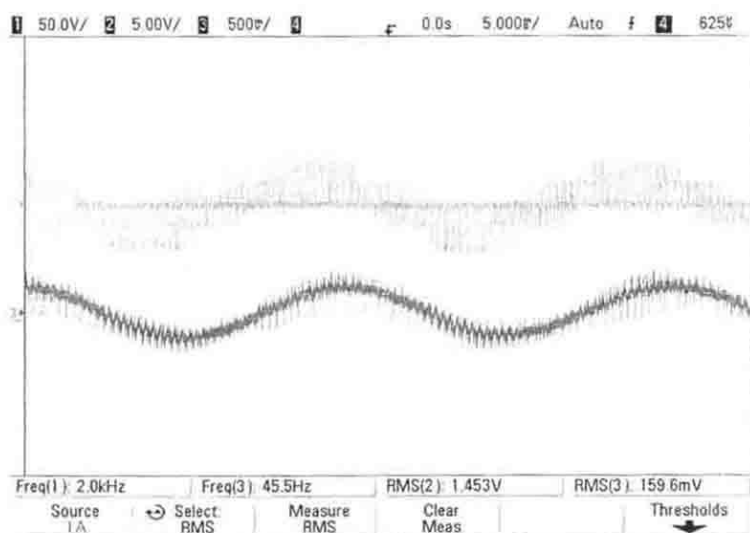


ภาพที่ 4.69 การหน่วงเวลาของสัญญาณขั้วเกิดหน้ากลั่น

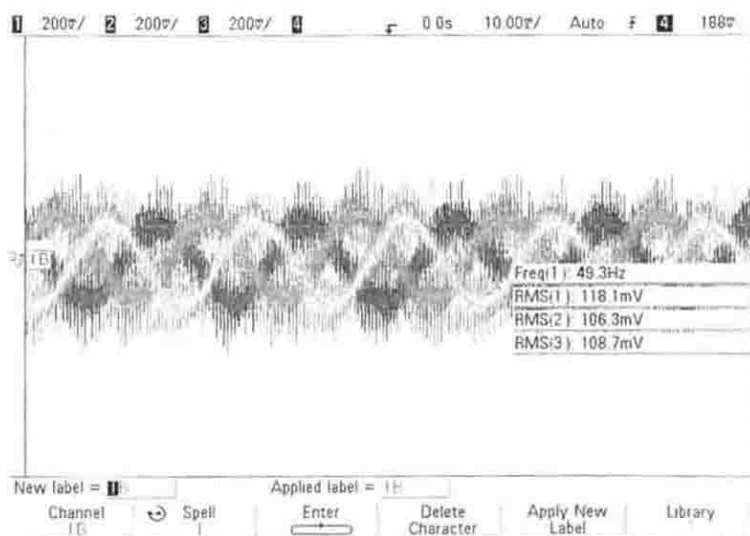


ภาพที่ 4.70 การหน่วงเวลาของสัญญาณขั้วเกิดหลังกลั่น

การทดสอบวัดสัญญาณ SVPWM เปรียบเทียบกับสัญญาณของแรงดันและกระแสที่ด้านเอาต์พุต
การวัดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของระบบ

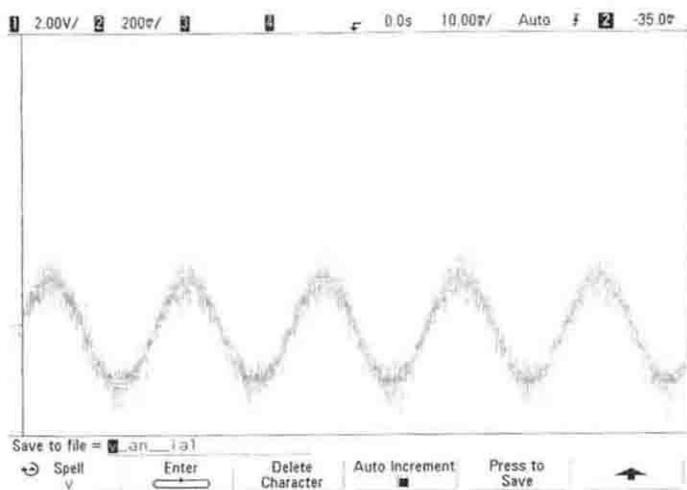


ภาพที่ 4.71 สัญญาณ SVPWM แรงดันและกระแสเฟส A



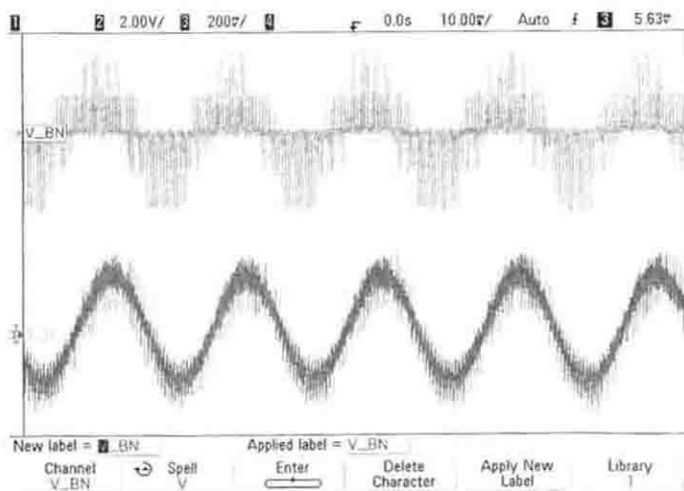
ภาพที่ 4.72 กระแสที่มอเตอร์เฟสทั้งสามเฟส

ในภาพที่ 4.72 จะเป็นผลการวัดกระแสเฟส A, B และ C ทางด้านเอาต์พุต ที่ความถี่ 50 Hz โดยมีค่าตามลำดับคือ 118 mA, 106 mA และ 108 mA



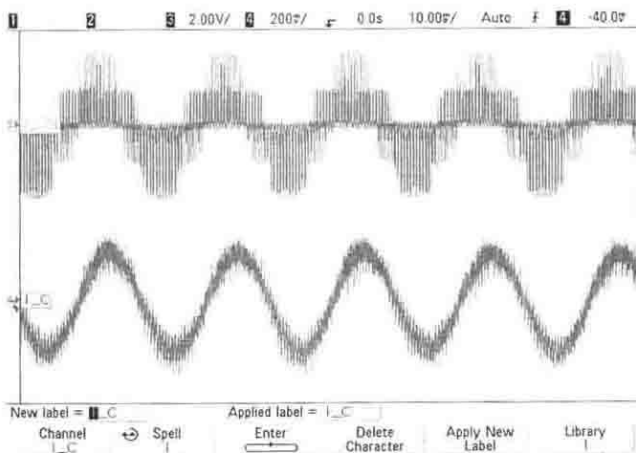
ภาพที่ 4.73 แรงดันกับกระแสเฟส A

ในภาพที่ 4.74 จะเป็นผลการวัดแรงดันและกระแสเฟส A โดยมีค่าตามลำดับคือ 80 V, 157 mA



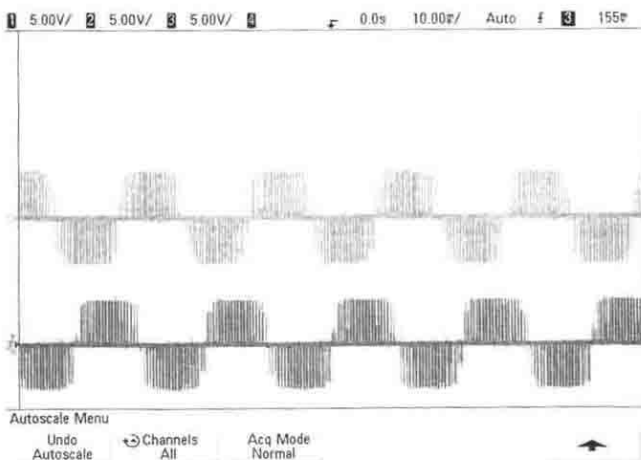
รูปที่ 4.74 แรงดันกับกระแสเฟส B

ในภาพที่ 4.74 จะเป็นผลการวัดแรงดันและกระแสเฟส B โดยมีค่าตามลำดับคือ 80 V 157 mA



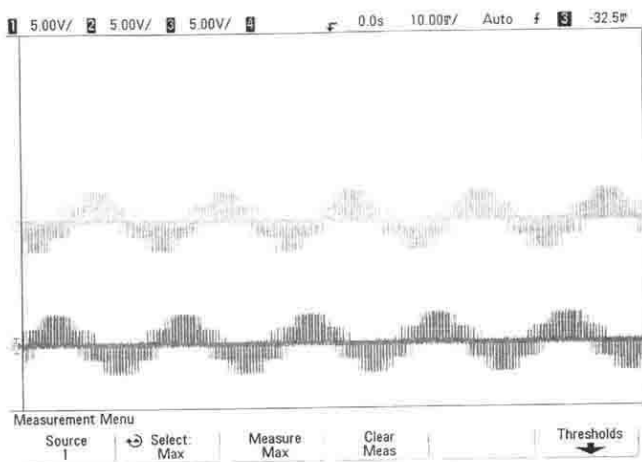
ภาพที่ 4.75 แรงดันกับกระแสเฟส C

ในภาพที่ 4.75 จะเป็นผลการวัดแรงดันและกระแสเฟส C โดยมีค่าตามลำดับคือ 80 V 157 mA



ภาพที่ 4.76 แรงดันระหว่างสายทั้งสามเฟส

ในภาพที่ 4.76 จะเป็นผลการวัดแรงดันระหว่างสายคือ AB, BC และ CA โดยมีค่า 140 V



รูปที่ 4.77 แรงดันเฟสทั้งสามเฟส

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา ออกแบบและสร้าง ชุดฝึกวิทยาศาสตร์เชิงประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบ บั๊ก วงจรแปลงผันแบบบูส วงจรแปลงผันแบบบั๊ก-บูส วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค วงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด อินเวอร์เตอร์ เพื่อบ่งเน้นให้การทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นไปอย่างรวดเร็ว และสะดวก ทั้งนี้เพื่อช่วยลดปัญหาเรื่องการจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้นำมาทำการทดลอง

การออกแบบหม้อแปลงสวิตซ์ในงานวิจัยนี้เป็นหม้อแปลงที่ใช้ร่วมกันระหว่างวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคและวงจรแปลงผันแบบฟอร์เวิร์ด ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้หม้อแปลงในการแยกสัญญาณไฟฟ้า ในส่วนของลักษณะหม้อแปลงจะแตกต่างกันทั้งนี้เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าวงจรให้กำลังเอาต์พุตต่างกันอย่างไรถ้าใช้หม้อแปลงเดียวกัน

5.2 ปัญหาในงานวิจัย

5.2.1 การพันตัวเหนี่ยวนำ ให้ได้ค่าตามที่ต้องการนั้นทำได้ยากที่จะตรงกับค่าที่คำนวณ

5.2.2 การอิมิตัวของค่าความเหนี่ยวนำ เป็นผลมาจากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากเกินไปจึงทำให้เกิดการอิมิตัวของสนามแม่เหล็ก

5.2.3 การพันหม้อแปลงสวิตซ์กำลังที่สูงเสียในหม้อแปลงมีค่ามาก จนอาจทำให้แรงดันเอาต์พุตที่ได้ค่าไม่ตรงกับที่คำนวณไว้

5.2.4 เมื่อทำการจ่ายโหลดให้กับวงจรแล้วจะทำให้แรงดันตกเนื่องจากยังไม่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การที่จะพันตัวเหนี่ยวนำ ให้ได้ค่าตามที่ต้องการนั้นทำได้ยากจึงต้องพันเผื่อไว้ 20 % และควรใช้แผ่นฉนวนกันแกนระหว่างคู่ประกะบ จะสามารถพันรอบได้มากขึ้นซึ่งเป็นการป้องกันการอิมิตัวของแกนเฟอร์ไรต์

5.3.2 ปัญหาการอิมิตัวของสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจาก กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่ามากจึงทำให้เกิดการอิมิตัว วิธีแก้ไขคือเมื่อทราบกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเราต้องเลือกขนาดของขดลวดทองแดงที่จะพันให้เหมาะสมให้สามารถทนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดได้และวิธีที่ใช้พันขดลวด

ลงบนนั้น อีกวิธีคือการลดขนาดของขดลวดที่ใช้พันลงครึ่งหนึ่งแต่ให้เพิ่มจำนวนรอบตีเกลียวไปครึ่งหนึ่งด้วย จนครบตามที่ต้องการ

5.3.3 ในการพันหม้อแปลงสวิตซ์ซึ่งต้องทำช่องว่างอากาศให้แกนเฟอร์ไรต์ เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้หม้อแปลงเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก ทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต ได้ค่าใกล้เคียงตามที่ต้องการ

5.3.4 ถ้าต้องการนำวงจรไปใช้งานกับงานจริงควรมีการป้องกันแรงดัน

บรรณานุกรม

- [1] Blaabjerg, F.; Teodorescu, R.; Liserre, M.; Timbus, A.V "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, Oct 2006, pp. 1398-1409
- [2.] TMS320F2812 Data Manual available at:<http://www.ti.com>
- [3] N. Mohan, W. P. Robbins, P. Imberson, T. M. Underland, R. C. Panaitescu, A. K. Jain, P. Jose and T. Begalke, "Re-structuring of First Courses in Power Electronics and Electric Drives That Integrates Digital Control ", IEEE Trans on Power Elec., Vol. 18, No. 1, Jan. 2003, pp. 429-437.
- [4] J. H. Su, J. J. Chen and D. S. Wu, "Learning Feedback Controller Design of Switching Converter via Matlab/Simulink," IEEE Trans. on Education., Vol.45, Nov., 2002, pp.307-314.
- [5] Robert W. Erickson "Fundamental of Power Electronics" second Edition
- [6] J. F. Silva, "Control Methods for power converters" in Power electronics Handbook, M. H. Rashid, Ed., New York, Academic, Ch. 9, 2001 pp. 431-486

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งาน

จากตารางด้านล่างเป็นตารางแสดงการต่ออุปกรณ์พาสซีฟแต่ละวงจร เมื่อทำการต่ออุปกรณ์พาสซีฟเรียบร้อยแล้ว กดปุ่มเปิดเครื่อง หน้าจอแสดงผลจะถามให้เราเลือกวงจรที่เราจะทำการทดลอง กดปุ่มเลือกวงจรที่จะทดลอง แล้วป้อนแรงดันอินพุตกระแสตรงเข้ากับวงจร จากนั้นก็วัดค่าต่าง ๆ ของวงจรการทดลอง

ตารางที่ ก.1 การต่ออุปกรณ์พาสซีฟ ชุดฝึกอิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์

DC TO DC CONVERTER	TERMINAL TO TERMINAL	$V_{S_{pk}}$		$V_{O_{pk}}$		L		TRANSFORMER					
								N_1		N_2		N_3	
		+	-	+	-	H1	X1	H1	X1	H2	X2	H3	X3
BUCK CONVERTER	7-10	1	2	11	12	3	11						
BOOST CONVERTER	7-10	11	12	1	2	3	11						
BUCK-BOOST CONVERTER	5-10 6-8	1	2	11	12	5	6						
FLYBACK CONVERTER	6-4	1	2	11	12			5	6	10	8		
FORWARD CONVERTER	9-10	1	2	11	12			5	6	8	10	7	4

วงจรแปลงผันแบบบัก กด สวิตช์ Buck

วงจรแปลงผันแบบบูสต์ กด สวิตช์ Boost

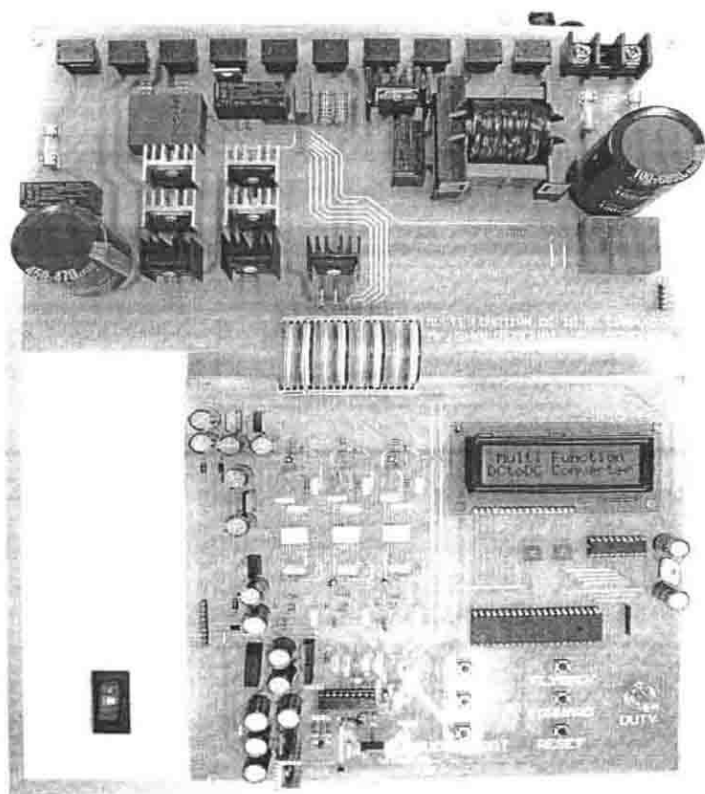
วงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ กด สวิตช์ Buck-Boost

วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค กด สวิตช์ Flyback

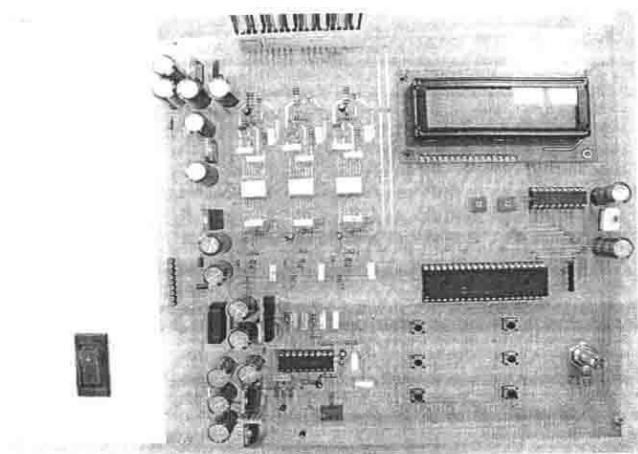
วงจรแปลงผันแบบฟอเวิร์เวิร์ด กด สวิตช์ Forward

หยุดการทำงาน กด สวิตช์ Reset

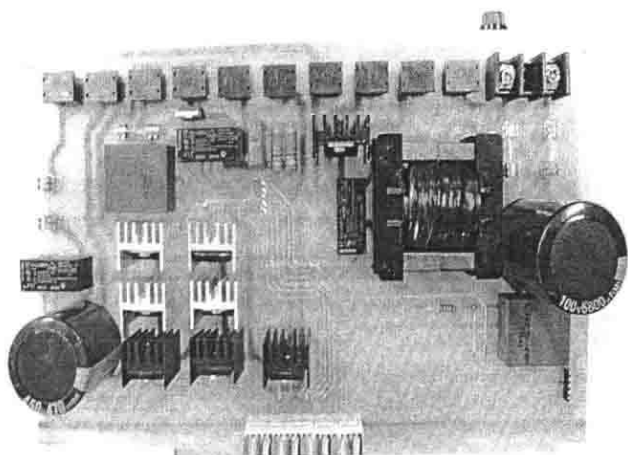
ภาคผนวก ข



ภาพที่ ข.1 ชุดฝึกวิทยาศาสตร์



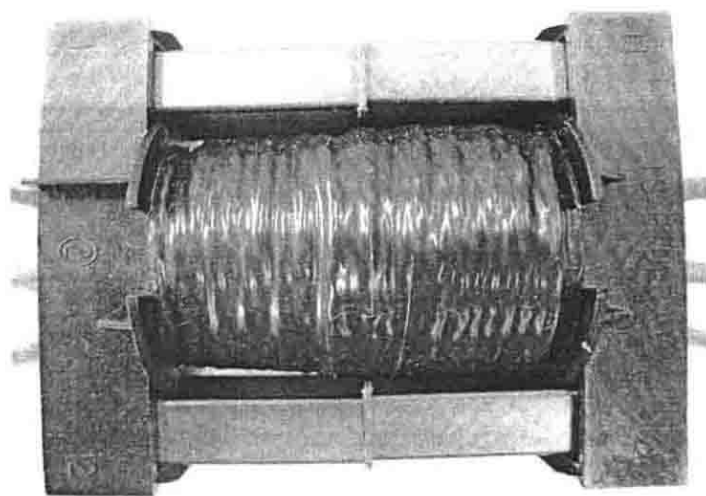
ภาพที่ ข.2 ชุดภาคควบคุม



ภาพที่ ข.3 ชุดภาคกำลัง



ภาพที่ ข.4 ตัวเหนี่ยวนำ 800 μH



ภาพที่ ข.5 หม้อแปลงความถี่สูง

