

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมวงจร Power Electronic ด้วยระบบดิจิทัล
(Basic Digital Power Electronics)



ร/น.
น/บ ๗
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72040
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ส.ย. 2550

b. 117 b2225
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**เรื่อง การควบคุมวงจร POWER ELECTRONIC ด้วยระบบดิจิทัล
BASIC DIGITAL POWER ELECTRONIC**

ผู้จัดทำ นายนพดล จิ๋ว 47015289
 นายธราวุฒิ จิวเจริญผล 47015305



นายณรงค์ จิวเกษ:อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมวงจร POWER ELECTRONIC ด้วยระบบดิจิทัล
BASIC DIGITAL POWER ELECTRONIC

โดย

นายพศ จีจุ 47015289

นายสรวุฒิ จิวเจริญผล 47015305

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ จุฑะชะ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างวงจร Buck Converter รวมถึงการควบคุมแบบ Digital ด้วย Micro Controller ตระกูล PSoC ซึ่งมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาและนำความรู้ทางด้านระบบควบคุมมาประยุกต์ใช้ในการควบคุม โดยคุณสมบัติของ Buck Converter ที่สร้างขึ้นนั้นจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 15-30 V แรงดันไฟฟ้าที่ทางออก 10 V และ กระแสไฟฟ้าที่ทางออกสูงสุด 3A วงจรทำงานแบบ Discontinuous Current Mode (DCM) , Continuous Current Mode (CCM) โดยมี Switching Frequency 40kHz การปรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกปรับด้วยเทคนิค Duty Cycle Control , ควบคุมระบบแบบ Digital ด้วย Micro Controller ตระกูล PSoC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมวงจร POWER ELECTRONIC ด้วยระบบดิจิทัล
BASIC DIGITAL POWER ELECTRONIC

โดย

นายพศด จีจุ 47015289

นายศราวดี จิวเจริญผล 47015305

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเคชะ

ABSTRACT

This Project is presented analysis of controller design to the power supplies. In this case, control with digital controller. The controller designed is applied to buck converter at the constant frequency 40 kHz. Buck converter is designed with input voltage 15-30 V , output voltage 10 V and output current maximum (3A) in discontinuous current mode (DCM) and continuous current mode (CCM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาเป็นอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ จุลเดชะ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปการะที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่นๆ แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ พี่ๆนักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาเอื้อเฟื้ออุปการะที่จำเป็น รวมถึงการให้ความสนใจในความคืบหน้าอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาควบคุม และพี่เจ้าหน้าที่ห้องสโตร์ ที่ให้ความอำนวยความสะดวก

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำ ที่ได้ให้ความสนับสนุนให้โอกาสผู้จัดทำได้เล่าเรียนจนถึงทุกวันนี้ และคอยให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ความร่วมมือและเป็นกำลังใจ จนทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

นายนพดล

จิ๋ว

นายสรวิชัย

จิ๋วเจริญผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	I
บทที่ 2 ทฤษฎีของ Buck Converter	3
2.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตชิ่ง	3
2.2 หลักการทำงานของวงจร Buck Converter	4
2.3 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจร Buck Converter	6
2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก	8
2.5 การทำงานในโหมดกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง	9
2.6 MOSFET	13
2.6.1 MOSFET N- channel type	13
2.6.2 MOSFET P- channel type	13
2.7 ทฤษฎีของออปโตคัปเปิลอร์	14
2.8 ทฤษฎีการควบคุม PID	15
2.8.1 วิธีการควบคุมแบบต่างๆ	15
2.9 Micro Controller PSoC	18
2.9.1 จุดเด่นของ PSoC MCU เมื่อเทียบกับไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นๆ	18
2.9.2 คุณสมบัติของ PSoC MCU ตระกูล CY8C27443	18
2.9.3 โครงสร้างสถาปัตยกรรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PSoC	20
2.9.4 ขาสัญญาณต่าง ๆ ของ Micro Controller PSoC	21
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	23
3.1 การออกแบบวงจร Buck Converter	23
3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	25
3.2.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์	25
3.2.2 เลือก Core Material	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3	คำนวณ Max Flux Density และ Max Flux Swing	25
3.2.4	เลือกขนาดและรูปร่างของ Core	26
3.2.5	คำนวณจำนวนรอบ (N)	26
3.2.6	คำนวณ Gap length	27
3.2.7	คำนวณขนาดของขดลวดตัวนำ และ Winding Resistance	28
3.2.8	ตัวอย่าง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ	28
3.2.8.1	กำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter)	28
3.2.8.2	เลือก Core Material	28
3.2.8.3	เลือกขนาด และ Shape ของ Core	30
3.2.8.4	คำนวณจำนวนรอบ (N)	30
3.2.8.5	คำนวณ Gap length	31
3.2.8.6	คำนวณขนาดของขดลวดตัวนำและ Winding Resistance	31
3.3	การออกแบบระบบควบคุมดิจิทัล	32
3.4	การใช้งานโปรแกรม PSoC Designer	38
3.4.1	User Module Selection View	38
3.4.2	Interconnect View	39
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	40
บทที่ 5	บทวิจารณ์และสรุป	45
ภาคผนวก ก	รูปของวงจร Buck Converter ที่ใช้ในการทดลอง	
ภาคผนวก ข	โปรแกรม(Sorce Code)	
ภาคผนวก ค	Data Sheet	

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	3
2.2 วงจร Buck Converter	4
2.3 รูปคลื่นการทำงานของวงจร Buck Converter	6
2.4 รูปคลื่นการทำงานของวงจร Buck Converter	8
2.5 การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง	10
2.6 สัญลักษณ์ของ MOSFET ชนิด N- channel	13
2.7 สัญลักษณ์ของ MOSFET P- channel	13
2.8 วงจรออปโต ไอโซเลท	14
2.9 บล็อกไดอะแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PSoC	20
2.10 แสดงตัวถัง และการวางตำแหน่งขาสัญญาณต่างๆของไอซี CY8C27443	22
3.1 วงจร Buck Converter	23
3.2 กราฟระหว่าง B กับ H และ กราฟระหว่าง μ กับความถี่	29
3.3 กราฟระหว่าง B ความถี่ และ Power Loss	30
3.4 การควบคุม PI ต่อเนื่อง	32
3.5 แผนผังบล็อกของการควบคุมดิจิทัล PI	33
3.6 ระบบควบคุมพร้อมด้วยการควบคุมดิจิทัล PI	34
3.7 การทำงานของเครื่องควบคุมดิจิทัล PI	36
3.8 แสดงหน้าต่าง User Module Selection View	38
3.9 แสดงหน้าต่าง Interconnect View	39
4.1 วงจร Buck Converter และ ชุดควบคุม	40
4.2 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ กับ V_{GS} ของ MOSFET	40
4.3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ กับ V_{GS} ของ MOSFET	41
4.4 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้ามีขนาด 15 V	41
4.5 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก(1A ~ 3A)	42
4.6 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก(1A ~ 3A)	42
4.7 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก(1A ~ 3A)	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (15V ~ 30V)	43
4.9 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (15V ~ 30V)	44
4.10 กราฟของประสิทธิภาพเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ทางออก	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

2.1 หน้าที่ขาสัญญาณต่างๆ ของCY8C27443

หน้า

21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยวงจร Buck Converter ชนิด Open Loop ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าตรงจากแรงดันไฟฟ้าระดับหนึ่งให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตรงอีกระดับหนึ่งที่คงที่ แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางเข้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ออกมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตรงที่ทางออกมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทางออกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง วงจร Buck Converter ต้องเป็นชนิด Close Loop ซึ่งต้องมีการออกแบบระบบควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของวงจร Buck Converter

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของวงจร Buck Converter
2. ศึกษาการออกแบบและสร้างวงจร Buck Converter
3. ศึกษาการทำงานของ Micro Controller ตระกูล PSoc
4. วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมของวงจร Buck Converter

1.3 ขอบเขตการศึกษา

นำเสนอทฤษฎีการทำงานและการสร้างวงจร Buck Converter รวมถึงการควบคุมเป็นแบบ Digital ด้วย Micro Controller ตระกูล PSoc โดยคุณสมบัติของ Buck Converter ที่สร้างขึ้นนั้นจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 15-30 V แรงดันไฟฟ้าที่ทางออก 10 V และ กระแสไฟฟ้าที่ทางออกสูงสุด 3A วงจรทำงานแบบ Discontinuous Current Mode (DCM) , Continuous Current Mode (CCM) โดยมี Switching Frequency 40kHz การปรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกปรับด้วยเทคนิค Duty Cycle Control , ควบคุมระบบแบบ Digital ด้วย Micro Controller ตระกูล PSoc ประกอบด้วยเนื้อหา 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

ประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการศึกษา และขอบเขตของการศึกษาของปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีของ Buck Converter

ประกอบด้วยทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทำงานของ Buck Converter ที่มีการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกปรับด้วยเทคนิค Duty Cycle Control และส่วนประกอบต่างๆ ของวงจร

บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง

แสดงการออกแบบของอุปกรณ์ในวงจร Buck Converter และการออกแบบระบบควบคุมของระบบทั้งหมด

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

แสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขต่างๆ ของวงจร Buck Converter ที่สร้างขึ้น

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป



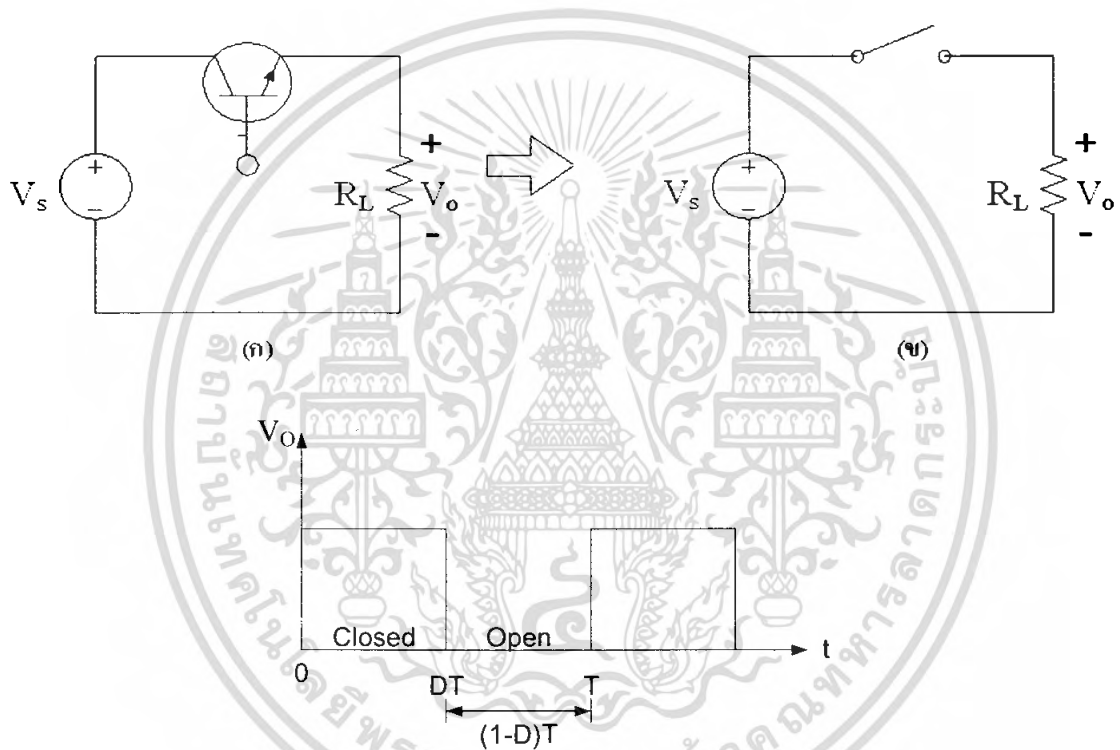
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของ Buck Converter

2.1 หลักการทำงานของวงจรสวิตชิง

อุปกรณ์สวิตชิงเช่น MOSFET หรือ IGBT จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ มีโหมดการทำงานคือ โหมดนำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้า โดยสมมติให้ MOSFET หรือ IGBT ที่ใช้ เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในอุดมคติดังในรูปที่ 2.1 หลักการทำงานคือ



รูปที่ 2.1 การทำงานของอุปกรณ์สวิตชิงในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

- (ก) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงพื้นฐาน
- (ข) วงจรสมมูลของสวิตช์
- (ค) แรงดันไฟฟ้าด้านออก

เมื่อสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า ($V_o = V_s$) และเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ ($V_o = 0$) ดังนั้นช่วงเวลาในการนำกระแสไฟฟ้าและหยุดนำกระแสไฟฟ้าจะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกเป็นพัลส์ดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยหรือค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าทางด้านออกได้จากสมการ(ในโหมด-CCM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt$$

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_s dt$$

$$V_o = DV_s \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) จะพบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกถูกควบคุมได้จากการปรับค่า duty cycle (Duty cycle หรือ Duty ratio :D) ซึ่ง D หมายถึงอัตราส่วนของช่วงเวลาที่มีสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า ต่อช่วงเวลาหนึ่งคาบการสวิตช์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

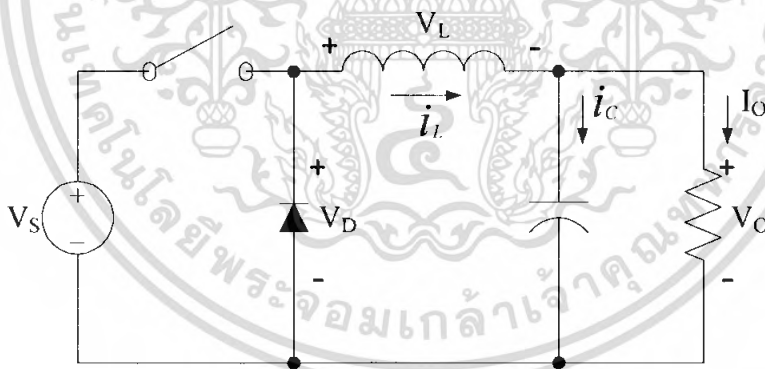
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

$$t_{on} = DT$$

$$t_{off} = (1-D)T$$

(2.2)

2.2 หลักการทำงานของวงจร Buck Converter



รูปที่ 2.2 วงจร Buck Converter

ขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า

$$V_L = V_s - V_o \quad (2.3)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.5)$$

ในกรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแสไฟฟ้าคือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.6)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้า

$$V_L = -V_o \quad (2.7)$$

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.8)$$

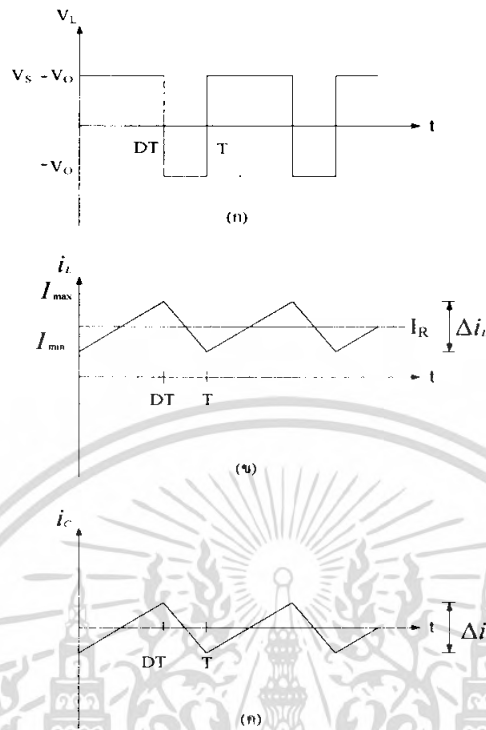
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.9)$$

ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาที่หยุดนำกระแสไฟฟ้า คือ $dt = (1 - D)T$

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L} \right) (1 - D)T \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจร Buck Converter



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นการทำงานของวงจร Buck Converter

- (ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
- (ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
- (ค) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุด

$$I_{L,\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.11)$$

$$I_{L,\max} = V_o \left[\frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right] \quad (2.12)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด

$$I_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ $I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.14) สามารถคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ทำให้วงจรทำงานแบบ Continuous Current Mode ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $I_{L,\min} = 0$

$$I_{L,\min} = V_o \left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.15)$$

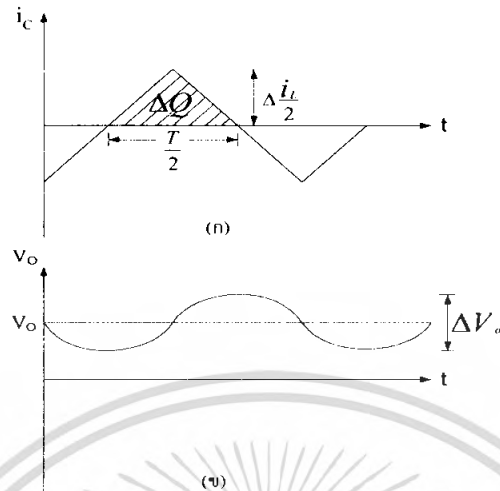
$$\left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right] = 0 \quad (2.16)$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.17)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นการทำงานของวงจร Buck Converter

- (ก) กระแสไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ
(ข) ระลอกคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณจาก

$$Q = CV_o \quad (2.18)$$

$$\Delta Q = C\Delta V_o$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.19)$$

เมื่อ ΔQ คือ ค่าประจุที่เปลี่ยนแปลง

ΔV_o คือ ค่าระลอกของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่เปลี่ยนแปลงน้อย ๆ ระหว่างขอดถึงขอด

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (2.20) ลงในสมการที่ (2.19) จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.21)$$

แทนค่า $\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T$ จากสมการที่ (2.10) (โดยพิจารณาเฉพาะขนาด) ลงในสมการที่ (2.21) จะได้

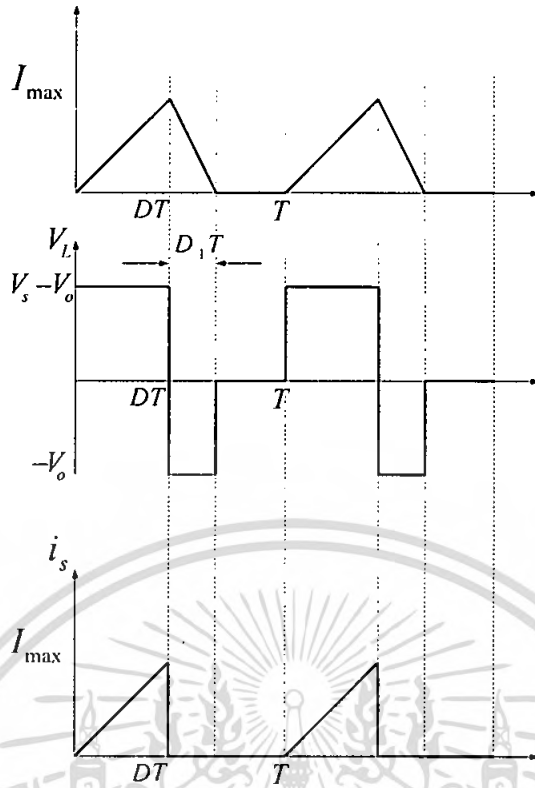
$$\Delta V_o = \frac{T}{8C} \frac{V_o}{L} (1-D)T \quad (2.22)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T^2}{8C} \left(\frac{1}{L}\right) (1-D) \quad (2.23)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2}$$

2.5 การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่องของวงจร Buck Converter

รูปที่ 2.5 แสดงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังในการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่องของ วงจร Buck Converter ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านออกและด้านเข้าหาได้ จากค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำตลอดคาบมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (2.24)



รูปที่ 2.5 การทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง Buck Converter

$$(V_s - V_o)(DT) - V_o(D_1)T = 0 \quad (2.24)$$

$$(V_s - V_o)(DT) = V_o(D_1)T$$

$$(V_s - V_o)D = V_o D_1 \quad (2.25)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{D + D_1} \quad (2.26)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในตัวเก็บประจุเท่ากับศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในโหลดความต้านทาน สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับ

$$I_L = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{2} I_{L,\max} DT + \frac{1}{2} I_{L,\max} D_1 T \right)$$

$$I_L = \frac{1}{2} I_{L,\max} (D + D_1) \quad (2.28)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28) จะได้

$$\frac{V_o}{R} = \frac{1}{2} I_{L,\max} (D + D_1) \quad (2.29)$$

ในช่วงการทำงานขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ

$$V_L = V_s - V_o$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้าคือ

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{I_{L,\max}}{DT}$$

ดังนั้น

$$I_{L,\max} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT$$

แทนค่า $I_{L,\max}$ ในสมการที่(2.29)

$$\frac{V_o}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_o D_1 T}{L} \right) (D + D_1) \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_1^2 + DD_1 - \frac{2Lf}{R} = 0 \quad (2.31)$$

จากสมการที่(2.31)จะหาค่า D_1 ได้

$$D_1 = \frac{-D + \sqrt{D^2 + \frac{8Lf}{R}}}{2} \quad (2.32)$$

แทนค่า D_1 ในสมการที่(2.26)

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{D + D_1} = \frac{2D}{D + \sqrt{D^2 + \frac{8Lf}{R}}} \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.33) เป็นอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ของวงจร Buck Converter เมื่อทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งขอบเขตระหว่างการทำงานของโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง กับ โหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่องอยู่ในเงื่อนไขของสมการ คือ $D_1 = 1 - D$ เมื่อเปรียบเทียบอัตราขยายแรงดันของวงจร Buck Converter จากการทำงานของโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง กับ โหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่องจะได้ ปัจจัยที่มีผลต่อค่า D_1 คือค่า D ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความถี่สวิตช์และโหลดความต้องการ

2.6 MOSFET

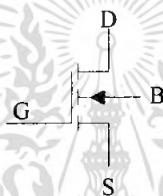
ทรานซิสเตอร์ชนิด MOSFET ที่ใช้ในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์กำลังแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

ชนิด N- channel type

ชนิด P- channel type

2.6.1 MOSFET N- channel type

รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นสัญลักษณ์ของ MOSFET ชนิด N- channel สังเกตได้ว่าระยะห่างระหว่างเส้นต่อกับ Gate และเส้นต่อกับ N – channel หมายถึงชั้นของออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน และลูกศรที่อยู่บนเส้น Substrate (หรือที่เรียกว่าตัวฐานรอง Body) มีทิศทางชี้ตรงจากข้าง Substrate ไปยัง N – channel ซึ่งแสดงว่าเป็น MOSFET ชนิด N- channel

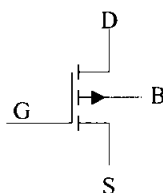


รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ของ MOSFET ชนิด N- channel

การทำงานของ MOSFET ทำงานโดยการควบคุมความกว้างของ N- channel ด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ Gate ซึ่ง MOSFET จะอยู่ในสภาวะ ON เต็มที่กล่าวคือ N- channel มีความกว้างที่สุดเมื่อ $V_{GS} \geq 12V$

2.6.2 MOSFET P- channel type

MOSFET ชนิด P- channel ทำงานเหมือนกับชนิด N- channel โดยแตกต่างกันเฉพาะทิศทางขั้วของแรงดันไฟฟ้าและทิศทางของกระแสไฟฟ้าสลับกัน รูปที่ 2.7 แสดงสัญลักษณ์ของ MOSFET P- channel (ไม่นิยมใช้ในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์กำลัง)

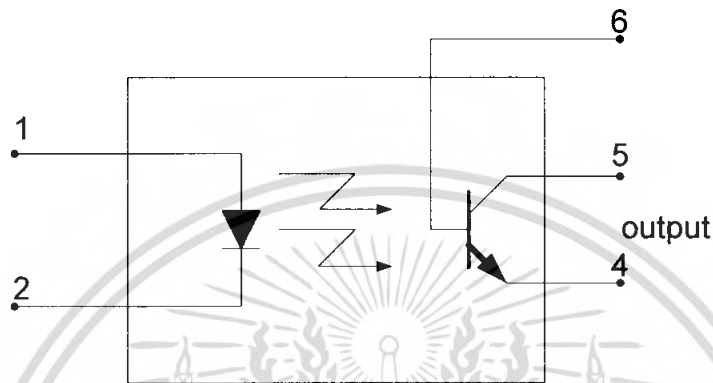


รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ของ MOSFET P- channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ทฤษฎีของออปโตคัปเปิลเลอร์

ไอซีออปโตคัปเปิลเลอร์ ซึ่งเป็นลักษณะของไอซี 6 ขาซึ่งภายในมี LED อยู่ทางด้านทิศทางเข้าเป็นตัวส่งแสงให้ไปตกกระทบที่ตัวรับแสง ซึ่งเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ทางด้านทิศทางออก โดยใช้แสงที่ส่งออกจาก LED เป็นเสมือนตัวกลางนำสัญญาณสั่งงานที่รับมาจากทิศทางเข้าส่งต่อไปยังทิศทางออก โดยไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดเชื่อมต่อกันเลย หรือไม่มีการเชื่อมโยงทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 วงจรออปโตไอโซเลท

ตำแหน่งของขาทิศทางขาเข้าส่วนใหญ่คือ ขา 1 กับขา 2 สำหรับทิศทางขาออกมักจะต่อใช้งานจากขา 4 กับขา 5 ในส่วนของทิศทางเข้ากับทิศทางออกนี้ไม่สามารถสลับที่กันได้ดังนั้นสัญญาณแสงที่ถูกส่งออกมา จึงมีเพียงทิศทางเดียวเท่านั้นจากสัญญาณขาเข้าไปยังสัญญาณขาออก

การทำงานของไอซี เราจะต้องทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า หรือสัญญาณเข้าไปยังทิศทางเข้า ซึ่งมี LED ต่ออยู่ภายในไอซีขา 1 กับขา 2 ให้ขั้วแรงดันไฟฟ้าถูกต้อง และพอเหมาะ กับ LED ที่จะรับได้ ไม่ควรจ่ายแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าสูงเกินไป เพราะจะทำให้ LED ภายในเสียหายได้

2.8 ทฤษฎีการควบคุม PID

2.8.1 วิธีการควบคุมแบบต่างๆ

การควบคุมแบบ P ในการควบคุมแบบนี้ ค่าสัญญาณทางออก ของการควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน กล่าวคือ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามาก สัญญาณทางออก ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลงสัญญาณทางออก ก็จะได้ค่าน้อยตามไปด้วย จึงเรียกความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ เรียกว่า อัตราขยายของการควบคุมแบบ P (Proportional Gain) โดยสามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (2.34)$$

$m(t)$ = ค่าสัญญาณทางออก ของการควบคุมแบบ P

K_c = อัตราขยายของการควบคุมแบบ P

\bar{m} = ค่าสัญญาณทางออก ของการควบคุมเมื่อความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์

$e(t)$ = ค่าความผิดพลาดของกระบวนการ

ในการควบคุมแบบ P นั้นจะทำให้เกิดการอิมิตัวของค่าความคลาดเคลื่อน คือ เมื่อสัญญาณทางออกสูง ถึง 100 % ขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนยังคงเพิ่มขึ้นไปอีก ค่าของสัญญาณทางออก จะไม่สามารถเพิ่มขึ้นตามได้ ในทำนองเดียวกันสัญญาณทางออก เมื่อค่าของสัญญาณทางออก มีค่าเท่ากับ 0 % ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนยังคงลดลงอีกค่าของ สัญญาณทางออก ก็ไม่สามารถลดลงได้ ซึ่งช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่สัญญาณทางออก มีค่าจาก 0% ถึง 100% เรียกว่า ช่วงการใช้งานของอัตราขยาย (Proportional Band) โดยค่านี้จะมีผลต่ออัตราขยายของการควบคุม กล่าวคือเมื่อช่วงการใช้งานของอัตราขยายมีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราขยายของการควบคุมจะลดลง เพราะว่า $K_p = 100/\text{ช่วงการใช้งานของอัตราขยาย}$ และเมื่ออัตราขยายของการควบคุมลดลงทำให้เกิด offset ในระบบมากขึ้น

การควบคุมแบบ I หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การควบคุมแบบ RESET โดยการควบคุมพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งการหาค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมแบบ I นั้นจะต้องหาพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาจากนั้นนำไปคูณกับค่าคงที่ที่เราเรียกว่า อัตราขยายของการควบคุมแบบ I (Integral Gain) เพื่อหาค่าของสัญญาณทางออก ตามสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$p(t) = \bar{p} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.35)$$

T_i = เวลาอินทิเกรต หรือเวลารีเซตซึ่งมีหน่วยเป็นเวลา และสามารถปรับค่าได้ตามความเหมาะสม

\bar{p} = ค่าสัญญาณทางออกของ ตัวควบคุมที่เวลา t มีค่าเป็นศูนย์

$p(t)$ = ค่าสัญญาณทางออกของตัวควบคุมแบบ I

$e(t)$ = ค่าความผิดพลาดของกระบวนการ

ผลของการควบคุม ด้วยการควบคุมชนิด I นี้จะไม่ทำให้เกิด ออฟเซต ขึ้นในระบบ และลดค่า Overshoot ของระบบลงได้แต่ถ้าในการควบคุมมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลงได้

การควบคุมแบบ D การควบคุมแบบนี้ ค่าสัญญาณทางออก ของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็น ศูนย์ได้ และค่าสัญญาณทางออก ก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น ได้เมื่อความคลาดเคลื่อนเกิดการ เปลี่ยนแปลง โดยการควบคุมในลักษณะนี้สามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$p(t) = \bar{p} + T_d \frac{de}{dt} \quad (2.36)$$

$p(t)$ = ค่าสัญญาณทางออก ของตัวควบคุมแบบ D

\bar{p} = ค่าสัญญาณทางออก ของตัวควบคุมแบบ D ณ เวลาศูนย์

T_d = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ D

$e(t)$ = ค่าความผิดพลาดของกระบวนการ

การควบคุมลักษณะนี้ เหมาะสำหรับกระบวนการที่มีเวลาหน่วงมากๆ เพราะสามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อน โดยการกระทำล่วงหน้าก่อนที่จะมีการกระทำเกิดขึ้นได้ จึงช่วยให้ผลตอบสนองของกระบวนการเร็วขึ้นแต่มีข้อเสีย คือ การควบคุมแบบนี้จะมีความไวต่อค่าความคลาดเคลื่อนมาก ทั้งโดยเฉพาะในกรณีที่มีค่า T_d หรือ K_d มีค่ามาก ซึ่งจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงได้ ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับกระบวนการที่มีค่าเวลาหน่วงเวลาน้อยๆ และกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เช่น ระบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้า หรือระบบการควบคุมการไหล โดยการควบคุมในลักษณะนี้ไม่สามารถนำไปใช้ได้อย่างโดดเด่นได้ เพราะว่าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์จะทำให้ ค่าสัญญาณทางออก ของตัวควบคุมเป็นศูนย์ไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแบบ PI ตามที่กล่าวมาแล้วว่าในการควบคุมแบบ P นั้นจะทำให้ มีออฟเซตเกิดขึ้น ซึ่งการจัดค่า ออฟเซต นี้ ทำได้โดยการเพิ่มการควบคุมแบบ I เข้าไป โดยจะมีสมการดังนี้

$$m(t) = \bar{m} + K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (3.37)$$

หรืออาจจะเขียนในรูปลาปลาซทรานส์ฟอร์มของสัญญาณทางเข้า ต่อ สัญญาณทางออก ได้ว่า

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

การควบคุมแบบ PI จะช่วยให้ค่าออฟเซต ที่ ณ สภาวะคงที่มีค่าเป็นศูนย์แล้วนั้น ยังช่วงลดค่า Overshoot และการแกว่ง ของระบบลงได้ แต่จะทำให้โรซไทม์ (rise time) และ เซ็ตติงไทม์ (setting time) เพิ่มขึ้นมาก



72040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 Micro Controller PSoC

PSoC Microcontroller เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ของค่าย Cypress Microcontroller โดยเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการประมวลผลข้อมูลแบบ 8 บิต เหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตทั่วไปแต่คุณสมบัติเด่นที่แตกต่างไปจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอื่นๆ ก็คือ PSoC MCU จะรวมเอาการออกแบบทั้งทางด้าน ดิจิตอล และ อนาล็อก มาไว้ด้วยกันทำให้การออกแบบที่ต้องมีการยุ่งเกี่ยวกันระหว่าง อุปกรณ์ทางดิจิตอล และ อนาล็อกสามารถทำได้โดยง่าย และสะดวกสบายยิ่งขึ้น อีกทั้งยังทำให้ขนาดของการออกแบบเล็กลงอีกด้วย โดยเฉพาะวงจรทางด้านอนาล็อก ซึ่งมักจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ อีกทั้งการทำงานของ PSoC ยังมีความคล่องตัวสูงทั้งเรื่องของแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชัน In-System Serial Programming (ISSP) ที่สามารถทำการ โปรแกรมซอร์สโค้ดที่ได้ออกแบบลงไป ในหน่วยความจำโปรแกรม (Flash Memory) ภายในตัวชิปได้ ซึ่งจะช่วยให้การพัฒนาโปรแกรมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ สะดวกสบายยิ่งขึ้น

2.9.1 จุดเด่นของ PSoC MCU เมื่อเทียบกับไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นๆ

UserModules:สามารถเลือกใช้ทรัพยากรของระบบได้ตามต้องการทั้งอนาล็อก และดิจิตอล จะไม่ถูกจำกัดด้วยโครงสร้างฮาร์ดแวร์เหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นๆ

API(Application Programming Interface) : สนับสนุนการพัฒนาโปรแกรมด้วยฟังก์ชัน API ช่วยให้ผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถเขียนออกแบบโปรแกรมได้โดยง่าย

ISRs (Interrupt Service Routines) สนับสนุน และรองรับการทำงานแบบอินเทอร์รัพท์

Interconnect device interface : สามารถทำการเชื่อมต่อสัญญาณๆ ได้อย่างอิสระ ไม่ถูกกำหนดตายตัวตามฮาร์ดแวร์ เหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นๆ

2.9.2 คุณสมบัติของ PSoC MCU ตระกูล CY8C27443

- สถาปัตยกรรม Harvard Architecture Processor
- ความเร็วของ M8C Processor สูงสุด 24 MHz
- 8x8 Multiply, 32-Bit Accumulate
- Low Power at High Speed
- ทำงานในช่วงแรงดัน 3.0 ถึง 5.25 V
- สามารถทำงานที่แรงดันต่ำสุดที่ 1.0 V โดยใช้วงจร Switch Mode Pump (SMP) ภายในชิป
- 12 Analog PSoC Blocks รองรับการใช้งานทางด้านอนาล็อก เช่น
 - ADCs ความละเอียดสูงสุดถึง 14 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

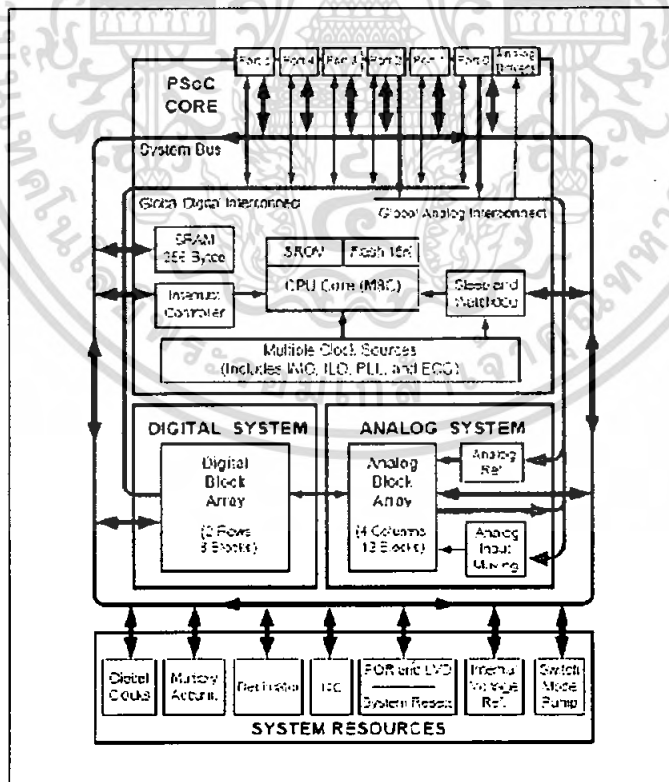
- DACs ความละเอียดสูงสุดถึง 9 บิต
- วงจรเกณฑ์การขยาย (Programmable Gain A)
- วงจรฟิลเตอร์ และ วงจรคอมพาราเตอร์ (Programmable Filters and Comparators)
- 8 Digital PSoC Blocks รองรับการใช้งานทางดิจิทัล
 - Timers, Counters และ PWMs ขนาด 8 ถึง 32 บิต
 - CRC และ PRS โมดูล
 - UARTs แบบ Full-Duplex สูงสุด 2 ช่อง
 - SPI โมดูล เป็นได้ทั้งแบบ Master และ Slave
 - ดิจิทัลบล็อกต่างๆสามารถเชื่อมต่อไปยังขาสัญญาณ GPIO ได้ทุกขาสัญญาณ
- สามารถกำหนดขนาดความถี่ของสัญญาณนาฬิกาภายใน ได้หลายระดับ
- สัญญาณนาฬิกาภายในขนาด 24/ 48 MHz ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 2\%$
- สามารถเลือกแหล่งกำเนิดสัญญาณ 24/48 MHz จากออสซิลเลเตอร์ 32 kHz ภายใน หรือภายนอกได้
- สามารถรับสัญญาณออสซิลเลเตอร์จากภายนอกได้สูงสุด 24 MHz
- มีแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายในให้กับ Watchdog และ Sleep
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 16K Byte สามารถ Erase/Write ได้ถึง 50,000 ครั้ง
- หน่วยความจำข้อมูล SRAM ขนาด 256 Byte
- ฟังก์ชันการโปรแกรมภายใน ISSP(In-System Serial Programming)
- สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูล Flash Memory เฉพาะบางส่วนได้
- สามารถตั้งค่าระบบป้องกันข้อมูลได้(Flash Security)
- หน่วยความจำ EEPROM (ใช้จาก Flash Memory)
- ขาสัญญาณ GPIO จำนวน 24 ขาสัญญาณ
- สามารถกำหนดคุณสมบัติของขาสัญญาณต่างๆได้ (GPIO Pin Configurations)
- GPIO สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 25mA
- สามารถกำหนด Drive Mode ของสัญญาณ GPIO ได้ เช่น Pull up, Pull down, High Z, Strong
- ขาสัญญาณอินพุตอนุลอกสูงสุด 12 ขาสัญญาณ(จากขาสัญญาณของ GPIO)
- ขาสัญญาณอนุลอกเอาพุตสูงสุด 4 ขาสัญญาณ(จากขาสัญญาณ GPIO) จ่ายกระแสได้ถึง 40mA
- สามารถกำหนดการอินเทอร์รัพท์ได้ทุกขาสัญญาณของ GPIO
- I2C โหมด Slave, Master c)lt Muiti-Master ความเร็วสูงสุด 400 kHz
- Watchdog และ Sleep Timerc และ สามารถตั้งค่าระดับการตรวจจับแรงดันต่ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า PSoC MUC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีคุณสมบัติที่ถือว่าครบถ้วนมาก ไม่ได้ด้อยไปกว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอื่น ๆ เลย บางทีอาจถูกมองว่าการที่มีคุณสมบัติหลาย ๆ อย่างเช่นนี้ จะทำให้การออกแบบเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยาก แต่สำหรับ PSoC MUC แล้ว กลับทำได้ไม่ยุ่งยากนักเนื่องจากใช้ซอฟต์แวร์ PSoC Designer ในการออกแบบ ซึ่งซอฟต์แวร์ดังกล่าวนี้จะมีการออกแบบเป็นลักษณะของ กราฟิก หรือ เป็นแบบวิซชวล (Visual) เช่น การเลือกใช้โมดูลต่าง ๆ หรือ การกำหนดค่า Configuration ต่าง ๆ ส่วนในการเขียนโปรแกรมก็จะเป็นลักษณะการใช้งาน ฟังก์ชัน (API : Application Programming Interface) ที่ PSoC Designer ได้จัดเตรียมไว้ให้แล้ว ทำให้ลดความยุ่งยากไปได้มากเลยทีเดียว

2.9.3 โครงสร้างสถาปัตยกรรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PSoC

การศึกษาและการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เกิดประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุด ผู้ใช้งานจำเป็นที่จะต้องทราบถึงองค์ประกอบและความสามารถภายในตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ PSoC มีรูปแบบโครงสร้างของระบบภายในดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ PSoC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4 ขาสัญญาณต่าง ๆ ของ Micro Controller PSoC

ขาสัญญาณของ PSoC มีลักษณะคล้ายกับ Micro Controller แบบอื่น ๆ คือมีทั้งขาสัญญาณทิศทางเข้าและทิศทางออก ซึ่งในบางขาอาจทำหน้าที่มากกว่าหนึ่งหน้าที่หน้าที่การทำงานของขาสัญญาณต่าง ๆ ของ PSoC สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 ต่อไปนี้

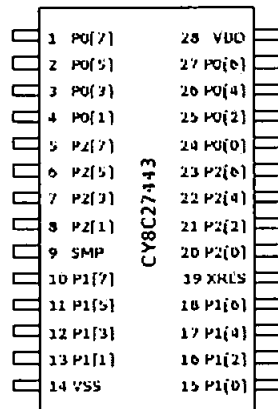
Pin No.	Type		Pin Name	Description
	Digital	Analog		
1	IO	I	PD[7]	Analog column mux input.
2	IO	IO	PD[5]	Analog column mux input and column output.
3	IO	IO	PD[3]	Analog column mux input and column output.
4	IO	I	PD[1]	Analog column mux input.
5	IO		P2[7]	
6	IO		P2[5]	
7	IO	I	P2[2]	Direct switched capacitor block input.
8	IO	I	P2[1]	Direct switched capacitor block input.
9		Power	SMP	Switch Mode Pump (SMP) connection to external components required.
10	IO		P1[7]	I2C Serial Clock (SCL)
11	IO		P1[5]	I2C Serial Data (SDA)
12	IO		P1[3]	
13	IO		P1[1]	Crystal Input (XTALIn), I2C Serial Clock (SCL)
14		Power	Vss	Ground connection.
15	IO		P1[0]	Crystal Output (XTALOut), I2C Serial Data (SDA)
16	IO		P1[2]	
17	IO		P1[4]	Optional External Clock Input (EXTCLK)
18	IO		P1[6]	
19		Input	XRES	Active high external reset with internal pull down.
20	IO	I	P2[0]	Direct switched capacitor block input.
21	IO	I	P2[2]	Direct switched capacitor block input.
22	IO		P2[4]	External Analog Ground (AGND)
23	IO		P2[6]	External Voltage Reference (VRef)
24	IO	I	PD[0]	Analog column mux input.
25	IO	IO	PD[2]	Analog column mux input and column output.
26	IO	IO	PD[4]	Analog column mux input and column output.
27	IO	I	PD[6]	Analog column mux input.
28		Power	Vcc	Supply voltage.

LEGEND: A = Analog, I = Input, and O = Output.

ตารางที่ 2.1 หน้าที่ขาสัญญาณต่างๆ ของ CY8C27443

จากตารางข้างต้นเป็นการกำหนดขาสัญญาณมาตรฐานของ Micro Controller PSoC ซึ่งในที่นี้ได้เลือกเบอร์ CY8C27443 มาใช้ในการศึกษาการทำงาน ซึ่งมีการจัดขา ดังต่อไปนี้ นอกจากการใช้งานขาพอร์ตต่าง ๆ เป็นพอร์ตทิศทางเข้าและทิศทางออกทั่วไปแล้ว ขาพอร์ตบางขา ยังมีหน้าที่เฉพาะอย่าง ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงตัวถัง และการวางตำแหน่งขาสัญญาณต่างๆของไอซี CY8C27443

VDD เป็นขาสำหรับรับไฟเลี้ยง ต่อกับไฟ 5 V

GND เป็นขากาวัดต่อกับไฟ 0 V

XRES เป็นขาจับสัญญาณรีเซ็ต เมื่อขานี้เป็นลอจิก “1” CPU จะถูกรีเซ็ต

PO[2]-PO[5] เป็นขาสำหรับรับ-ส่งสัญญาณ Analog

PO[6]-PO[7] เป็นขาสำหรับรับสัญญาณ Analog แต่ไม่สามารถส่งสัญญาณ Analog ได้

P1[0] เป็นขา XTALout ใช้สำหรับต่อกับ XTAL เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับ PSoC นอกจากนี้ยังเป็นขาจับ-ส่งข้อมูลแบบอนุกรมด้วย (ทั้ง PSI และ I²C)

P1[1] เป็นขา XTALin ใช้สำหรับต่อกับ XTAL เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับ PSoC นอกจากนี้ยังเป็นขาจับสัญญาณนาฬิกาสำหรับรับ-ส่งข้อมูลแบบอนุกรมด้วย (ทั้ง PSI และ I²C)

P1[4] เป็นขาจับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

P1[5] เป็นขาจับ-ส่งข้อมูลของ I²C ซึ่งเรียกว่าขา SDA (Serial Data)

P1[7] เป็นขาจับสัญญาณนาฬิกาในการรับ-ส่งข้อมูลของ I²C เรียกขานี้ว่า SCL (Serial Clock)

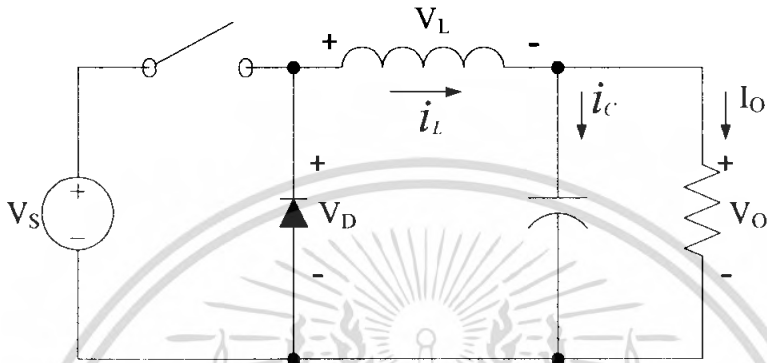
P2[0]-P2[3] เป็นขาจับสัญญาณ Analog แบบ Non-Multiplexed

P2[6] เป็นขาจับสัญญาณอ้างอิงจากภายนอก

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 การออกแบบวงจร Buck Converter



รูปที่ 3.1 วงจร Buck Converter

$$V_S = 24V$$

$$V_O = 10V$$

$$I_O = 3A$$

$$f_s = 40kHz$$

จากสมการ(2.1)

$$V_O = V_S \times D$$

$$D = \frac{V_O}{V_S} = \frac{10}{24} = 0.416 = 41.66\% \quad (3.1)$$

$$P_O = V_O \times I_O = 10 \times 3 = 30W = P_S \quad (3.2)$$

$$R = \frac{V_O}{I_O} = \frac{10}{3} = 3.33\Omega \quad (3.3)$$

$$t_{on} = DT = 0.416 \times 25\mu s = 10.4\mu s \quad (3.4)$$

จากสมการ(2.3)

$$V_L = V_S - V_O = 24 - 10 = 14V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ(2.17)

$$L_{\min} = \frac{(1-D) \times R}{2f} = \frac{(1-0.416) \times 3.33}{(2)(40\text{KHz})} = 24.3\mu\text{H}$$

กำหนด $L = 30\mu\text{H}$ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าทำงานได้ทั้งโหมด (CCM) และ (DCM)

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT = \left(\frac{24-10}{30\mu\text{H}} \right) (0.416)(25\mu\text{s}) = 4.853\text{A} \quad (3.5)$$

จากสมการ(2.11)

$$I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = 3 + \frac{4.853}{2} = 5.4265\text{A}$$

$$I_{\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = 3 - \frac{4.853}{2} = 0.5735\text{A}$$

$$I_{L,rms} = \sqrt{I_L^2 + \left(\frac{\Delta i_L / 2}{\sqrt{3}} \right)^2} = \sqrt{3^2 + \left(\frac{4.853/2}{\sqrt{3}} \right)^2} = 3.31\text{A} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} \quad (3.7)$$

แรงดันไฟฟ้า Ripple ที่ทางออกตามที่กำหนดเท่ากับ 1%

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} \times 100 = 1\% \quad (3.8)$$

จากสมการ(3.7)

$$C = \frac{1-0.416}{8 \times 30\mu\text{H} \times 0.01 \times (40\text{kHz})^2} = 152.08\mu\text{F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

3.2.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์

Inductance

Full Load Current (I_{FL})

Max peak Short Circuit Current (I_{SCpk})

Max Ripple current (ΔI_{pp})

Max Temperature Rise

Switching Frequency (f_s)

Mode การทำงานของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวเหนี่ยวนำ

3.2.2 เลือก Core Material

3.2.3 คำนวณ Max Flux Density และ Max Flux Swing

กรณี B_{sat} Limited

-กำหนดค่าของ B_{sat} ตามชนิดของ Core Material ที่เลือก

-คำนวณค่า ΔB_{max}

$$\Delta B_{max} = B_{max} \times \frac{\Delta I_{pp}}{I_{SCpk}} \quad (3.9)$$

$$\Delta B_{max,data} = \frac{\Delta B_{max}}{2} \quad (3.10)$$

-พิจารณา Core loss จากข้อมูลกราฟ Core loss ที่แปรตาม $\Delta B_{max,data}$ และ f_s

ถ้า Core loss $\ll 100 \text{ mw/cm}^2$ แสดงว่าเป็นกรณี B_{sat} Limited

ถ้า Core loss $\gg 100 \text{ mw/cm}^2$ แสดงว่าเป็นกรณี Core loss Limited

กรณี Core loss limited คำนวณ B_{max} ใหม่

-คำนวณ Thermal Core Resistance

กำหนดค่าของ R_T จาก Datasheet

คำนวณจากสมการ

$$R_T \approx 23(AP)^{-0.37} c/w \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-คำนวณ Temperature rise limit ($Loss_{Temp}$)

$$Loss_{Temp} = Temp / R_T \quad (3.12)$$

-เปรียบเทียบ $Loss_{Temp}$ กับ Absolute loss limit เลือก loss ที่มีค่าน้อย

-คำนวณ Core loss

$$Coreloss = \frac{Loss}{2}$$

-นำ Core loss ที่ได้ไปกำหนด $B_{max,data}$ จากข้อมูลกราฟ Core loss

-ลด $B_{max,data}$ (ΔB_{max}) ลดลง เพื่อให้ Core loss ลดลง

3.2.4 เลือกขนาดและรูปร่างของ Core

กรณี B_{sat} Limited

จาก สมการ

$$AP = \left(\frac{LI_{SCpk} I_{FL} 10^4}{420 KB_{max}} \right)^{1.315} \text{ cm}^4$$

กรณี Core loss Limited

จาก สมการ

$$AP = \left(\frac{L \Delta \text{Im} I_{FL} 10^4}{297 KB_{max}} \right)^{1.315} \text{ cm}^4$$

เลือกขนาดของ Core loss ที่มี AP มากกว่า AP ที่คำนวณ

3.2.5 คำนวณจำนวนรอบ (N)

จาก สมการ

$$N = \left(\frac{L(\mu H) I_{SCpk}}{B_{max} Ae(\text{cm}^2)} \right) 10^{-2}$$

ถ้า N ไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม

-ปัดขึ้น Winding loss เพิ่มขึ้น , Core loss ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ปัดลง Winding loss ลดลง , Core loss เพิ่มขึ้น

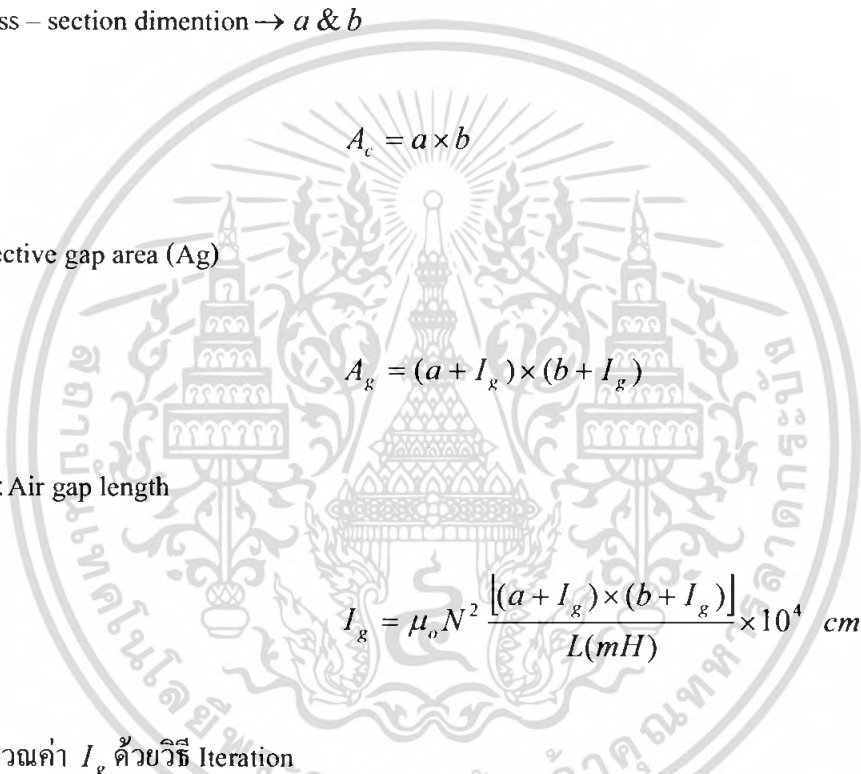
ถ้า N เป็นเลขจำนวนเต็ม คำนวณ ΔB_{\max} และ Core loss ใหม่

3.2.6 คำนวณ Gap length

$$I_g = \mu_o N \frac{Ag}{L(\mu H)} \times 10^4 \quad (3.13)$$

-Rectangular center-pole

Cross – section dimation $\rightarrow a \& b$



Effective gap area (A_g)

$$A_c = a \times b$$

$$A_g = (a + I_g) \times (b + I_g)$$

I_g : Air gap length

$$I_g = \mu_o N^2 \frac{[(a + I_g) \times (b + I_g)]}{L(mH)} \times 10^4 \text{ cm}^4 \quad (3.14)$$

คำนวณค่า I_g ด้วยวิธี Iteration

-Round center-pole

Rand center – pole with Diameter $\rightarrow D_{cp}$

$$A_c = \frac{\pi}{4} D_{cp}^2 \quad (3.15)$$

Effective gap area (A_g)

$$A_g = \frac{\pi}{4} (D_{cp} + I_g)^2 = A_c \left[1 + \frac{I_g}{D_{cp}} \right]^2 \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_g : Air gap length

$$I_g = \mu_o N^2 \frac{A_e}{L} \left(1 + \frac{I_g}{D_{cp}} \right)^2 \times 10^4 \text{ cm}^4 \quad (3.17)$$

คำนวณค่า I_g ด้วยวิธี Iteration

3.2.7 คำนวณขนาดของขดลวดตัวนำ และ Winding Resistance

*พิจารณาขนาดพื้นที่ตัวนำใช้งานจาก Winding data กับ I_{FL} ได้ลวดตัวนำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D_{FL}

*สรุปเลือกขนาดของลวดตัวนำจากตารางโดยใช้ข้อมูล $D_{FL}, n_p = k$ ได้ข้อมูลจากตารางคือเบอร์ของลวดตัวนำ

3.2.8 ตัวอย่าง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

3.2.8.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter)

$$L = 30 \mu H$$

$$I_{FL} = 3.31 A. \approx 3.3 A.$$

$$I_{sck} = 6.62 A. \approx 6.6 A.$$

$$I_{pp} = 6 A.$$

$$\text{Max Temperature Rise} = 30^\circ$$

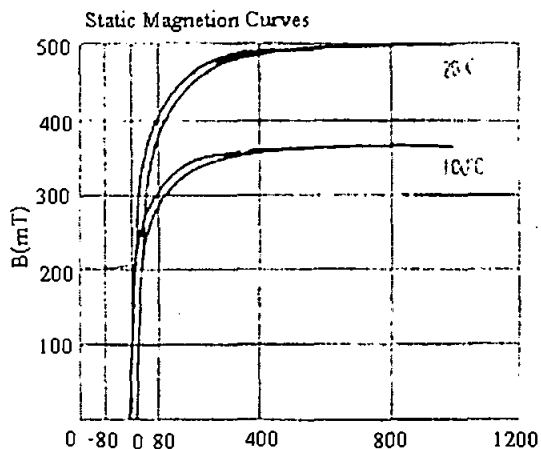
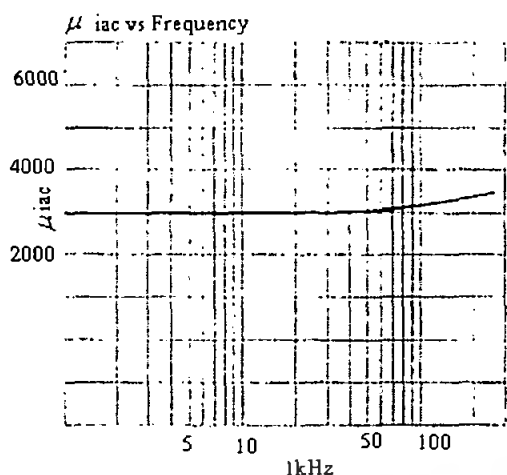
$$\text{Switching Freq} = 40 \text{ KHz}$$

Mode การทำงานเป็นแบบ Discontinuous และ Continuous

3.2.8.2 เลือก Core Material

เป็นแบบ EE Core เบอร์ EE25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กราฟระหว่าง B กับ H และ กราฟระหว่าง μ กับความถี่

จากสมการ(3.9)

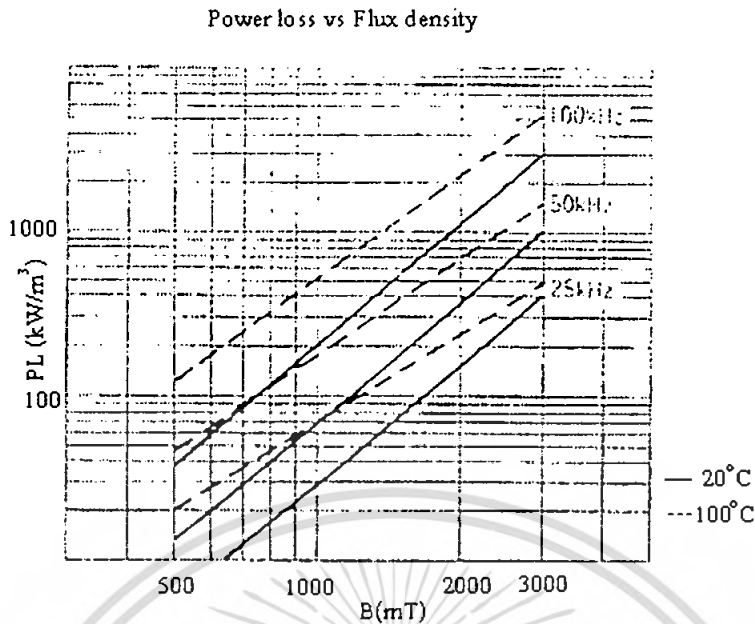
$$\begin{aligned} \Delta B_{\max} &= B_{\max} \times \frac{\Delta I_{pp}}{I_{scpk}} \\ &= 0.2 \times \frac{6}{6.6} \\ &= 0.1818T \end{aligned}$$

จากสมการ(3.10)

$$\begin{aligned} \Delta B_{\max,data} &= \frac{\Delta B_{\max}}{2} \\ &= \frac{0.1818T}{2} \end{aligned}$$

$$= 0.09T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กราฟระหว่าง B ความถี่ และ Power Loss

จากกราฟเป็นกรณี B_{sat} Limited

3.2.8.3 เลือกขนาด และ Shape ของ Core

$$AP = \left[\frac{LI_{pk} I_{FL} 10^4}{420KB_{max}} \right]^{1.315}$$

$$AP = \left[\frac{(30 \mu H)(6.6)(3.3)(10^4)}{420(0.7)(0.2)} \right]^{1.315}$$

$$= \left[\frac{6.534}{58.8} \right]^{1.315} = 0.0556 \text{ cm}^4$$

3.2.8.4 จำนวนจํานวนรอบ (N)

$$N = \left[\frac{L(\mu H) I_{scpk} 10^{-2}}{B_{max} A_e (\text{cm}^2)} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{(30)(6.6) \times 10^{-2}}{(0.2)(0.455)}$$

$$= 21.75 \text{ รอบ}$$

3.2.8.5 คำนวณ Gap length

$$I_g = \mu_o N^2 \frac{A_g}{L(\mu H)} \times 10^4 \quad \text{cm}^4$$

$$= (4\pi \times 10^{-7})(21.75)^2 \left[\frac{0.422}{30} \right] \times 10^4$$

$$= 0.0836 \text{ cm. หรือ } 0.836 \text{ mm.}$$

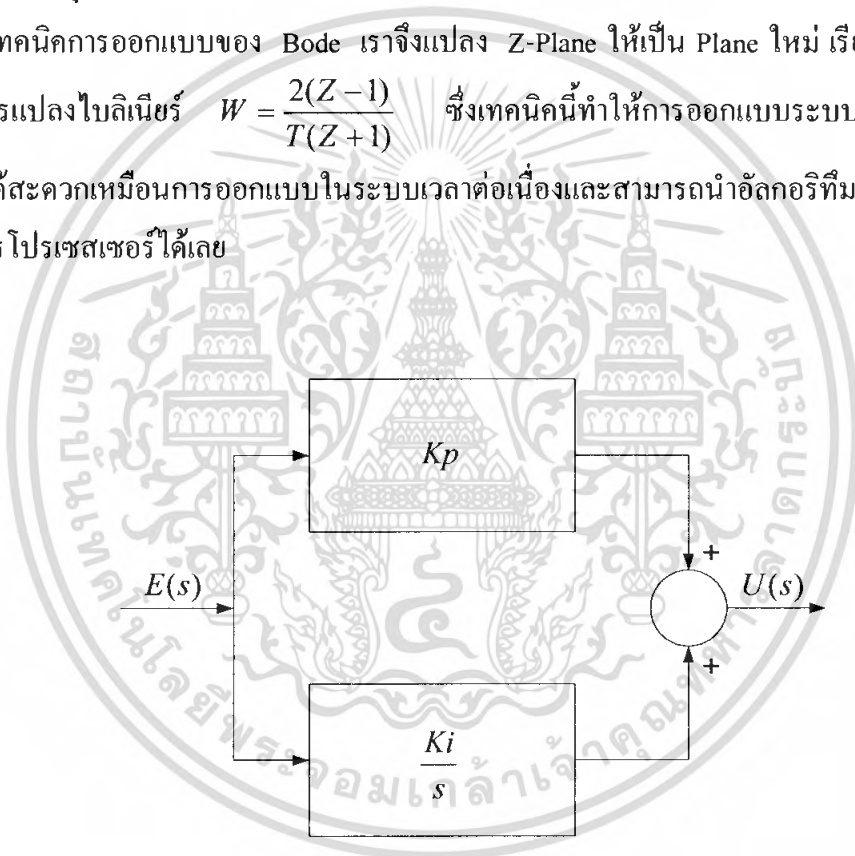
3.2.8.6 คำนวณขนาดของลวดตัวนำและ Winding Resistance

นำค่ากระแสไฟฟ้าไปเลือก Winding Data ซึ่งจากข้อกำหนดของวงจร = 3.3 A จึงเลือกลวดเบอร์ 19 แต่เนื่องจากลวดมีขนาดใหญ่ แต่ Bobbin มีขนาดเล็กจึงเปลี่ยนมาใช้ลวดเบอร์ 23 แทน และใช้การเทคนิคพันลวด 3 เส้นคู่ขนานกันไป

3.3 การออกแบบระบบควบคุมดิจิทัล

การออกแบบระบบควบคุมทางดิจิทัลกระทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีแรก ทำการออกแบบในระบบเวลาต่อเนื่อง แล้วแปลงจากอนุกรมไปสู่อินพุตโดเมนดิจิทัล และอีกวิธีหนึ่ง ทำการออกแบบระบบควบคุมในโดเมนดิจิทัลโดยตรงเลย สำหรับวิธีหลังนี้โดยทั่วๆ ไปจะอยู่ในรูปของ $Z = e^{sT}$ อีกทั้งเทคนิคการออกแบบใน โดเมนความถี่ (S-Plane) ที่ใช้ในระบบเวลาต่อเนื่อง ก็จะนำมาใช้กับ Z-Plane ได้ยาก วิธีการแก้ไขก็คือต้องทำการแปลง Z-Plane ให้เป็น Plane ใหม่ เรียกว่า W-Plane ก็จะได้ความสะดวกสบายในการออกแบบกลับคืนมา อย่างไรก็ตาม W-transform ก็ยังทำให้เกิดการเพี้ยนทางความถี่ได้ จึงต้องอาศัยการทดสอบปรับแต่งพารามิเตอร์ในกระบวนการออกแบบอีกด้วยเพื่อให้ได้อัลกอริทึมควบคุมระบบ $D(Z)$ ตามต้องการ

ใช้เทคนิคการออกแบบของ Bode เราจึงแปลง Z-Plane ให้เป็น Plane ใหม่ เรียก W-Plane โดยอาศัยการแปลงไบลิเนียร์ $W = \frac{2(Z-1)}{T(Z+1)}$ ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้การออกแบบระบบควบคุมทางดิจิทัลทำได้สะดวกเหมือนการออกแบบในระบบเวลาต่อเนื่องและสามารถนำอัลกอริทึมที่หาได้ไปใช้กับ ไมโคร โปรเซสเซอร์ได้เลย



รูปที่ 3.4 ตัวควบคุม PI ต่อเนื่อง

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม PI คือ

$$D(s) = Kp + \frac{Ki}{s} = \frac{Kps + Ki}{s} = \frac{U(Z)}{E(Z)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะนำหลักการของการควบคุม PI แบบต่อเนื่อง ขยายออกไปใช้กับแบบดิสครีตได้ ก่อนอื่นเราจะหาทรานส์ฟอร์มฟังก์ชันของการควบคุม PI ดิสครีต ส่วน Proportional gain ยังคงใช้ค่า K_p ส่วน Integration ใช้การประมาณแบบ trapezoidal ให้ $u(t)$ เป็นอินทิกรัลของ $e(t)$ ดังนั้นค่าของอินทิกรัลที่ $t = (K + 1)T$ คือ

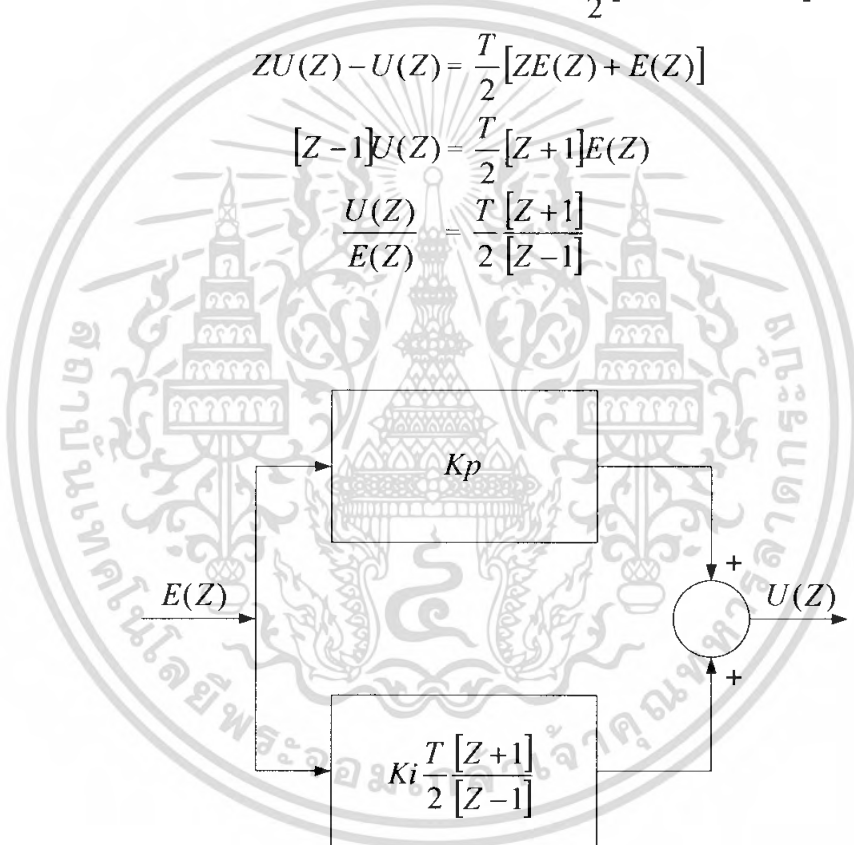
$$\begin{aligned} u[(K + 1)T] &= u[KT] + \int_{KT}^{(K+1)T} e(\tau) d\tau \\ &= u[KT] + \frac{T}{2} \{e[(K + 1)T] + e(KT)\} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } ZU(Z) = U(Z) + \frac{T}{2} [ZE(Z) + E(Z)]$$

$$ZU(Z) - U(Z) = \frac{T}{2} [ZE(Z) + E(Z)]$$

$$[Z - 1]U(Z) = \frac{T}{2} [Z + 1]E(Z)$$

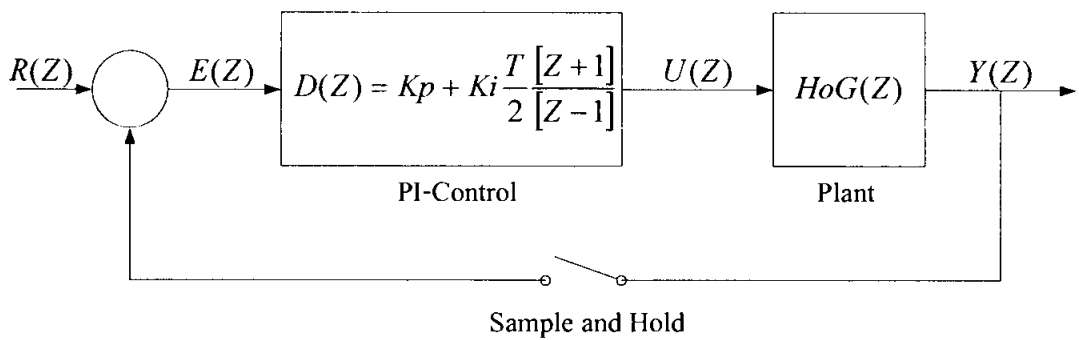
$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{T}{2} \frac{[Z + 1]}{[Z - 1]}$$



รูปที่ 3.5 แผนผังบล็อกของตัวควบคุมดิจิทัล PI

การออกแบบการควบคุม PI ก็คือการหาค่า K_p , K_i ทำให้ระบบทำงานได้ตรงตามข้อกำหนดและวิธี Bode Plot จากระบบต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการออกแบบ PI ดิสครีตได้ เพราะ PI ดิสครีตคือ กรณีเฉพาะของ Phase Lag compensator ต่อไปนี้จะแสดงวิธีการออกแบบเพื่อให้ได้ $\phi_s =$ Phase margin ที่กำหนดพิจารณาจากระบบควบคุมดิจิทัลดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ระบบควบคุมพร้อมด้วยการควบคุมดิจิทัล PI

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของการควบคุม PI ในระนาบ $W = \frac{2(Z-1)}{T(Z+1)}$ ลงใน $D(Z)$ ได้

$$D(W) = \frac{U(W)}{E(W)} = KP + \frac{Ki}{W}$$

$$D(jv) = KP + \frac{Ki}{jv}$$

$$= KP + \frac{Ki}{jv} \cdot \frac{jv}{jv}$$

$$\text{ดังนั้น } D(jv) = KP - j \frac{Ki}{v} \quad (3.18)$$

$$\text{จาก } a + jb = |r|(\cos\theta + j\sin\theta)$$

$$\text{ได้ } = |D(jv)|(\cos\theta + j\sin\theta)$$

$$= |D(jv)|\cos\theta + j|D(jv)|\sin\theta \quad (3.19)$$

ปัญหาการออกแบบ คือ เลือก $D(W)$ เพื่อให้ได้

$$D(jv)HoG(jv) = 1 \angle (180^\circ + \phi_s)$$

ϕ_s = Phase margin ที่กำหนด ณ ความถี่ gain cross-over V_s ดังนั้น

$$\angle D(jv_c) + \angle HoG(jv_c) = 180^\circ + \phi_s$$

$$\text{หรือ } \angle D(jv_c) = \theta = 180^\circ + \phi_s - \angle HoG(jv_c) \quad (3.20)$$

$$\text{และ } |D(jv_c)| = \frac{1}{|HoG(jv_c)|}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก(3.18) และ (3.19)เปรียบเทียบสมการทั้งสองจะได้

$$Kp = \frac{\cos \theta}{|HoG(jv_c)|} \quad (3.21)$$

$$Ki = -v_c \frac{\sin \theta}{|HoG(jv_c)|} \quad (3.22)$$

สมการ (3.21) และ (3.22) เป็นสมการสำหรับออกแบบการควบคุมดิจิทัล PI ในระนาบ W เมื่อได้ออกแบบหาค่า Kp , Ki เรียบร้อยแล้ว เราจะได้การควบคุม PI ดังนี้

$$\text{จาก } D(W) = Kp + \frac{Ki}{W}$$

และเมื่อใช้ $W = \frac{2}{T} \frac{[Z-1]}{[Z+1]}$ จะได้ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของเครื่องควบคุมดิจิทัล PI

$$D(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)} = Kp + \frac{TKi}{2} \frac{[Z+1]}{[Z-1]}$$

และนำทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้ไป แก้เป็นสมการผลต่างดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{U(Z)}{E(Z)} &= \frac{2Kp[Z-1] + TKi[Z+1]}{2[Z-1]} \\ &= \frac{2KpZ - 2Kp + TKiZ + TKi}{2[Z-1]} \\ &= \frac{Z\left(Kp + \frac{TKi}{2}\right) + \left(\frac{TKi}{2} - Kp\right)}{[Z-1]} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$ZU(Z) - U(Z) = \left\{ Z\left(Kp + \frac{TKi}{2}\right) + \left(\frac{TKi}{2} - Kp\right) \right\} E(Z)$$

$$ZU(Z) = U(Z) + \left(Kp + \frac{TKi}{2}\right)ZE(Z) + \left(\frac{TKi}{2} - Kp\right)E(Z)$$

$$U(Z) = Z^{-1}U(Z) + \left(Kp + \frac{TKi}{2}\right)E(Z) + \left(\frac{TKi}{2} - Kp\right)E(Z)Z^{-1}$$

จาก Z -transform กำหนดโดย

$$Z^{-1}\{F(Z)\} = f(n)$$

$$Z^{-1}\{Z^{-m}F(Z)\} = f(n-m)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้
$$U(n) = u(n-1) + \left(\frac{TKi}{2} - Kp\right)e(n-1) + \left(Kp + \frac{TKi}{2}\right)e(n) \quad (3.24)$$

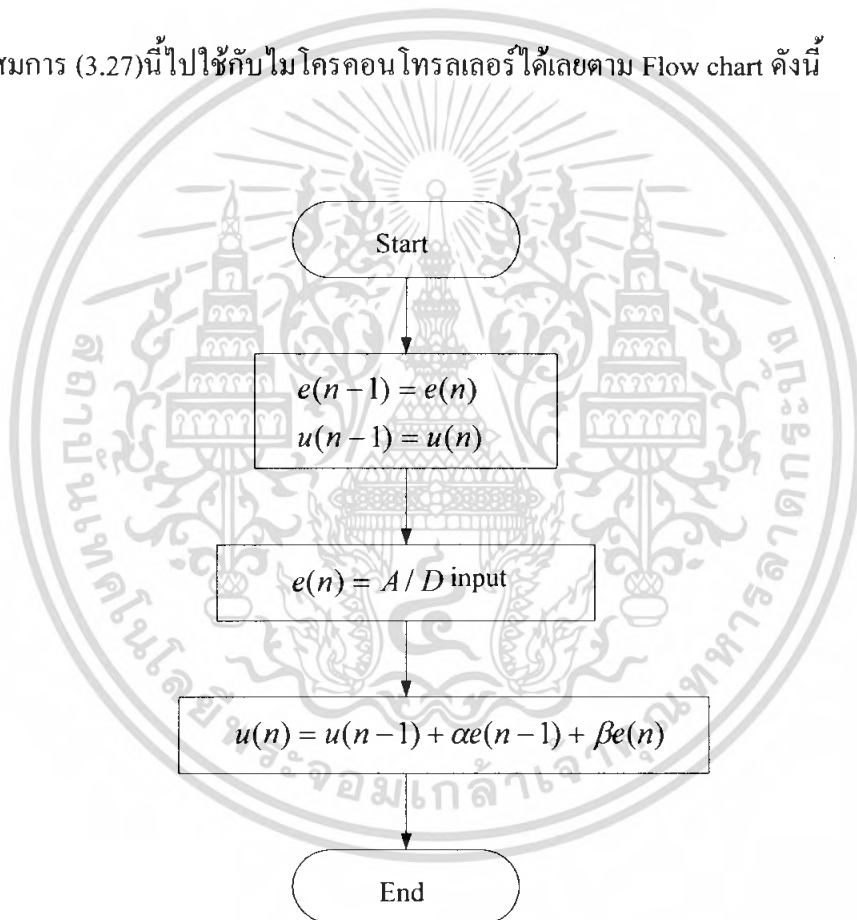
และกำหนด
$$\alpha = \left(\frac{TKi}{2} - Kp\right) \quad (3.25)$$

$$\beta = \left(Kp + \frac{TKi}{2}\right) \quad (3.26)$$

นำสมการ (3.25) , (3.26) ไปแทนในสมการ (3.24) จะได้

$$u(n) = u(n-1) + \alpha e(n-1) + \beta e(n) \quad (3.27)$$

สามารถนำสมการ (3.27) นี้ไปใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตาม Flow chart ดังนี้



รูปที่ 3.7 การทำงานของเครื่องควบคุมดิจิทัล PI

เมื่อ α, β, e และ u เป็นค่าตัวแปรที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย e และ u เป็นตัวแปรแบบอเรียซ์ดังนี้

กำหนดให้ $e(n) = e[1]$ ตัวแปร e แบบอเรียซ์ช่องที่ 1 หมายถึงค่าปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$e(n-1) = e[2]$ ตัวแปร e แบบอเรียซช่องที่ 2 หมายถึงค่าอดีตที่ผ่านมาแล้วใน 1 เวลา

$u(n) = u[1]$ ตัวแปร u แบบอเรียซช่องที่ 1 หมายถึงค่าปัจจุบัน

$u(n-1) = u[2]$ ตัวแปร u แบบอเรียซช่องที่ 2 หมายถึงค่าอดีตที่ผ่านมาแล้วในเวลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การใช้งานโปรแกรม PSoC Designer

3.4.1 User Module Selection View

หน้าต่าง User Module Selection View จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ ดังนี้



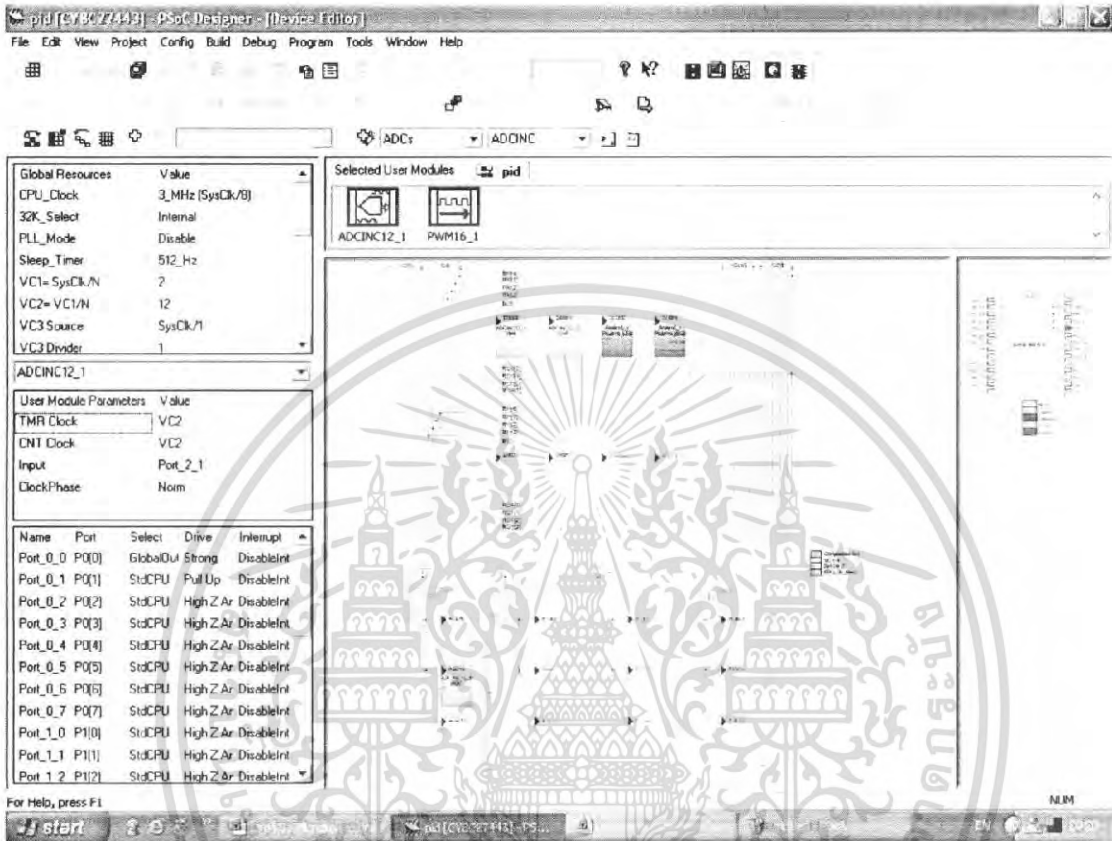
รูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่าง User Module Selection View

โดยจะแสดง User Module ที่ได้เลือกเข้ามาใช้ภายใน โปรเจคนี้ และบอกถึงทรัพยากรที่ได้ใช้ไป คือในที่นี้ใช้ Digital Blocks 4 Blocks และ Analog Blocks 1 Blocks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 Interconnect View

หน้าต่าง Interconnect View จะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆดังนี้



รูปที่ 3.9 แสดงหน้าต่าง Interconnect View

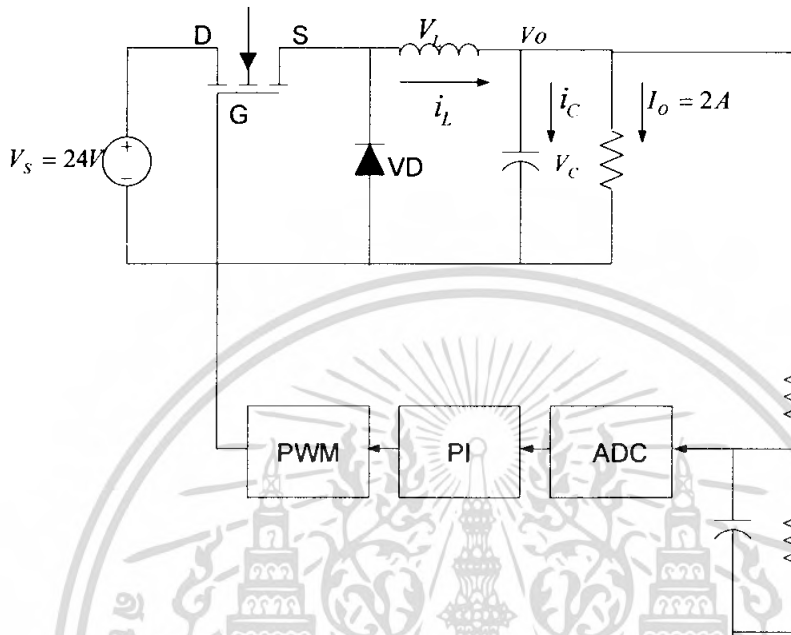
เป็นส่วนที่ใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ Microcontroller เลือกใช้สัญญาณ Clock ที่ 1 MHz เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับ Module ของ ADC และเลือกใช้ Clock ที่ 12 MHz เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับ Module ของ PWM

โดยได้เลือกใช้ Port0_0 เป็น Port ที่สร้างสัญญาณ PWM ที่มีคาบเวลา (T) เท่ากับ $25 \mu\text{s}$ และ Port2_2 เป็น Port ที่รับค่า Input ของ ADC สามารถดูโปรแกรมการทำงานได้จากภาคผนวก

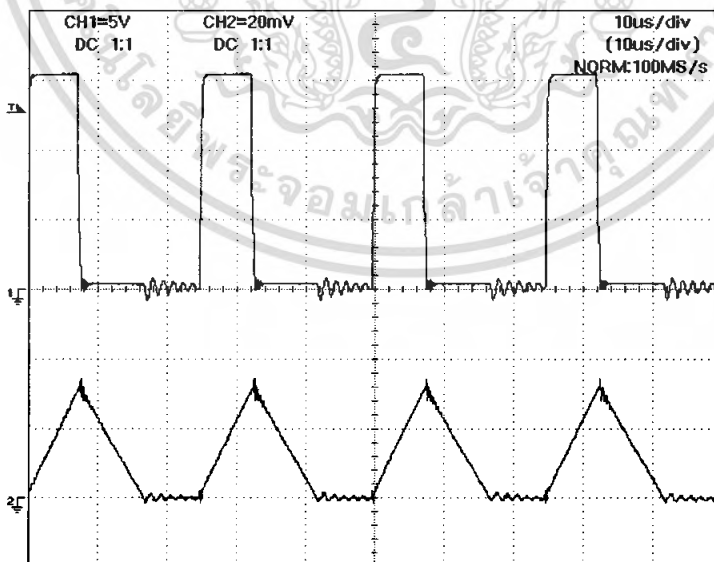
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

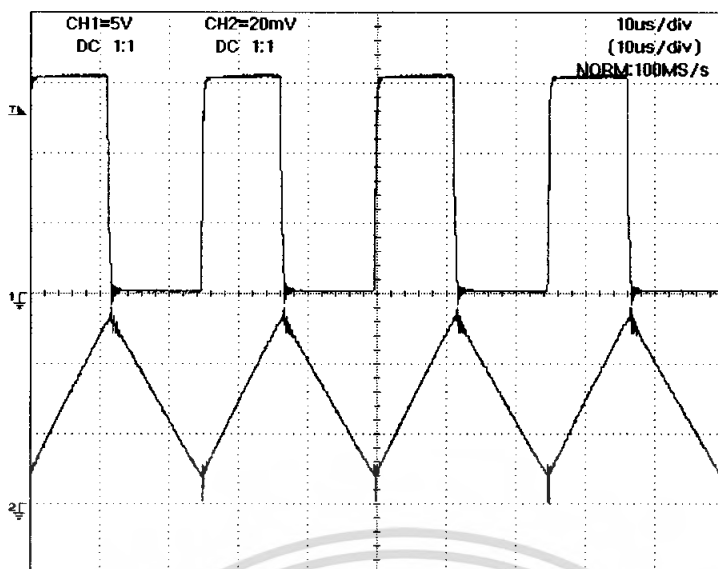


รูปที่ 4.1 วงจร Buck Converter และ ชุดควบคุม

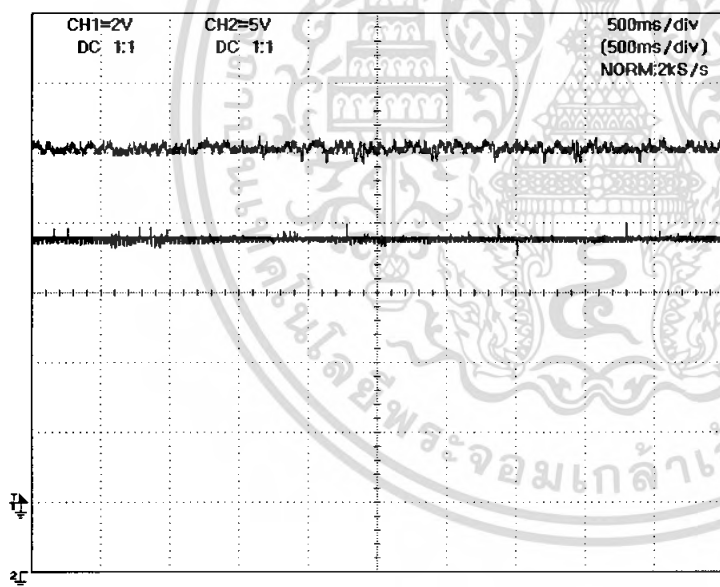


รูปที่ 4.2 กระแสไฟฟ้ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ กับ V_{GS} ของ MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกับ V_{GS} ของ MOSFET

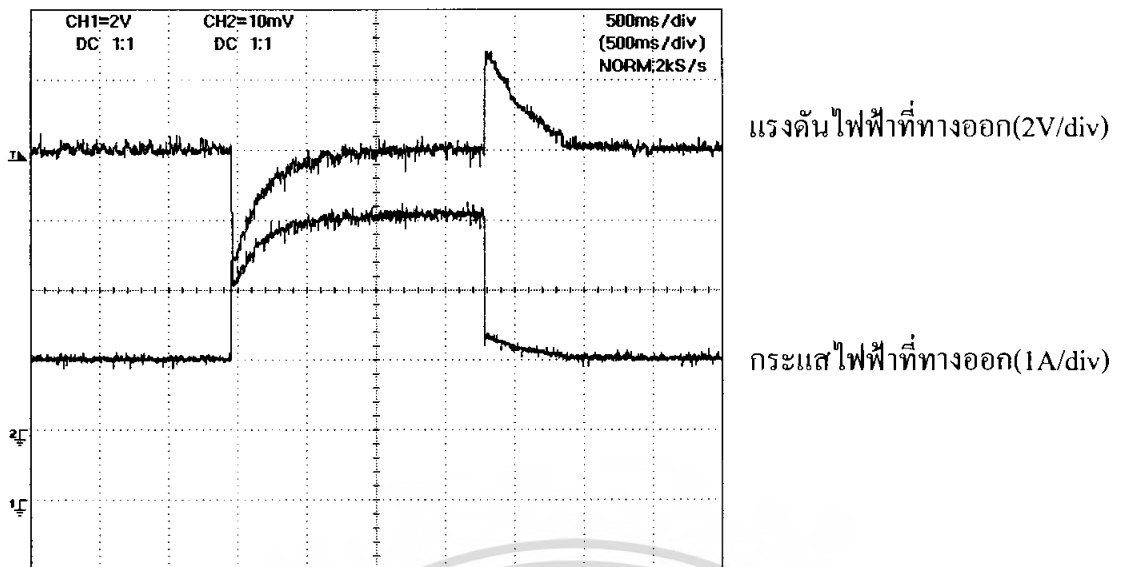


แรงดันไฟฟ้าที่ทางออก(2V/div)

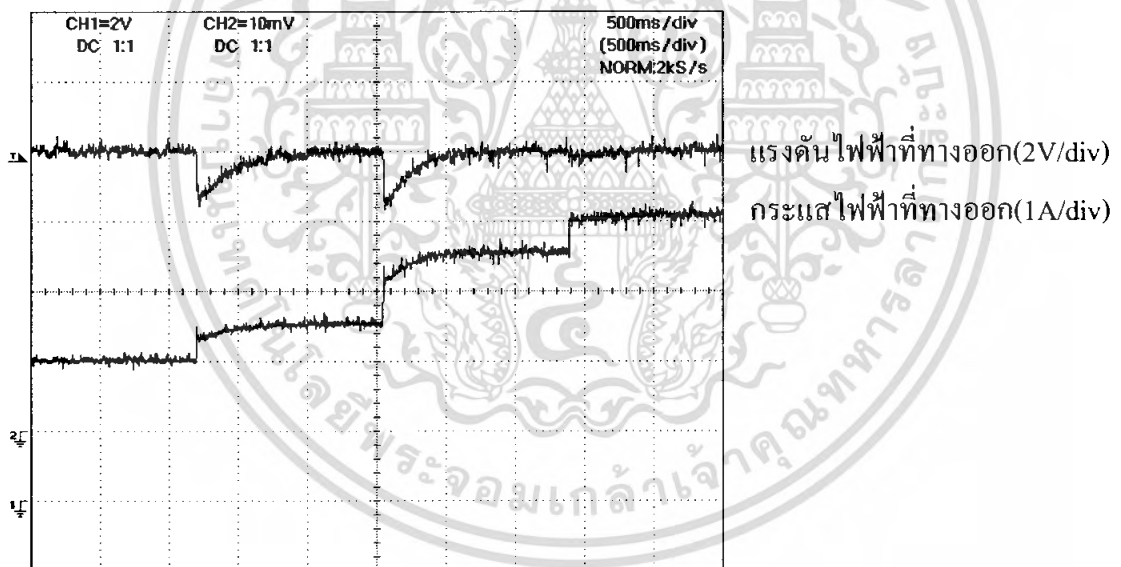
แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า(5V/div)

รูปที่4.4 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้ามีขนาด 24 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

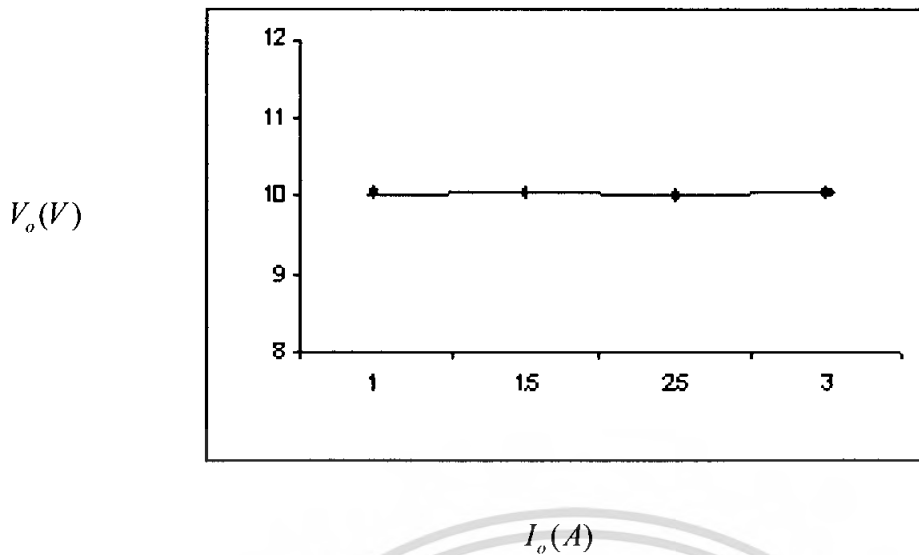


รูปที่4.5 แรงดัน ไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก(1A ~ 3A)

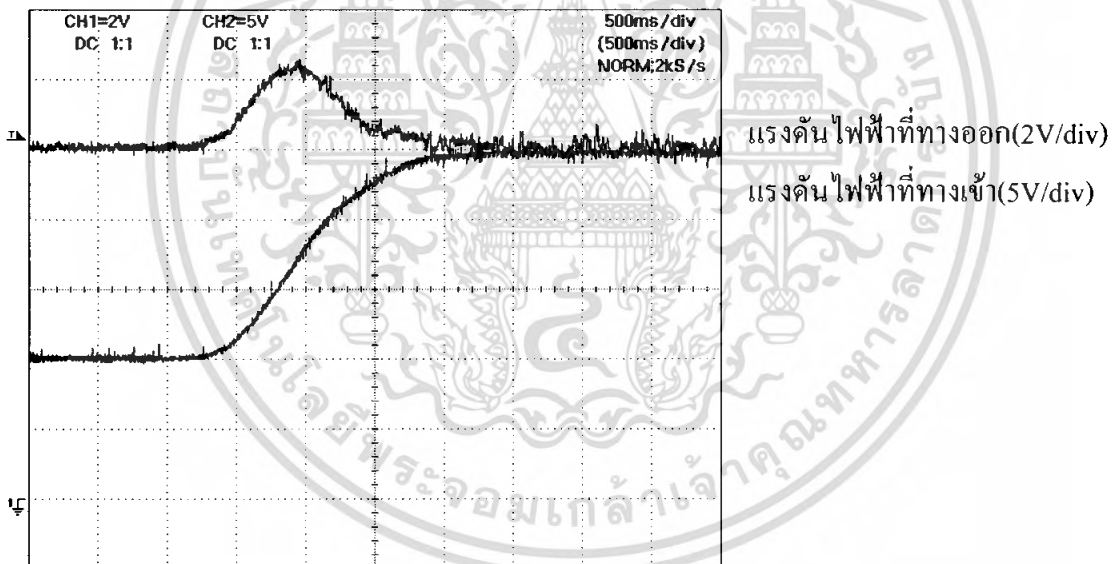


รูปที่4.6 แรงดัน ไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก(1A ~ 3A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

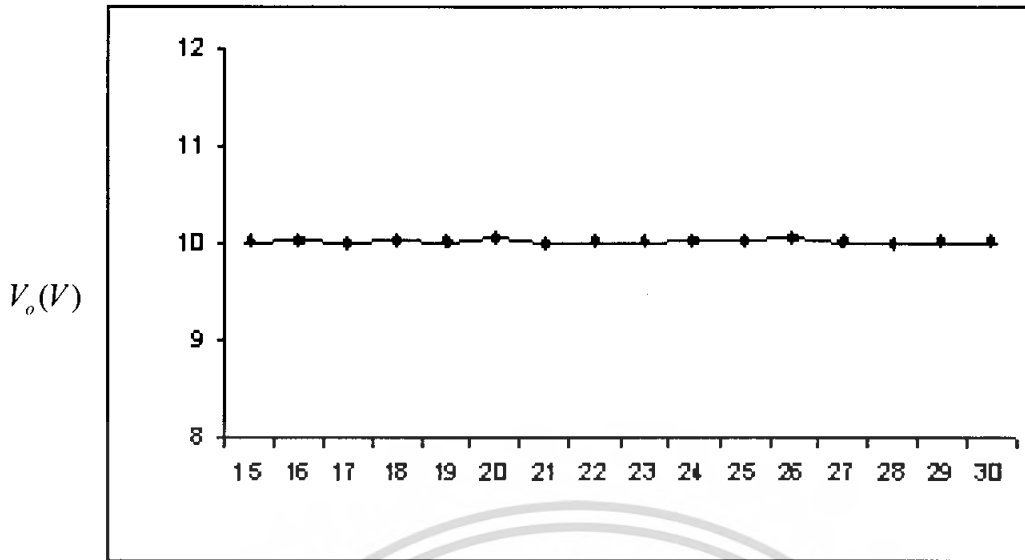


รูปที่ 4.7 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ทางออก (1A ~ 3A)

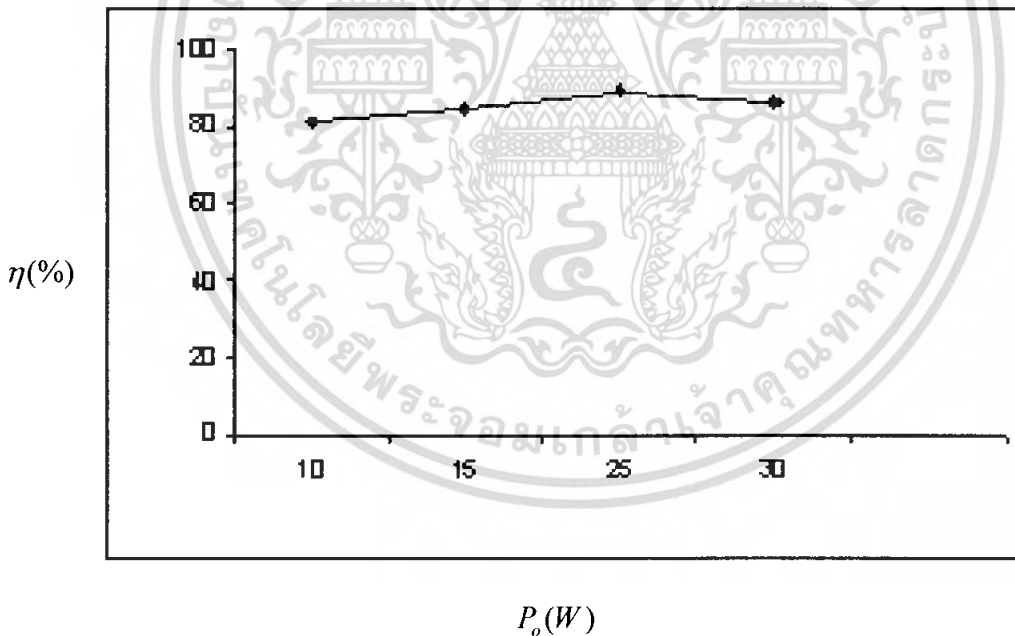


รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (15V ~ 30V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า (15V ~ 30V)



รูปที่ 4.10 กราฟของประสิทธิภาพเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แสดงถึงการศึกษาการทำงาน การออกแบบ และการสร้างวงจร Buck Converter ชนิด Closed Loop ที่มีแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้า 15V ~ 30V โดยมีแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก 10V และ กระแสไฟฟ้าที่ทางออกสูงสุด 3A วงจรทำงานแบบ Continuous Current Mode และ Discontinuous Current Mode โดยมี Switching Frequency 40 kHz ใช้การควบคุมแบบ Digital Control จาก Micro Controller ตระกูล PSoC ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ แสดงถึงความสามารถของการใช้ความรู้ที่ได้ศึกษามา นำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างดียิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel W. Hart, **Introduction to Power Electronics**, Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall International, c1997.
- [2] H.W. Whittington, B.W. Flynna and D.E. Macpherson. **Switched Mode Power Supplies Design and Construction**. Research Studies Peass Ltd. 1992.
- [3] ก็นตติชา กิตติพิรชล. **การออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์**
วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547.
- [4] กรชัย รัตนบุรี, กิตติพงษ์ ดอกบัว. **การควบคุมแรงดันไฟฟ้าสำหรับ คีชี-คีชี คอนเวอร์เตอร์**
ปริญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2548.
- [5] วีรเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ชาริธีรเศรษฐ์. **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. กรุงเทพมหานคร. ห้างหุ้นส่วนจำกัด
วี.เจ. พรินติ้ง. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ของวงจร Buck Converter ที่ใช้ในการทดลอง

รูป ของบอร์ดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

```
//-----  
// C main line  
//-----  
  
#include <m8c.h> // part specific constants and macros  
#include "PSoCAPI.h" // PSoC API definitions for all User Modules  
#include <stdlib.h>  
#include <delay.h>  
#include <ioport.h>  
  
#define Ts 0.001  
  
int nADCdata;  
float adc;  
float Pv;  
float e_new;  
float e_old;  
float u;  
float Kp=31;  
float Ki=70;  
int Sp=150;  
float a,b,c;  
  
void ADC_Read(void)  
{  
    if(ADCINC12_1_flsData())  
    {  
        nADCdata=ADCINC12_1_iGetData();  
        nADCdata += 0x0800;  
        ADCINC12_1_ClearFlag();  
        Pv=(nADCdata*0.07326);  
    }  
}  
  
void PID_control(void)  
{  
    e_new = (Sp-Pv);  
    a=((Ts*Ki)/2)-Kp;  
    b=Kp+((Ts*Ki)/2);  
    u=c+(a*e_old)+(b*e_new);  
    e_old=e_new;  
    c=u;  
    PWM16_1_WritePulseWidth(u);  
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void PWM_Data(void)
{
    PWM16_1_Start();
    PWM16_1_WritePeriod(300);
    PWM16_1_WritePulseWidth(125);
}

void Enable_interrupt(void)
{
    M8C_EnableGInt;
}

void main()
{
    ADCINC12_1_Start(3);
    ADCINC12_1_GetSamples(0);
    Enable_interrupt();
    PWM_Data();

    while(1)
    {
        ADC_Read();
        PID_control();
    }
}

```



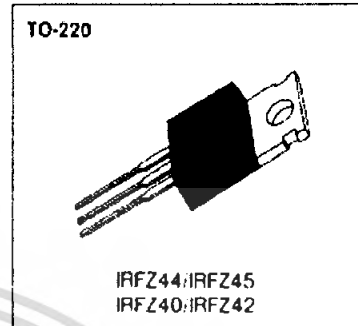
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFZ44/45 IRFZ40/42

N-CHANNEL POWER MOSFETS

FEATURES

- Lower $R_{DS(on)}$
- Improved inductive ruggedness
- Fast switching times
- Rugged polysilicon gate cell structure
- Lower input capacitance
- Extended safe operating area
- Improved high temperature reliability



PRODUCT SUMMARY

Part Number	V_{DS}	$R_{DS(on)}$	I_D
IRFZ44	60V	0.028 Ω	35A
IRFZ45	60V	0.035 Ω	35A
IRFZ40	50V	0.028 Ω	35A
IRFZ42	50V	0.035 Ω	35A

* Current limited by wire & pin diameter

MAXIMUM RATINGS

Characteristic	Symbol	IRFZ44	IRFZ45	IRFZ40	IRFZ42	Unit
Drain-Source Voltage (1)	V_{DS}	60		50		Vdc
Drain-Gate Voltage ($R_{GS}=1\text{ M}\Omega \times 1$)	V_{DGS}	60		50		Vdc
Gate-Source Voltage	V_{GS}		± 20			Vdc
Continuous Drain Current $T_C=25^\circ\text{C}$	I_D	35	35	35	35	Adc
Continuous Drain Current $T_C=100^\circ\text{C}$	I_D	35	33	35	33	Adc
Drain Current—Pulsed (3)	I_{DM}	210	190	210	190	Adc
Gate Current—Pulsed	I_{GM}		± 1.5			Adc
Single Pulsed Avalanche Energy (4)	E_{AS}		53			mJ
Avalanche Current	I_{AS}		35			A
Total Power Dissipation at $T_C=25^\circ\text{C}$	P_T		150			Watts
Derate above 25°C			1.2			W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}		-55 to 175°			$^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temp. for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5 seconds	T_L		300			$^\circ\text{C}$

Notes: (1) $T_C=25^\circ\text{C}$ to 175°C

(2) Pulse test. Pulse width $< 300\mu\text{s}$. Duty Cycle $< 2\%$

(3) Repetitive rating. Pulse with limited by max. junction temperature

(4) $L=50\mu\text{H}$. $V_{DS}=25\text{V}$. $R_G=25\Omega$. Starting $T_J=25^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFZ44/45 IRFZ40/42

N-CHANNEL POWER MOSFETS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_C=25°C unless otherwise specified)

Symbol	Characteristic	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
BV _{DSS}	Drain-Source Breakdown Voltage IRFZ44/45 IRFZ40/42	60 50	— —	— —	V	V _{GS} =0V, I _D =250μA
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} =V _{GS} , I _D =250μA
I _{GSS}	Gate-Source Leakage Forward	—	—	100	nA	V _{GS} =20V
I _{GSS}	Gate-Source Leakage Reverse	—	—	-100	nA	V _{GS} =-20V
I _{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	—	—	250 1000	μA	V _{DS} =Max. Rating, V _{GS} =0V V _{GS} =0.8Max. Rating, V _{GS} =0V, T _C =150°C
I _{D(on)}	On-State Drain-Source Current (2)	35	—	—	A	V _{DS} ≥1.2V, V _{GS} =10V
R _{DS(on)}	Static Drain-Source On-State Resistance	—	—	0.028 0.035	Ω	IRFZ44/40 IRFZ45/42 V _{GS} =10V, I _D =33A
g _{fs}	Forward Transconductance (2)	15	—	—	Ω	V _{DS} ≥50V, I _D =33A
C _{iss}	Input Capacitance	—	2450	—	pF	V _{GS} =0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	740	—	pF	V _{DS} =25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	360	—	pF	f=1.0MHz
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	—	32	ns	V _{DD} =0.5 BV _{DSS} , I _D =52A, Z _θ =9.1Ω (MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature)
t _r	Rise Time	—	—	210	ns	
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	—	75	ns	
t _f	Fall Time	—	—	130	ns	
Q _g	Total Gate Charge (Gate-Source Pulse Gate-Drain)	—	—	100	nC	V _{GS} =10V, I _D =52A, V _{DS} =0.8Max. Rating (Gate charge is essentially independent of operating temperature)
Q _{gs}	Gate-Source Charge	—	—	21	nC	
Q _{gd}	Gate-Drain ("Miller") Charge	—	—	58	nC	

THERMAL RESISTANCE

R _{thJC}	Junction-to-Case	MAX	1.0	K/W	
R _{thCS}	Case-to-Sink	TYP	0.5	K/W	Mounting surface flat smooth, and greased
R _{thJA}	Junction-to-Ambient	MAX	80	K/W	Free Air Operation

Notes: (1) T_J=25°C to 175°C

(2) Pulse test Pulse width≤300μs, Duty Cycle≤2%


(3) Repetitive rating Pulse width limited by max junction temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

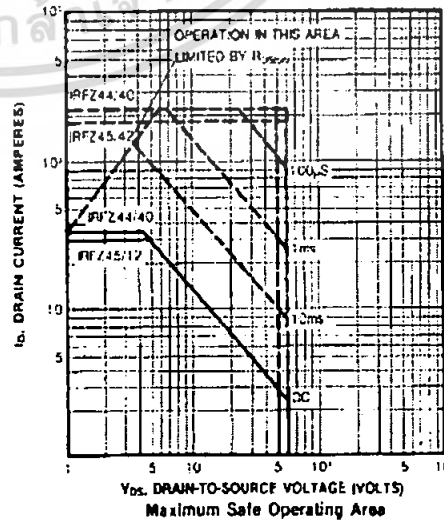
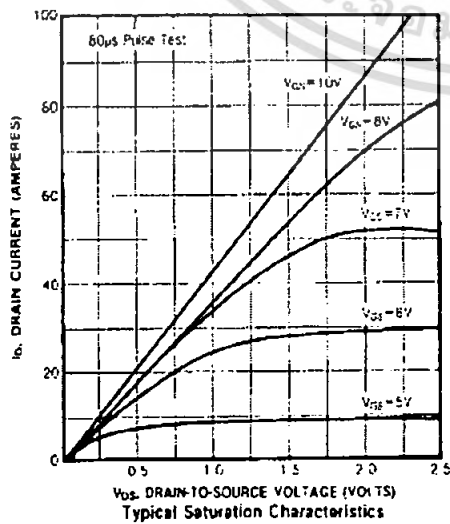
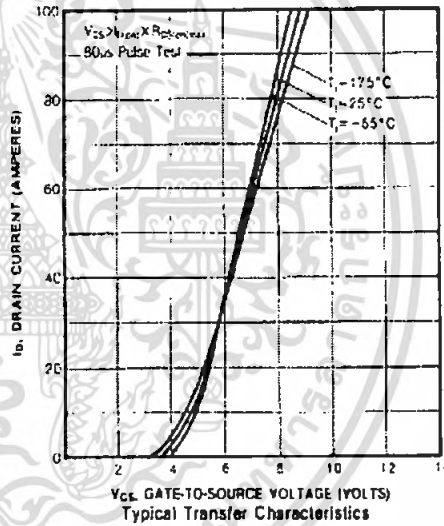
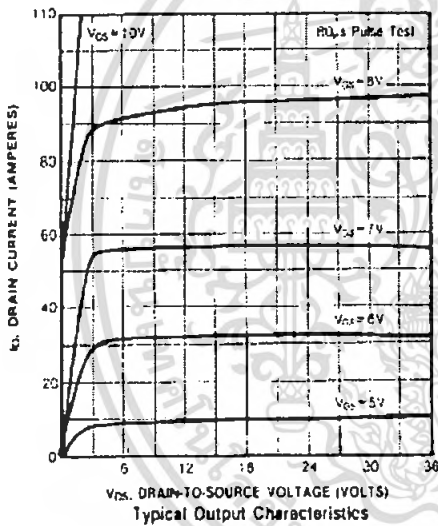
**IRFZ44/45
IRFZ40/42**

**...CHANNEL
POWER MOSFETS**

SOURCE-DRAIN DIODE RATINGS AND CHARACTERISTICS

Symbol	Characteristic	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	IRFZ44:40	---	35	A	Modified MOSFET integral reverse P-N junction rectifier
		IRFZ45:42	---	35	A	
I_{SV}	Pulse Source Current (3)	IRFZ44:40	---	210	A	
		IRFZ45:42	---	190	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	All	---	2.5	V	$T_C = 25^\circ\text{C}$, $I_S = 35\text{A}$, $V_{GS} = 0\text{V}$
t_{rr}	Reverse Recovery Time	---	---	250	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_F = 35\text{A}$, $di/dt = 100\text{A}/\mu\text{S}$

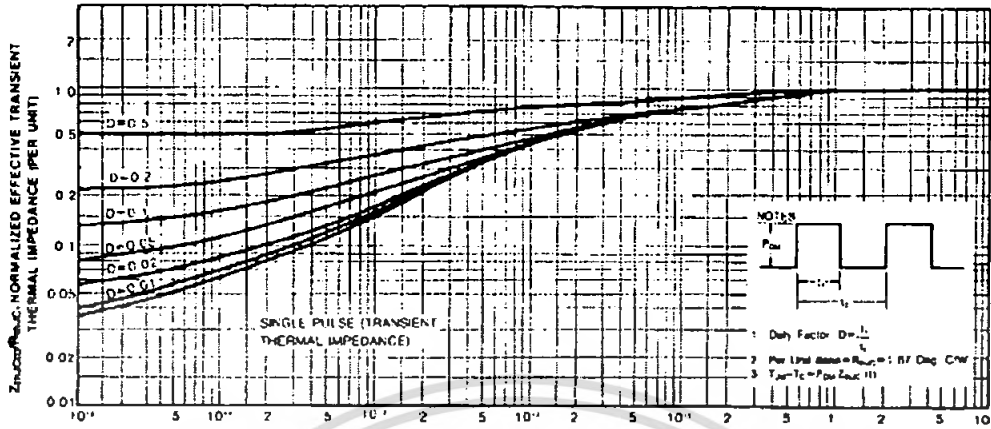
- Notes: (1) $T_J = 25^\circ\text{C}$ to 175°C
 (2) Pulse test Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$
 (3) Repetitive rating Pulse with limited by max junction temperature



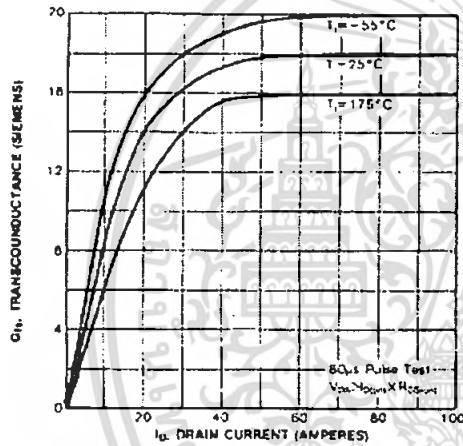
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IRFZ44/45
IRFZ40/42**

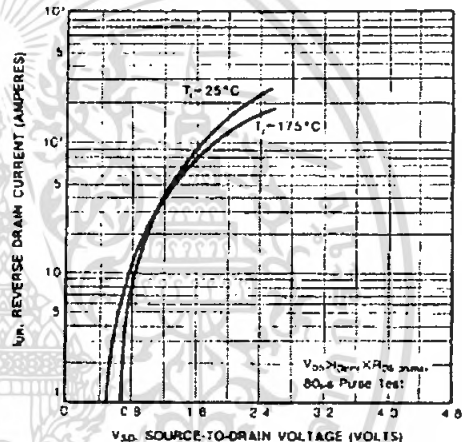
**N-CHANNEL
POWER MOSFETS**



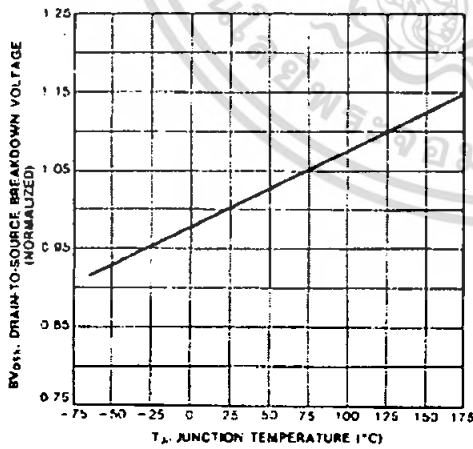
11. SQUARE WAVE PULSE DURATION (SECONDS)
Maximum Effective Transient Thermal Impedance Junction-to-Case Vs. Pulse Duration



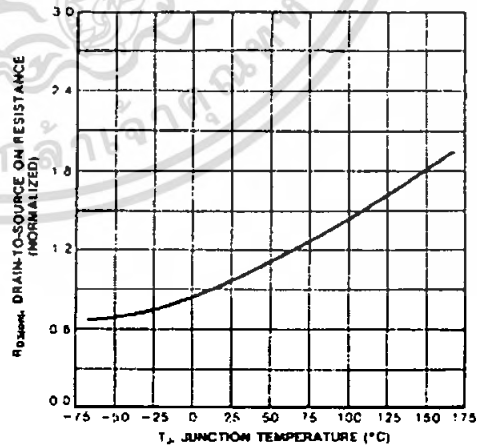
Typical Transconductance Vs. Drain Current



Typical Source-Drain Diode Forward Voltage



Breakdown Voltage Vs. Temperature

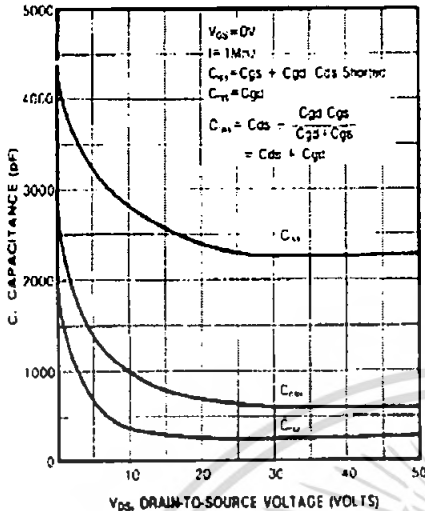


Normalized On-Resistance Vs. Temperature

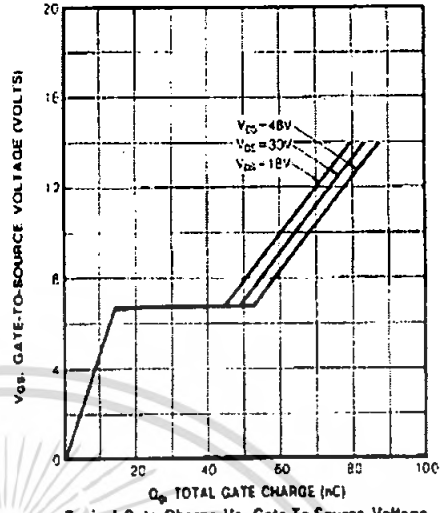
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IRFZ44/45
IRFZ40/42**

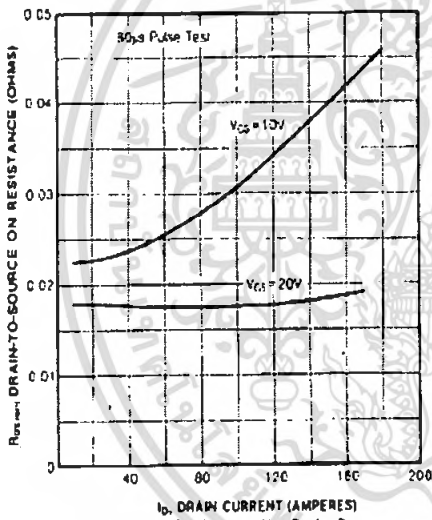
**CHANNEL
POWER MOSFETS**



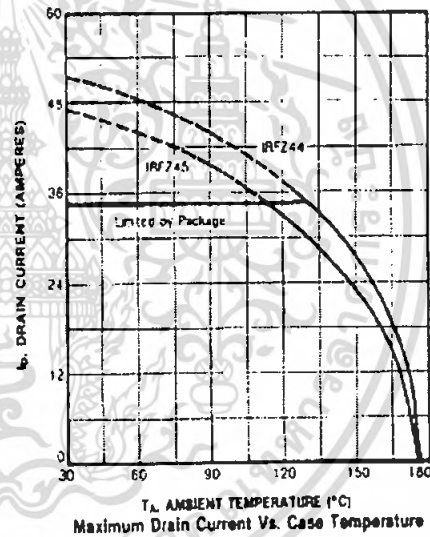
Typical Capacitance Vs. Drain to Source Voltage



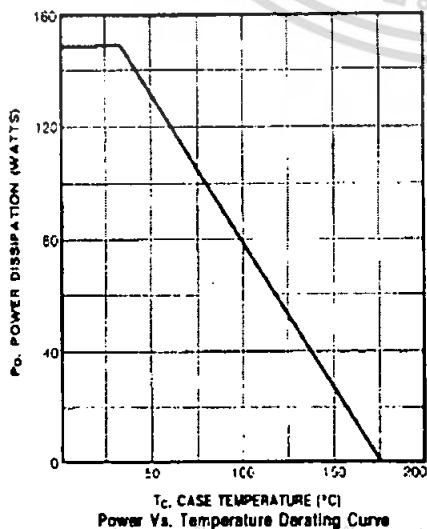
Typical Gate Charge Vs. Gate-To-Source Voltage



Typical On-Resistance Vs. Drain Current



Maximum Drain Current Vs. Case Temperature



Power Vs. Temperature Derating Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA**TLP250****Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)**

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I_F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I_{FPT}	1	A	
	Reverse voltage	V_R	5	V	
	Junction temperature	T_j	125	°C	
Detector	"H" peak output current (P _W ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I_{OPH}	-1.5	A	
	"L" peak output current (P _W ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	I_{OPL}	+1.5	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_O	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_{CC}	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C	
Junction temperature	T_j	125	°C		
Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz		
Operating temperature range	T_{opr}	-20~85	°C		
Storage temperature range	T_{stg}	-55~125	°C		
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)	T_{sol}	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)	BV_S	2500	Vrms		

Note 1: Pulse width P_W ≤ 1μs, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, I_{OPH} ≤ -1.0A (≤ 2.5μs), I_{OPL} ≤ +1.0A (≤ 2.5μs)

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input current, on (Note 7)	$I_{FI(ON)}$	7	6	10	mA
Input voltage, off	$V_{FI(OFF)}$	0	—	0.8	V
Supply voltage	V_{CC}	15	—	30 20	V
Peak output current	I_{OPH}/I_{OPL}	—	—	±0.5	A
Operating temperature	T_{opr}	-20	25	70 85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

TLP250

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V _F	—	I _F = 10 mA, Ta = 25°C	—	1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV _F / ΔTa	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I _R	—	V _R = 5V, Ta = 25°C	—	—	10	μA
Input capacitance		C _T	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I _{OPH}	3	V _{CC} = 30V (*)	I _F = 10 mA V _{ES} = 4V	-0.5	-1.5	—
	"L" level	I _{OPL}	2			I _F = 0 V _{ES} = 2.5V	0.5	2
Output voltage	"H" level	V _{OH}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V _{OL}	5		V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	
Supply current	"H" level	I _{CCH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
	"L" level	I _{CCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11	
				V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
V _{CC} = 30V, I _F = 0mA	—	—	11					
Threshold input current	"Output L→H"	I _{FLH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I _{FHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V _{CC}	—	—	10	—	35	V
Capacitance (input-output)		C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		R _S	—	V _S = 500V, Ta = 25°C R.H.S 50%	1 × 10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω

* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of I_O time ≤ 50μs**TOSHIBA**

TLP250

Switching Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t _{PLH}	ε	I _F = 8mA (Note 7) V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t _{PHL}			—	0.15	0.5	
Output rise time		t _r	—	—	—	—	—	—
Output fall time		t _f	—	—	—	—	—	—
Common mode transient immunity at high level output		C _{MH}	7	V _{CM} = 500V, I _F = 8mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output		C _{ML}	7	V _{CM} = 500V, I _F = 0mA V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

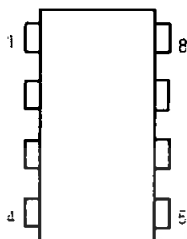
* All typical values are at Ta = 25°C

*Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

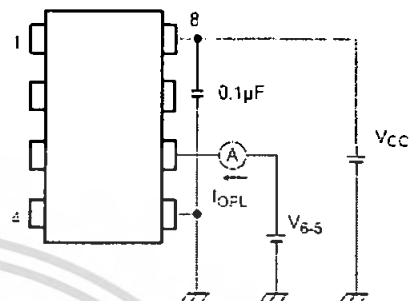
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA**TLP250**

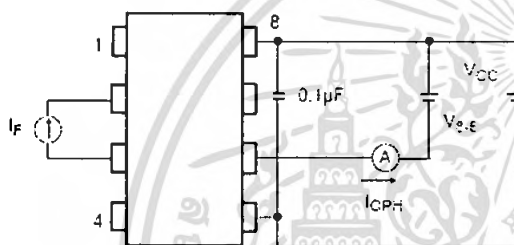
Test Circuit 1 :



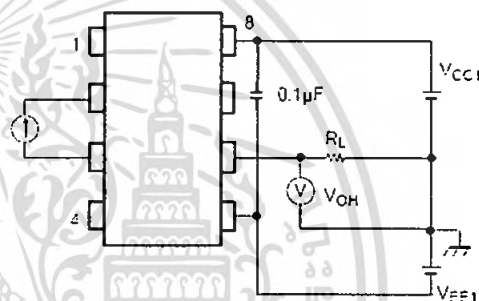
Test Circuit 2 : IOPL



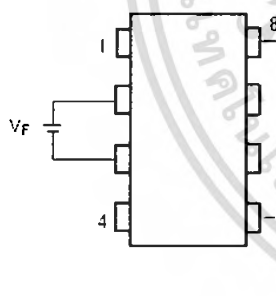
Test Circuit 3 : IOPH



Test Circuit 4 : VOH

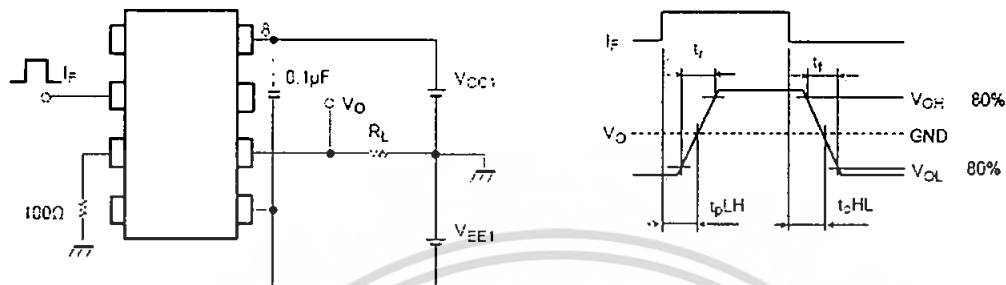


Test Circuit 5 : VOL

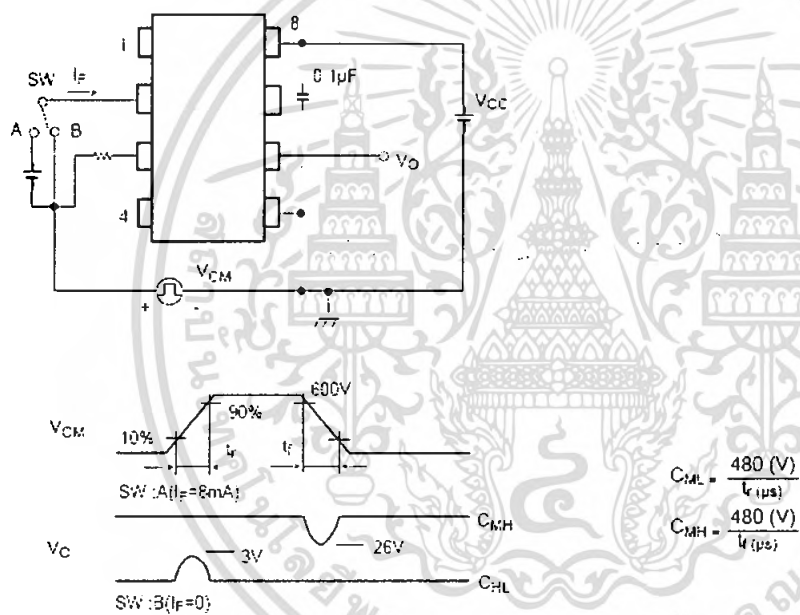


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit 6: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f

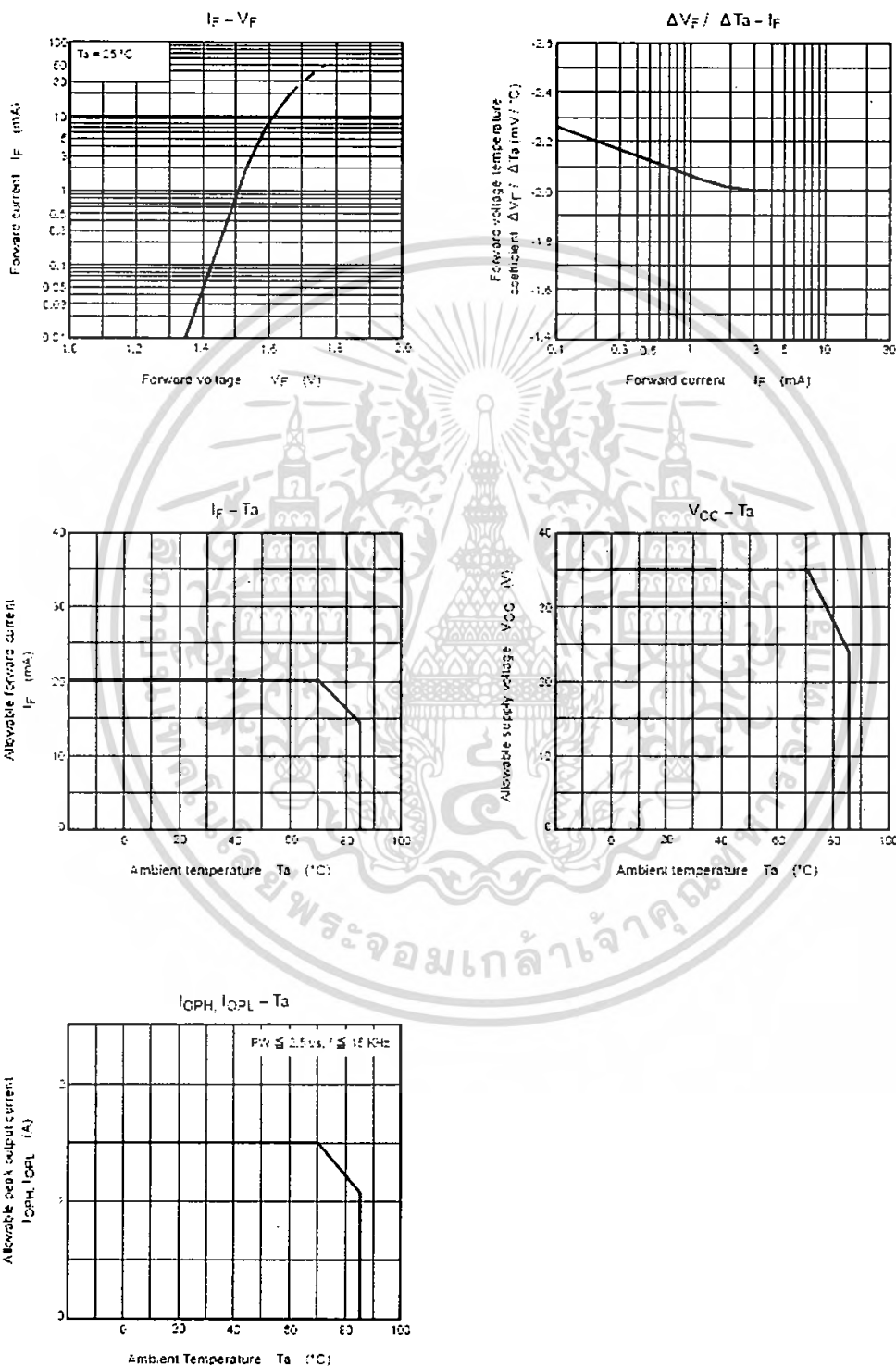


Test Circuit 7: C_{MH} , C_{ML}



$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- The information contained herein is subject to change without notice.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of TOSHIBA or others.
- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- TOSHIBA products should not be embedded to the downstream products which are prohibited to be produced and sold, under any law and regulations.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.

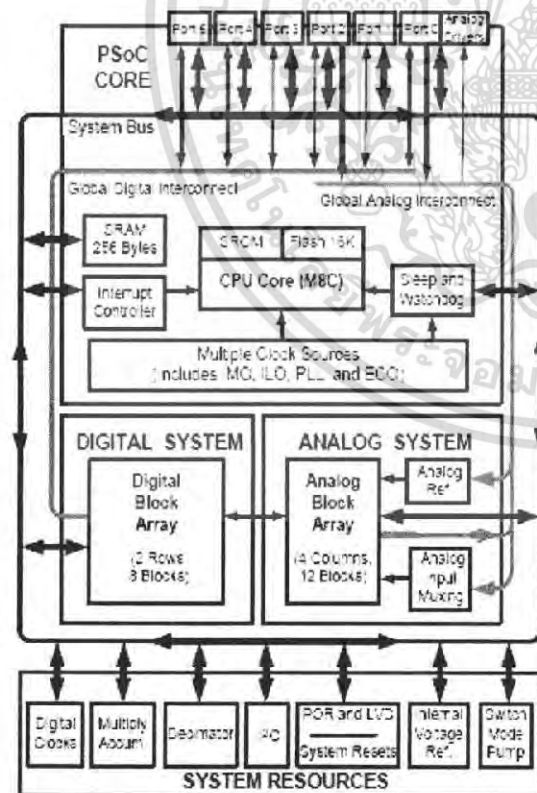
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CY8C27143, CY8C27243, CY8C27443, CY8C27543, and CY8C27643



Features

- Powerful Harvard Architecture Processor**
 - M8C Processor Speeds to 24 MHz
 - 8x8 Multiply, 32-Bit Accumulate
 - Low Power at High Speed
 - 0.0 to 5.25 V Operating Voltage
 - Operating Voltages Down to 1.0V Using On-Chip Switch Mode Pump (SMP)
 - Industrial Temperature Range: -40°C to +85°C
- Advanced Peripherals (PSoC Blocks)**
 - 12 Rail-to-Rail Analog PSoC Blocks Provide:
 - Up to 14-Bit ADCs
 - Up to 9-Bit DACs
 - Programmable Gain Amplifiers
 - Programmable Filters and Comparators
 - 8 Digital PSoC Blocks Provide:
 - 8- to 22-Bit Timers, Counters, and PWMs
 - CRC and PRS Modules
 - Up to 2 Full-Duplex UARTs
 - Multiple SPI™ Masters or Slaves
 - Connectable to all GPIO Pins
 - Complex Peripherals by Combining Blocks
- Precision, Programmable Clocking**
 - Internal 2.875 24.48 MHz Oscillator
 - 24.48 MHz with Optional 32 kHz Crystal
 - Optional External Oscillator, up to 24 MHz
 - Internal Oscillator for Watchdog and Sleep
- Flexible On-Chip Memory**
 - 16K Bytes Flash Program Storage (ECC, DCC, Erase/Write Cycles)
 - 256 Bytes SRAM Data Storage
 - In-System Serial Programming (ISSP™)
 - Partial Flash Updates
 - Flexible Protection Modes
 - EEPROM Emulation in Flash
- Programmable Pin Configurations**
 - 25 mA Sink on all GPIO
 - Pull-up, Pull-down, High-Z, Strong, or Open Drain Drive Modes on all GPIO
 - Up to 12 Analog Inputs on GPIO
 - Four 50 mA Analog Outputs on GPIO
 - Configurable Interrupt on all GPIO
- Additional System Resources**
 - PCM Slave, Master, and Multi-Master to 400 kHz
 - Watchdog and Sleep Timers
 - User-Configurable Low Voltage Detection
 - Integrated Supervisory Circuit
 - On-Chip Precision Voltage Reference
- Complete Development Tools**
 - Free Development Software (PSoC™ Designer)
 - Full-Featured, In-Circuit Emulator and Programmer
 - Full-Speed Emulation
 - Complex Breakpoint Structure
 - 128K Bytes Trace Memory



PSoC™ Functional Overview

The PSoC™ family consists of many *Mixed Signal Array with On-Chip Controller* devices. These devices are designed to replace multiple traditional MCU-based system components with one, low cost single-chip programmable device. PSoC devices include configurable blocks of analog and digital logic, as well as programmable interconnects. This architecture allows the user to create customized peripheral configurations that match the requirements of each individual application. Additionally, a fast CPU, Flash program memory, SRAM data memory, and configurable I/O are included in a range of convenient pinouts and packages.

The PSoC architecture, as illustrated on the left, is comprised of four main areas: PSoC Core, Digital System, Analog System, and System Resources. Configurable global busing allows all the device resources to be combined into a complete custom system. The PSoC CY8C27x43 family can have up to five I/O ports that connect to the global digital and analog interconnects, providing access to 8 digital blocks and 12 analog blocks.

The PSoC Core

The PSoC Core is a powerful engine that supports a rich feature set. The core includes a CPU, memory, clocks, and configurable GPIO (General Purpose I/O).

The M8C CPU core is a powerful processor with speeds up to 24 MHz, providing a four MIPS 8-bit Harvard architecture micro-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

processor. The CPU utilizes an interrupt controller with 17 vectors, to simplify programming of real time embedded events. Program execution is timed and protected using the included Sleep and Watch Dog Timers (WDT).

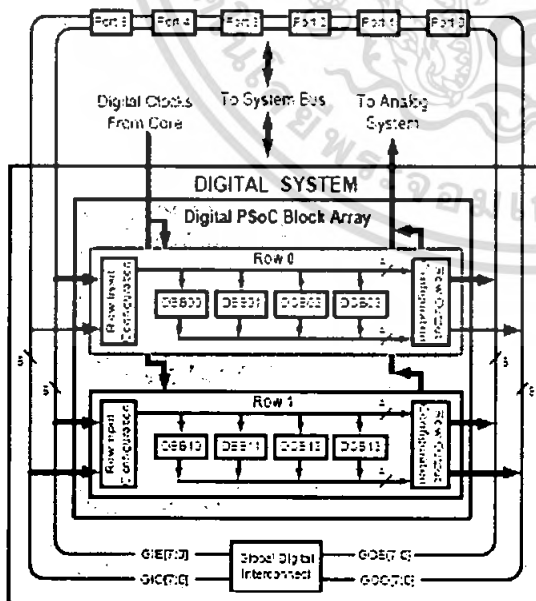
Memory encompasses 16 KB of Flash for program storage, 256 bytes of SRAM for data storage, and up to 2 KB of EEPROM emulated using the Flash. Program Flash utilizes four protection levels on blocks of 64 bytes, allowing customized software IP protection.

The PSoC device incorporates flexible internal clock generators, including a 24 MHz IMO (internal main oscillator) accurate to 2.5% over temperature and voltage. The 24 MHz IMO can also be doubled to 48 MHz for use by the digital system. A low power 32 kHz ILO (internal low speed oscillator) is provided for the Sleep timer and WDT. If crystal accuracy is desired, the ECO (32.768 kHz external crystal oscillator) is available for use as a Real Time Clock (RTC) and can optionally generate a crystal-accurate 24 MHz system clock using a PLL. The clocks, together with programmable clock dividers (as a System Resource), provide the flexibility to integrate almost any timing requirement into the PSoC device.

PSoC GPIOs provide connection to the CPU, digital and analog resources of the device. Each pin's drive mode may be selected from eight options, allowing great flexibility in external interfacing. Every pin also has the capability to generate a system interrupt on high level, low level, and change from last read.

The Digital System

The Digital System is composed of 8 digital PSoC blocks. Each block is an 8-bit resource that can be used alone or combined with other blocks to form 8, 16, 24, and 32-bit peripherals, which are called user module references.



Digital System Block Diagram

Digital peripheral configurations include those listed below.

- PWMs (6 to 32 bit)
- PWMs with Dead band (8 to 32 bit)
- Counters (8 to 32 bit)
- Timers (6 to 32 bit)
- UART 3 bit with selectable parity (up to 2)
- SPI master and slave (up to 2)
- I2C slave and master (1 available as a System Resource)
- Cyclical Redundancy Checker/Generator (8 to 32 bit)
- IrDA (up to 2)
- Pseudo-Random Sequence Generators (8 to 32 bit)

The digital blocks can be connected to any GPIO through a series of global buses that can route any signal to any pin. The buses also allow for signal multiplexing and for performing logic operations. This configurability frees your designs from the constraints of a fixed peripheral controller.

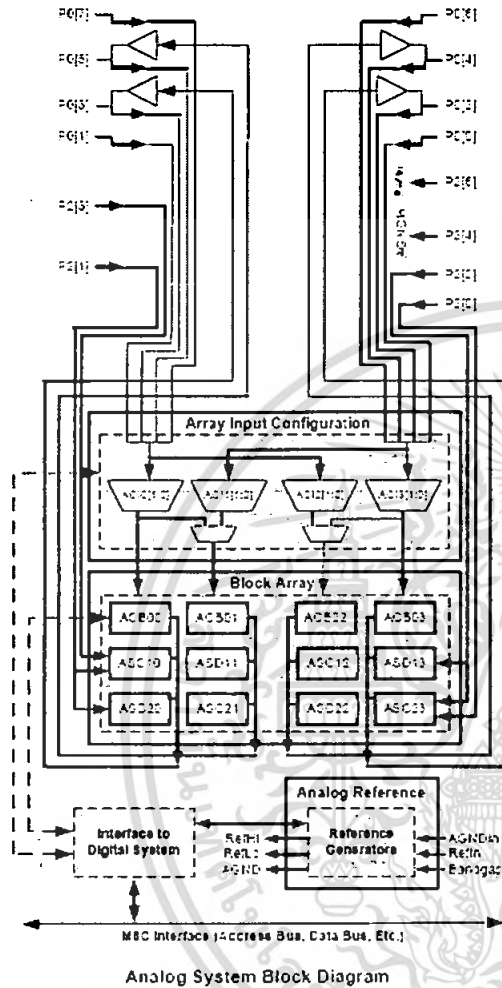
Digital blocks are provided in rows of four, where the number of blocks varies by PSoC device family. This allows you the optimum choice of system resources for your application. Family resources are shown in the table titled "PSoC Device Characteristics" on page 3.

The Analog System

The Analog System is composed of 12 configurable blocks, each composed of an opamp circuit allowing the creation of complex analog signal flows. Analog peripherals are very flexible and can be customized to support specific application requirements. Some of the more common PSoC analog functions (most available as user modules) are listed below.

- Analog-to-digital converters (up to 4, with 6- to 14-bit resolution, selectable as Incremental, Delta Sigma, and SAR)
- Filters (2, 4, 6, and 8 pole band-pass, low-pass, and notch)
- Amplifiers (up to 4, with selectable gain to 48x)
- Instrumentation amplifiers (up to 2, with selectable gain to 93x)
- Comparators (up to 4, with 16 selectable thresholds)
- DACs (up to 4, with 6- to 9-bit resolution)
- Multiplying DACs (up to 4, with 6- to 9-bit resolution)
- High current output drivers (four with 30 mA drive as a Core Resource)
- 1.3V reference (as a System Resource)
- DTMF dialer
- Modulators
- Correlators
- Peak detectors
- Many other topologies possible

Analog blocks are provided in columns of three, which includes one CT (Continuous Time) and two SC (Switched Capacitor) blocks, as shown in the figure below.



Additional System Resources

System Resources, some of which have been previously listed, provide additional capability useful to complete systems. Additional resources include a multiplier, decimator, switch mode pump, low voltage detection, and power on reset. Brief statements describing the merits of each system resource are presented below.

- Digital clock dividers provide three customizable clock frequencies for use in applications. The clocks can be routed to both the digital and analog systems. Additional clocks can be generated using digital PSoC blocks as clock dividers.
- A multiply accumulate (MAC) provides a fast 8-bit multiplier with 32-bit accumulate, to assist in both general math as well as digital filters.
- The decimator provides a custom hardware filter for digital signal processing applications including the creation of Delta Sigma ADCs.
- The I2C module provides 100 and 400 kHz communication over two wires. Slave, master, and multi-master modes are all supported.
- Low Voltage Detection (LVD) interrupts can signal the application of falling voltage levels, while the advanced POR (Power On Reset) circuit eliminates the need for a system supervisor.
- An internal 1.5V reference provides an absolute reference for the analog system, including ADCs and DACs.
- An integrated switch mode pump (SMP) generates normal operating voltages from a single 1.2V battery cell, providing a low cost boost converter.

PSoC Device Characteristics

Depending on your PSoC device characteristics, the digital and analog systems can have 16, 6, or 4 digital blocks and 12, 6, or 3 analog blocks. The following table lists the resources available for specific PSoC device groups. The PSoC device covered by this data sheet is shown in the second row of the table.

PSoC Device Characteristics

PSoC Part Number	Digital IO	Digital Rows	Digital Blocks	Analog Inputs	Analog Outputs	Analog Columns	Analog Blocks
CY8C27x65	up to 64	4	16	12	4	4	12
CY8C27x43	up to 44	2	8	12	4	4	12
CY8C24x25	up to 24	1	4	12	2	2	6
CY8C24x25A	up to 24	1	4	12	2	2	6
CY8C22x15	up to 16	1	4	5	1	1	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Getting Started

The quickest path to understanding the PSoC silicon is by reading this data sheet and using the PSoC Designer Integrated Development Environment (IDE). This data sheet is an overview of the PSoC integrated circuit and presents specific pin, register, and electrical specifications. For in-depth information, along with detailed programming information, reference the *PSoC™ Mixed Signal Array Technical Reference Manual*.

For up-to-date Ordering, Packaging, and Electrical Specification information, reference the latest PSoC device data sheets on the web at <http://www.cypress.com/psoc>.

Development Kits

Development Kits are available from the following distributors: Digi-Key, Avnet, Arrow, and Future. The Cypress Online Store at <http://www.onfulfillment.com/cyressstore/> contains development kits, C compilers, and all accessories for PSoC development. Click on *PSoC (Programmable System-on-Chip)* to view a current list of available items.

Tele-Training

Free PSoC "Tele-training" is available for beginners and taught by a live marketing or application engineer over the phone. Five training classes are available to accelerate the learning curve including introduction, designing, debugging, advanced design, advanced analog, as well as application-specific classes covering topics like PSoC and the LIN bus. For days and times of the tele-training, see <http://www.cypress.com/support/training.cfm>.

Consultants

Certified PSoC Consultants offer everything from technical assistance to completed PSoC designs. To contact or become a PSoC Consultant, go to the following Cypress support web site: <http://www.cypress.com/support/cypros.cfm>.

Technical Support

PSoC application engineers take pride in fast and accurate response. They can be reached with a 4-hour guaranteed response at <http://www.cypress.com/support/login.cfm>.

Application Notes

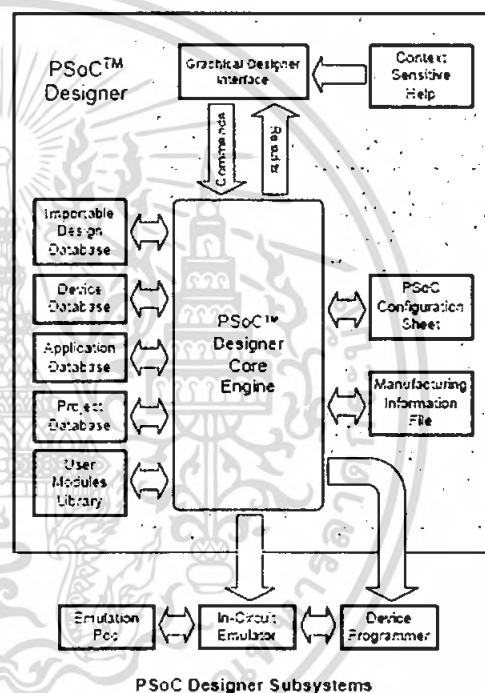
A long list of application notes will assist you in every aspect of your design effort. To locate the PSoC application notes, go to <http://www.cypress.com/design/results.cfm>.

Development Tools

The Cypress MicroSystems PSoC Designer is a Microsoft® Windows-based, integrated development environment for the Programmable System-on-Chip (PSoC) devices. The PSoC Designer IDE and application runs on Windows NT 4.0, Windows 2000, Windows Millennium (Me), or Windows XP. (Reference the PSoC Designer Functional Flow diagram below.)

PSoC Designer helps the customer to select an operating configuration for the PSoC, write application code that uses the PSoC, and debug the application. This system provides design database management by project, an integrated debugger with In-Circuit Emulator, in-system programming support, and the CYASM macro assembler for the CPUs.

PSoC Designer also supports a high-level C language compiler developed specifically for the devices in the family.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PSoC Designer Software Subsystems

Device Editor

The Device Editor subsystem allows the user to select different onboard analog and digital components called user modules using the PSoC blocks. Examples of user modules are ADCs, DACs, Amplifiers, and Filters.

The device editor also supports easy development of multiple configurations and dynamic reconfiguration. Dynamic configuration allows for changing configurations at run time.

PSoC Designer sets up power-on initialization tables for selected PSoC block configurations and creates source code for an application framework. The framework contains software to operate the selected components and, if the project uses more than one operating configuration, contains routines to switch between different sets of PSoC block configurations at run time. PSoC Designer can print out a configuration sheet for a given project configuration for use during application programming in conjunction with the Device Data Sheet. Once the framework is generated, the user can add application-specific code to flesh out the framework. It's also possible to change the selected components and regenerate the framework.

Design Browser

The Design Browser allows users to select and import preconfigured designs into the user's project. Users can easily browse a catalog of preconfigured designs to facilitate time-to-design. Examples provided in the tools include a 300-baud modem, LIN Bus master and slave, fan controller, and magnetic card reader.

Application Editor

In the Application Editor you can edit your C language and Assembly language source code. You can also assemble, compile, link, and build.

Assembler. The macro assembler allows the assembly code to be merged seamlessly with C code. The link libraries automatically use absolute addressing or can be compiled in relative mode, and linked with other software modules to get absolute addressing.

C Language Compiler. A C language compiler is available that supports Cypress MicroSystems' PSoC family devices. Even if you have never worked in the C language before, the product quickly allows you to create complete C programs for the PSoC family devices.

The embedded, optimizing C compiler provides all the features of C tailored to the PSoC architecture. It comes complete with embedded libraries providing port and bus operations, standard keypad and display support, and extended math functionality.

Debugger

The PSoC Designer Debugger subsystem provides hardware in-circuit emulation, allowing the designer to test the program in a physical system while providing an internal view of the PSoC device. Debugger commands allow the designer to read and program and read and write data memory, read and write IO registers, read and write CPU registers, set and clear breakpoints, and provide program run, halt, and step control. The debugger also allows the designer to create a trace buffer of registers and memory locations of interest.

Online Help System

The online help system displays online, context-sensitive help for the user. Designed for procedural and quick reference, each functional subsystem has its own context-sensitive help. This system also provides tutorials and links to FAQs and an Online Support Forum to aid the designer in getting started.

Hardware Tools

In-Circuit Emulator

A low cost, high functionality ICE (In-Circuit Emulator) is available for development support. This hardware has the capability to program single devices.

The emulator consists of a base unit that connects to the PC by way of the parallel or USB port. The base unit is universal and will operate with all PSoC devices. Emulation pods for each device family are available separately. The emulation pod takes the place of the PSoC device in the target board and performs full speed (24 MHz) operation.

Designing with User Modules

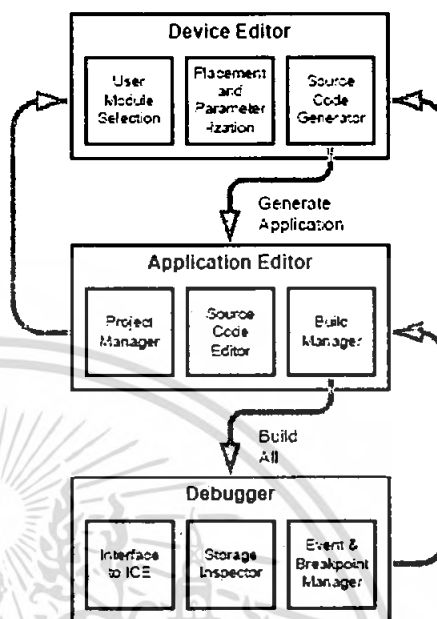
The development process for the PSoC device differs from that of a traditional fixed function microprocessor. The configurable analog and digital hardware blocks give the PSoC architecture a unique flexibility that pays dividends in managing specification change during development and by lowering inventory costs. These configurable resources, called PSoC Blocks, have the ability to implement a wide variety of user-selectable functions. Each block has several registers that determine its function and connectivity to other blocks, multiplexers, buses, and to the IO pins. Iterative development cycles permit you to adapt the hardware as well as the software. This substantially lowers the risk that you will have to select a different part to meet the final design requirements.

To speed the development process, the PSoC Designer Integrated Development Environment (IDE) provides a library of pre-built, pre-tested hardware peripheral functions, called "User Modules." User modules make selecting and implementing peripheral devices simple, and come in analog, digital, and mixed signal varieties. The standard User Module library contains over 50 common peripherals such as ADCs, DACs, Timers, Counters, UARTs, and other not-so common peripherals such as DTMF Generators and Bi-Quad analog filter sections.

Each user module establishes the basic register settings that implement the selected function. It also provides parameters that allow you to tailor its precise configuration to your particular application. For example, a Pulse Width Modulator User Module configures one or more digital PSoC blocks, one for each 8 bits of resolution. The user module parameters permit you to establish the pulse width and duty cycle. User modules also provide tested software to cut your development time. The user module application programming interface (API) provides high-level functions to control and respond to hardware events at run-time. The API also provides optional interrupt service routines that you can adapt as needed.

The API functions are documented in user module data sheets that are viewed directly in the PSoC Designer IDE. These data sheets explain the internal operation of the user module and provide performance specifications. Each data sheet describes the use of each user module parameter and documents the setting of each register controlled by the user module.

The development process starts when you open a new project and bring up the Device Editor, a graphical user interface (GUI) for configuring the hardware. You pick the user modules you need for your project and map them onto the PSoC blocks with point-and-click simplicity. Next, you build signal chains by interconnecting user modules to each other and the IO pins. At this stage, you also configure the clock source connections and enter parameter values directly or by selecting values from drop-down menus. When you are ready to test the hardware configuration or move on to developing code for the project, you perform the "Generate Application" step. This causes PSoC Designer to generate source code that automatically configures the device to your specification and provides the high-level user module API functions.



User Module and Source Code Development Flows

The next step is to write your main program, and any sub-routines using PSoC Designer's Application Editor subsystem. The Application Editor includes a Project Manager that allows you to open the project source code files (including all generated code files) from a hierarchical view. The source code editor provides syntax coloring and advanced edit features for both C and assembly language. File search capabilities include simple string searches and recursive "grep-style" patterns. A single mouse click invokes the Build Manager. It employs a professional-strength "makefile" system to automatically analyze all file dependencies and run the compiler and assembler as necessary. Project-level options control optimization strategies used by the compiler and linker. Syntax errors are displayed in a console window. Double clicking the error message takes you directly to the offending line of source code. When all is correct, the linker builds a HEX file image suitable for programming.

The last step in the development process takes place inside the PSoC Designer's Debugger subsystem. The Debugger downloads the HEX image to the In-Circuit Emulator (ICE) where it runs at full speed. Debugger capabilities rival those of systems costing many times more. In addition to traditional single-step, run-to-breakpoint and watch-variable features, the Debugger provides a large trace buffer and allows you define complex breakpoint events that include monitoring address and data bus values, memory locations and external signals.